

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03720

研究課題名(和文) 初期太陽系Al-Mg年代学の再検討

研究課題名(英文) Reevaluation of Al-Mg chronology in the early Solar System

研究代表者

比屋根 肇(Hiyagon, Hajime)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：70192292

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：初期太陽系年代学において重要なアルミニウム-マグネシウム( $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$ )年代測定法の有効性を再検証するため、二次イオン質量分析法(SIMS)および湯堂結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)を用いて、熱変成度の低い普通(L)コンドライトNWA7926中のコンドルールに対するMg同位体分析とAl/Mg比の分析をおこなった。鉱物分離の不調により、アイソクロンを求めることはできなかったが、得られたMg同位体比( $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ 比)は地球に比べて10-20 ppmも低い傾向があった。得られた結果をもとに、初期太陽系における $^{26}\text{Al}$ 分布の均一性の問題について詳細に議論をおこなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、隕石など固体試料からイオンカラム法によりマグネシウムを分離・精製し、誘導結合プラズマ質量分析法を用いてマグネシウム同位体組成を精密分析する手法を開発した。達成された分析精度(数ppm)・再現性の良さは世界のトップレベルであり、惑星物質科学の今後の進展に大きな寄与が期待できる。開発された手法をLコンドライトNWA7936中のコンドルールに適用し、精密なマグネシウム同位体分析に成功した。普通コンドライトのコンドルールについての精密なマグネシウム同位体データが得られたのは初めてである。本研究の結果をもとに、初期太陽系における $^{26}\text{Al}$ の分布に関する有意義な議論をおこなった。

研究成果の概要(英文)：In order to evaluate the applicability of the  $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  chronometer in the early Solar System, magnesium isotope and Al/Mg analyses were conducted using ICP-MS and SIMS for chondrules in a primitive L chondrite NWA7926. Due to insufficient mineral separation, isochrons for individual chondrules could not be obtained in this study. However, the obtained Mg isotope data were very precise and this L chondrite chondrules tend to show very low  $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$  ratios of 10-20 ppm below the terrestrial Mg isotopic ratio. Based on the observed low Mg isotopic ratios, homogeneity/heterogeneity of  $^{26}\text{Al}$  in the early Solar System is discussed.

研究分野：惑星科学、同位体宇宙化学

キーワード：アルミニウム $^{26}$  マグネシウム同位体 誘導結合プラズマ質量分析法 二次イオン質量分析法 初期太陽系 同位体不均一 コンドルール 難揮発性包有物

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

消滅核種であるアルミニウム 26 ( $^{26}\text{Al}$ )は半減期 70 万年でマグネシウム 26 ( $^{26}\text{Mg}$ ) に放射壊変する。 $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  系は時間分解能の高い『時計』として、初期太陽系年代学において重要な役割を果たしてきた。しかし、最近、Al-Mg 年代学が成り立つ前提となっている『初期太陽系における  $^{26}\text{Al}$  分布 (より正確にはアルミニウム同位体比  $^{26}\text{Al}/^{26}\text{Al}$  の分布) の均一性』の仮定が成り立たない可能性が指摘され、 $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  系の『時計』としての有用性に疑問符がつくようになった。現在も、 $^{26}\text{Al}$  分布の均一性を支持する論文と疑問視する論文が出され、論争が続いている。本研究は、初期太陽系の物質進化を探る上で重要な役割を担ってきた Al-Mg 年代学における仮定『初期太陽系における  $^{26}\text{Al}$  の分布の均一性』を、新しい手法で再検討し、Al-Mg 年代学の適用範囲を明らかにすることを目的としている。

