

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540525

研究課題名(和文) 初期太陽系史の完成を目指して

研究課題名(英文) aiming at comprehensive understanding of the early solar system

研究代表者

杉浦 直治 (Sugiura, Naoji)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80196716

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)： ^{26}Al の太陽系の分布を知る目的で、Al-Mg年代とMn-Cr年代を比較するのが一番です。このMn-Cr年代を求めるために標準試料を作成し、Mn/Crの相対感度決定し、CVコンドライトの鉄に富むオリビンの年代を求めました。これらはCV母天体の集積は遅い時期に起きたことを示唆します。しかしここで得られた年代は精度が十分ではなく ^{26}Al の太陽系における一様分布を確認することはできませんでした。一方、 ^{26}Al が一様に分布していると考えると、隕石母天体の集積時期と ^{54}Cr の同位体異常に相関が見られます。これは簡単な太陽系進化モデルで説明でき、従って ^{26}Al の一様な分布を示唆します。

研究成果の概要(英文)：The best way of checking the uniform distribution of ^{26}Al in the early solar system is to compare Al-Mg ages and Mn-Cr ages. To this end, I made standard samples for Mn/Cr measurements and obtained Mn-Cr ages from Fe-rich olivine grains in CV chondrites. The results suggest late formation of the CV parent body. But the precision of the ages was not good enough for judging the uniformity of ^{26}Al . If one assumes that ^{26}Al were homogeneously distributed in the solar system, then a good correlation between the accretion ages of meteorite parent bodies and the ^{54}Cr in bulk meteorites emerges. This could be well explained by a simple model of solar disk evolution and does suggest that the ^{26}Al was homogeneously distributed in the early solar system.

研究分野：惑星科学

キーワード：太陽系 隕石 同位体 一様性

1. 研究開始当初の背景

過去10年間に我々の初期太陽系の歴史の理解は隕石の分析によって格段に進歩しました。そのかなりの部分は消滅核種を使った年代測定の進歩によっています。また、 ^{54}Cr に代表される安定同位体異常の測定技術の進歩も重要な寄与をしています。これらの新たな知見を総合することによって、原始太陽系がどのように進化したのかを理解できるようになってきました。

Al-Mg系やHf-W系の年代測定の進歩によって、分化した小惑星(エイコンドライトや鉄隕石の母天体)が早い時期に集積したことが解りました。これは、早い時期に集積した天体はより多くの ^{26}Al 熱源を保持し、結果として、より高温を経験して、分化したことを示唆しています。また炭素質隕石中で2次的に形成された鉱物のMn-Cr系の年代は若く、始原的な炭素質隕石母天体が、強く変成された普通コンドライト母天体や火成活動を経験したエイコンドライト母天体よりも、後の時期に集積したことを示しました。これらの結果(古いものほど強く加熱されている)は ^{26}Al が太陽系に一樣に分布していたことを示唆します。一方で ^{54}Cr 等の安定同位体異常は、初期太陽系の不均質性を明らかにし、それと年代の情報を組み合わせることによって太陽系の進化を定量的に理解できるようになってきました。

消滅核種を使った年代測定の進歩により、原始太陽系で起きた色々な事象(コンドライトの形成や隕石母天体の集積)の年代をかなり正確に決めることができるようになりました。しかしこの様にして得られた初期太陽系の歴史は大まかには正しいと思われませんが、年代の決定にはまだいくつかの問題点があります。特にLarsen et al. (Ap.J. (2011) 735, L37)は、年代決定の主役であり、もっとも重要な熱源でもある ^{26}Al が太陽系に一樣に分布していなかったと主張しています。もし ^{26}Al が太陽系に一樣に分布していなかったら、Al-Mg系は年代測定につかえないことになり、初期太陽系の歴史の理解は根底から覆る可能性があります。この問題はAl-Mg系と他の年代測定系の年代を比較したときに、誤差を超えて時間間隔(消滅核種では相対年代しか決められません)の矛盾が存在するように見えるために起きることです。例えばCAIとエイコンドライトの形成年代の時間差をAl-Mg系とPb-Pb系で計ったときに(データの選び方にもよりますが)誤差を超えて矛盾が見えることがあります。その解釈の1つは、 ^{26}Al が太陽系に不均質に存在していたというものです。別の解釈は、それぞれの年代測定系は独自の閉鎖温度を持つために、異なった年代を示しているのであって、 ^{26}Al の非一様性が原因ではないという考えです。実際、

