

2012年度日本地球化学会賞受賞記念論文

隕石母天体の集積の歴史を明らかにする試み

杉 浦 直 治*

(2013年8月30日受付, 2013年10月14日受理)

A scenario on the accretion of meteorite parent bodies

Naoji SUGIURA*

* Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Accretion ages of meteorite parent bodies were estimated assuming homogeneous distribution of ^{26}Al in the solar nebula. In case of iron meteorites, the accretion ages are constrained by the core formation ages (W isotopic composition of metal samples). In case of achondrites, Al-Mg and Mn-Cr ages obtained from (bulk) isochrons and/or Mg isotopic compositions of Al-poor meteorites could be used for constraining accretion ages. In case of chondrite parent bodies, the accretion ages are mainly constrained by the peak metamorphic temperatures. Formation ages of secondary minerals such as carbonates also constrain accretion ages of C chondrite parent bodies. Using literature data of bulk $\varepsilon^{54}\text{Cr}$ anomalies in meteorites and the estimated accretion ages, a diagram that suggests increase in $\varepsilon^{54}\text{Cr}$ with time of accretion is constructed. This is interpreted as a result of injection of ^{54}Cr -rich grains into the solar nebula and the subsequent diffusive advection. Numerical simulations confirmed that the $\varepsilon^{54}\text{Cr}$ evolution obtained from meteoritic data can be well explained by an appropriate set of adjustable parameters (e.g. viscosity parameter = 10^{-3} and injection radius ~ 100 AU).

Key words: Meteorite parent body, Accretion, Thermal history, ^{54}Cr , ^{26}Al , Radiogenic ages

1. はじめに

原始太陽系において微惑星の集積がどのように起きたのかはいまだに明らかになっていない。理論的には、ダストの密度が高くなった太陽系の赤道面での重力不安定によって短時間で作る考え方と、小さなダストの集合体の衝突合体によって徐々に大きな天体を作る考えが提唱されているが、どちらも難点があり、長年にわたる研究にもかかわらず合意が得られていない。近年、天文の観測は急速に進歩し、星周円盤の寿命は数百万年程度であること、いくつかの円盤（星雲）は内側に穴（光学的に薄い場所）があり、それが拡大して星雲が散逸すること等が明らかになっており、微惑

星の集積の制約条件を与えていた。

ここでは隕石の持っている情報を用いて微惑星（隕石の母天体）の集積の歴史を明らかにすることを試みる。母天体の集積は各種隕石のさまざまな性質（形成年代、同位体組成、化学組成）に影響を及ぼすので、正しい歴史であればそのすべてを説明できなければならない。これは、測定されている隕石の性質の解釈が必ずしも一意的でないことを考えると、簡単なことではない。本稿では、筆者が合理的と考える解釈をつなぎ合わせて、比較的簡単な集積の歴史を構築してみる。ここで提唱する集積の歴史と過程は、隕石母天体の歴史と、安定同位体比異常に基づいている。この説は、大多数の隕石研究者のコンセンサスを得ているわけではないので、その弱点、問題点などについてもできるだけ詳しく説明したい。

* 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻
〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

2. ^{26}Al ：熱源と時計として

最近数年の間に隕石研究者の間で広く合意されるようになったことに、エイコンドライト (HED エイコンドライト, パラサイト, 鉄隕石等) がコンドライトより早く集積したということがある (Hevey and Sanders, 2006)。これは ^{26}Al (コンドライトの熱変成やエイコントライト母天体の火成活動の主な熱源) が星雲中に一様に分布していたという考えを受け入れれば、当然の帰結であり、初期太陽系における微惑星の集積を統一的に理解するための重要な事実である。現状では、各種隕石の集積場所で ^{26}Al の量がかなり (2倍をこえて) 変動していたと考える研究者もいる (Larsen *et al.*, 2011)。その根拠は (1) Al-Mg 系の年代間隔と U-Pb 系の年代間隔に矛盾があると考えられる、(2) 一般的の CAI と違って ^{26}Al を含まない FUN -CAI と呼ばれる CAI (Ca-Al-rich Inclusion) があること、である。しかし前者については Al-Mg 系の年代間隔と U-Pb 系の年代間隔に矛盾のないデータも存在する。後者については、FUN-CAI が太陽系が一様化する以前の、ごく初期のものと考えることができる。

エイコンドライトの母天体の方がコンドライトの母天体よりも早い時期に集積したことは、年代測定のデータに基づいて主張することもできる。多くのエイコンドライトは CAI から数えて 500 万年前後の形成年代を与える (Nyquist *et al.*, 2009)。また多くの鉄隕石の W 同位体比はその母天体のコアの形成は CAI から数えて、100~200 万年の間に起きたことを示唆している (Kruijer *et al.*, 2012; 2013)。したがってその母天体の集積はそれより早かった (CAI から数えて 150 万年より早い時点) ことになる。一方、始原的なコンドライト (CI や CM コンドライト) の炭酸塩の年代 (CAI から数えておよそ 500 万年後に形成) から、それらの母天体は CAI から数えて、およそ 350 万年後に集積したと考えられる (Fujiya *et al.*, 2012; 2013)。(もっとも、この集積年代の推定も、星雲内での ^{26}Al の分布の一様性に多少依存する。)