#### (1) SIMS によるコンドルールと CAI の相対年代

$^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  相対年代測定法では、通常、太陽系最古の固体物質 CAIs が年代基準として用いられる。その初生( $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ )<sub>0</sub> 比は二次イオン質量分析法(SIMS)によって精力的に求められており(たとえば、MacPherson et al., 1995)、近年では誘導結合プラズマ型質量分析法(ICP-MS)によって、精密な値が、 $(5.23 \pm 0.13)\text{E-5}$  (Jacobsen et al., 2008)、あるいは $(5.252 \pm 0.019)\text{E-5}$  (Larsen et al., 2011)と求められている。一方、コンドルールに関しては分析可能な鉱物相(アノーサイト等)のサイズが小さく(通常数  $\mu\text{m}$  以下)、最近に至るまでほとんどの分析は SIMS によって行われてきた。SIMS 分析の結果によると、コンドルール形成は CAIs 形成より 100 ~ 150 万年遅く始まり、その後 300 年以上にわたる年代分布があることが示されている(たとえば、Kita et al., 2000, 2013; Kita and Ushikubo, 2012; Pape et al., 2019)。

#### (2) 初期太陽系における $^{26}\text{Al}$ 分布の均一性に対する疑義

最近になって、個々のコンドルール(全岩)に対するマルチコレクター型 ICP-MS (MC-ICP-MS) による Mg 同位体の高精度分析が行われるようになってきた(Olsen et al., 2016)。その結果、隕石グループごとにコンドルールの Mg 同位体比に違いがあることが見え始め、原始太陽系における  $^{26}\text{Al}$  分布の不均一性についても議論されるようになってきた。

Larsen et al. (2011)は、難揮発性包有物 (CAIs) とアメーバオリピン (AOAs) の全岩アイソクロンを求め、その y 切片から精密な初生 Mg 同位体比 ( $\mu^{26}\text{Mg}^*$ )<sub>0</sub> の値として、 $15.9 \pm 1.4$  (ppm) を求めた。一方で CAIs の ( $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ )<sub>0</sub> =  $(5.252 \pm 0.019)\text{E-5}$  が初期太陽系全域に分布していたと仮定した場合に予想される ( $\mu^{26}\text{Mg}^*$ )<sub>0</sub> 値は、太陽組成の  $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg} = 0.101$  を元に計算すると -38 (ppm) である。Larsen et al. (2011)は、CAIs-AOAs アイソクロンから求めた ( $\mu^{26}\text{Mg}^*$ )<sub>0</sub> =  $-15.9 \pm 1.4$  (ppm) と計算から求められた ( $\mu^{26}\text{Mg}^*$ )<sub>0</sub> = -38 (ppm) との違いは原始太陽系内での  $^{26}\text{Al}$  分布の不均一性を示すものと解釈した。この解釈によると、地球領域での ( $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ )<sub>0</sub> は CAIs のおよそ半分であったことになる。また、Schiller et al. (2015)は 3 つのアングライト隕石の初生 ( $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ )<sub>0</sub> と Pb-Pb 絶対年代測定から、CAIs 形成時の ( $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ )<sub>0</sub> を計算し、( $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ )<sub>0</sub> =  $(1.33 \pm 0.21 / -0.18)\text{E-5}$  を得た。即ち、アングライト形成領域においては  $^{26}\text{Al}$  の存在度が CAIs 形成領域のおよそ 1/4 程度であった可能性を指摘した。

最近、Connelly et al. (2012)、および Bollard et al. (2017, 2018)は、個々のコンドルールに対して Pb-Pb アイソクロンよりその形成年代を求めた。その結果、コンドルールと CAIs の間に年代差がないものが見つかり、コンドルール形成は CAIs 形成と同時に始まり約 400 万年継続したという結果を得た。この結果は、コンドルールと CAIs の形成年代の間に約 100 ~ 150 万年のギャップがあるという SIMS による  $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  相対年代の結果と矛盾する。彼らはこの矛盾を  $^{26}\text{Al}$  分布の不均一性が原因であると主張した。一方、『 $^{26}\text{Al}$  分布の均一性』を支持する論文もいくつか出されている。例えば、Mg 安定同位体に異常がある可能性を指摘した Wasserburg et al. (2012)、 $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  相対年代測定法と  $^{53}\text{Mn}$ - $^{53}\text{Cr}$  相対年代測定法、 $^{182}\text{Hf}$ - $^{182}\text{W}$  相対年代測定法との整合性を指摘した Kruijjer et al. (2014)、さらにそれらを引用しつつ多角的に議論している Kita et al. (2013)等である。現在、両方の立場から議論が続いている。

