

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400524

研究課題名(和文) 初期太陽系における同位体組成均一化過程に関する研究

研究課題名(英文) A study on isotopic homogenization processes 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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：(1) マーチソン(CM2)隕石およびアエンデ(CV3)隕石から見つかったFUN包有物に対し、SIMSによる同位体分析をおこない、FUN包有物の起源と前駆物質の組成について考察した。(2) CH/CBコンドライト中のCAIに対し、NanoSIMSによるベリリウム-ホウ素(Be-B)同位体分析をおこない、 ^{10}Be の起源について考察した。(3) ICP-MSを用いてLL 3.15コンドライト中のコンドルールのマグネシウム精密同位体分析をおこない、 ^{26}Al の存在量($^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 同位体比)の原始太陽系における空間分布の不均一性に関する考察をおこなった。

研究成果の概要(英文)：(1) Isotopic studies were conducted on so-called FUN inclusions from Murchison (CM2) and Allende (CV3) chondrites, and their origin and chemical compositions of their precursors were considered. (2) Isotopic analyses of Be-B systematics were conducted for CAIs from CH/CB chondrites using NanoSIMS, and the origin of ^{10}Be was discussed. (3) A high precision Mg isotope analysis technique has been developed using ICP-MS and applied to chondrules from an LL 3.15 chondrite, and possible heterogeneity in the distribution of ^{26}Al ($^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ ratio) in the early solar system was considered.

研究分野：惑星科学

キーワード：SIMS ICP-MS CAI コンドルール マグネシウム同位体 ベリリウム10 同位体不均一 初期太陽系

1. 研究開始当初の背景

太陽系最古の固体物質とされる難揮発性包有物 (CAI) およびその関連物質のうち、いわゆる FUN 包有物やヒボナイト包有物など、少数のグループには、通常の太陽系物質と比べて Ca, Ti などに大きな同位体異常を示すものがある。(FUN は、Fractionation and Unknown Nuclear Effects の略。ヒボナイト $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ は高温で凝縮する鉱物のひとつで、微量の Mg, Ti を含む。) また、これらの包有物は ^{26}Al (半減期 70 万年) 起源の過剰 ^{26}Mg がほとんど見られないことや、Mg, Si, O などに大きな質量依存同位体分別を示すなどの特徴も持っている。大きな安定同位体異常の存在は、これらの包有物が太陽系形成の最初期(星起源の ^{26}Al が太陽系に持ち込まれる以前)における同位体組成均一化過程の情報を持っている可能性を示唆する。大きな質量依存同位体分別は、FUN 包有物が著しい真空蒸発を経験したことを示唆する。さらに、FUN 以外の CAI にもしばしば見られる Be/B 比と関連した過剰 ^{10}B の存在は、CAI 生成時におけるベリリウム 10 (^{10}Be ; 半減期 140 万年) の存在を示唆する。 ^{10}Be の起源としては、高エネルギー粒子(銀河宇宙線、または太陽宇宙線)の照射による核破砕反応が考えられるため、包有物の生成場所・形成環境を考察する上で有力な手掛かりとなっている。

2. 研究の目的

以上の背景をふまえて、本研究では、始原的隕石中の CAI、その中でも特に FUN 包有物やヒボナイト包有物に注目し、二次イオン質量分析法 (SIMS) を用いてそれらに対する系統的な多元素 (O, Mg, Si, Ca, Ti, B) 同位体分析をおこなうことにより、太陽系形成最初期における物質進化・同位体組成均一化プロセスの解明を目指した。このうち、 ^{10}Be (過剰 ^{10}B) については、従来の分析データが限定されていることを考慮し、CH-CB コンドライトの細粒の CAI も分析対象に加えて、より広く CAI の生成環境と ^{10}Be の起源の解明を目指した。さらに、誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) を用いた高精度 Mg 同位体分析法の開発・普通コンドライトのコンドルールへの適用により、初期太陽系における ^{26}Al の不均一分布の可能性の検証を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、初期太陽系における物質進化・同位体組成均一化プロセスの解明に向けて、大きく分けて次の 3 つの研究課題に取り組んだ。

