

特集「初期太陽系の物質科学」

SIMSで測るコンドロールの年代

木多紀子¹

1. 隕石年代学の最前線

1.1 最初の1千万年

惑星形成論で有名なWetherillは、今から30年前に何十個ものコンドライト隕石のRb-Sr分析から、どんな隕石も約46億年前に作られ、それが太陽系の年齢に相当することをつきとめた[1]。分析機器の進歩とともに様々な隕石に対してU-Th-Pb年代、Sm-Nd年代、K-Ar年代などが測定され、隕石の種類や岩石学的特徴と年代の関係が調べられた。年代測定法の中でも変成作用に影響されにくく測定精度も高いU-Pb年代の結果(図1)から、様々な隕石やその中の構成物質の形成年代が約1千万年の時間幅に含まれることがわかった[2]。その中には原始太陽系星雲での加熱溶融を経験したと推定されるCAI(Ca, Alに富むインクルージョン)の 45.66 ± 0.02 億年という隕石最古の年代、大き

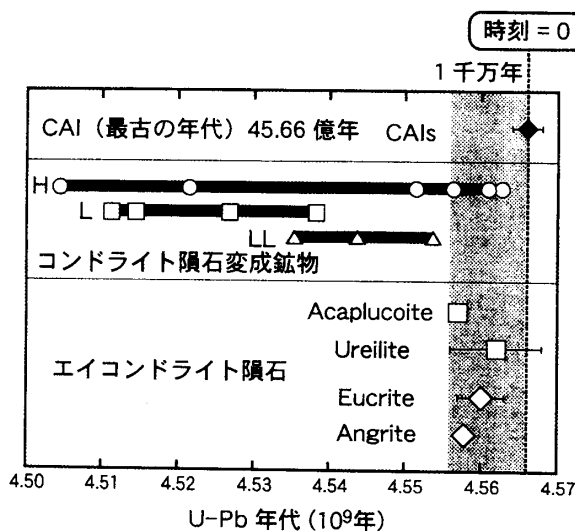


図1 隕石の高精度U-Pb年代。

¹ 地質調査所地殻化学部

な小惑星の内部が分化してできたエイコンドライトの結晶年代などが含まれる。また、コンドライト隕石が母天体で熱変成を受けた際に生じたとされる鉱物から得られた年代は、最も古いものでは45.63億年となり、CAIの生成から数百万年以内にはコンドライト母天体が小惑星程度の大きさに成長していたことを示している。このように、原始太陽系星雲の化学進化や微惑星の形成・成長や内部進化など、惑星形成の主要な過程は太陽系46億年の最初の1千万年に集中している。隕石構成物質の年代測定から太陽系形成過程に時間スケールを与えるためには、この最初の1千万年を精度良く(百万年以下の測定精度)測定する必要がある。

従来の年代測定では、⁸⁷Rbなど半減期が数億年以上の長寿命放射性核種を用いているので、半減期の1%に満たない百万年以下の精度で年代を決定することは、特別な場合を除き極めて難しい。そこで、最近では太陽系の誕生時に存在した半減期数千万年以下の短寿命放射性核種(²⁶Al, ⁵³Mnなど、現在は壊変しつくして天然には存在しないので「消滅核種」と呼ばれている)を利用した年代測定が注目されてきた。ここでは、筆者らが行っているコンドロールの²⁶Al年代測定について紹介する。

2.1 CAIとAlに富むコンドロール

²⁶Alは半減期73万年で²⁶Mgに壊変する。70年代に炭素質コンドライト中のCAIから娘核種²⁶Mg同位体の過剰が見つかり、CAI形成時に²⁶Alが存在したことがわかった[3]。CAI中の²⁶Alの存在度は安定同位体²⁷Alに

対して $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 5 \times 10^5$ と低いが、CAIはAlに富みMgに乏しいため大きな ^{26}Mg 同位体の過剰を示す。一方、コンドールは一般にMgに富みAlに乏しいため、Alに富む斜長石を含むような特殊なコンドールを除き ^{26}Mg 同位体の過剰はほとんど見つかっていなかった。Alに富むコンドールはコンドール全体の1%以下の割合でしか存在していないが、Russellらにより $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比が $(1\sim 8) \times 10^6$ と、CAIに比べ1~2桁低い値が得られている[4]。Al同位体比が太陽系誕生時に均質であったとすると、 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比は73万年ごとに半分になっていくので、CAIとコンドールの $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比の違いは形成時刻の違いに相当する。したがって、コンドールの形成はCAIの形成から2百万年後にはじまり、5百万年後ごろまで続いたということになる。この結果はさまざまな波紋をなげかけた。