この様に ^{26}Al は太陽系に一様に分布していたと考えることで、いろいろなデータを整合的に説明できるので、本稿では ^{26}Al は太陽系に一様に分布していたと考えることにする。これを仮定すると、たとえば鉄隕石の母天体の場合、熱史を計算することにより、コアの形成温度を仮定すれば、いつ母天体が集積したかを定

量的に計算できる。またコンドライトの場合には、熱変成の時の最高到達温度から母天体の集積時期を求めることができる。普通コンドライトのように変成温度 (900度程度) の高いものについては、これはかなり精度よく求めることができる。なぜなら、 ^{26}Al の半減期は 72 万年程度なので、もし集積年代が 72 万年早かつたら、最高到達温度は 2 倍の 1,800 度まで上がることになり、コンドライトの性質と明らかに矛盾することになるからである。普通コンドライトの最高到達温度が ± 100 度の精度で決まっているとすると集積年代はおよそ ± 10 万年程度の精度で決まることになる。ただしこのような集積年代の推定にはいくつかの仮定がある。(1) 母天体の大きさは十分に大きくてほとんどすべての ^{26}Al が壊変するまで、天体の中心附近から熱が逃げないこと。この条件は、熱拡散率から推定すると、半径が 50 km 程度の天体であれば十分に満たしている。(2) それぞれの母天体のかなり深いところ (母天体全体の最高到達温度にほぼ到達したところ) から隕石のサンプルが得られていること。小惑星の反射光強度の自転に伴う変化から小惑星の形が解り、小惑星の表面には十分に深いクレーターがあることが知られている (Torppa *et al.*, 2003)。従って、小惑星の深部から隕石試料が得られていることが推測できる。(3) ^{26}Al 以外の熱源、たとえば水質変成に伴う発熱など、が十分に知られていること。水質変成に伴う発熱は炭素質コンドライトで重要であり、特にその反応速度はあまり正確に決まっていない。したがって炭素質コンドライトの変成時の最高到達温度から集積時期を推定すると誤差が大きくなる。幸い、水質変成に伴って 2 次的にできる鉱物の年代測定から、集積年代を制約できるので、炭素質隕石母天体の集積年代の精度も極端に悪いわけではない。(4) 母天体の集積は (少なくともその初期において) 十分に早いこと。すばやく集積を支持する論拠は (i) 普通コンドライトの場合、もしゆっくり集積していたら、中心部は溶けてエイコンドライトができてしまう。(ii) L コンドライトの場合、type 6 (変成度のもっとも高いもの) の割合は大きく、すばやく集積した場合の熱史の計算から求められる割合と矛盾しない。(iii) それぞれのコンドライトは独自の岩石学的特徴を保持しており、比較的短時間に集積が起きたことを示唆する。現時点ではすべての母天体の集積が速かったことを証明するのは難しいが、上記を論拠としてここではすばやく集積を仮定する。

石鉄隕石のパラサイトの場合には ^{26}Mg の不足（地球の標準物質に比べて）が報告されており（Baker *et al.*, 2012）早い時期に ^{26}Al を含むマグマがパラサイトの存在領域から取り去られたことを示唆している。これは早い時期にその母天体が集積したことを意味している。いくつかのエイコンドライト隕石母天体に関しては集積年代に対する年代学的な制約がない場合がある。この様な場合にも、 ^{26}Al の崩壊による加熱によってコアが分離したと考えると、集積年代の下限（最も遅い時期）を推定することができる。

この様にして求めた各種隕石母天体の集積年代をFig. 1の横軸に示す。若干の補足をすると、コンドライトについてはコンドルールの形成年代（Al-Mg系で測定したもの）の代表的な値と変成温度から推定した集積年代の間には良い相関があり、古いものから順に、普通コンドライト、CO コンドライト、CV コンドライト、CR コンドライトの順に並んでいる（Hutcheon *et al.*, 2009; Kita and Ushikubo, 2012; Tenner *et al.*, 2013）。コンドルールはコンドライト集

積前に形成したはずのもので、これは当然予想される結果である。また始原的エイコンドライトの場合には母天体上の爆発的噴火によって、Alを含む玄武岩的組成のマグマが母天体から失われた可能性がある（Wilson *et al.*, 2008）。これは熱源である ^{26}Al が部分的に母天体から失われる所以、熱史に影響を及ぼす。詳細は省略するが、ユーレイライトやロードラナイトなどの始原的エイコンドライトの集積年代の推定にはこの様な Al の量の減少を考慮に入れている。