(1) FUN 包有物の同位体的研究:

マーチソン (Murchison, CM2) 隕石から、凍結融解法、磁性分離、重液分離を経てハンドピックによりヒボナイト包有物を抽出し、それらに対する SIMS 多元素同位体分析を実

施した。研究の過程で、これらの中に Ca, Ti に大きな同位体異常 (^{48}Ca , ^{50}Ti の過剰) を持つ FUN 包有物が存在することをつきとめ、3 つの FUN 包有物 (MC037, MC040, MC003) についてより詳細な SIMS 分析をおこなった。アエンデ (Allende, CV3) 隕石中に見つかった FUN 包有物に対しても SIMS 分析をおこなった。同位体分別の大きさから Mg, Si の蒸発量を推定し、それらと EPMA 分析による包有物の現在の全岩化学組成から、これら FUN 包有物の初期組成 (蒸発を経験する前の化学組成) を復元し、FUN 包有物の起源について考察をおこなった。

(2) ベリリウム - ホウ素同位体分析: CAI・コンドールの宇宙線照射環境の推定

初期太陽系における ^{10}Be は、銀河宇宙線または原始太陽からの高エネルギー粒子 (太陽宇宙線) の照射により生成する。本研究では、従来分析例のなかった CH-CB コンドライト中の微小な CAI や CO コンドライト中のコンドルールについて、SIMS による Be-B 同位体分析をおこなった。得られた初生 $^{10}\text{Be}/^{11}\text{Be}$ 比の値とその変動の大きさから、 ^{10}Be の起源と CAI の生成環境について考察した。

(3) 誘導結合プラズマ質量分析法による高精度マグネシウム同位体分析: 普通コンドライト中のコンドルールへの応用

東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻に設置された複数検出器・誘導結合プラズマ質量分析装置 (MC-ICPMS, Neptune Plus; Thermo Scientific 社) を用いた高精度マグネシウム同位体分析法の開発をおこなった。スタンダードとして、純粋の金属マグネシウムを溶解した溶液 (DSM-3) を準備した。分析精度・再現性・確度のチェックには、地球の玄武岩粉末試料である JB-2 および BCR-2 を用いた。まず、岩石の粉末試料を酸に溶解し、陽イオン交換樹脂を用いて純粋のマグネシウムを分離・抽出した。こうして準備した溶液試料と、スタンダードである DSM-3 を交互に ICP-MS に導入し、マグネシウム同位体分析をおこなった。スタンダードの分析結果と比較し規格化することにより、未知試料のマグネシウム同位体組成を求めた。 $^{25}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ 比と $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ 比についてスタンダード分析値からのズレ、 $\mu^{25}\text{Mg}$ 、 $\mu^{26}\text{Mg}$ (ppm) を求め、さらに質量依存同位体分別効果を補正して、過剰 ^{26}Mg と ^{24}Mg の比である $\mu^{26}\text{Mg}^*$ (ppm) を求めた。JB-2 および BCR-2 の分析結果から、Mg 同位体分析の精度と確度を評価した。

アルミニウム / マグネシウム元素比については、四重極型誘導結合プラズマ質量分析装置 (Q-ICPMS, iCAP Q; Thermo Scientific 社) を用いて測定した。

以上の基礎実験の結果、十分な精度と確度を得られることを確認したのち、実際の隕石試料から抽出された CAI およびコンドルー

ルに対して、ICP-MSによるマグネシウム同位体分析をおこなった。まず、CVコンドライト中のCAI 3個(Allende隕石からのCAI 1個、NWA 3118コンドライトからのCAI 2個)を分析した。Al-Mgアイソクロンプロットをおこない、傾きが典型的なCV CAIsの持つ値(カノニカル値: $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} \sim 5 \times 10^{-5}$)と整合的かどうかをチェックした。

次に、変成度の低い普通コンドライトであるNWA 7936(LL 3.15)のコンドラールをいくつか選び、Mg同位体分析(およびAl/Mg元素分析)をおこなった。

4. 研究成果

(1) FUN包有物の同位体的研究

マーチソン隕石(CM2)から抽出されたヒボナイト包有物のうち、3つの包有物(MC037, MC040, MC003)がFUN包有物の特徴を持つことが明らかになった(図1)。