### 2. 研究の目的

#### (1) 本研究の目的

本研究の目的は、初期太陽系における『 $^{26}\text{Al}$  分布の均一性』の問題に新しい手法でアプローチをおこない、 $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  系を用いた初期太陽系年代学を再検証することにある。従来の Al-Mg 年代学では、主として二次イオン質量分析法 (SIMS) を用いた研究により、アイソクロンの傾きから相対年代が議論されてきた (Kita et al., 2000, Geochim. Cosmochim. Acta 64, 3913-3922 ほか)。しかし、SIMS の分析精度 (~1%) の関係から y 切片である初生マグネシウム同位体比 ( $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ ) についてはほとんど議論されてこなかった。本研究の最大の特徴は、アイソクロンの『傾き』と『y 切片』の両方に着目する点である。実は、 $^{26}\text{Al}$  の初期分布が均一であったな

らアイソクロンの『傾き』と『y切片』の間には逆相関がみられるはずである。本研究では、この理論的予測を用いて、初期太陽系の Al-Mg 年代学の再検証を試みる。この検証をおこなうためには、きわめて高精度 (10 ppm レベル) なマグネシウム同位体分析が必要である。そのため、SIMS に加えて誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) を使用する。アイソクロンの『傾き』と『y切片』の両方に注目し、その相関を調べた研究は世界的にほとんど例がない。また、高精度の ICP-MS 分析により個々のコンドルールの鉱物アイソクロンを求めた例もほとんどない。そこが本研究の独自性・創造性のすぐれた点であり、成功すれば初期太陽系の物質進化の解明に重要な貢献をなすことが期待される。

### 3. 研究の方法

従来の Al-Mg 年代学では、アイソクロンの傾きから相対年代が議論されてきたが、本研究では y 切片である初生マグネシウム同位体比 ( $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ ) にも注目する。そして、 $^{26}\text{Al}$  の初期分布が均一であった場合『傾き』と『y切片』の間には逆相関が見られるはずである、との理論的予測に基づき、Al-Mg 年代学の再検証を試みる。分析手法としては二次イオン質量分析法 (SIMS) と誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) を併用する。主な分析ターゲットは始原的隕石中のコンドルールと難揮発性包有物である。

試料: 本研究では特に、従来分析のおこなわれていなかった普通コンドライト中のコンドルールの分析に力を注いだ。具体的には、熱変成度の低い Lコンドライトである NWA 7936 (L3.15) から抽出したコンドルールを用いて、SIMS による Al-Mg 同位体分析、および ICP-MS による全岩分析と鉱物分離を行った上での同位体分析 (Al-Mg アイソクロンを求める分析) を試みた。

分析装置: SIMS に関しては、東京大学大気海洋研究所設置の NanoSIMS 50 (CAMECA 社) を用いた。ICP-MS に関しては、東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻設置の Neptune Plus および iCAP Q (いずれも Thermo Scientific) を用いた。前者はマグネシウム同位体精密測定に、後者は Al/Mg 比などの元素分析に用いた。本研究計画では特に共同研究者を設けていないが、SIMS 分析については、佐野有司 教授と高畑直人 助教、ICP-MS 分析については飯塚毅 准教授にいろいろとご指導いただいた。

