# 特集「初期太陽系物質科学の最前線」 隕石中の炭酸塩のMn-Cr年代測定

## **藤谷 渉<sup>1</sup>, 杉浦 直治<sup>1</sup>, 市村 康治<sup>1</sup>, 高畑 直人<sup>2</sup>, 佐野 有司<sup>2</sup>** 2010年7月12日受領, 2010年11月4日受理,

(要旨)始原的隕石である炭素質コンドライトには母天体上で水質変成を受けたものが存在し、含水鉱物や炭酸塩、硫酸塩などを含む、炭酸塩は微量元素として Mn を含み、短寿命放射性核種である<sup>53</sup>Mn を用いた年 代測定を適用することができる、本研究では、隕石母天体の形成とその後の変成のタイムスケールを調べる ことを目的に、炭素質コンドライトに属する CM コンドライト中の炭酸塩に対し年代測定を行い、その形成 年代を求めた、分析した4つの隕石について、炭酸塩の形成年代はすべて一致し、現在から45億 6340(+40/-50)万年前ということが分かった、この結果に基づいて、小惑星形成の時期と継続時間について議論する、

### 1. はじめに

#### 1.1 隕石中の炭酸塩

始原的隕石である炭素質コンドライトには,程度の 差はあるが,広範囲にわたって水質変成の痕跡がみら れる[1].特にCI,CM,CRコンドライトといった隕 石グループは,層状ケイ酸塩(サーペンティンなど)や 酸化物(マグネタイトなど),炭酸塩や硫酸塩などの二 次鉱物を含み,その影響は顕著である.このことは, 炭素質コンドライトの母天体(反射スペクトルの比較 から,C型小惑星だと考えられている[2])において, 地質学的進化・表層環境変遷に水と岩石の反応が重要 な役割を果たしてきたことを示す.

水質変成によって生じた二次鉱物は隕石母天体の進 化・変遷の記録をとどめており,形成した年代を調べ ることで,小惑星の形成や変成の年代を明らかにする ことができる.この点で,プライマリーな情報を保持 するコンドルールや難揮発性包有物(CAI)の形成年代 (例えば[3],[4])とは年代の意味が異なる.このよう な太陽系最初期に起こった出来事の年代を高時間分解 能で明らかにしようとするとき,短寿命放射性核種を 用いた年代測定は非常に有効である。そこで本研究で は、CMコンドライトに含まれる炭酸塩に対して二次 イオン質量分析計(SIMS)を用いた<sup>53</sup>Mn-<sup>53</sup>Cr年代測定 (半減期370万年)を行った。短寿命放射性核種を用い た年代測定の原理は1.2節で詳しく述べる。短寿命放 射性核種を用いた年代測定法は様々なものが現在まで に考案されているが[5]. それらはあらゆる鉱物につ いて適用できるわけではなく、実質的に年代測定でき る鉱物はかなり限定されている。隕石中の炭酸塩は一 般に微量元素として Mn を含むため,<sup>53</sup> Mn-<sup>53</sup> Cr を適用 して高精度で年代が決定できる数少ない鉱物の一つで ある.また、隕石中の炭酸塩はその酸素同位体[6]、 炭素同位体[7]などから形成したときの温度が推定さ れており、0-20 ℃程度だと考えられている、この 情報は炭酸塩の形成年代が求められた際、その時の隕 石母天体の温度がおよそ室温くらいであったことを示 唆し、母天体の熱史を考えるうえで非常に重要である。

#### 1.2 <sup>53</sup>Mn-<sup>53</sup>Cr年代測定

<sup>53</sup>Mnは電子捕獲により半減期370万年で<sup>53</sup>Crに壊変 する放射性核種である.この核種は太陽系形成時に存 在していたという証拠があるが[8],370万年という半 減期は太陽系の年齢より十分に短く,現在では検出可 能なレベルで太陽系物質中には残っていない.しかし, もし<sup>53</sup>Mnがまだ存在していた時期にある物質が形成

