

隕石物質の年代が示す初期太陽系

木多紀子¹

1. タイムスケール

1.1 若い星の観測とのギャップ

長い間、我々は隕石試料の年代測定から地球や他の小惑星の形成時刻を推定することができると信じて隕石の年代測定を行ってきた。なぜなら、45-46億年の年代をもつ隕石は、太陽系では最も古く未分化な天体であるからだ。一方、赤外線領域の天体観測からは若い星の回りに塵とガスからなる円盤(原始惑星系円盤)があることがわかってきている。中心星のスペクトルをHR図にのせ、星の年齢とともに円盤がどのように進化しているかも推定されている。図1に模式的に示したが、主系列星に至るまで、大きく分けると以下の3つのステージを経過するとされている。

- (1) 原始星(～10万年)：原始星の周囲に円盤ができ、星間物質が大量に降り注いでいる。
- (2) 古典的Tタウリ型星(～数百万年)：塵とガスからなる円盤が星の周囲にとりまく。
- (3) 弱輝線Tタウリ型星(～1千万年)：塵を含む円盤が薄いか消滅しており、惑星形成が進行していると考えられている。

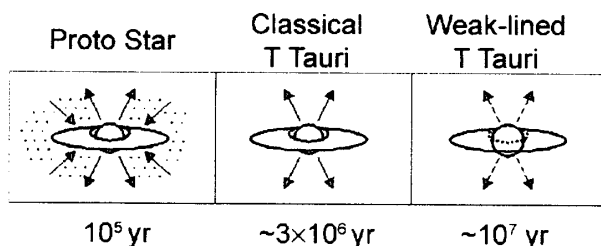


図1 原始惑星系円盤の進化の模式図。概念図は[1]による

10万年から1千万年という時間幅は46億年の太陽系の年齢に比較すると、僅か2万分の1から200分の1に過ぎない。この間に起きた様々な過程を隕石試料の年代から知ろうとしても、従来の年代測定法では測定誤差が大きすぎて何もわからなかった。過去30年以上も地道に得られてきた隕石の年代測定結果からは数億年以上の変動が報告されていたが、その大部分は小惑星の初期の熱変成や衝突破壊に伴う加熱によって最も古い形成時期の記録が消されてしまった結果であることも分かってきた。実際、二次的な影響の少ない隕石試料の年代測定結果はどれも45.5億年付近の結果を示し、区別がつかないほどである。筆者もかつて、隕石のRb-Sr年代やU-Pb年代測定を行い、貴重な隕石試料をごく少量用いて精密に測る腕を磨いたが、本来知りたかったコンドロールの年代や微惑星の形成時刻には、ほど遠い世界にいるジレンマも感じていた。

1.2 消滅核種の年代測定への利用

従来の年代測定法で年代精度が出ない理由は、年代測定に用いている放射性核種の半減期が10億年以上もあって、百万年以下の年代解像度がないことにある。ならば、もっと短い半減期の年代系を使えば良いはずである。46億年前の初期太陽系に半減期が1億年より短い放射性核種が存在していたことは、娘核種の同位体の過剰として隕石試料の同位体分析から確認されている。親核種そのものは、現在の太陽系では壊変しつくして天然には存在しないので「消滅核種 (extinct nuclide)」と呼ばれている。

¹ 産業技術総合研究所地球科学情報研究部門

最初に確認されたのは1961年、半減期1,600万年の ^{129}I に由来する ^{129}Xe の過剰であった [2]. その後1970年代には、 ^{26}Al に由来する ^{26}Mg の過剰が炭素質コンドライトの中のCa, Al-rich Inclusions (CAI)から見つかり [3], 現在まで表1のように半減期が短いものでは10万年の ^{41}Ca も含め様々な核種が太陽系初期に存在していたことがわかっている.