ICP-MS (Neptune Plus) によるマグネシウム同位体分析においては、地球のマグネシウム同位体スタンダード DSM-3 (純粋の金属マグネシウムを溶かした溶液)、および二次的なスタンダード BCR-2 と JB-2 (いずれも玄武岩) を用いることにより再現性を検証し、約 10ppm の精度・確度でマグネシウム同位体比が分析できていることが確認された。ICP-MS 分析の感度は十分に高く、現在の分析手法で必要最小量のマグネシウムから計算すると、原理的には直径約 200 $\mu\text{m}$  の比較的小さなコンドルールまで分析可能である。したがって、比較的大きなミリメートルサイズのコンドルールであれば、オリビン斑晶とメソスタシス (斑晶の間を埋めるガラス質の相) に鉱物分離を行っても、マグネシウム同位体組成を正確に測るだけの量を確保することは可能だと考えた。つまり、鉱物分離がうまくいけば、コンドルールに対する鉱物アイソクロン (内的アイソクロン) が引ける可能性がある。オリビンや輝石などはアルミニウムをほとんど含まないため、できるだけ純粋のオリビン・輝石を含む相と、それ以外の相 (メソスタシスなど) に分けることが重要である。

### 4. 研究成果

#### (1) NanoSIMS によるコンドルールの Al-Mg 同位体分析 (予察的研究)

はじめに、熱変成度の低い普通コンドライト NWA 7936 (L3.15) の薄片を用いて、二次イオン質量分析計 (NanoSIMS @東大: 大気海洋研) によるコンドルールの Al-Mg 同位体分析をおこない、Al-Mg アイソクロン年代についての予備的研究をおこなった。ここでは、初期太陽系における  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  分布の均一性を仮定する。分析対象は、3つのコンドルール (CH2, CH3, CH5) で、それぞれ4点ずつ Al/Mg 比の高い領域 (メソスタシス中のアノーサイト的な組成を持つ領域) を選んで分析をおこなった。SIMS の分析条件は、一次イオン:  $^{16}\text{O}^-$ 、ビーム径: 2  $\mu\text{m}$ 、イオン強度: 200pA、分析した二次イオン:  $^{26}\text{Mg}$ 、 $^{25}\text{Mg}$ 、 $^{24}\text{Mg}$ 、 $^{27}\text{Al}^{++}$ 、分析時間: 1 サイクル 200 秒  $\times$  100 サイクルである。同一の分析条件で、三宅島アノーサイト (Al/Mg 比が既知) を分析し、イオン強度比  $^{27}\text{Al}^{++}/^{24}\text{Mg}^+$  を元素比  $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$  に換算するための『相対感度係数』を求めた。得られたマグネシウム同位体比に質量依存同位体分別の補正をおこない、(過剰  $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ ) 比 (基準値からのずれの千分率  $\delta^{26}\text{Mg}$  で表記) を計算した。データを Al-Mg アイソクロンダイヤグラム ( $\delta^{26}\text{Mg}$  vs  $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$ ) 上にプロットし、相関線の傾きから初生 ( $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ ) 比を求めた。

結果は、3つのコンドルールとも明瞭な過剰  $^{26}\text{Mg}$  の存在を示し、初生 ( $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ ) 比は、CH2:  $(1.33 \pm 0.41) \text{E-5}$ 、CH3:  $(1.67 \pm 0.94) \text{E-5}$ 、CH5:  $(1.10 \pm 0.71) \text{E-5}$  (誤差  $2\sigma$ ) と、3つともコンドルールとしてはかなり高い値を示した。これを CAIs との相対年代に直すと、CH2:  $1.34 +0.38/-0.27$  (My)、CH3:  $1.11 +0.83/-0.45$  (My)、CH5:  $1.52 +1.04/-0.50$  (My) である。