3. 原始太陽系星雲の進化

次に、母天体集積のころの原始太陽系星雲の状況について考える。（また、母天体集積の場所についても考えるが、これはかなり不確定性の大きな問題である。）この問題を解く鍵は安定同位体比異常にある。隕石に見られる安定同位体比異常の代表的なものとして、酸素同位体比異常と ^{54}Cr の異常が挙げられる。前者はおそらく、光解離の自己遮蔽効果に起因している（Yurimoto and Kuramoto, 2004）。酸素の主なキャ

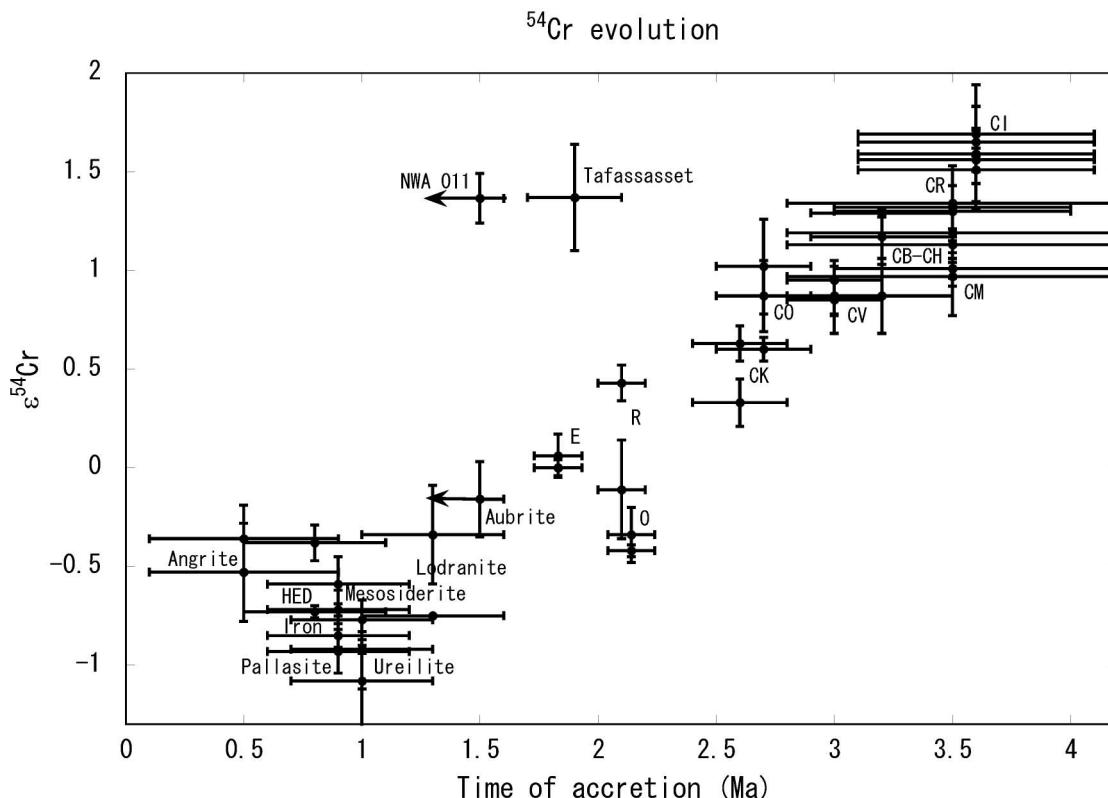


Fig. 1 $\varepsilon^{54}\text{Cr}$ of bulk meteorites are plotted against the accretion ages of the parent bodies. Except for the NWA 011 achondrite grouplet and Tafassasset, a positive correlation between $\varepsilon^{54}\text{Cr}$ and accretion ages is observed, suggesting increase in $\varepsilon^{54}\text{Cr}$ with time in the solar nebula. Leftward arrows indicate that the errors on the older side cannot be specified.