最近のWimpenny et al (2013)によれば、Asuka881394 エイコンドライトのPb-Pb年代はAl-Mg, Mn-Cr年代よりおよそ100万年古いのですが、これは閉鎖温度の違いと解釈できる様です。いずれにしても、この問題を解決するには、2つ以上の年代測定系で色々な隕石構成鉱物の年代を測定し、矛盾があるのかどうかを調べる必要があります。そのためには半減期が比較的短いために、年代がより正確に決められるMn-Cr年代とAl-Mg年代を比較するのが最善です。私はこれまでに鉄隕石、エイコンドライト、コンドライトの炭酸塩など色々なもののMn-Cr系の年代測定を行っており、この様な研究計画を提案するのに最も適した研究者と自負し、本研究を提案しました。

2. 研究の目的

初期太陽系の歴史を解明する上で、消滅核種 ^{26}Al を使った年代測定は重要な役割を果たしてきました。この年代測定の前提は ^{26}Al が太陽系に一樣に分布していることです。しかし、最近、 ^{26}Al は太陽系に一樣には分布していなかったという主張がなされて、大きな問題になっています。本研究計画では、 ^{26}Al が太陽系に一樣に存在していたかどうかを明らかにすることを主目的とし、初期太陽系の歴史の完成を目指しました。

3. 研究の方法

2次イオン質量分析計(NanoSIMS-50)を用いてMn-Cr系年代を測定します。Mn-Cr系の測定にはオリビンや炭酸塩を用います。確度の高いMn-Cr系年代を測定するためには、隕石中の鉱物と似た組成の標準試料を作成する必要があります。当初はエイコンドライトの測定を目指したのですが標準試料の作成が難しく、測定対象は炭素質コンドライト母天体の水質変成で作られたオリビンに限られました。測定対象と同じ組成を持つ標準試料の作成がこの研究のもっとも重要な部分になります。

この年代測定と並行して、隕石母天体の集積年代を熱史を通して求めることを行いました。これによって間接的に熱源である ^{26}Al が原始太陽系に一樣に分布していたかどうかを調べることができます。

4. 研究成果

(1) Fayalite 標準試料の作成と相対感度の決定

標準試料の作成は物性研究所のFZ電気炉を使っておこなった。雰囲気はArあるいはAr+H₂でおこない、温度は1200~1300°C、最高温度滞在時間は1時間程度でおこなった。出発物質は鉄、シリコン、マグネシウム、マンガンおよびクロムの酸化物である。作成した試料の反射電子顕微鏡写真の例を図1に示す。試料は不均質であり理想的なものとは言い難い。オリビンの組成も試料によって

(図 1a) また一つの試料でも場所によって (図 1b) 異なっている。試料ごとの違いは、微妙な酸素分圧の違いによって、金属鉄あるいはスピネルが析出するために起きている。場所による違いは、急冷時の分別結晶化作用の影響と、高温で部分融解している時の melt の移動によって起きている。