また、既にMg同位体分析結果があるアエンデ隕石(Allende, CV3)中に見つかったFUN包有物AL1B-F(Hiyagon and Hashimoto, 2008, 図2)について、Si同位体分析をおこなった。

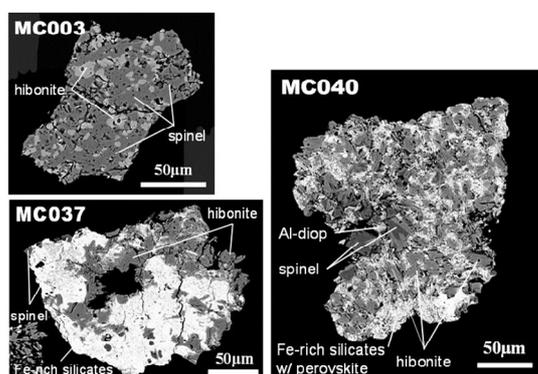


図1. マーチソン隕石から抽出された3つのヒボナイト包有物の反射電子像。

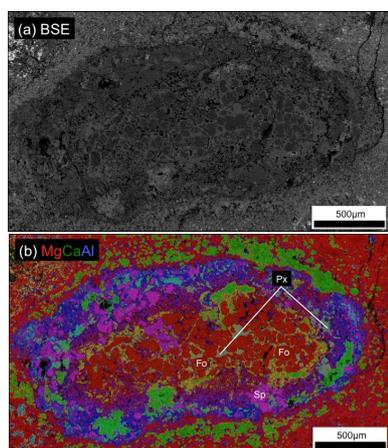


図2. アエンデ隕石中に見つかったFUN包有物AL1B-Fの反射電子像(a)、および元素マップ(b)。Mg=赤、Ca=緑、Al=青、Fo=forsterite、Sp=spinel、Px=Al-Tiに富む輝石。(Fukuda et al., 2015.)

(i) マグネシウム同位体分析

マグネシウムのデータに関して、通常は主に表示が用いられるが、今回は正確に質量分別の効果を見積もるため、以下で定義される表示を採用し、解析した。

$$^{25}\text{Mg} = 1000 \times \ln\{(^{25}\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_{\text{sample}} / (^{25}\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_{\text{std}}\}$$

$$^{26}\text{Mg} = 1000 \times \ln\{(^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_{\text{sample}} / (^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_{\text{std}}\}$$

また、 ^{26}Mg は以下の関係式から求めた。

$$^{26}\text{Mg} = \varphi(^{26}\text{Mg}) - \varphi(^{25}\text{Mg}) / 0.514$$

式中の0.514という分別係数はDavis et al. (2005)で報告されているCAI的な組成をもつメルトの蒸発実験によって求められた係数で、FUN包有物の同位体分別を解析する際に適していると考えられる。 $\varphi(^{26}\text{Mg})$ vs $\varphi(^{25}\text{Mg})$ 図上ですべてのデータが質量依存同位体分別線の上に乗った。MC040とMC003はかなり均一な質量分別を示す(MC040: $\sim 52 \pm 3$ ‰/amu; MC003: $\sim 17 \pm 2$ ‰/amu)。一方、MC037はヒボナイト粒子ごとに大きなバリエーションを示した(-13から-47 ‰/amu)。

次に、Al-Mgアイソクロン図(^{26}Mg vs $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$ のグラフ)にデータをプロットすると、すべての点が誤差の範囲で $^{26}\text{Mg} = 0$ を示し、 ^{26}Al の壊変起源の過剰 ^{26}Mg は確認されなかった。これまでに報告されているFUN包有物のAl/Mg比は4800-57000と大きな値を示すのに対し、今回発見されたFUN包有物のAl/Mg比は高々160に留まっている。このことは、蒸発前の物質のAl/Mg比が非常に低かった可能性を示唆する。つまり、これら包有物の前駆物質は、CAI的な組成ではなく、むしろマグネシウムに富んだ組成(たとえばCI的な組成=太陽系の平均的な組成)であった可能性がある。