親-娘核種	半減期	太陽系初期の存在量
^{41}Ca - ^{41}K	10万年	$^{41}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$ 1.5E-8
^{26}Al - ^{26}Mg	73万年	$^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 5.0E-5
^{10}Be - ^{10}B	150万年	$^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 9.5E-4
^{60}Fe - ^{60}Ni	150万年	$^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ $\sim 3\text{E}-7$
^{53}Mn - ^{53}Cr	370万年	$^{53}\text{Mn}/^{55}\text{Mn}$ $\sim 9\text{E}-5$
^{107}Pd - ^{107}Ag	650万年	$^{107}\text{Pd}/^{108}\text{Pd}$ 2.0E-5
^{182}Hf - ^{182}W	900万年	$^{182}\text{Hf}/^{180}\text{Hf}$ 1.0E-4
^{129}I - ^{129}Xe	1600万年	$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 1.0E-4
^{244}Pu -核破砕	8000万年	$^{244}\text{Pu}/^{238}\text{U}$ 7.0E-3
^{146}Sm - ^{142}Nd	1億年	$^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}$ 5.0E-3

表1 隕石試料から確認された初期太陽系の消滅核種

このような短寿命の放射性核種と安定な同位体の比が太陽系の初期に均質であったと仮定すると、この比(以後、親核種の同位体比と呼ぶ)は一定の半減期で時間とともに減少する。このことを利用し、隕石中の娘核種の同位体の過剰から、試料が形成された時の親核種の同位体比を推定すると、相対的な年代差を求めることが可能になる。図2は例としてCAIとコンドラールの相対年代を求めたアイソクロン図(等時線図)である。この方法では親核種がすべて壊変してしまっているため、現在から何年前であるか、という絶対年代は求めることはできない。しかし、親核種の同位体比が短い時間間に大きく変化するので、百万年以下の年代精度で隕石試料の相対的な形成年代を議論することが可能になる。