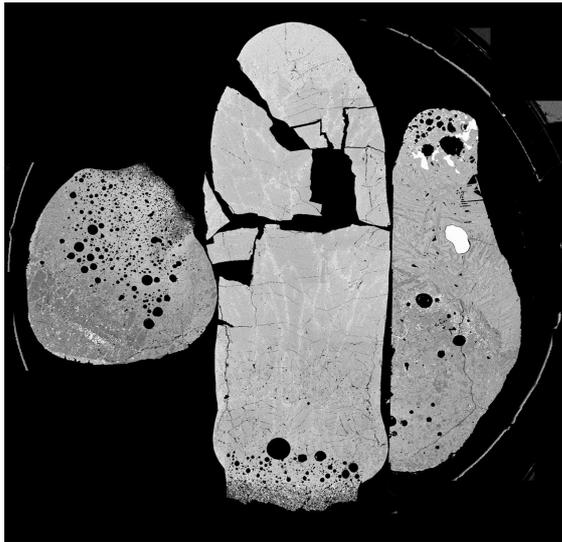


図 1 a. fayalite 標準試料

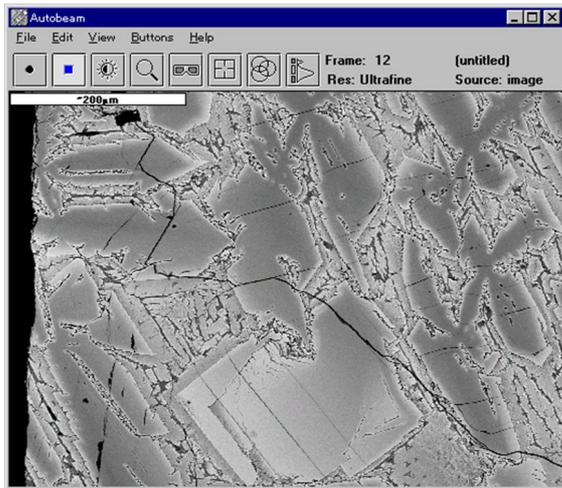


図 1 b. 標準試料の拡大図

理想的ではないが nano SIMS で測定を行うためには、およそ 10 ミクロンの一様な組成の領域があれば良いので、そのような spot は何か所か存在していた。SEM - EDS あるいは EPMA で組成分析を行い、Fa60 から Fa100 の組成と十分な Mn と Cr の量があり、組成のほぼ一様な場所を選んだ (図 2)。(大部分のオリビンは Mg が多く、Cr が少ないものであった。) Mn/52Cr 比は 1.7 程度のもので多いが鉄に富んだものでは 5 をこえるようなものもあった。これらのスポットで nano SIMS の測定を行った。この SIMS 測定のと、測定が狙った場所で行えたことを確認し(うまくできなかった例もいくつかあった)、SEM-EDS の測定を spot の周囲 6 か所で行い、

平均値と分散を求めた (図 3)。

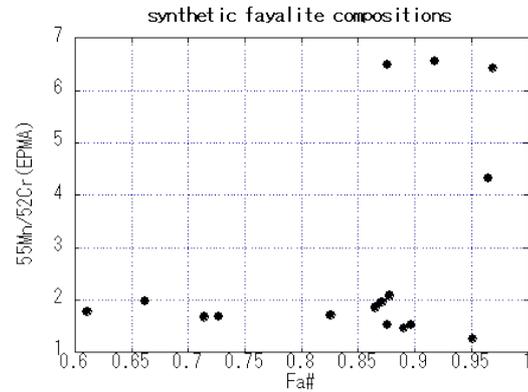


図 2 標準試料の組成

図 3 に示すように全体として nano SIMS の相対感度 $(Mn+/Cr+)/ (Mn/Cr)$ は 2.2 程度である。しかし詳しく見ると測定日によって違いがあり (異なるシンボルで示してある) 測定条件の微妙な変化によって相対感度が変わること示している。また縦軸の値につけられている誤差はもっぱら EDS (EPMA) のばらつきのせいであり、SIMS 測定の誤差はごく小さなものである。Mn/Cr 相対感度 ~2.2 という値は以前に CAMECA-6f で求めた ~1.6 より有意に大きな値である。このことも、相対感度は測定条件に強く依存することを示唆している。同じ session で測定した相対感度は Fa# にあまりよらないように見える。実際には、例えば ~Fa#95 の 4 つのデータは有意な違いがあるが、これも微妙な測定条件の変化に起因しているかもしれない。と言うわけで、結論として、相対感度は Fa#60 から Fa#100 までではほとんど組成に依らないと考えられる。しかし、測定条件依存性は非常に強いので、年代測定の際には、標準試料と隕石試料を同じ条件で測定することが必要となる、また、測定条件依存性を小さくするためには、おそらくビームサイズを少し大きくするか、あるいはラスターさせて測定することが望ましい。また、炭酸塩の場合と同様に、相対感度は測定時間 (クレーターの深さ) に依存するので、決まった時間だけ presputter をして決まった時間だけ測定をすることが必要である。