<sup>1.</sup> 東京大学 大学院理学系研究科

<sup>2.</sup> 東京大学 大気海洋研究所

fujiya@eps.s.u-tokyo.ac.jp

し、その物質内で同位体的に閉鎖系になった場合、放 射性同位体<sup>53</sup>Mnが壊変した先の安定同位体<sup>53</sup>Crの存 在度に変化が生ずる.すると、閉鎖系になった時点で のCr同位体比、すなわちCr同位体比の初生値 (<sup>53</sup>Cr/<sup>52</sup>Cr)<sub>0</sub>と比べ過剰に存在する<sup>53</sup>Crの存在量を測 定することで、その物質が形成した当時の<sup>53</sup>Mnの初 生値(<sup>53</sup>Mn/<sup>55</sup>Mn)<sub>0</sub>を求めることができる.過剰<sup>53</sup>Crの 大きさは、その物質のMn/Crに比例する.Crに比べ てMnが多ければ、もともと存在していた<sup>53</sup>Crに比べ て壊変起源の<sup>53</sup>Crの量が多くなるからである(式1).

$$\frac{{}^{53}Cr}{{}^{52}Cr} = \left(\frac{{}^{53}Cr}{{}^{52}Cr}\right)_0 + \frac{{}^{55}Mn}{{}^{52}Cr} \times \left(\frac{{}^{53}Mn}{{}^{55}Mn}\right)_0 \cdots (1)$$

ここで、<sup>53</sup>Cr/<sup>52</sup>Cr, <sup>55</sup>Mn/<sup>52</sup>Crは現在の分析値, (<sup>53</sup>Cr/<sup>52</sup>Cr)<sub>0</sub>, (<sup>53</sup>Mn/<sup>55</sup>Mn)<sub>0</sub>は物質が閉鎖系になった 時点での値(初生値)である.

実際に(<sup>53</sup>Mn/<sup>55</sup>Mn)<sub>0</sub>を調べる際には,同時期に閉 鎖系になったと考えられる複数の物質(化学組成が異 なる鉱物)について<sup>53</sup>Cr/<sup>52</sup>Cr,<sup>55</sup>Mn/<sup>52</sup>Crを測定し,得 られたデータを<sup>53</sup>Cr/<sup>52</sup>Cr vs.<sup>55</sup>Mn/<sup>52</sup>Crのグラフにプ ロットする(図1).すると,式1により,同時期に閉 鎖系になった物質の分析データは直線上にプロットさ れ,その傾きが(<sup>53</sup>Mn/<sup>55</sup>Mn)<sub>0</sub>に対応する.この直線 のことをアイソクロンという.このようにして (<sup>53</sup>Mn/<sup>55</sup>Mn)<sub>0</sub>を求めることができれば,異なった時



図1:アイソクロンの概念図. 横軸に<sup>55</sup>Mn/<sup>52</sup>Cr, 縦軸に<sup>55</sup>Cr/<sup>52</sup>Cr をとると,同時期に閉鎖系になったと考えられる物質の分 析データは直線上にプロットされる.この傾きから<sup>53</sup>Mnの 初生値(<sup>53</sup>Mn/<sup>55</sup>Mn)<sub>0</sub>が求まる.グラフのy切片は,閉鎖系 になったときの<sup>53</sup>Cr/<sup>52</sup>Crの値を表す.

期に閉鎖系になった物質間で(<sup>53</sup>Mn/<sup>55</sup>Mn)₀を比較す ることで、閉鎖系になった時間の差(相対年代)を求め ることができる、これが、 短寿命放射性核種を用いた 年代測定の原理である、ここで、 短寿命放射性核種を 用いた年代測定はその性質上、測定対象となる物質が 現在より何年前に形成した. という絶対年代を求める ことができないということに注意されたい。もし絶対 年代を求めたい場合は、<sup>53</sup>Mnの初生値(<sup>53</sup>Mn/<sup>55</sup>Mn)<sub>0</sub> と絶対年代がともに精度よく測定されている試料(一 般にanchorという)と比較する必要がある。<sup>53</sup>Mn-<sup>53</sup>Cr 年代測定の場合、通常 anchor には LEW 86010 あるい はD'Orbignyというアングライト(エコンドライトの 一種)を用いる.本稿内の絶対年代はすべて LEW86010をanchorにして計算してあり、LEW86010 の(<sup>53</sup>Mn/<sup>55</sup>Mn)<sub>0</sub>とPb-Pb年代測定法による絶対年代は それぞれ  $({}^{53}\text{Mn}/{}^{55}\text{Mn})_0 = (1.25 \pm 0.07) \times 10^6$  [9]. 4558.55 ± 0.15 Ma [10]と求められている(Maは100 万年前を意味する).