#### (2) ICP-MS による Mg 同位体分析法の確立

まず、地球の標準試料を用いて、誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) によるマグネシウム

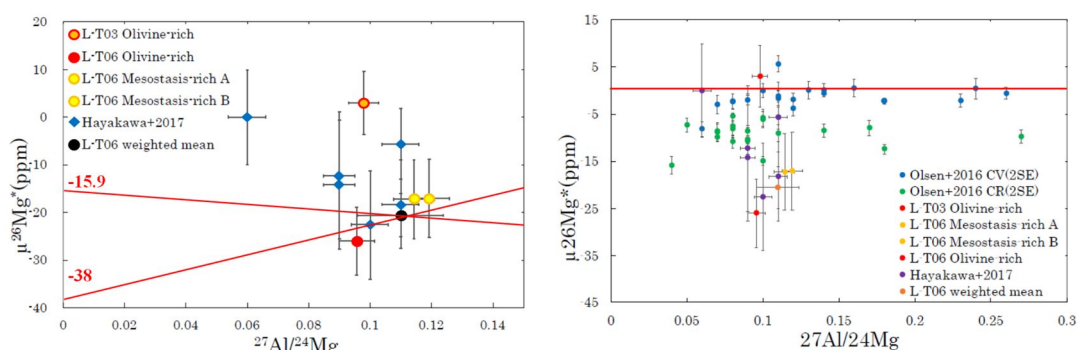
(Mg)の同位体分析の精度・再現性のチェックをおこなった。具体的には、酸に溶かした岩石試料からの Mg の抽出・精製過程の最適化と ICP-MS の分析シーケンスの最適化をおこなった。Mg 以外の妨害イオンは、Yajun et al., (2014) によって開発されたカラムクロマトグラフィーを用いて、Mg イオンおよび他の妨害イオンの抽出曲線を作成し、両者の分離条件を確定した。この基礎実験の過程で、各イオンの抽出される位置が分析の回ごとに変動することがわかった。そのため、純粋の Mg イオンを分離するためには、分析ごとに丁寧に抽出曲線を作成し、分離条件を決め直す必要がある。本研究では、最終的に、すべてのコンドルール分析について丁寧に抽出曲線を作成する作業をおこない、分析の安定性・再現性を確かなものとするに成功した。予備的実験の段階(早川ら)では、抽出曲線の作成は最初の一度だけであり、抽出曲線が変動しないとの仮定のもとに Mg イオンの分離・精製をおこなっていた。その場合には、分析精度の信頼性がやや落ちることになる。(ただし、Mg の回収率が 90%以上であれば誤差の範囲内で結果に影響を与えないことは確認されている。)

### (3) ICP-MS によるコンドールのマグネシウム同位体分析結果

上記の新たに開発した手法を用いて、始原的な L コンドライトである Northwest Africa (NWA) 7936 隕石 (L 3.15) 中のコンドールの Mg 精密同位体分析および Al/Mg 比の分析をおこなった。隕石ブロックから分離したコンドール試料を荒く粉碎したのち、実体顕微鏡下で色の濃淡を用いてオリビン結晶(薄い色の粒子)とマトリックス(濃い色の粒子)への鉱物分離を試みた。鉱物分離により、Al/Mg 比が大きくことなる 2 つ以上のフラクションが得られれば、それらの精密な Mg 同位体分析により、非常に正確なコンドールの鉱物アイソクロンを求めることが可能になるはずである。しかも、『傾き』から年代の議論が、『y 切片』からコンドール形成時の初期 Mg 同位体組成の議論が可能になるはずである。(しかし、後述するように、結果的に鉱物分離は非常に不完全であることが明らかになった。)

### (4) NWA7936 (L3.15) 中のコンドールの Mg 同位体分析結果

本研究で分析したコンドールのデータ、および本研究に先立つ予備的研究(早川, 2017)で得られた同じ隕石中のコンドールのデータを以下に示す。



(左) 図1 NWA7936 隕石中のコンドールの Mg 同位体分析結果。縦軸は  $(^{26}\text{Mg}^*/^{24}\text{Mg})$  を  $1\text{E}-6$  ( $\mu$ ) の単位で表示したもの。大きいシンボル: 本研究における 2 つのコンドール (T-03 と T-06) の分析結果。小さいシンボル(青菱形): 早川(2017)による分析結果。黒いシンボルは、T-06 のオリビン結晶に富むフラクション(赤色)と、メソスタシスに富むフラクション A, B (オレンジ色)の重みつき平均。