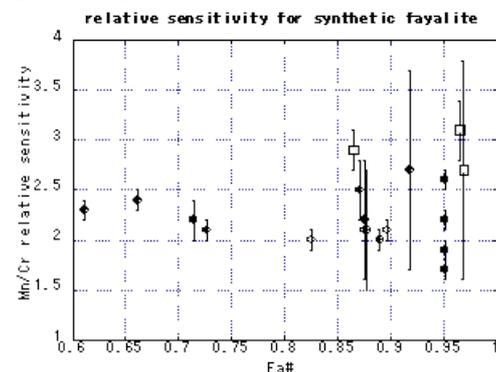


図 3 . Mn-Cr 相対感度

(2) CV コンドライトの fayalite の年代測定

Vigarano の fayalite の BSE image を図 4 に示す。Vigarano の場合にはこれが代表的な大きさである。Yamato 86009 の場合にはもう少し大きな 50 ミクロンを超える大きさのものがあるが、多くの場合はクラックが入っているので分析できる領域は 20 ミクロン程度である。

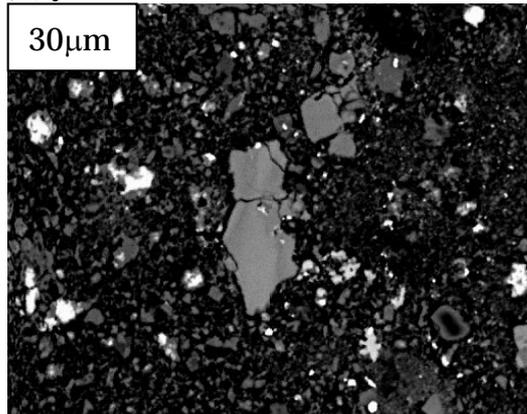


図 4 Vigarano の fayalite(画面の中央)

図 5、6 はそれぞれ Yamato 86009 と Vigarano のアイソクロンを示す。Mn/52Cr 比は Yamato 86009 で最大 2000000、Vigarano で最大 400000 であった。従って、53Cr/52Cr の異常は十分に大きい、EM の background の補正は正確に行う必要がある。

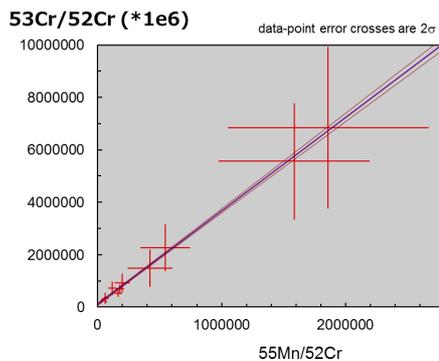


図 5 . Yamaato86009 のアイソクロン

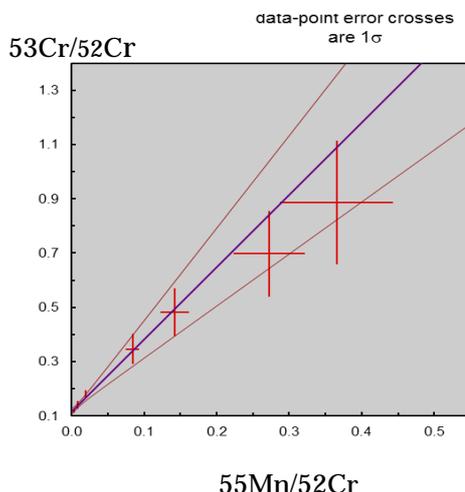


図 6 . Vigarano のアイソクロン

(53Mn/55Mn)₀ は Yamato 86009 で $(3.564 \pm 0.088) \times 10^{-6}$ 、Vigarano で $(2.66 \pm 0.75) \times 10^{-6}$ であった。ただし相対感度の不確定さはこの誤差に含まれていない。この 2 つの初期値は 2 シグマエラーでぎりぎり重ならない。Vigarano の方が熱変成度が高いので、あとまで open system であったと解釈できるかもしれないし、相対感度の誤差も含めるならば、ほぼ同じころにできたと考えることもできる。これは Vigarano の誤差を小さくすれば解決する問題である。