早くから応用されてきた ^{129}I - ^{129}Xe 法を除くと、消滅核種を利用した年代測定はここ10年間で飛躍的に

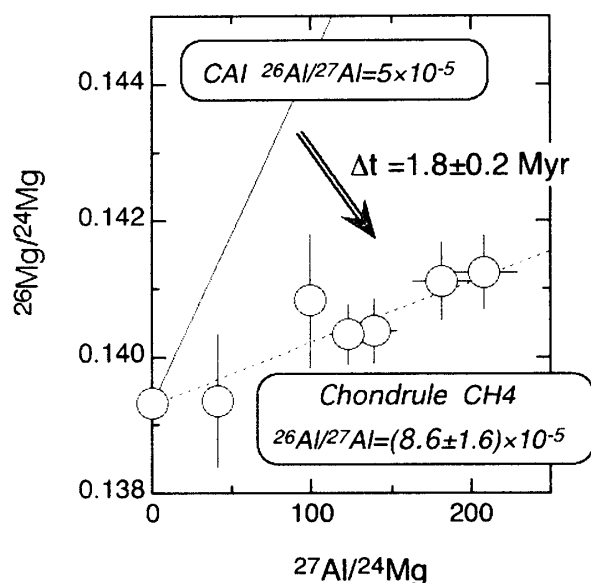


図2 ^{26}Al - ^{26}Mg アイソクロン図の例。CAIの典型的な値を基準に年代を計算する。コンドラールのデータは[4]による

進歩した。その理由のひとつはパーミル(同位体比のずれの1000分率;‰)レベルの同位体過剰を鉱物ごとに測定する二次イオン質量分析計(SIMS)や、0.01%の超高精度で同位体比を測るICP質量分析計(ICP-MS)や熱イオン化質量分析計(TIMS)の普及という背景がある。一方で、隕石試料には母天体での熱変成や衝突による破壊など形成後の二次的な過程が上書きされているが、どのような試料を測定すれば、primaryな年代値を得ることができるかという点について考慮されてきたことも進展を促した大きな要因である。その一例として、最も始源的な普通コンドライト中のコンドラールの ^{26}Al 年代を測定した研究について既に本誌で紹介している[5]。隕石が形成後に受けた熱変成がどんなに大きな影響を及ぼしうるかは、そちらを御参照いただきたい。以前から精力的に行なわれてきた ^{129}I - ^{129}Xe 年代については、ヨウ素を多く含む鉱物は熱変成などの二次的な影響を大きく受けており、例えばコンドラール一個一個の ^{129}I - ^{129}Xe 年代値はコンドラール形成ではなく母天体中の熱変成によって擾乱を受けた年代であると、最近では考えられている。

本稿では、最近の ^{26}Al - ^{26}Mg 年代測定結果を中心に紹介し、数十万年の時間分解能で隕石の年代を

概観し、そこから見えてくる我々の太陽系の原始惑星系円盤の歴史について考察したい。

2. 隕石の ^{26}Al - ^{26}Mg 年代

表1に挙げた消滅核種の中でも ^{26}Al は親核種の存在度が比較的高く、半減期も短いため年代精度が高いという利点がある。CAIから得られている典型的な値 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 5 \times 10^{-5}$ を相対年代の原点として基準にとると、相対年代 Δt_{CAI} は以下の式で計算される。

$$\Delta t_{\text{CAI}} (\text{Myr}) = \ln \left[\left(\frac{^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}}{(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_{\text{CAI}}} \right) \right] \times 0.73 / \ln(2)$$

個々の隕石試料について試料形成時の $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比を求めるには、図2のようにアイソクロン図上に同一試料から得られた複数の測定点をのせて、その傾きを求める。多くの場合、Alを多く含むガラスや斜長石とMgを多く含むかんらん石や輝石などを用いる。 ^{26}Mg 同位体の過剰はすべて ^{26}Al の放射壊変による寄与であるから、Alの安定同位体 ^{27}Al と ^{26}Mg 過剰は直線で

正の相関を持つ。もし、そうでない場合は試料の形成後に試料中の ^{26}Mg 同位体、あるいはAlとMgの比が動いたため、相対年代を求めることはできない。

図3に最近までに得られたコンドルールや隕石中の斜長石の相対年代をまとめた。明らかに二次的な変成によって年代が若返り、年代値の意味が明確でないものは省いた。CAIについては膨大なデータがあり代表的な範囲を示した。個々のデータについては、総説を参照頂きたい [6]。図中では、単一のCAIが複数回加熱され複数の年代履歴を示すという例 [7] について、具体的なデータを示してある。 ^{26}Al 相対年代は隕石試料の種類によってきれいに3つの区分に分かれる。すなわち、(1) CAIは最も古く年代の幅が数十万年と短い、(2)コンドルールは約200万年を中心に年代が100-300万年に分布している、(3)小惑星サイズの母天体中の地質学的な分化を経たエイコンドライトや熱変成によって平衡化したコンドライトの年代は400万年より若い。分化隕石などの試料は天体がゆっくり冷却したため熱変成によって ^{26}Al 相対年代が若返り、 ^{26}Mg 同位体過剰がまったく見えないものも多