リアーとして内惑星領域では、 H_2O ガス、COガス、CAI、ケイ酸塩がある。これらの混合と、コンドルール形成時などの高温の場での同位体交換反応によって、各種隕石の酸素同位体比は説明されるはずであるが、現在のところ簡単な構図は描けていない。一方で ^{54}Cr の異常（Table 1）は超新星（おそらくIa型）起源の太陽系前駆物質のCr酸化物を起源としていることが知られている（Dauphas *et al.*, 2010; Qin *et al.*, 2011）。各種隕石中の異常は、その混入量の違いによって説明できる。一般的に言えば隕石中の ^{54}Cr 等の安定同位体比異常（他にもCaやOsなどいろいろな元素に見られる）の解釈としては、原始太陽系星雲の時間的变化、原始太陽系星雲の空間的不均質（太陽系前駆物質の混ざり方の不均質）、原始太陽系星雲内での加熱（たとえばコンドルール形成時の）による前駆物質の消失、母天体内の熱変成・水質変成に伴う物質の移動、等が考えられる。Fig. 1は ^{54}Cr の異常を母天体の集積年代に対してプロットした図である。 ^{54}Cr の異常は地球の $^{54}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$ 比からの差を 10^{-4} の単位で表している。地球はかなり大きな天体なので地球形成時の1AU付近の微惑星の平均的な値を代表していると考えられる。2つのマイナーな隕石グループ（エイコンドライトと始原的エイコンドライト）を除くと ^{54}Cr の異常は集積時期とともに変化していることが解る。これは、原始太陽系星雲の時間的变化（超新星起源の太陽系前駆物質の混ざりかたが、時間とともに増えた）によって説明することができる。Fig. 2に原始太陽系星雲への前駆物質混入の模式図を示す。この星雲が適度な乱流混合を行っていると考えてシミュレーションを行うと（Fig. 3），混入した前駆物質は、拡散によって広がりつつ、太陽に向かって落ちていくことが解る。この様な原始太陽系星雲では空間的不均質は短時間で消滅し、物質は良く混合される。彗星のちりに、太陽に近いところでできたと考えられる高温凝縮物が存在することは、空間的不均質は短時間で解消されるとのシミュレーション結果を支持している。Crの酸化物は酸化的な状況下では熱変成に耐性があるので、星雲中や母天体中の熱変成によって、隕石に見られる ^{54}Cr の異常を作ることは難しい。したがって、Fig. 1の解釈としては、形成中の原始太陽系星雲の遠方に混入した超新星起源の ^{54}Cr キャリアーが移流・拡散によって小惑星帯にやってきて、そこで形成される母天体に混入したと考えるのが、もっとも自然かつ合理的と思われる。

ここで2つの問題を考える必要がある。1つはFig. 1でトレンドに乗らないエイコンドライト（NWA 011グループ）・始原的エイコンドライト（Tafassasset）が存在することである。素直に考えるならば、これは ^{26}Al がたくさん存在している早い時期に ^{54}Cr をたくさん持った母天体が存在していたということを意味する。そうだとすると同じ時期に ^{54}Cr の少ない母天体と ^{54}Cr の多い母天体が形成されたことになり、Figs. 2 and 3で示した描像とは相いれない。（これはFigs. 2 and 3の描像の致命的欠陥かも知れない。）NWA 011グループとTafassassetに共通の特徴は両者ともマイナーなグループであることであり、これは重要な意味を持っているかもしれない。NWA 011と似た隕石は7つ見つかっているがすべてペアである可能性が高い（Meteorite Bulletin data base）。Tafassassetは1つの隕石だけで独立のグループを形成している。このことを考慮に入れると、上述とは別の解釈が可能になる。Bottke *et al.* (2006) で指摘されているように、エイコンドライト母天体（鉄隕石を含む）は太陽系の内側で形成され、重力的に散乱されて小惑星帯に移動したと考えられる。同様にNWA 011やTafassassetの母天体も ^{26}Al のたくさんある、早い時期に太陽系の内側で形成され、重力的に散乱されて離心率の大きな、小惑星帯を横切る軌道になって、小惑星帯を通過しているときに、 ^{54}Cr に富んだ物質を獲得した可能性がある。この様な軌道は、円軌道に近い小惑星との衝突頻度が高いので、その母天体はいずれは衝突破壊を経験し、小さな破片だけが小惑星帯に残ることが考えられる。この様に考えると、NWA 011やTafassassetがマイナーなグループであることが理解できる。

もう1つの問題はCAIの ^{54}Cr の過剰である。Birck and Allegre (1984) などによりCAIは~7εの ^{54}Cr の過剰を示すことが知られている。もしこれが始原的炭素質コンドライトと同様の、超新星起源の異常だとすると、 ^{54}Cr の異常の時間変化はとても複雑なものになってしまいFigs. 2 and 3で示した描像では説明できない。しかしながら Kitts *et al.* (2003) は月のsoilの中に ^{54}Cr の過剰を見出し、これは太陽大気中の核破碎反応で作られたものが、太陽風として月のsoilに打ち込まれたものと解釈した。これが正しければ、CAI（太陽の近くで作られたと考えられる）にも同様の、核破碎反応起源の ^{54}Cr が入っていたとしても不思議ではない。より詳しい、CAI中の ^{54}Cr 異常の研究が必要であるが、現時点ではCAI中の ^{54}Cr の過剰は

Table 1 $\varepsilon^{54}\text{Cr}$ in bulk meteorites.