(右) 図2 Olsen ら(2016)の CV, CR コンドライト中のコンドールの分析結果との比較。Olsen et al. (2016) のデータの誤差は 2SE、本研究および早川(2017)のデータの誤差は 2SD。

本研究、および早川(2017)で分析された L コンドライト NWA7936 中の 8 つのコンドールのうち、6 つが負の値を示し、うち 5 つが  $-12\text{ppm}$  以下の非常に低い値 ( $-12.3$  から  $-26.0$ ) を示すことが注目される。L-T06 の 3 つのフラクションの  $\mu^{26}\text{Mg}^*$  値は誤差の範囲内でよく一致しており、 $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$  比も 0.096 から 0.119 の間の狭い範囲に収まっている。このことは、オリビンとメソスタシスの鉱物分離作業が十分に行えていなかったことを示している。一方でこの 3 つのフラクションのデータは、それぞれ別々に Mg 抽出作業および同位体分析を行った結果であり、 $\mu^{26}\text{Mg}^*$  値および  $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$  比の分析の高い再現性を証明している。これら 3 つのデータの平均をとり、1 つのコンドールの全岩データとして取り扱うことにする。その結果、L-T06 の全岩組成は、 $\mu^{26}\text{Mg}^* = -20.6 \pm 4.5$  (ppm),  $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg} = 0.110 \pm 0.014$  と求まる。

さらに早川 (2017) のデータも加えて、低い  $\mu^{26}\text{Mg}^*$  値を示す計 5 つのコンドールについての重み付き平均を算出してみると、 $\mu^{26}\text{Mg}^* = -17.5 \pm 5.7$  (ppm) となる。L コンドライトにこのような低い値を示すコンドールが多く存在することは、太陽系の初生 Mg 同位体比、あるいは  $^{26}\text{Al}$  の分布に関して重要な制約を与える。

### (5) 他のコンドールデータとの比較

本研究の結果を Olsen et al. (2016) の CV および CR コンドライト中のコンドルールに対する結果と比較する(図2)。Olsen et al. (2016) の結果を見ると、コンドールのマグネシウム同位体組成  $\mu^{26}\text{Mg}^*$  について、横軸の Al/Mg 比にかかわらず、CV コンドライトでは -4 ppm から 0 ppm、CR コンドライトでは -10 ppm から -5 ppm に大部分のデータが集中していることがわかる。それに対し、本研究および早川の L コンドライトのデータでは、全体としてより大きなバリエーション(-26 ppm から +3 ppm)を示すものの、より低い値(-26 ppm から -12 ppm)を示すものが多い傾向が明らかに見て取れる。まだデータ数が限られているが、各コンドライトグループは固有の  $\mu^{26}\text{Mg}^*$  を持つ可能性が示唆される。