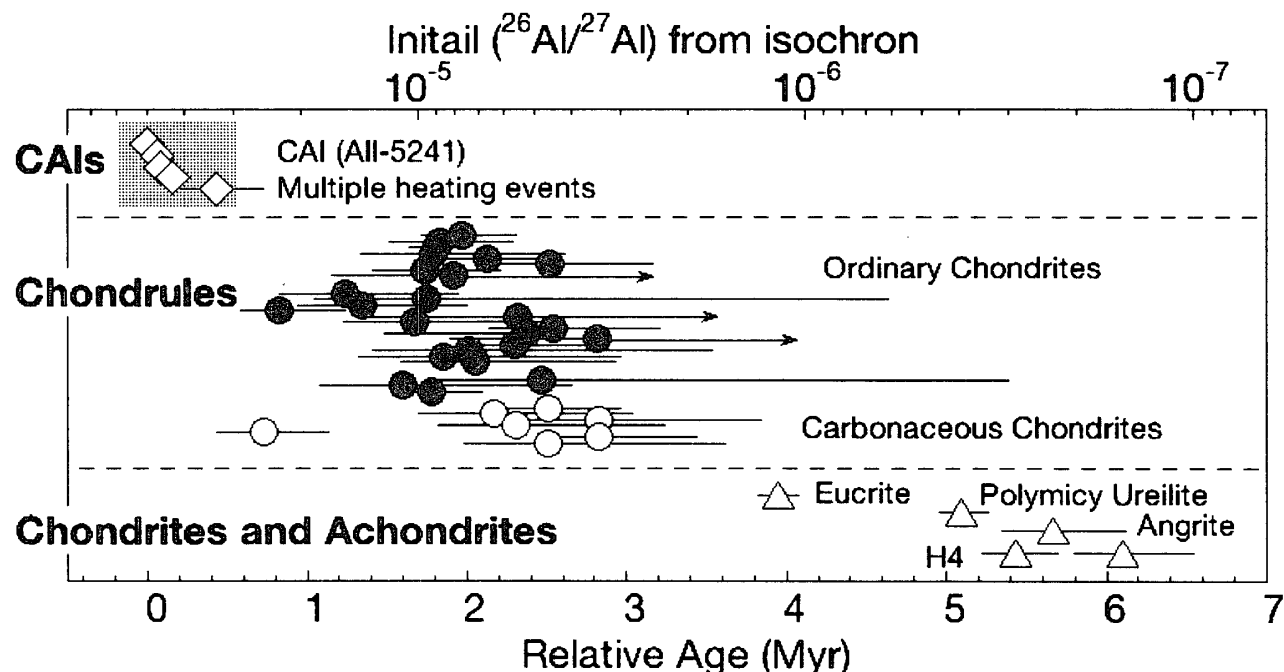


図3 隕石試料の ^{26}Al 年代。CAIのデータは[7]、コンドルールは[4]、[8]、及び [9]のまとめの表を参照した。H4コンドライトは[10]、分化隕石については最近の国際会議の要旨より引用

数有る。この3つの相対年代差は、図1に示した若い星の観測から得られている原始惑星系円盤の3つのステージのタイムスケールに驚くほどよく一致している。高温のガスの中で最初に固体になるような鉱物の集合体であるCAIは、星間物質の降着率が高く活動的な円盤が高温になるような環境で形成したのであろう。その後降着率が低下し準静的な状態になった円盤では、数百万年にわたってコンドルール形成を起こす加熱イベントが繰り返された。コンドルール形成が終わるとほぼ同時に微惑星が形成され、小惑星や原始惑星の集積が始まり、天体の分化が起こった。このような描像が年代測定の結果を眺めるだけで自然と描き出されてくる。

3. 同位体組成の均質性

3.1 複数の年代系の一貫性

さらに細かく議論を進める前に、 ^{26}Al 相対年代測定法の仮定「短寿命の放射性核種と安定な同位体の比が太陽系の初期に均質である」について、検討したい。長い間、コンドールの $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比がCAIより低いのはCAIの ^{26}Al 存在量が太陽系の平均的な初期値より異常に多かったからだ、とする説が唱えられていた。この背景には、(1)CAIやコンドールの

ようなmmからcmサイズの粒子はガス抵抗で100万年も経たないうちに太陽に落ちてしまうという理論予想、(2)コンドルールを形成するような加熱イベントが数百万年経った準静的な円盤で可能かどうかと言う疑念、(3)CAIには酸素をはじめ様々な元素の同位体に異常が認められる、など複数の要因があった。昨年、AmelinらはCAIとコンドールのU-Pb年代測定を行い、絶対年代でも ^{26}Al 年代とほぼ同じ250万年の差が認められることを初めて示した[11]。この結果によって、 ^{26}Al の存在度は初期太陽系で均質であり、 ^{26}Al - ^{26}Mg 系は初期太陽系の時計として有効に使えることが確認された。