アエンデ隕石中に見つかったFUN包有物AL1B-Fについては、既にMgおよびOの同位体分析がおこなわれている(Hiyagon and Hashimoto, 2008)。Mgは 24.41 ‰/amuと大きな同位体分別を示す。この包有物に対し、あらたにEPMAを用いた元素マッピングをおこない、全岩化学組成を推定した。その際、変成された部分はメリライト(melilite; gehlenite = $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7$ とåkermanite = $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ の固溶体)であったと仮定した。

(ii) シリコン同位体分析

AL1B-Fに対してシリコン(^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si)同位体分析をおこなった。その結果、Siにも大きな質量依存同位体分別が存在し、その大きさは、6-20 ‰/amuであることがわかった。これは75%のSiが失われたことを示唆する。同様に、Mgのデータから、78%のMgが失われたと推定された。

AL1B-Fの全岩化学組成の推定値(wt%) (変成部分はメリライトmeliliteと仮定)をもとに、失われたMg, Siをもとに戻してやると、前駆物質の全岩化学組成が推定できる。

その結果、AL1B-F の前駆物質もかなり Si, Mg に富む組成であったことがわかった。

(iii) カルシウム・チタン同位体分析

マーチソン隕石から見つかった FUN 包有物 (MC003, MC037, MC040) に対するカルシウムとチタンの同位体分析の結果、3つの包有物すべてが⁴⁸Caと⁵⁰Tiに同位体異常を持つことがわかった。すなわち、FUN 包有物としての特徴をすべて持つことが示された。従来のデータでは、⁴⁸Caと⁵⁰Tiの二つの同位体異常の間に正の相関があったが、MC003 では⁴⁸Caが正、⁵⁰Tiは負の異常を示している。したがって、FUN 包有物の3つの特徴である、F (質量依存同位体分別)、UN (Ca, Ti などに見られる安定同位体異常)、そして²⁶Mgの過剰が小さいこと、の間には、包有物ごとにバリエーションがあることが示唆された。

(2) ベリリウム - ホウ素同位体分析：CAI・コンドロールの宇宙線照射環境の推定

(i) Be/B 分析用スタンダードの作成

CAI の Be-B 同位体分析は、ほとんどの場合、メリライト (melilite; ゲーレナイト gehlenite = $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7$ とオケルマナイト åkermanite = $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ の固溶体) に対しておこなわれている。従来は、Be/B 分析用の適当なスタンダードが存在せず、通常 NIST610, 612 などを用いて Be/B 相対感度係数を求めていた。しかしながら、メリライト組成との違いが大きく、マトリックス効果による相対感度係数のズレが問題であった。そこで本研究では、微量の Be-B をドーブしたメリライト組成のガラスを合成して標準試料とし、Be/B 相対感度係数の正確な値を決定した。合成ガラス中の Be/B 比に対して、NanoSIMS による Be/B イオン強度比をプロットすると、両者の間には非常によい相関がみられる (図3)。合成ガラスの組成依存性 (Ak#30 ~ Ak#70) は見られない。グラフの傾きは、 1.29 ± 0.32 である。NanoSIMS の検出器の感度補正も考慮すると、Be/B の真の (イオン強度比/重量比) は、 1.70 ± 0.42 と求まる。同じ条件で NanoSIMS 分析を NIST610 に対しておこなうと、Be/B の (イオン強度比/重量比) は、 2.53 ± 0.11 となり、従来のデータには大きなズレがあったことが判明した。

(ii) CH/CB コンドライト中の CAI の Be-B 同位体分析

本研究では、CH コンドライトである SaU290 隕石から CAI を6個、CH/CB コンドライトとされる Isheyev 隕石から CAI を1個選び、Be-B 同位体分析および Al-Mg 同位体分析をおこなった。CH-CB コンドライトは、太陽系の外側の物質を多く含んでいる可能性が指摘されている (Van Kooten et al., 2016) ため、従来の CV コンドライト中の CAI とは異なる分析結果が得られる可能性がある。