(3) CM コンドライトの炭酸塩年代との比較
CM コンドライトの炭酸塩の (53Mn/55Mn)₀ は $(2.66 \pm 0.74) \times 10^{-6}$ から $(3.40 \pm 0.79) \times 10^{-6}$ であり (Fujiya et al., 2012) これは今回得られた fayalite の年代とほぼ同じである。CV と CM の集積年代は CAI から数えて、それぞれ (3.0 ± 0.2) Ma と $(3.5 \pm 0.7 / -0.5)$ Ma と考えているので、CV の fayalite の方が早い時期にできて不思議ではない。これもまた誤差を小さくできれば解決する問題である。ただし、炭酸塩の Mn/52Cr 比は最大で 140000 程度であるので、精度を上げるのは簡単ではない。その意味では、fayalite の測定は精度を上げやすいので、将来的に有望と言える。

Mn-Cr 系の年代測定をまとめると、再現性の良い測定をするには、測定条件の決定が非常に重要である。また現在のデータは誤差が大きいため、26Al の一様性を議論することはできないが、将来的には可能性があると考えている。

(4) 初期太陽系の進化

26Al の初期太陽系中の一様分布を確認することは現状ではできていないが、それを支持する状況証拠として、次の 2 つを挙げられます。(a) エイコンドライトの固化は早い時期に起き、従ってその母天体は 26Al のたくさんある早い時期に集積した。(b) 炭素質隕石は若い年代を持ち、従って 26Al が少なくなった遅い時期に集積した。これらは 26Al が一様に分布していたことを示唆します。一方で 54Cr は原始太陽系 (各種隕石間で) に非一様に分布しています。私は、これを形成中の太陽系星雲に 54Cr が注入されたと考えて、この 54Cr の非一様性を説明するモデルを構築しました。(Sugiura & Fujiya, 2014)。他の研究者は、これとは異なった解釈 (一様な星雲中で微粒子を分離する) を提唱していますが、いずれにしても、この非一様性を使って太陽系の進化をより良く理解できるようになると思います。

(5) 国内外における位置づけ

本研究の根幹をなす fayalite の Mn-Cr 年代測定は海外でも注目されている分野であり、McKibbin et al. (2014, 2015) や Doyle et al. (2013) などと同様な研究がおこなわれている。前者は異なったタイプの 2 次イオン質量分析計を使用しているため、比較は難しい。

一方 Doyle は Cameca の装置を使っているの
で相対的には比較がしやすい。彼女の報告に
よれば相対感度は 1.6 程度で鉄の多いときは
fayalite の組成に依らない。この絶対値は
本研究の 2.2 程度とは異なるが、相対感度が
分析条件に敏感であることを考えれば納得
のいく結果である。また、fayalite の組成依
存性は本研究と調和的である。

(6) 今後の展望

原始太陽系における 26Al の一様性について
は Mn-Cr の年代測定を achondrites に適用し
て Al-Mg 系の年代測定と比較するのが最良と
思われます。また安定同位体に基づく初期太
陽系の進化に関しては、現在多くの元素の同
位体比異常が報告されつつあるところであ
り、その解釈・モデリングは近い将来に解決
されるべき重要な課題です。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に
は下線)

[雑誌論文](計 10 件)

N. Sugiura and W. Fujiya, Correlated
accretion ages and $\epsilon^{54}\text{Cr}$ of meteorite
parent bodies and the evolution of the
solar nebula. *Meteoritics & Planetary
Sci.* 査読有, 49, 2014, 772-787.

C.E. Jilly, G.R. Huss, A.N. Krot, K.
Nagashima, Q-Z. Yin and N. Sugiura,
53Mn-53Cr dating of aqueously formed
carbonates in the CM2 lithology of the
Sutter's Mill carbonaceous chondrite.
Meteoritics & Planet. Sci. 査読有, 49,
2014, 2104-2117.