- (1) CAIもコンドールも同じ隕石中に含まれているが、CAIは2百万年後のコンドール形成時にどのように加熱を免れたのか？
- (2) CAIもコンドールも原始太陽系星雲中で作られたとすると、星雲の寿命は5百万年以上となり、その間ずっと固体物質を高温に加熱する過程が続いたのか。
- (3) CAI形成から5百万年後にはすでにコンドライト母天体はできており、エイコンドライト母天体では大規模な地質学的な分化が始まっていた。年代の結果は、コンドールの星雲中での形成ではなく、母天体起源説(火山活動や高速の衝突現象)を支持するのではないか。

しかし、これまで測られたコンドールは一般的なMgやFeに富むコンドールではなく、Alに富む特殊なコンドールであった。また比較的若い年代を示すコンドールを含んでいるコンドライト隕石には、わずかに母天体での熱変成の証拠が見られ、Al-Mg年代系が乱され年代が若返っている可能性も否定できない。そこで、筆者らは母天体で250°C以上に加熱されなかったことがわかっているSemarkona隕石(LL3.0)中の

MgやFeに富む普通のコンドールのAl-Mg年代測定を行い、(a)既存のデータには熱変成の影響がなかったのかどうか、(b)CAIと同時刻にできたコンドールは本当になかったのか、を調べることにした。

2. コンドールの年代測定

2.1 地質調査所SIMS

普通のコンドールの多くは、MgやFeの珪酸塩であるオリビンや輝石の斑晶の間をAlに富むガラスが占めるような斑状組織を示す。コンドール全体でAl/Mg比が0.1くらいしかないため、ガラス中のAl/Mg比は通常10以下である。 ^{26}Al 年代を求めるには ^{26}Al から壊変した ^{26}Mg 同位体の過剰を検出しなくてはならないので、Al/Mg比が高くないと ^{26}Mg 同位体の過剰が小さすぎて年代測定はできない。しかし、Semarkona薄片中のコンドールをひとつひとつ丹念に電子顕微鏡で調べたところ、ガラスの中に数ミクロンの輝石の微結晶が晶出している場合があり、その近傍のガラスはMgが抜けてAl/Mg比が30~200にもなる。コンドールによ



図2 Semarkona隕石コンドールCH4のガラス部分の電子顕微鏡写真[5]約0.8mm径のコンドールの一部。図中の○はオリビン、Pは輝石、暗い部分がAlに富むガラス。ガラス中の明るい針状の結晶は輝石の微結晶。白い円形の印は実際のSIMS測定の一次イオン径の大きさと場所を示している。

では、ガラスではなく輝石と斜長石の微小な結晶ができており、斜長石中のAl/Mg比が約50程度になる。図2に筆者らが分析したコンドルール中のガラスを例に示すが、このようなAl/Mg比の高い部分を測定するには、二次イオン質量分析計(SIMS)のように薄片試料表面をマイクロスケールで局所分析する必要がある。これまでのCAIやAlに富むコンドルールのSIMS分析においては、試料表面に照射する一次イオンビーム径を小さくしすぎると同位体比分析に必要な精度が十分得られなかった。SIMS同位体分析では目的の原子イオンに多くの分子イオンが同重体として妨害するので、スリットを狭くして質量分解能を上げ分離しなければならず、結果として感度が1桁から2桁も犠牲になってしまうためであった。

地質調査所のSIMS (Cameca IMS-1270) は同位体地球化学用に開発された機種で、汎用型のSIMSに比べ二次イオン分析部に大きなマグネットを用い、軌道半径を大きくとってあるため、質量分解能を5000(=イオンの質量の0.02%を分離できる)まであげても、二次イオンの感度が低下しない設計になっている。このような高感度の利点を生かして、我々は分析用電子顕微鏡(EPMA)のプロブ径に迫る3~5ミクロンの一次イオン径で、普通のコンドルール中のガラスのMg同位体比分析に成功した。このSIMSは単に試料から出される二次イオンを検出器で計数するだけでなく、試料表面から出されるイオンのイメージを1ミクロン程度の解像度で観察できるイオン顕微鏡の機能を持っている。このため、測定している領域にMgを含む輝石の小さな粒子が混じっていないかどうか、Mgのイオンイメージを使って確認しながら分析もできる。

2.2 コンドルールの ^{26}Al 年代

筆者らはSemarkona隕石からMgやFeに富む5つのコンドルールを測定した[5]。図3のアイソクロン図の一例では、 ^{26}Mg 同位体の過剰がAl/Mg比に相関しており、確かに ^{26}Al がコンドルール形成時に存在したことが確