#### 1.3 先行研究で得られた炭酸塩の年代

この節では現在までに先行研究で報告されたCMコ ンドライトに含まれる炭酸塩のMn-Cr年代を概観し てみる[11-14]. 図2に報告されたデータがまとめてあ り,それぞれの点が異なる隕石の炭酸塩に対応する. 横軸は炭酸塩の絶対年代を,縦軸はそれぞれの隕石が 受けた水質変成の度合いを表しており,上から下に向 かって水質変成をより受けていることを示す(CM ~ の数字が水質変成度を表し,この数字が小さいほど激 しく水質変成を受けている).また,anchorである LEW86010アングライトと,CAIのPb-Pb年代[4]も 一緒にプロットしてある.CAIは一般に太陽系物質で もっとも古い形成年代を示し,その年代は太陽系その ものの年代とみなされている.なお,炭酸塩のデータ はすべてSIMSを用いて得られたものである.

さて,このグラフを見て気付くことが数点ある.ま ず1つ目に,炭酸塩の年代でCAIよりも古いものが存 在する.これは一般に考えられている惑星形成論,太 陽系物質の進化とは矛盾する.なぜならば,炭酸塩は 隕石母天体内での水質変成によって結晶化したものと 考えられており,その年代は母天体が形成した年代よ りも若く,その材料の一部であったであろうCAIよ りも当然若いはずだからである.



図2:現在までに報告されているCMコンドライト中の炭酸塩の <sup>53</sup>Mn-<sup>53</sup>Cr年代.LEW86010のanchorを用いて相対年代を絶 対年代に焼き直してある.LEW86010は<sup>53</sup>Mn-<sup>53</sup>Cr年代測定 の際通常anchorとして用いられるアングライトで,Pb-Pb 年代と<sup>56</sup>Mnの初生値(<sup>53</sup>Mn/<sup>55</sup>Mn)₀がともに精度よく決まっ ている(本文参照).CAIのPb-Pb年代は太陽系の形成年代 に等しい.

2つ目に、炭酸塩の年代に、600万年ほどの幅があ る(de Leuw et al., 2009 [13]は変成度と相関している と主張しているが、これまでに年代が測定された隕石 はCM 2.1がほとんどであり、水質変成の度合いはほ ば等しい).これはCMコンドライト母天体における 水質変成の熱源を考えると、やや奇妙な結果である. 水質変成は小惑星が形成する際に取り込まれた氷が何 らかの熱源によって融解し、その結果生じた水と岩石 が反応して起こる.その熱源として最も寄与するのが ケイ酸塩鉱物の主成分であるAlの放射性同位体、<sup>26</sup>Al (半減期:73万年)の壊変エネルギーによる熱である [15].先に述べたように、炭酸塩の形成した温度はお よそ室温くらいであり、熱源の半減期の短さを考えれ ば年代値がそれほど幅をもつということは考えづらい.

我々は上記の点に着目し、このような結果はSIMS による分析上の問題に起因すると考えた.SIMS分析 では装置内で異なる同位体間,元素間で分別が起こる. 特に,元素間の分別は数倍のレベルで起こる.これは, 元素によって装置の感度が異なるためである.この効 果を補正するために,得られた元素比(<sup>53</sup>Mn-<sup>53</sup>Cr年代 測定の場合は<sup>55</sup>Mn/<sup>52</sup>Cr)を,元素組成既知の標準試料 を分析した値で規格化しなくてはならない.この規格 化定数((<sup>55</sup>Mn/<sup>52</sup>Cr)<sub>measured</sub>/(<sup>55</sup>Mn/<sup>52</sup>Cr)<sub>true</sub>)のことを相 対感度係数という.このとき,分別の程度は分析対象 とする物質の鉱物,化学組成に依存する.この効果を マトリクス効果という.したがって,炭酸塩の<sup>53</sup>Mn-<sup>53</sup>Cr年代測定で正しい結果を得るためには,Mn/Cr が既知の炭酸塩の標準試料を準備する必要がある.

しかしながら、先行研究ではこの分別の補正が正し く行われていない.なぜならば、Mn/Crを精度よく 分析できるほど十分Crを含有する炭酸塩が天然には 産出せず、適切な標準試料を準備できないからである. そのため、やむをえずアメリカ・アリゾナ州産のサン カルロス・オリビンで代用していることがほとんどで ある.これは、前節で説明したアイソクロン(図1)に おいて、データの横軸の値が正確に決まっていないこ とを意味する.もしこの値が系統的にエラーを含んで いるとすると、グラフの傾きに相当する<sup>53</sup>Mnの初生 値(<sup>53</sup>Mn/<sup>55</sup>Mn)<sub>0</sub>の見積もり、そして年代値の見積も りも当然誤りを含むことになる.