このように、同一試料について消滅核種による相対年代とU-Pb年代による絶対年代を決めておけば、相対年代測定から絶対年代を換算することが可能になる。そのような手法が有効かどうかは、様々な試料について複数の年代測定で決めた年代が一致するかを調べてみれば良い。図4では、Al-Mg年代系はAmelinらの測ったCAI E60のデータ、Mn-Cr年代系はLugmairらが測定したLEW86010南極産アングライトのデータを用いて、それぞれU-Pb年代に較正し、他のデータを比較した。Mn-Cr年代の場合、CAIにはMnがほとんど存在せず、娘核種のCr同位体に僅かな同位体比異常があることから、CAIの分

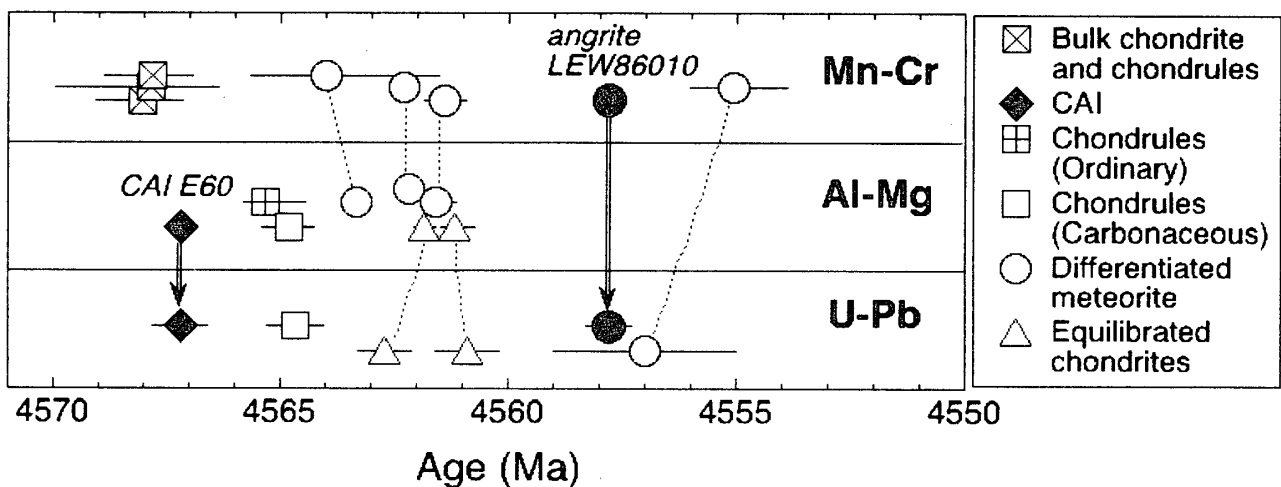


図4 隕石の年代の複数系における比較。U-Pb年代: [11, 12, 14], Mn-Cr年代: [13], 及び最近の国際会議の要旨より引用。コンドールのAl-Mg年代は図3より代表的な範囲を表示

析から太陽系の初生的な $^{55}\text{Mn}/^{55}\text{Mn}$ 比を求めることができない。アングライト LEW86010 は U-Pb 年代 (45.578 億年) と $^{55}\text{Mn}/^{55}\text{Mn}$ 比 (1.25×10^{-6}) の双方が他の試料よりも高い精度で測定されていることから、Mn-Cr 年代の基準点として選ばれている [12, 13]。