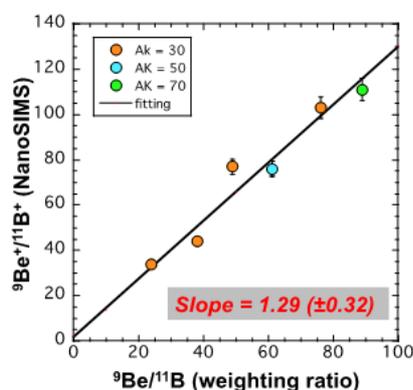


図3. メリライト組成の合成ガラス中の⁹Be/¹¹Bモル比とNanoSIMSによるイオン強度比の相関。NIST610を用いて同様の分析をおこなうと、50%程度高い傾きを示し、マトリックス効果が無視できないことを示す。

分析結果を¹⁰B/¹¹B vs ⁹Be/¹¹Bのグラフ上にプロットし、Y切片 (初生¹⁰B/¹¹B比) をコンドライト的と仮定して、モデルアイソクロンから初生¹⁰Be/⁹Be比を推定した。その結果、初生¹⁰Be/⁹Beには大きなバリエーションが存在することがわかった (初生¹⁰Be/⁹Beが誤差の範囲で0から、最高で $\sim 3.3 \times 10^{-3}$ に達する)。最大値は、従来のCVコンドライト中のCAIsの典型的な値の数倍に達する。初期太陽系に存在した¹⁰Beの起源に関しては、(a) 銀河宇宙線との相互作用により星間分子雲中に定常的に存在していた¹⁰Beが太陽系にもたらされた、(b) 原始太陽からの高エネルギー粒子の照射により、原始太陽近傍の物質中で¹⁰Beが生成された、(c) 太陽系形成直前に起きた超新星爆発の際に、ニュートリノとの反応により生成された¹⁰Beが太陽系にもたらされた、という3つの説がある。本研究結果は、¹⁰Beのきわめて不均一な分布を示唆しており、(b) 原始太陽近傍でのローカルな¹⁰Beの生成と整合的である。だとすると、CH-CBコンドライトが太陽系のかなり外側の領域で生成されたとしても、そこに含まれるCAIは原始太陽近傍で生成され、太陽系の外側領域まで運ばなければならないことになる。このことは、CAI形成領域と、原始太陽系星雲内における物質移動に関して重要な示唆を与えるものである。

(3) 誘導結合プラズマ質量分析法による高精度マグネシウム同位体分析：普通コンドライト中のコンドロールへの応用

(i) MC-ICPMSによるMg同位体比の分析度・確度の検証

純粋の金属マグネシウムの溶液 DSM-3 を Mg の標準溶液とし、地球の玄武岩スタンダードである BCR-2 と JB2 を繰り返し分析することにより、Mg の抽出・分離・分析プロセス全体を通しての分析精度と確度を検証

した。得られた $\mu^{26}\text{Mg}^*$ (ppm) は、BCR-2 が -5.9 ± 11.2 、JB2 が 2.3 ± 20.0 となり、誤差の範囲でゼロに一致した。これはマグネシウムの分離・精製プロセスにおける Mg の収率が 90% を超えている場合に成り立つ。

(ii) CV コンドライトの CAI に対する Al-Mg 同位体分析

CV コンドライトから 3 つの CAI を抽出して分析した。Al-Mg アイソクロンの傾きから初生 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比を推定すると、 $(5.08 \pm 0.84) \times 10^{-5}$ となり、CAI のカノニカル値 5.23×10^{-5} と一致した。

(iii) LL コンドライト中のコンドルールの Mg 同位体分析

NWA7936 (LL 3.15) コンドライトから抽出した 6 個のコンドルールについて、Mg 同位体分析と Al/Mg 比の測定をおこなった。結果は図 4 に示すとおりである。