以上のような状況を踏まえ、本研究ではCMコンド ライト中の炭酸塩の<sup>53</sup>Mn-<sup>53</sup>Cr年代測定を行うととも に、マトリクス効果補正のための標準試料を準備した. 具体的には、Mn、Crをドープしたカルサイト(方解石: CaCO<sub>3</sub>)を実験室で合成し、それを用いてMn/Crの相 対感度係数を評価した.本研究により、隕石中の炭酸 塩に対して不確定性の小さい<sup>53</sup>Mn-<sup>53</sup>Cr年代が求まり、 小惑星の形成とその変成についてより詳細な年代情報 が得られることが期待される.さらに、炭酸塩の年代 がCAIの年代よりも古くなってしまうという矛盾が 解決され、他の年代測定の結果と調和的な確固たる初 期太陽系年代学を構築することを目指す.

### 2. 試料と分析手法

隕石試料はCMコンドライトに属するMurchison (CM 2.5), Y791198 (CM 2.4), ALH83100 (CM 2.1), Sayama (CM 2.1)を準備した.水質変成度が異なる試 料を分析することで,先行研究から示唆されるような 年代と変成度の関係を確認することができる.また, Y791198と ALH83100に関しては炭酸塩の年代が先 行研究で報告されているので,それらと比較すること で,本研究で合成した炭酸塩標準試料の効果を確かめ ることができる.

隕石試料は、直径1/2あるいは1インチのガラスデ ィスクにエポキシ樹脂を使用して貼り付けた.樹脂が



図3: Murchisonに含まれるカルサイトの電子顕微鏡(SEM)像(上)とNanoSIMSによるイオン像(下). SEM 像は左が反射電子像(BEI),右がカソードルミネッセンス(CL)像. CLは微量元素の分布を調べる際に 有効な手段とされる.SEM像のスケールバーは20マイクロメートル.イオン像の視野は50 x 50マイク ロメートル.CL像およびイオン像から,元素組成は均質ではなくゾーニングがあることがわかる.

硬化した後,厚さが100マイクロメートル程度になる ように隕石を切断した.その後アルミナ研磨粉を用い て表面を研磨し,最終的に粒径0.25マイクロメートル のダイヤモンドペーストで仕上げた.表面には炭素蒸 着を施し,電子顕微鏡観察や同位体分析の際,試料表 面がチャージアップするのを防いだ.

炭素蒸着を施した試料は、まず走査型電子顕微鏡 (SEM)を用いて表面を観察し、ターゲットとなる炭 酸塩を探した.また、発見した炭酸塩に対して、エネ ルギー分散型X線分光(EDS)を用いて炭酸塩の化学 組成、特にMnの存在量を調べ、カソードルミネッセ ンス(CL)を用いてMnなど微量元素の分布の観察を 試みた.図3にMurchison隕石中に見つかったカルサ イトの反射電子像(BEI)、CL像、NanoSIMS(後述)に よるイオン像を示す。Murchison隕石ではカルサイト が主な炭酸塩鉱物である。典型的な粒子サイズは30 マイクロメートルほどであり、Mnを最大0.7重量パ ーセントほど含む、また、CL像からはカルサイトに ゾーニングが見られ、<sup>55</sup>Mn<sup>+</sup>および<sup>43</sup>Ca<sup>+</sup>のイオン像と 強度分布がよく一致していた、これはY791198中のカ ルサイトにも共通の特徴である、このように、CL像 はMnが濃集している領域を調べるために効果的であり、年代測定に適した粒子を容易に探し出すことができる. Y791198も同様にカルサイトが主な炭酸塩であるが、ALH83100とSayamaはドロマイト(苦灰石: CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)が主な炭酸塩であった. Mnの含有量は 概してドロマイトのほうが多く、Sayamaに含まれる ドロマイトは最大1.4 重量パーセントのMnを含んでいた.