図 4 から、二つの基準点のデータ以外も、誤差の範囲内でよく一致していることがわかる。Mn-Cr 系では複数の炭素質コンドライトの全岩分析値や普通コンドライト中の複数のコンドルールの全岩分析値を用いて、全岩アイソクロンの初生 $^{55}\text{Mn}/^{55}\text{Mn}$ 比を出した結果も合わせて示した。このデータの個々の測定値は ^{53}Cr の過剰が極めて小さく、アイソクロンの直線性も決して良くないものも有り、意味のある相対年代が出ているのか不明であるが、面白いことに CAI の年代とほぼ同じような値になっている。

3.2 短寿命放射性核種の起原

ここに示した3つの年代系以外にも同一の鉱物を選んで I-Xe 年代と U-Pb 年代を求めると複数の隕石試料で良い一致を示すという報告もある。一般に、隕石試料も地球の岩石もその同位体組成は(酸素同位体などの例外を除くと)極めて均質であり、様々な星の原子核合成に由来する同位体組成の違う物質が、太陽系の初期によく均質化する過程があったことを示している。消滅核種を用いた複数の年代測定の良い一致は短寿命放射性元素についても同様によく混ざっていたことを強く示唆している。これは、隕石中の CAI やコンドルールの形成を説明するために Shu が唱えている X-wind model で、 ^{26}Al を含む放射性核種が初期太陽系の内部で高エネルギー粒子との核反応で生成されたとした説とは食い違う結果である [15, 16]。

星内原子核合成による様々な核種の生成率を隕石から推定されている太陽系の初期値に比較すると、(1) 太陽系内の核反応では生成しない ^{60}Fe の存在度が ^{26}Al や ^{55}Mn に比べ低く、(2) 星の核合成ではできない ^{10}Be の存在度が大きすぎる、という特徴が

ある。これを合理的に理解するために、太陽系内の高エネルギー粒子との核反応で短寿命放射性核種がつくられた、という Shu の仮説が広く支持されている。しかし、今春の Houston の会議でこれらの点について新しい考え方が出された。(1) については、太陽系初期の ^{60}Fe の存在度がこれまでの推定より高いことが判明し、太陽系形成直前に近傍で起こった超新星爆発によって放射性核種が太陽系に付け加わった可能性が指摘された [17]。(2) についても、宇宙線中に豊富に存在する ^{10}Be が太陽系をつくった星間雲に捕獲されたとすると、太陽系の初期値を説明することができるという新説も出されている [18]。このような新しい事実や説を取り入れれば、太陽系内の核反応による消滅核種の生成は考える必要はないようである。

4. 初期太陽系の進化への制約

では、 ^{26}Al 相対年代が意味のある太陽系の時計であったことを受け入れ、さらに細かく年代測定結果を検討しよう。原始惑星系円盤の進化へ重要な制約条件となるものがいくつかあげられる。

4.1 円盤中の固体粒子の保持

CAI とコンドルールは 100 万年から 200 年以上も形成年代が異なるのに、同じ隕石中 mm オーダーで混在している。しかし、理論的には mm から cm サイズの粒子はガス抵抗によって太陽系の内側へ落下し、100 年以上円盤中に滞在することはできない。CAI については Shu のように X-wind で内側から外側へ何度も飛ばされて戻っていった可能性も否定できない。しかし、コンドルールが形成された時期は既に述べたように古典的 T タウリ型星のステージであり、同じようにコンドルールも X-wind で飛ばされたとは考えにくい。したがって、原始惑星系円盤ではガス抵抗による粒子の落下を妨げる別の効果があったはずである。古典的 T タウリ型星の時期には、

固体粒子はある程度赤道面に沈澱し固体とガスの分離がおこったはずである。その場合、ガス抵抗は弱くなり、落下は押さえられたはずである。また、乱流が起こるためダスト層は十分沈澱できず、自己重力による微惑星形成を起こせないと推測されている。このような状況では古いCAIやコンドルールはダスト層内に保持された可能性が高い。また、固体沈澱層全体にコンドルール形成が起こったとすると、古いCAIやコンドルールは再加熱されて年代の若いコンドルールのみが残ってしまう。従って、コンドルール形成は沈澱層の一部にのみ起こった過程であったことも推察される。