M. Koike, Y. Ota, Y. Sano Y, N.
Takahata and N. Sugiura, High-
spatial resolution U-Pb dating of
phosphate minerals in Martian
meteorite Allan Hills 84001, *Geochem.*
J., 査読有, 48, 2014, 423-431

N. Sugiura, Morphological features of
Chelyabinsk meteorite. *Spaceguard
Research*, 査読有, 6, 2014, 36-38.

Y. Sano, M. Takada, N. Takahata, W.
Fujiya and N. Sugiura, Ion microprobe
Al-Mg dating of single plagioclase
grains in an Efremovka chondrule.
Geochem. J., 査読有, 48, 2014, 133
-144.

W. Fujiya, N. Sugiura, Y. Sano, and H.
Hiyagon, Mn-Cr ages of dolomites in
CI chondrites and the Tagish Lake
ungrouped carbonaceous chondrite,
Earth Planet. Sci. Lett., 査読有, 362,
2013, 130-142.

M. Kimura, N. Sugiura, T. Mikouchi, T.
Hirajima, H. Hiyagon, and Y.
Takehana, Eclogitic clasts with
omphacite and pyrope-rich garnet in
the NWA 801 CR2 chondrite, *American*

Mineralogist, 査読有, 98, 2013, 387
-393.

S.J. McKibbin, T.R. Ireland, Y. Amelin,
P. Holden and N. Sugiura, A
re-evaluation of the Mn-Cr
systematics of olivine from the angrite
meteorite D'Orbigny using Secondary
Ion Mass Spectrometry. *Geochim.
Cosmochim. Acta*, 査読有, 123, 2013,
181-194.

杉浦直治, 隕石母天体の集積の歴史を明
らかにする試み。地球化学, 査読有, 47,
2013, 183-191 .

W. Fujiya, N. Sugiura, H. Hotta, K.
Ichimura, and Y. Sano, Evidence for
the late formation of hydrous asteroids
from young meteoritic carbonates,
Nature Communications, 査読有, 3,
2012, 627.

[学会発表](計 9 件)

N. Sugiura and M. Kimura,
Reheating and Cooling of
mesosiderites. Lunar Planetary Sci.
Conf., 2015 年 3 月 19 日、Woodlands
(USA).

K. Ichimura and N. Sugiura,
Preparation of Synthetic dolomite for
determination of Mn/Cr relative
sensitivity. Lunar Planetary Sci. Conf.,
2015 年 3 月 17 日、Woodlands (USA).
杉浦直治, 初期太陽系を同位体比を使っ
て理解する。質量分析学会同位体比部会,
2014 年 11 月 27 日、彩香の宿一望、(茨
城県・つくば市)

C.E. Jilly, G.R. Huss, K. Nagashima,
Q.-Z. Yin, N. Sugiura and A.N. Krot,
In situ radiometric dating of
aqueously formed carbonates in
Sutter's Mill. 76th Meteoritical Society
Meeting. 2013 年 7 月 29 日 8 月 2 日、
Edmonton (Canada).

N. Sugiura and M. Kimura, A
primitive mesosiderite NWA 1878.
Japan Geoscience Union Meeting,
2013 年 5 月 19 日 25 日、幕張メッセ、
(千葉県・千葉市).

N. Sugiura, A preliminary
petrographic study of several
mesosiderites. 44th Lunar Planetary
Sci. Conf., 2013 年 3 月 18 日-3 月 22 日。
Woodlands (USA).

杉浦直治, 初期太陽系の年代学・物質進
化に関する研究、日本地球化学会, 2012
年 9 月 10 日 ~ 2012 年 9 月 13 日、九州
大学、(福岡県・福岡市)

N. Sugiura and W. Fujiya, Accretion
ages of meteorite parent bodies and its
correlation with ^{54}Cr anomalies: An
update. 75th Meteoritical Soc. Meeting,

2012年8月12日~2012年8月17日,
Cairns (Australia).
N. Sugiura and W. Fujiya, 54Cr
anomalies and accretion ages of
meteorite parent bodies. Japan
Geoscience Union Meeting, 2012年5
月20日~2012年5月25日, 幕張メッ
セ(千葉県・千葉市)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉浦 直治 (SUGIURA, Naoji)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：80196716

(2) 研究分担者

高畑 直人 (TAKAHATA, Naoto)
東京大学・大気海洋研究所・助教
研究者番号：90245059

(3) 連携研究者

()

研究者番号：