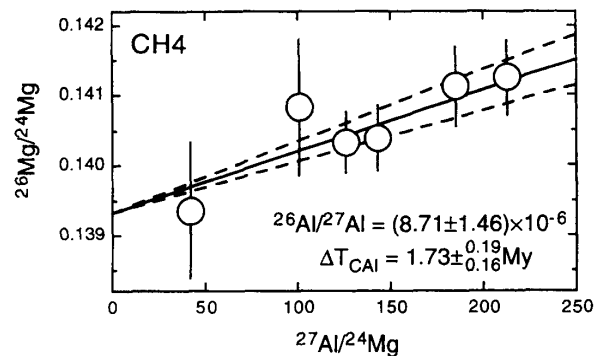


図3 コンドルールCH4の ^{26}Al - ^{26}Mg アイソクロン。

認された。この直線の傾きがコンドルール形成時の $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比に相当する。5つのコンドルールはそれぞれ少しずつ異なった組織、化学組成、鉱物組成を示しているが、得られた $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比は $(4\text{--}9) \times 10^{-6}$ という狭い範囲内におさまる。測定結果を $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比に対応するCAIからの年代差とともに図4にまとめた。Semarkona隕石のコンドルールの年代はCAI形成から約2百万年後で、コンドルールの間での年代の差は百万年以下であることがわかった。この結果はSemarkona隕石で既に測定されていた斜長石を含む完晶質のコンドルールの結果と良く一致するほか、Alに富むコンドルールのうちで、高めの $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比を示すコンドルールとも一

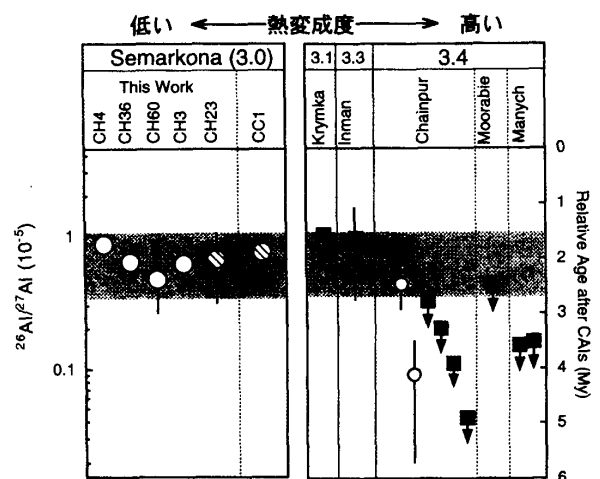


図4 コンドルールの ^{26}Al 年代

Semarkonaについてはコンドルール名を他の隕石については隕石名のみ示す。隕石名についている数字(3.0~3.4)は非平衡コンドライトの変成度の指標で、Semarkonaは最も低い。シンボルはコンドルールの種類を示す。白抜き円はMg, Feに富む斑状コンドルール、斜線円はMg, Feに富む完晶質のコンドルール、黒四角はAlに富むコンドルール。

SIMSで測るコンドルールの年代／木多

致する。しかし、主にChainpur隕石から測定されたAlに富むコンドルールは系統的に $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比が低い値を示すものが多い。

Chainpur隕石はSemarkona隕石とともに非平衡コンドライトと呼ばれ、様々な環境で作られたコンドルールやメタル粒子、それを埋める細粒のマトリックス物質などが互いに非平衡なまま存在している。天体形成時の衝突によるエネルギーや放射性核種の崩壊熱で母天体内部の温度が上昇すると、鉱物間で元素が平衡に近づこうと再分配される。このような母天体中の熱変成作用があれば、コンドルールの中のMg同位体は再分配され ^{26}Mg の過剰は消されてしまう。Chainpur隕石はSemarkona隕石に比べほんの僅か熱変成を受けているので、コンドルールの ^{26}Al - ^{26}Mg 系が乱されて年代が若返った可能性が高い。もし、そうだとすると、コンドルールの本来の年代はSemarkona隕石のように母天体上での変成をほとんど受けなかった隕石中に保存され、それはCAIから約2億年後の百万年より短い期間に集中していたと考えられる。Alに富むコンドルールの中にも $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比が $\sim 7 \times 10^{-6}$ となるものがあるので、コンドルールの化学組成に関係なくどんなコンドルールもこの時期につくられたと考えるのが妥当であろう。さらに、多くの分析結果を積み重ねれば、数十万年以下の時間スケールでコンドルールの鉱物・化学・同位体組成と年代の間に関係があるのかも、調べられると期待している。