4.2 CAIとコンドルールの関係

CAIもコンドルールもともに高温で加熱された小さな固体粒子と言う点で、形成過程も類似していると考えられることが多い。しかし、年代的にはあまり重ならず、コンドルールの年代には100万年以上の幅が有るのに対し、CAIの年代幅は数十万年以下と小さいので、形成イベントが異なっていた可能性も高い。CAIの形成年代は原始星の時期に十万年単位で起こっていたイベントに対応しているであろう。この時期には星間物質の降着率が高く、しかも大きく変動していたと考えるのが自然である。そのような状況下ではガス自体の温度が極めて高温になり、高温のガスからCAI組成の固体が凝縮するような過程が繰り返し起こった可能性が高い。この間に星間物質に由来する同位体組成の不均質は気相になることで簡単に均質化したと考えられる。

CAIが再加熱された試料の例では、もっとも若い記録でも約50万年以内に起こっており、必ずしもコンドルール形成年代と重ならない。図3からは一見CAIの再加熱に続いてコンドルール形成が始まったような印象も受けるが、100万年より古いコンドルールが見つかった例は希少である。また、上で述べたようにコンドルール形成期にCAIは円盤中に保持されており、時にはコンドルール形成の材料の一部と

して取り込まれた可能性もある。Mg珪酸塩を主体とする固体物質の融点は一般に高く1,600℃を超えるが、Al, Caを多く含むCAI組成の物質が混入すると融点がやや下がり、融けやすくなるのでコンドルールそのものになってしまうだろう。コンドルールの中に融け残ったCAI組成の物質が含まれている例は、稀では有るが、いろいろなコンドライト隕石に見られるようだ [19]。しかし、その逆はごく最近見つかった一例を除いて [20]、皆無である。このことは、CAIの形成はコンドルール形成よりも早く起こり、古いCAIをコンドルールが材料として取り込んだことを示している。

4.3 微惑星の形成

隕石の年代は融解などの高温過程でリセットされるので、岩石の融解を伴わない微惑星 (= 隕石母天体) の形成というイベントを隕石の年代測定から直接決めることはできない。しかし、コンドルールの年代と分化隕石の年代を比較すると、明らかに300万年から400万年にかけて年代の空白期がある。母天体の分化を引き起こした熱源が ^{26}Al の崩壊熱であるとすると、母天体の集積時刻から分化隕石の結晶化までは ^{26}Al の寿命程度の遅延があると考えべきで、年代の空白期間はその時間差に相当するものであろう。したがって、コンドルール形成期の直後、あるいは終盤に微惑星形成が始まった考えるべきである。円盤中の乱流の存在が自己重力による微惑星形成の主要な阻害要因であったとすると、250-300万年頃に円盤は乱流が弱くなり古典的Tタウリ型星の時期から弱輝線Tタウリ型星の時期に移ったのかもしれない。コンドルール形成は微惑星の成長によって引き起こされたとする説もあるが、コンドルールの形成は100万年頃から起こっており、もしその時期に微惑星ができていたとするとコンドルールの年代と重なるような分化隕石が(小さな破片でもいいから)見つかっていても良いはずだ。年代の空白がコンドルールと分化隕石の間で確実に存在していることは、む

しろコンドルール形成の後に微惑星が形成したことを強く示唆するものである。

微惑星形成後、原始惑星は100万年以内に作られるという理論的見積もりから、多くの人が太陽系形成後100万年後には惑星集積が始まっていると考えている。この時期に作られた小天体の内部では大量に存在する ^{26}Al の崩壊熱であつという間に融解がおこるであろう。しかし、分化隕石からは100-200万年の年代を示す試料は全く出てこない。隕石の年代は、少なくとも小惑星領域では微惑星形成が数百万年遅延し、その間、塵とガスの円盤が存在していたことを強く示している。