炭酸塩の標準試料は以下の手順で準備した[16].ま ずフラスコ中でNH<sub>4</sub>Cl, CaCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O, MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O, Cr<sub>2</sub>(CH<sub>3</sub>COO)<sub>4</sub>·(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>·4HCl, CH<sub>3</sub>COONaの 水溶液を調整した.フラスコに連結した試験管に (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>を入れ,発生した二酸化炭素およびアンモ ニアを水溶液に導いた.CaCl<sub>2</sub>+(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> → CaCO<sub>3</sub> + 2NH<sub>4</sub>Clの反応により水溶液中には炭酸カル シウムの粒子が沈殿し,この粒子にはMnとCrが含 まれている.この炭酸カルシウムの粒子は後方散乱電 子回折(EBSD)によりカルサイトの多結晶であること が確認された.典型的な粒子サイズは300マイクロメ ートル程度であり,MnとCrの存在量はそれぞれ0.7, 1.1 重量パーセント程度であった.この合成した粒子 は隕石試料と全く同様にエポキシに埋め込み,表面を 研磨した後,炭素蒸着を施した.

SIMSによるMnおよびCrの同位体分析は東京大学 大気海洋研究所に設置されている高空間分解能・高感 度の二次イオン質量分析計(NanoSIMS)を用いて行っ た、カルサイトの標準試料と隕石中の炭酸塩に対して、 16 kVで加速したO<sup>-</sup>イオンの一次イオンを電流値1 nAに調整し、試料表面に照射した、一次イオンビー ムの直径は約5マイクロメートルである。次に、発生 した二次イオンを8 kV で引き出した後<sup>43</sup>Ca<sup>+</sup>.<sup>52</sup>Cr<sup>+</sup>. <sup>55</sup>Mn<sup>+</sup>を扇状磁場で質量分析し,3つの二次電子増倍 管で同時検出した。その後磁場の強さを変えて、<sup>53</sup>Cr<sup>+</sup> を<sup>52</sup>Cr<sup>+</sup>と同一の二次電子増倍管を用いて検出した. 分析はこの一連の流れを150サイクル繰り返し、分析 時間は1サイクル当たり最初の磁場(<sup>43</sup>Ca<sup>+</sup>, <sup>52</sup>Cr<sup>+</sup>, <sup>55</sup>Mn<sup>+</sup>)が2秒.次の磁場(<sup>53</sup>Cr<sup>+</sup>)が5秒である.隕石中 の炭酸塩に対しては粒子サイズに応じて複数のスポッ トを分析したものもある. 図3のイオン像は一次イオ ンビームを電流値20 pA. 直径1マイクロメートル以 下に絞り、試料表面を走査して、元素の二次元的分布 を調べたものである。

合成したカルサイトの標準試料はNanoSIMSで分析 した後、電子線マイクロアナライザ(EPMA)によっ てMn/Crの元素比を求め、NanoSIMSで得られた <sup>55</sup>Mn<sup>+</sup>/<sup>52</sup>Cr<sup>+</sup>と比較して相対感度係数を評価した.合 成カルサイトには1つの粒子内にMn/Cr比で約10% 程度の不均一性が存在するため、NanoSIMSで分析し たスポットの周囲をEPMAで分析した.EPMA分析 では加速電圧15 kV,電流値12 nAの電子線を用いた. 電子を照射することによる試料表面のダメージを避け るため、ビームを直径約20マイクロメートルにデフ ォーカスし、スポット1点につき分析時間は1分に制 限した.

隕石の分析で得られた<sup>53</sup>Cr/ $^{52}$ Cr, <sup>55</sup>Mn/ $^{52}$ Crは合成 したカルサイトの値で規格化した. 隕石中の炭酸塩は 通常Cr<sup>+</sup>のカウント数が非常に少ないため( $^{52}$ Cr<sup>+</sup> ~ 1 cps), 増倍管のノイズを補正する必要がある. ノイズ は検出器の直前にあるデフレクターの電圧を – 10 V ずらし, イオンを検出器に入れない状態で計数して見 積った. データにつける誤差は得られたシグナルの Poisson分布および標準試料の分析値の再現性に基づ いて計算した. 得られたデータは<sup>53</sup>Cr/ $^{52}$ Cr vs. <sup>55</sup>Mn/<sup>52</sup>Crのグラフにプロットした後,各データにつ いて縦軸,横軸両方の誤差を加味し,York法[17]に よって傾きとその誤差を見積もった.