#### (6) 太陽系の初生 ( $\mu^{26}\text{Mg}^*$ )<sub>0</sub> 比への示唆

Larsen et al. (2011) は、彼らが分析した CAIs-AOA の Al-Mg アイソクロン図 ( $\mu^{26}\text{Mg}^*$  vs 27Al/24Mg) の y 切片から、初生 Mg 同位体比 ( $\mu^{26}\text{Mg}^*$ )<sub>0</sub> = -15.9 +/- 1.4 (ppm) を求め、これを太陽系の初生同位体比 ( $\mu^{26}\text{Mg}^*$ )<sub>0</sub> として絶対視した上で、<sup>26</sup>Al の不均一分布に関する議論を展開した。太陽系物質中の  $\mu^{26}\text{Mg}^*$  値は <sup>26</sup>Al からの放射壊変により時間とともに必ず増加することを考慮すると、どのような物質であれ、必ず、彼らの太陽系初生 ( $\mu^{26}\text{Mg}^*$ )<sub>0</sub> 値よりも高い  $\mu^{26}\text{Mg}^*$  値を持たなければならない。ところが、図1に示すように、Larsen et al. (2011) の初期太陽系 ( $\mu^{26}\text{Mg}^*$ )<sub>0</sub> 値から本研究で得られたデータの平均値に直線を引くと、傾きが (-4.3 +/- 4.3) E-5 (誤差 2 ) となり、本研究のコンドルールの方が低い値(誤差を考えるとぎりぎり同じ値)を持つことがわかる。この結果は彼らのモデルと整合的ではない。(NWA7936 中のコンドルールに <sup>26</sup>Al が確実に含まれていたことは、NanoSIMS 分析により得られた3個のコンドルールに対する(26Al/27Al)<sub>0</sub> 初生比がすべて 1E-5 以上の高い値であったことから明らかである。つまり、その後の <sup>26</sup>Al の放射壊変による寄与により、 $\mu^{26}\text{Mg}^*$  は初期太陽系の初生 ( $\mu^{26}\text{Mg}^*$ )<sub>0</sub> 比よりも確実に高い値を示す必要がある。このことから、Larsen et al. (2011) のモデルは本研究および早川 (2017) の結果と矛盾し、確実に否定されることになる。)一方で、初期太陽系における <sup>26</sup>Al/<sup>27</sup>Al 比の均一分布と太陽組成の Al/Mg 比(0.101)を仮定した時に推定される初生 Mg 同位体比  $\mu^{26}\text{Mg}^*$  (-38 ppm) は本研究で得られた結果と矛盾しない。

#### (7) 最近の <sup>26</sup>Al 不均一の可能性をめぐる議論への示唆

最近、Bollard et al. (2019) は、鉱物アイソクロンにより Pb-Pb 絶対年代の求められたコンドールの一部の試料に対して <sup>26</sup>Al-<sup>26</sup>Mg 年代測定法を適用し、二つの『時計』の関係性を調べる研究結果を公表した。その手法は、Al-Mg 年代測定法の『時計』としての適用可能性をよりダイレクトに評価する方法だといえる。彼らの結論は、初期太陽系における <sup>26</sup>Al の分布には不均一が存在し、コンドルール形成領域における <sup>26</sup>Al/<sup>27</sup>Al 比は、CAI 形成領域におけるそれと比較して、1/3 から 1/4 程度である、というものである。これが事実であるならば、Al-Mg 年代測定法はそのまま初期太陽系の『時計』として用いるには問題があり、<sup>26</sup>Al の初期分布を考慮した慎重な適用をおこなう必要が生じることになる。

しかしながら、彼らの用いたコンドールの Pb-Pb 年代データには未解決の問題があることにも注意する必要がある。実は、太陽系形成年代の基準となるべき CAIs (難揮発性包有物) の年代には、Pb-Pb 法により2種類の年代が報告されている。ひとつは、Amelin et al. (2002) の 4567.2 +/- 0.5 Ma あるいは Connelly et al. (2012) の 4567.3 +/- 0.3 Ma、もうひとつは、Bouvier et al. (2010) の 4568.2 +/- 0.2/-0.4 Ma である。その差はほぼ百万年 (1Ma) に達し、無視できる差ではない。実際、Pb-Pb 絶対年代測定法、Al-Mg 年代測定法、Hf-W 年代測定法、Mn-Cr 年代測定法の結果を比較すると、後者3つは整合的であるが、Pb-Pb 法の CAIs の結果だけがばらつきを示し、それが 4568.2 Ma のときは前者3つと整合的であるが、4567.2 ~ 4567.3 Ma のときは整合的でなくなるとの指摘がある (Kleine et al., 2009)。さらに、Kita et al. (2015) は、CAIs およびコンドルールに対する Pb-Pb 法の年代測定のばらつきが何に起因するかを探った学会報告で、Bollard らが Pb-Pb アイソクロンを求める際に、強酸で最後に抽出される強固なフラクションや残渣のフラクションを除外しているとの問題点を指摘した。さらに、それら除外されたフラクションを含めた、より適切と思われるフィッティングをおこなうと、計算される年代が 4567 Ma 余から 4568 Ma 余に上昇することを指摘した。このような Pb-Pb 法におけるフィッティングのミスが年代のずれを引き起こしていたとすると、結論は大きく変わってくる可能性がある。Kita らが主張するように、Pb-Pb 『時計』による CAIs の年代値が修正されれば、Pb-Pb 『時計』と Al-Mg 『時計』あるいは他の消滅核種を用いた 『時計』(Hf-W, Mn-Cr 系)との食い違いは解消されるかもしれない。