meteorite	$\varepsilon^{54}\text{Cr} +/\!- 2\sigma$ error	reference
magmatic iron	-0.85+/-0.06	Trinquier et al., 2007
pallasite	-0.72+/-0.10	Trinquier et al., 2007
	-0.93+/-0.11	Qin et al., 2010a
mesosiderite	-0.72+/-0.03	Trinquier et al., 2007
	-0.59+/-0.14	Yamashita et al., 2005
ureilite	-1.08+/-0.25	Larsen et al., 2011
	-0.77+/-0.10	Qin et al., 2010b
	-0.92+/-0.02	Yamakawa et al., 2010
	-0.92+/-0.20	Shukolyukov and Lugmair, 2006b
HED	-0.73+/-0.03	Trinquier et al., 2007
	-0.38+/-0.09	Qin et al., 2010a
angrite	-0.36+/-0.17	Trinquier et al., 2007
	-0.53+/-0.25	Larsen et al., 2011
aubrite	-0.16+/-0.19	Trinquier et al., 2007
NWA 011	1.37+/-0.03	Bogdanovski and Lugmair, 2004
acapulcoite-lodranite	-0.75	Göpel and Birck, 2010
	-0.34+/-0.25	Larsen et al., 2011
Tafassasset	1.37 +/- 0.27	Göpel et al., 2009
E chondrite	0.00+/-0.04	Trinquier et al., 2007
	0.06+/-0.11	Qin et al., 2010a
O chondrite	-0.42+/-0.03	Trinquier et al., 2007
	-0.34+/-0.14	Qin et al., 2010a
R chondrite	0.43+/-0.09	Qin et al., 2010a
	-0.11+/-0.25	Larsen et al., 2011
CK chondrite	0.63+/-0.09	Trinquier et al., 2007
	0.33+/-0.12	Qin et al., 2010a
CO chondrite	0.6+/-0.06	Trinquier et al., 2007
	0.87+/-0.18	Qin et al., 2010b
	1.02+/-0.24	Shukolyukov and Lugmair, 2006a
CV chondrite	0.86+/-0.09	Trinquier et al., 2007
	0.87+/-0.06	Qin et al., 2010a
	0.95+/-0.10	Qin et al., 2010a
	0.85+/-0.17	Shukolyukov and Lugmair, 2006a
CB-CH chondrite	1.17+/-0.14	Trinquier et al., 2007
	0.87+/-0.19	Shukolyukov and Lugmair, 2006a
	1.29+/-0.02	Yamashita et al., 2010
CM chondrite	1.01+/-0.06	Trinquier et al., 2007
	0.97+/-0.20	Qin et al., 2010a
	1.13+/-0.21	Shukolyukov and Lugmair, 2006a
Tagish Lake	1.34+/-0.19	Yamashita et al., 2005
	1.19+/-0.15	Petitat et al., 2011
CR chondrite	1.30+/-0.21	Trinquier et al., 2007
	1.32+/-0.11	Qin et al., 2010a
CI chondrite	1.56+/-0.12	Trinquier et al., 2007
	1.65+/-0.07	Qin et al., 2010a
	1.54+/-0.15	Shukolyukov and Lugmair, 2006a
	1.56+/-0.06	Petitat et al., 2011
	1.69+/-0.25	Larsen et al., 2011

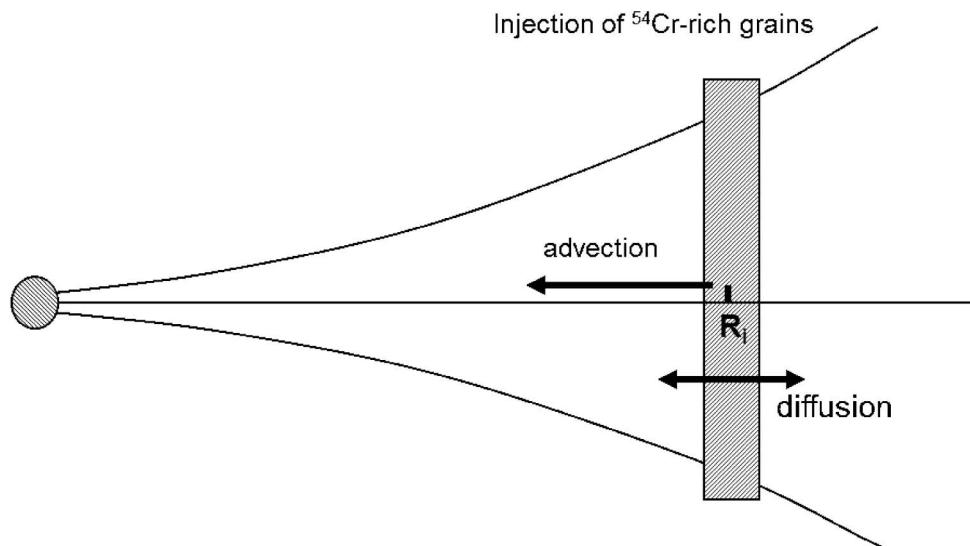


Fig. 2 A schematic figure on the evolution of $\varepsilon^{54}\text{Cr}$ in the solar nebula. ^{54}Cr -rich grains are injected at a distance R_i and spread in the nebula by diffusion and advection.