## 3. 結果と考察

Mn, Crを含んだカルサイト標準試料に対してMn/ Cr相対感度係数((<sup>55</sup>Mn/<sup>52</sup>Cr)<sub>SIMS</sub>/(<sup>55</sup>Mn/<sup>52</sup>Cr)<sub>EPMA</sub>)を 求めたところ、0.63 ± 0.04 (2 σ)であった。また、先 行研究において標準試料として代用されていたサンカ ルロス・オリビンも分析したところ、相対感度係数は 0.95 ± 0.02であった。オリビンの相対感度係数は先 行研究のそれと一致しており(例えば[18]), 合成カル サイトと比べて約1.5倍大きな値を示した、このことは、 もしオリビンを標準試料として代用して<sup>55</sup>Mn/<sup>52</sup>Crの 較正を行った場合、炭酸塩の標準試料を用いた場合に 比べて値が2/3倍になってしまうことを示す. つまり. 先行研究で得られたアイソクロンは横軸の値が2/3倍 に縮小されている可能性があり、グラフの傾きは見か け上1.5倍の値になる、式1によるとグラフの傾きが 1.5倍になれば(<sup>53</sup>Mn/<sup>55</sup>Mn)₀の値も1.5倍になり、<sup>53</sup>Mn の半減期370万年を考慮すると年代は約220万年古く なってしまう.

次に隕石の分析結果について述べる.4つの隕石 (Murchison, Y791198, ALH83100, Sayama)に含ま れる炭酸の形成年代はそれぞれ4562.6 (+1.4/-1.9) Ma, 4563.9 (+1.1/-1.3) Ma, 4562.8 (+0.8/-1.0) Ma, 4563.9 (+0.6/-0.7) Maであった.それぞれの隕石について求 められた (<sup>53</sup>Mn/<sup>55</sup>Mn)<sub>0</sub>の値は,LEW86010隕石のPb-Pb絶対年代および (<sup>53</sup>Mn/<sup>55</sup>Mn)<sub>0</sub>の値を用いて絶対年 代に対応させている.年代はすべて誤差の範囲内で一 致し,平均4563.4 (+0.4/-0.5) Maであった.これは CAI形成から約500万年後に相当する(図4).

本研究で得られたデータは以下に述べる非常に重要 なことを示唆している。一つ目に、本研究では先行研 究のデータと比べて若い年代が得られている。特に、 Y791198とALH83100については先行研究で年代が報 告されているが、それらと比較して有意に年代が若い。 これは炭酸塩の標準試料を用いて<sup>55</sup>Mn/<sup>52</sup>Crのデータ を正しく較正した結果であると解釈できる。 ALH83100に関しては、オリビンとカルサイトのMn/ Cr相対感度係数の違いを補正すれば、先行研究[13]と



図4:本研究で得られたCMコンドライト中の炭酸塩の<sup>83</sup>Mn-<sup>53</sup>Cr 年代.本研究で得られた炭酸塩の形成年代は概して先行研 究のものより若い.この結果は先行研究でコンドライトお よびエコンドライトから得られた年代情報と合わせて,小 惑星の形成がCAI形成後から400万年は継続していたこと を示唆する.

本研究で得られた年代は誤差の範囲で一致する、しか しY791198に関しては、先行研究[12]と本研究で得ら れた年代はMn/Cr相対感度係数の差を補正しても一 致しない. この原因は現在のところ不明であるが、少 なくとも本研究によってY791198の炭酸塩はCAIよ りも古い形成年代を示す、という結果は否定された. そもそもCAI形成後すぐに小惑星が形成してしまう と、含まれている<sup>26</sup>Alの壊変エネルギーによる発熱で あっという間に天体は溶けてしまい、コア・マントル に分化した天体になってしまう[19]. おそらくエコン ドライトと呼ばれる分化隕石はそのような天体から飛 来したものであろう.したがって、始原的隕石である CMコンドライト中の炭酸塩が4563.4 Maに結晶化し たというのはその意味でもっともらしく、炭酸塩の標 準試料を用いて<sup>55</sup>Mn/<sup>52</sup>Crのデータを正しく較正すれ ば、矛盾のない、他の年代測定とも調和的な年代が得 られる.

二つ目に、本研究で得られた年代値は水質変成の度 合いに関わらずすべて4563.4 Maで一致している.こ れは先行研究で報告された年代データが約600万年の 幅をもつことと対照的な結果である.しかし先に述べ たように,異なる隕石で炭酸塩の形成年代が一致する ことは,水質変成の熱源である<sup>26</sup>Alの半減期が73万 年と短いこととむしろ整合的であろう.