現時点では、個々のコンドルールに対する鉱物アイソクロンを求めている研究グループは一つだけであり、Kita らの問題提起を現段階で確認する方法はない。今後、<sup>26</sup>Al の空間分布の均一性の問題について結論を出すためには、他のグループによるコンドルールと CAIs の Pb-Pb データと Al-Mg データの再検証が必要だと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fukuda K., Hiyagon H., Fujiya W., Takahata N., Kagoshima T., and Sano Y.	4. 巻 886:34
2. 論文標題 Origin of the Short-lived Radionuclide $^{10}\text{Be}$ and Its Implications for the Astronomical Setting of CAI Formation in the Solar Protoplanetary Disk	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab479c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fukuda K., Hiyagon H., Fujiya W., Kagoshima T., Itano K., Iizuka T., Kita N. T., Sano Y.	4. 巻 293
2. 論文標題 Irradiation origin of $^{10}\text{Be}$ in the solar nebula: Evidence from Li-Be-B and Al-Mg isotope systematics, and REE abundances of CAIs from Yamato-81020 C03.05 chondrite	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 187-204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2020.10.011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 比屋根肇、谷村佑貴、中村友哉、福田航平、藤谷渉、杉浦直治、鹿兒島渉悟、高畑直人、佐野有司
2. 発表標題 初期太陽系における(太陽)宇宙線照射の重要な指標としてのベリリウム10の重要性
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiyagon H., Fukuda K., Tanimura Y., Fujiya W., Sugiura N., Kagoshima T., Takahata N. and Sano Y.
2. 発表標題 Excess boron 10 observed in chondrules from Y82094 (C3.2) chondrite
3. 学会等名 82nd Annual Meeting of The Meteoritical Society (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 比屋根肇、福田航平、谷村佑貴、藤谷渉、杉浦直治、鹿児島省吾、高畑直人、佐野有司
2. 発表標題 初期太陽系における太陽宇宙線の照射環境：CAI・コンドルールから推定されるベリリウム10の存在度からの考察
3. 学会等名 日本地球化学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯田享浩、早川瑛庸、飯塚毅、比屋根肇
2. 発表標題 ICP-MSを用いたNWA7936コンドライト(L3.15)中のコンドルールのマグネシウム同位体分析
3. 学会等名 日本地球化学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荷見拓生、比屋根肇、佐野有司、高畑直人
2. 発表標題 NanoSIMSによる普通コンドライトNWA7936中コンドルールの $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$ 年代測定
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福田航平、藤谷渉、比屋根肇、高畑直人、鹿児島渉悟、佐野有司
2. 発表標題 CAIのLi-Be-BおよびAl-Mg同位体組成：原始太陽系円盤進化への示唆
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiyagon H., Tanimura Y., Fukuda K., Fujiya W., Sugiura N., Takahata N., Kagoshima T., Sano Y.
2. 発表標題 Be-B isotope systematics in chondrules from Y82094 (ungrouped C3.2) chondrite
3. 学会等名 The 9th Symposium on Polar Research.
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関