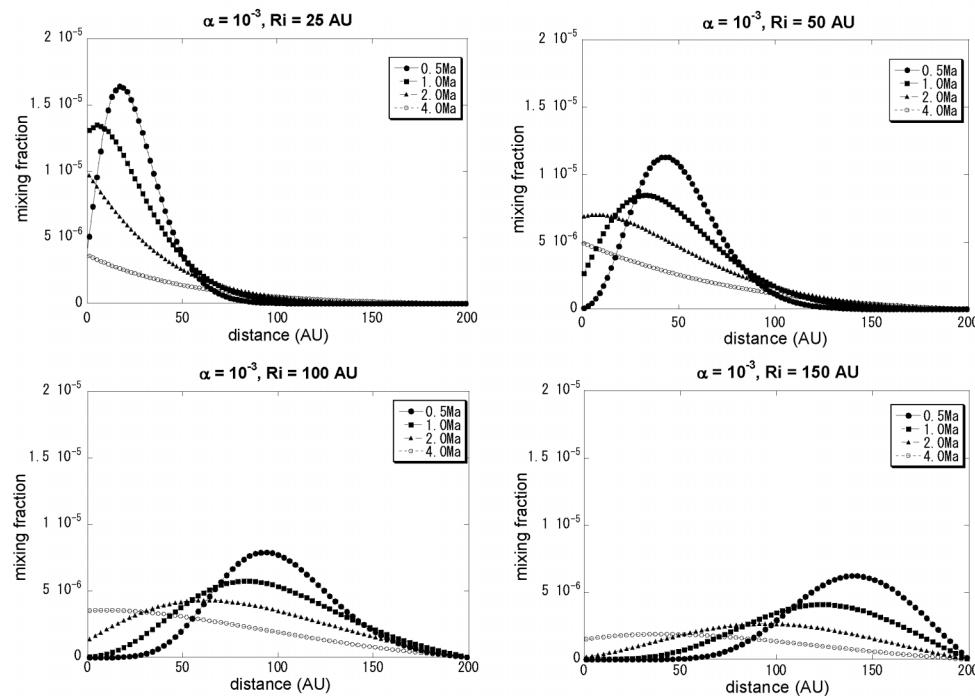


Fig. 3 Four examples of $\varepsilon^{54}\text{Cr}$ evolution (shown as mixing fraction profiles at 0.5, 1.0, 2.0 and 4.0 Ma after injection) for various injection radii and a constant viscosity parameter α . The ^{54}Cr mixing fraction at the time of injection is 10^{-4} . The asteroidal belt is located at $2\sim 4$ AU where mixing fractions are nearly constant with respect to position. The best fit to the meteoritic data is obtained for the injection radius of 100 AU.

本稿で示している初期太陽系進化の描像にとって致命的な問題ではないと考えている。

母天体集積の場所については状況証拠を積み重ねて考えていく。(1) 小惑星帯の小惑星の赤外反射スペクトルは系統的に太陽からの距離に従って変化している。(2) Bottke *et al.* (2006) で示唆されるようにエイコンドライト母天体は太陽に近い場所でできた後、重力的に散乱して小惑星帯に入った可能性がある。

(3) 天文学的観測によれば、transitional disk と呼ばれる星周円盤では内側に光学的に薄い穴があり、それが時間とともに拡大すると考えられている。(4) Fig. 1が示すように、エイコンドライトはコンドライトより早い時期に形成した。以上の様な情報を総合すると、エイコンドライトは太陽に近いところ（金星・地球・火星の形成領域）で早い時期に作られ、重力的に散乱して小惑星帯に移動したと考えられる。Vesta (HED 母天体), angrite 母天体などはこの散乱過程で破壊・消失することなく生き残った例外的なものと考えられる。NWA 011, Tafassasset や anomalous eucrites と呼ばれる Asuka 881394や Ibitira などは散乱過程で破壊した母天体のかけらと考えられる。また、ユーレイライトは衝突によって破壊したが再集積した例と考えられる。時とともに、集積場所は外側に移動し、エンスタタイトコンドライトや普通コンドライトは小惑星帯の内側で作られる。その後に、炭素質コンドライトは小惑星帯の外縁部で集積する。小惑星帯には大きな惑星が存在しないので、これらのコンドライト母天体の軌道は乱されることなく、現在でも、形成時の軌道をほぼ保持していると考えられる。

4. まとめ

隕石が記憶している様々な情報を正しく解釈できれば、太陽系の初期の歴史をかなり詳細に理解できる。本稿では²⁶Al が太陽系に一様に分布していたと仮定して、隕石母天体の歴史を計算し、隕石の持っている情報（たとえば鉄隕石の母天体中でのコアの分離の時期、あるいはコンドライト母天体の熱変成時の最高到達温度）と突き合わせることによって、隕石母天体の集積の時期を推定した。この集積の時期と各隕石の⁵⁴Cr の異常の間には良い相関があるよう見えるので、これを、形成途中の太陽系星雲に超新星起源の⁵⁴Cr のキャリアーが注入された結果と解釈した。