以下では本研究で得られた年代と他のコンドライト グループおよびエコンドライトから得られている年代 情報とを関連づけて,初期太陽系における小惑星の形 成期間について論じてみたい(図4).

様々な隕石の中で、エコンドライトと呼ばれる隕石 は火成岩的組織を示し、分化した天体を起源にしてい る。また、一部の鉄隕石はそのような天体のコアを起 源にしている. 天体が溶融するための放射性熱源は <sup>26</sup>Alであり、その半減期から分化隕石の母天体は太陽 系形成後、つまりCAI形成後130万年以内に集積しな ければならない[19]. 一方,鉄隕石のW同位体組成か らは母天体内でのコア・マントル分離の時期が推定さ れており、CAI形成後150万年以内に分離が起こった とされる[20]. HED隕石と呼ばれる隕石グループはそ の反射スペクトルから小惑星 Vesta に類似する天体を 起源にしていると考えられており、様々なHED隕石 に対して<sup>53</sup>Mn-<sup>53</sup>Cr全岩アイソクロンが求められてい る。この年代はマントル内に存在するHED隕石のリ ザーバー間でMnとCrが分別した年代を表すと解釈 され. その年代は4565.6 Ma (CAI形成から約300万 年後)である[9]. 以上のように、少なくとも一部の小 惑星はCAI形成後百数十万年以内に形成し、まだ多 量に存在していた<sup>26</sup>Alを熱源として大規模溶融,コア・ マントル分化を経験したのである.

一方, 天体内の温度がそれほど上昇せず, 大規模な 溶融を経験しなかった始原的な小惑星はいつ形成され たのであろうか. コンドライトはそのような始原的な 小惑星を起源にしており, コンドルールやCAIとい った太陽系星雲で形成された物質を含んでいる. コン ドライトの中でも非平衡普通コンドライト(UOC)や CO, CRタイプの炭素質コンドライト(UOC)や CO, CRタイプの炭素質コンドライトなど熱・水質変 成をあまり受けなかった隕石に対しては, 含まれてい るコンドルールの<sup>26</sup>AL<sup>26</sup>Mg年代が報告されている[21]. それによるとUOCやCOコンドライトのコンドルー ルとCAIの形成年代差は200万年程度であり, CRコ ンドライトのコンドルールはそれよりやや若い. コン ドライト母天体はコンドルール形成後まもなく集積し たと考えられるため[21], 少なくともコンドルールの 年代が求められているようなUOC, CO, CRコンド ライトの母天体はCAI形成後200万年以降に形成し, <sup>26</sup>AIの熱源による加熱をあまり受けなかったのであろう.しかしながら、あくまでコンドルールの年代が求められているコンドライトに限っての話であって,熱・水質変成を受けてコンドルールの<sup>26</sup>AL<sup>26</sup>Mg年代がリ セットされてしまったようなコンドライトはその限り ではない.

そして、水質変成の度合いが比較的激しいCM、CI タイプの炭素質コンドライトに関しては、本研究で分 析したような変成による二次鉱物が母天体の集積とそ の後の変成のタイムスケールについて情報を与える. CMコンドライト中の炭酸塩は水質変成の早い段階で 形成し[22]、そのときの温度は室温程度であったと考 えられる[6,7].本研究で得られた炭酸塩の形成年代 はCAI形成後500万年であるため、母天体の形成は CAI形成後400万年ほどだったのであろう.<sup>26</sup>AIはそ のころにはほとんど壊変してしまっていて、CAI形成 時の1/50程度しかない.そのため、母天体はあまり 加熱されなかったのである.

このように、最新の初期太陽系年代学の結果は、分 化した小惑星が形成した後に始原的な小惑星が形成し た、という結論を導く.これは、一見不可解な結論の ように思われるかもしれない.なぜならば、分化した 天体ももともとは始原的な材料物質からできているに 違いないからである.おそらく、分化した小惑星が集 積した場所は太陽に近く、微惑星の面密度が大きいた め、小惑星は短時間に集積してまもなく溶融してしま ったのであろう[23].一方、太陽からの距離が遠い場 所ではそれより後に小惑星が集積し、あまり温度が上 がらなかったため始原的な特徴を保持していると考え られる.このように太陽から遠い場所に始原的な小惑 星が形成されることは、観測からわかっている小惑星 のタイプの空間分布とも整合的である.