3. 原始太陽系星雲の進化

Semarkona隕石のコンドルール年代測定の結果から、コンドルールは一般にCAIの形成から約2億年後につくられたことが、確実にになった。この年代は母天体中の変成鉱物の生成時期やエイコンドライト隕石母天体の分化が始まった時期(CAIから3~5億年)より古く、コンドルールが原始太陽系星雲で作られたことを支持する結果となった。CAIとコンドルールは、推定さ

れている形成時の最高到達温度や冷却時間が違うものの、どちらも固体粒子が短時間高温に加熱されてきたという点では共通している。両者を形成した高温の過程に関して、筆者らの研究から得られた約2億年の差は、次の二通りに解釈できる。

- (1) 太陽系星雲で固体物質が高温に熱せられる過程は間欠的に2億年の時間を隔てて二度起こり、一度目がCAIを、二度目がコンドルールをつくった。
- (2) 最初にCAIがつくられた後、高温の過程は繰り返し起こり、コンドルールの示す年代はその最後の高温過程の年代である。

CAIには再熔融や、揮発性の高い元素が後から取り込まれるプロセスがあり、また ^{26}Al - ^{26}Mg 年代系が乱されたり、 ^{26}Mg の過剰が検出できない場合がある[6]ことから、CAIは形成後数百万年の間に再加熱された可能性がある。一方、コンドルールには、融け残り結晶が多く存在し、いったんできたコンドルールが再び熔融を繰り返す「コンドルール・リサイクリング」という過程があったと考えられている[7]。そのような点から、筆者は原始太陽系星雲が2億年間たいへん活動的で固体粒子が高温に加熱されるイベントが繰り返されたのではないかと、考えている。コンドルール形成もCAI形成後2億年よりもっと以前に始まり、現在隕石中に存在するのは何度かリサイクルされた最後の世代なのかもしれない。

原始太陽系星雲の進化のごく初期には、原始星雲から原始星へ急速な質量輸送($\sim 10^6$ 太陽質量/年)が起こり、原始星から双曲分子流が放出される活動的な時期があった。観測などからの推定ではこの時期はおおよそ百万年続いたとされ、CAIの形成からコンドルールの形成までがこの時期に相当するのであろう。

このような星雲中でのCAI・コンドルールの形成過程を考える上で、ひとつ解決すべき難点がある。この時期、星雲中の固体物質は数十万年で太陽に落ち込むと考えられているので、古い年代を示すCAIを太陽に落とさずにコンドルールとともに隕石母天体へ取り込め

たのか、という疑問である。このため、実はCAIとコンドルールは同時代に作られ、CAI形成時の $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 同位体比が高いのはAlの同位体比が太陽系内で不均質であったためという考えもある。この点については、他の年代測定法を用いてCAIとコンドルールに2百万年の差があることを確かめる必要があるが、現状では ^{26}Al 年代以外の方法でCAIとコンドルールの両方を正確に年代測定することは極めて難しい。ただ、Semarkona隕石中のコンドルールでも年代の差は最大で約70万年あり、これもAl同位体比の不均質であるとは考えにくい。もしコンドルールも数十万年で太陽に落ち込んでしまったのなら、年代の違うコンドルールがひとつの隕石に存在することも説明できない。したがって、CAIやコンドルール形成の過程では、先にできた粒子を星雲中に保持するか、いったん太陽近傍へ落ち込んで再び星雲中へ戻すメカニズムがあったのであろう。形成過程の詳細を知るためにも、さまざまなコンドルールやCAIなどの試料の ^{26}Al 年代測定を今後も行っていきたい。

謝辞

ここで述べたコンドルールの年代測定は東京大学の永原裕子博士、地質調査所の富樫茂子博士、森下祐一博士とともにやってきた。特に、測定対象としてSemarkona隕石という変成を受けていない隕石を選んだことが、成功の大きな要因であったが、それは永原博士の助言によるものである。この場を借りて、感謝申し上げたい。

参考文献

- [1] Kaushal, S. K. and Wetherill, G. W., 1969: J. Geophys. Res. 74, 2717.
- [2] 木多紀子, 1999: 地球化学 33, 103.
- [3] Gray, C. M. and Compston, W., 1974: Nature 251, 495.
- [4] Russell et al., 1996: Science 273, 757
- [5] Kita et al., 1999: Submitted to Geochim. Cosmochim. Acta
- [6] McPherson et al., 1995: Meteoritics 30, 365.
- [7] Jones, R. H., 1996: in Chondrules and the protoplanetary disk, 163.