太陽系に放射性同位体²⁶Al が均質に分布していた一方で、安定同位体⁵⁴Cr が不均質に分布していたという

ことは簡単には説明できないが、太陽系形成に関する重要な事実である。²⁶Al や⁵⁴Cr とともに、放射性同位体⁶⁰Fe の量も同時に説明しなければならない。隕石中には²⁶Al はたくさんあり太陽系形成の直前に作る必要がある。一方⁶⁰Fe はごくわずかしかなく、直前に作る必要はない。⁵⁴Cr は安定同位体なので、その意味ではその形成に時間的制約はないが、太陽系に不均質に混ざっていることを説明するには、太陽系形成のころに作る必要がある。理論的には、Meyer & Zinner (2006) によれば⁵⁴Cr の様な中性子に富む同位体は Ia 型の超新星で作られた可能性が高い。しかし同様に Ia 型超新星で作られるはずの⁶⁰Fe は原始太陽系ではごくわずかしか存在しない。²⁶Al は II 型超新星で作られるが、II 型超新星では同時に⁵⁴Cr や⁶⁰Fe もできてしまう。この様な状況で、現在のところ、これら3つの同位体の存在量をきれいに説明することはできない。

母天体集積年代の推定にはいろいろな（確かではないかもしれない）仮定が使われている。また NWA 011の様に、集積の時期と各種隕石の⁵⁴Cr の異常の間の相間に従わない隕石もある。さらに酸素同位体比、微量元素組成、酸化還元状態など、ここでは使わなかった、重要な情報もある。特に、原始太陽系のメインイベントであったはずのコンドルールの形成は本稿のシナリオには含まれていない。将来的には、これらの不確定な仮定、使っていない情報などを精査して、初期太陽系の歴史を確固たるものにする必要がある。

謝 辞

本研究の歴史の計算は藤谷渉さんによるものです。セミナーのメンバーの比屋根肇さん、佐野有司さんはいろいろ有益なコメントをいただきました。深く感謝いたします。

引用文献

- Baker, J. A., Schiller, M. and Bizzarro, M. (2012) ²⁶Al-²⁶Mg deficit dating ultramafic meteorites and silicate planetesimal differentiation in the early Solar System? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **77**, 415-431.
- Birck, J.-L. and Allegre, C. J. (1984) Chromium isotopic anomalies in Allende refractory inclusions. *Geophysical Research Letters*, **11**, 943-946.
- Bogdanovski, O. and Lugmair, G.W. (2004) Manganese-Chromium isotope systematics of basaltic achondrite Northwest Africa 011. (abstract #1715) *35th Lunar and Planetary Science Conference*. CD-ROM.