以上のように考えると、小惑星の形成時期とその分 化あるいは変成との関係は、熱源である<sup>26</sup>Alの存在量 という観点から整合的に説明することができる.そし て、現在までに得られている年代情報を総合すると、 初期太陽系において、小惑星の形成は少なくともCAI 形成後400万年程度は継続していたことがわかる.今 後、分析技術の進歩に伴ってより高精度な年代情報が 飛躍的に増えていくことが期待される.コンドルール やCAIといった太陽系星雲中で形成した物質のみな らず,コンドライト中の二次鉱物やエコンドライトの 詳細な分析により,隕石母天体の集積とその進化につ いてより一層の知見を得ることができるであろう.

# 4. まとめ

4種類のCMコンドライトに含まれる炭酸塩に対し て<sup>53</sup>Mn-<sup>53</sup>Cr年代測定を行った.適切な標準試料を用 いて分析を行った結果,4つの隕石に含まれる炭酸塩 は4563.4(+0.4/-0.5)Maという形成年代を示した.こ れは先行研究と比べて有意に若い年代であり,水質変 成の熱源である短寿命放射性核種<sup>26</sup>Alの存在量と整合 的である.本研究によって不確定性の小さい炭酸塩の 形成年代が求められたことで,隕石母天体の分化・変 成の程度とその形成時期との関係は<sup>26</sup>Alの存在量とい う観点から整合的に説明できることがわかった.現在 までに報告されているエコンドライトとコンドライト に関する年代情報から,小惑星の形成は少なくとも CAI形成後400万年程度まで継続していたことが明ら かになった.

#### 謝 辞

本稿の査読者である横山哲也博士(東京工業大学)に は多くの的確なコメントをいただきました. Sayama 隕石のサンプルは米田成一博士(国立科学博物館),中 村智樹博士(東北大学)に提供していただきました.本 稿の内容について,比屋根肇博士(東京大学)には大変 有益なアドバイスをいただきました.本稿を執筆する 機会を与えてくださいました橘省吾博士(東京大学)に この場をお借りして御礼申し上げます.

### 参考文献

- Brearley, A. J., 2006, in Meteorites and the Early Solar System II, 587.
- [2] Tholen, D. J., 1989, in Asteroids II, 1139.
- [3] Kurahashi, E. et al., 2008, Geochim. Cosmochim. Acta 72, 3865.
- [4] Bouvier, A. and Wadhwa, M., 2010, Nature Geosci. 3, 637.
- [5] Kita, N. T. et al., 2005, in Chondrites and the

Protoplanetary disk, 558.

- [6] Clayton, R. N. and Mayeda, T. K., 1984, Earth Planet. Sci. Lett. 67, 151.
- [7] Guo, W. and Eiler, J. M., 2007, Geochim. Cosmochim. Acta 71, 5565.
- [8] Birck, J. L. and Allègre, C. J., 1985, Geophy. Res. Lett. 12, 745.
- [9] Lugmair, G. W. and Shukolyukov, A., 1998, Geochim. Cosmochim. Acta 62, 2863.
- [10] Amelin, Y. 2008, Geochim. Cosmochim. Acta 72, 221.
- [11] Endress, M. et al., 1996, Nature 379, 701.
- [12] Brearley, A. J. and Hutcheon, I. D., 2002, Meteorit.Planet. Sci. 65, #5185.
- [13] de Leuw, S. et al., 2009, Geochim. Cosmochim. Acta 73, 7433.
- [14] Tyra, M. A. et al., 2009, Lunar Planet. Sci. 40, #2474.
- [15] Urey, H. C., 1955, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 41, 127.
- [16] Sugiura, N. et al., 2010, Geochem. Journal 44, e11.
- [17] Ludwig, K. R., 2003, in Berkeley Geochronology Center Special Publication 4, 1.
- [18] Hoppe, P. et al., 2007, Meteorit. Planet. Sci. 42, 1309.
- [19] Hevey, P. J. and Sanders, I. S., 2006, Meteorit. Planet. Sci. 41, 95.
- [20] Qin, L. et al., 2008, Earth Planet. Sci. Lett. 273, 94.
- [21] Krot, A. N. et al., 2009, Geochim. Cosmochim. Acta 73, 4963.
- [22] Zolensky, M. E. et al., 1989, Icarus 78, 411.
- [23] Ghosh A. et al., 2006, in Meteorites and the Early Solar System II, 555.