5. 今後の展開

^{26}Al の半減期は73万年と短いため、他のどの年代系よりも太陽系初期の年代を細かく決めることができる。測定器の進歩によって、同位体測定精度自体も良くなってきているので、様々な種類のCAIの年代を1万年の年代精度で測って比較してみるなどということが可能になれば、CAIの形成過程についても、より理解が深まるであろう。コンドルールとCAIの関係を明らかにすることは、加熱メカニズムを理解する鍵の一つである。CAIの中にコンドルールがあったという最新の報告 [20] は、年代測定そのものはなされていないものの、前節で述べた両者の時間的な前後関係「CAIはコンドルールより古い」に反する結果である。このような例が普遍的なのか、あるいは特殊な形成過程を経た例外的な試料であるのかを見極めることも重要であろう。筆者は現在コンドルールの年代測定値をさらに精度をあげて、数も100個単位まで増やしたいと思っている。コンドルール形成過程の詳細を明らかにすることができれば、原始惑星系円盤の物理的な状態をより理解し、惑星集積過程の初期条件ももっとはつきりするであろう。

謝辞

隕石試料の年代測定は東京大学の永原裕子博士、橋省吾博士、茨城大学の池田幸雄博士、木村眞博士の他、著者の所属する産総研地球科学情報研究部門微小領域同位体研究グループの複数の研究員との共同研究として行ってきた。また、原始惑星系円盤への制約条件は中本泰史博士との議論に負うところが大きい。この場をかりて感謝申し上げたい。本稿を通して、隕石を直接研究していない惑星科学研究者のみなさんに、隕石試料に秘められた情報の重要性を再認識していただければ、幸いである。

参考文献

- [1] Feigelson E. D. and Montmerle T. (1999) *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 37, 363.
- [2] Jeffery, P. M. and Reynolds, J. H. (1961) *J. Geophys. Res.* 66, 3582.
- [3] Gray, C. M. and Compston, W. (1974) *Nature* 251, 495.
- [4] Kita, N.T. et al. (2000) *Geochim. Cosmochim. Acta* 64, 3913.
- [5] 木多紀子 (1999) *遊星人* 8, 256.
- [6] MacPherson, G. J. et al. (1995) *Meteoritics* 30, 365.
- [7] Hsu, W. et al. (2000) *Earth Planet. Sci. Lett.* 182, 15.
- [8] Mostefaoui, S. et al. (2002) *Meteorit. Planet. Sci.* 37, 421.
- [9] Huss G. et al. (2001) *Meteorit. Planet. Sci.* 36, 975.
- [10] Zinner, E. and Göpel, C. (2002) *Meteorit. Planet. Sci.* 37, 1001.
- [11] Amelin, Y. et al. (2002) *Science* 297, 1678.
- [12] Lugmair, G. W. and Galer, S.J.G. (1992) *Geochim. Cosmochim. Acta* 56, 1673.

- [13] Lugmair, G. W. and Shukolyukov, A. (1998)
Geochim. Cosmochim. Acta 62, 2863.
- [14] Göpel, C. et al. (1994) Earth Planet. Sci. Lett.
121, 153.
- [15] Shu, F. et al. (1996) Science 271, 1545.
- [16] Shu, F. et al. (2001) Astrophys. J. 548, 1029.
- [17] Tachibana, S. and Huss, G. (2003) Astrophys.
J. 588, L41.
- [18] Desch, S. J., Srinivasan, G., Connolly, H. C.,
Jr. (2003) Lunar Planet. Sci. 34, #1111.
- [19] Krot, A. N., Hutcheon, I. D., and Keil, K.
(2002) Meteorit. Planet. Sci. 37, 155.
- [20] S. Itoh and H. Yurimoto (2003) Nature 423,
728-731.