- Bottke, W. F., Nesvorný, D., Grimm, R. E., Morbidelli, A. and O'Brien, D. P. (2006) Iron meteorites as remnants of planetesimals formed in the terrestrial planet region. *Nature*, **439**, 821–824.
- Dauphas, N., Remusat, L., Chen, J. H., Roskosz, M., Papanastassiou, D. A., Stodolna, J., Guan, Y., Ma, C. and Eiler, J. M. (2010) Neutron-rich chromium isotope anomalies in supernova nanoparticles. *Astrophysical Journal*, **720**, 1577–1591.
- Fujiya, W., Sugiura, N., Hotta, H., Ichimura, K. and Sano, Y. (2012) Evidence for the late formation of hydrous asteroids from young meteoritic carbonates. *Nature Communications*, **3**, 627.
- Fujiya, W., Sugiura, N., Sano, Y. and Hiyagon, H. (2013) Mn-Cr ages of dolomites in CI chondrites and the Tagish Lake ungrouped carbonaceous chondrite. *Earth and Planetary Science Letters*, **362**, 130–142.
- Göpel, C. and Birck, J. -L. (2010) Mn/Cr systematics: A tool to discriminate the origin of primitive meteorites? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **74**, Goldschmidt Conference Abstract A348.
- Göpel, C., Birck, J. -L. and Manhes, G. (2009) U/Pb and Cr isotope study of the Tafassasset meteorite. (abstract) *Meteoritics & Planetary Science*, **44**, A 83.
- Hevey, P. J. and Sanders, I. S. (2006) A model for planetesimal meltdown by ^{26}Al and its implications for meteorite parent bodies. *Meteoritics & Planetary Science*, **41**, 95–106.
- Hutcheon, I. D., Marhas, K. K., Krot, A. N., Goswami, J. N. and Jones, R. H. (2009) ^{26}Al in plagioclase-rich chondrules in carbonaceous chondrites: Evidence for an extended duration of chondrule formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **73**, 5080–5099.
- Kita, N. T. and Ushikubo, T. (2012) Evolution of protoplanetary disk inferred from ^{26}Al chronology of individual chondrules. *Meteoritics & Planetary Science*, **47**, 1108–1119.
- Kitts, B. K., Podosek, F. A., Nichols, R. N. Jr., Brannon, J. C., Ramezani, J., Korotev, R. L. and Jolliff, B. L. (2003) Isotopic composition of surface-correlated chromium in Apollo 16 lunar soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **67**, 4881–4893.
- Kruijer, T. S., Sprung, P., Kleine, T., Leya, I., Burkhardt, C. and Wieler, R. (2012) Hf-W chronometry of core formation in planetesimals inferred from weakly irradiated iron meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **99**, 287–304.
- Kruijer, T. S., Fischer-Godde, M., Kleine, T., Sprung, P., Leya, I. and Wieler, R. (2013) Neutron capture on Pt isotopes in iron meteorites and the Hf-W chronology of core formation in planetesimals. *Earth and Planetary Science Letters*, **361**, 162–172.
- Larsen, K. K., Trinquier, A., Paton, C., Schiller, M., Wielandt, D., Ivanova, M. A., Connelly, J. N., Nordlund, Å., Krot, A. N. and Bizzarro, M. (2011) Evidence for magnesium isotope heterogeneity in the solar protoplanetary disk. *Astrophysical Journal Letters*, **735**, L37 (7 pp).
- Meyer, B. S. and Zinner, E. (2006) Nucleosynthesis. In: *Meteorites and the Early Solar System II* (ed. D. S. Lauretta & H. Y. McSween, Jr.), Univ. of Arizona Press, Tucson, AZ, pp. 69–108.
- The Meteoritical Society (2013.10.18) Meteorite Bulletin data base. <http://www.lpi.usra.edu/meteor/>
- Nyquist, L. E., Kleine, T., Shih, C. -Y. and Reese, Y. D. (2009) The distribution of short-lived radioisotopes in the early solar system and the chronology of asteroid accretion, differentiation, and secondary mineralization. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **73**, 5115–5136.
- Petit, M., Birck, J. -L., Luu T. H. and Gounelle, M. (2011) The Chromium isotopic composition of the ungrouped carbonaceous chondrite Tagish Lake. *The Astrophysical Journal*, **736**, 23.
- Qin, L., Alexander, C. M. O'D., Carlson, R. W., Horan, M. F. and Yokoyama, T. (2010a) Contributors to chromium isotope variation of meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **74**, 1122–1145.
- Qin, L., Rumble, D., Alexander, C. M. O'D., Carlson, R. W., Jenniskens, P. and Shaddad, M. H. (2010b) The chromium isotopic composition of Almahata Sitta. *Meteoritics & Planetary Science*, **45**, 1771–1777.
- Qin, L., Nittler, L. R., Alexander, C. M. O'D., Wang, J., Stadermann, F. J. and Carlson, R. W. (2011) Extreme ^{56}Cr -rich nano-oxides in the CI chondrite Orgueil - Implication for a late supernova injection into the solar system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **75**, 629–644.
- Shukolyukov, A. and Lugmair, G. W. (2006a) Manganese-chromium isotope systematics of carbonaceous chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, **250**, 200–213.
- Shukolyukov, A. and Lugmair, G. W. (2006b) The Mn-Cr isotope systematics in the ureilites Kenna and LEW 85440. (abstract #1478) *37th Lunar and Planetary Science Conference*. CD-ROM.
- Tenner, T. J., Ushikubo, T., Nakashima, D., Kita, N. T. and Weisberg, M. K. (2013) ^{26}Al in chondrules from the CR 3.0 chondrite Queen Alexandra Range 99177: A link with O isotopes. *44th Lunar and Planetary Science Conference*, 2010.pdf.
- Torppa, J., Kaasalainen, M., Michałowski, T., Kwiatkowski, T., Kryszczyńska, A., Denchev, P. and Kowalski, R. (2003) Shapes and rotational properties of thirty asteroids from photometric data. *Icarus*, **164**, 346–383.
- Trinquier, A., Birck, J-L. and Allegre, C. J. (2007) Widespread ^{54}Cr heterogeneity in the inner solar system. *The Astrophysical Journal*, **655**, 1179–1185.
- Wilson, L., Goodrich, C. A. and Van Orman, J. A. (2008) Thermal evolution and physics of melt extraction on the ureilite parent body. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **72**, 6154–6176.

- Yamakawa, A., Yamashita, K., Makishima, A. and Nakamura, E. (2010) Chromium isotope systematics of achondrites: Chronology and isotopic heterogeneity of the inner solar system bodies. *The Astrophysical Journal*, **720**, 150–154.
- Yamashita, K., Ueda, T., Nakamura, N., Kita, N. and Heaman, L. M. (2005) Chromium isotopic study of mesosiderite and ureilite: Evidence for $\epsilon^{54}\text{Cr}$ deficit in differentiated meteorites. *Antarctic Meteorites*, **29**, 100–101.
- Yamashita, K., Maruyama, S., Yamakawa, A. and Nakamura, E. (2010) ^{53}Mn - ^{53}Cr chronometry of CB chondrite: Evidence for uniform distribution of ^{53}Mn in the early solar system. *The Astrophysical Journal*, **723**, 20–24.
- Yurimoto, H. and Kuramoto, K. (2004) Molecular cloud origin for the oxygen isotope heterogeneity in the solar system. *Science*, **305**, 1763–1766.