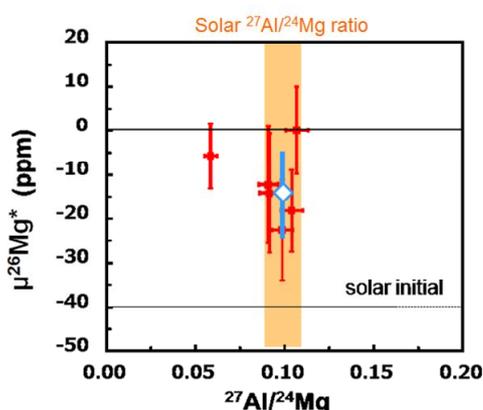


図 4 LL 3.15 コンドライト NWA7936 から抽出した 6 つのコンドルールの $\mu^{26}\text{Mg}^*$ vs $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$ ダイアグラム (赤色データ)。5 つのコンドルールは太陽組成に近い Al/Mg 比を持つ。青色データはそれら 5 個のデータの重みつき平均。

今回分析したコンドルールは Al/Mg 比のバリエーションが小さく、6 個のうち 5 個が太陽組成に近い Al/Mg 比を示した。 $\mu^{26}\text{Mg}^*$ 値は 0 から -23 (ppm) まで分布し、全体として負の値を示す傾向がある。かりに太陽組成に近い Al/Mg 比を示す 5 個のコンドルールについて重みつき平均をとると、 $\mu^{26}\text{Mg}^* = -13.1 \pm 9.9$ となり、ゼロより有意に低い値になる。

いま仮に、太陽組成に近い Al/Mg 比を持つコンドルール(の前駆物質)は、過去に Al-Mg の分別を受けていなかったとする。また、Mg には安定同位体の異常はなく、観測される同位体異常はすべて ^{26}Al の壊変による過剰 ^{26}Mg の生成によるとする。太陽系の初生 $\mu^{26}\text{Mg}^*$ 値には議論としては -38 ppm を採用する。この値は、太陽系全体にわたって $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比が均一で、その初期値が CAI のカノニカル値 5.23×10^{-5} であるとして、太陽組

成の Al/Mg 比から計算される ^{26}Mg の過剰分である。図 4 の Y 切片に $\mu^{26}\text{Mg}^* = -38$ (ppm) の点を取り、それを太陽系の初期値として各分析点と結ぶことにより、モデルアイソクロンを引くことができる。直線の傾きが各コンドルールの初生 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比に相当する。図から、その値は、 2.5×10^{-5} から 5.2×10^{-5} までファクター 2 のばらつきを示す。これは LL コンドライトのコンドルール(の前駆物質)における初生 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比の不均一を示唆する。

他の研究例と比較する。コンドルールの Mg 精密同位体分析データは数が少ない。最近、Olsen et al. (2016) によると、コンドルールごとに Al/Mg 比はかなりのばらつきを示すが、 $\mu^{26}\text{Mg}^*$ の値はそれぞれの隕石ごとにほとんど一定である (CV は ~ 0 ppm、CR は ~ 8 ppm の周辺にばらつく)。今回分析した LL コンドライトの値は誤差がやや大きいものの、5 点の平均値は -13 ppm であり、有意にゼロより低い。

これらのデータのひとつの解釈は、上に述べたように、コンドルールの含まれる隕石グループごとに初生 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比が異なっていた、というものである。この解釈が正しければ、 ^{26}Al を使った初期太陽系年代学では正確な年代差を議論することができないことになり、大きな解釈の変更を迫られることになる。

しかし、他の解釈も可能である。上記の議論の前提には、マグネシウムの安定同位体に異常がない、という仮定があるが、何らかの方法でそれを検証していく必要がある。実際、CAI の Al-Mg アイソクロンデータを見ると、傾きが同じ (すなわち初生 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比が同じ) であるにもかかわらず、Y 切片 (すなわち、初生 $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ 比) が異なる例が報告されている。この場合、もっとも自然な解釈は、初生 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比は同じであるが、マグネシウムの安定同位体異常が存在するために異なる Y 切片を示す、というものである。CAI とコンドルールを同列に扱うわけにはいかないが、Mg における安定同位体異常の存在の可能性は検証していく必要がある。

まったく別の方法として、Al-Mg 時計の結果を他の時計と比較する方法が考えられる。実際、さまざまな物質に対する ^{26}Al - ^{26}Mg 時計と ^{182}Hf - ^{182}W 時計の相対年代はよく一致しており、U-Pb 時計による年代データの方が若干ずれている、という報告もある。したがって、現時点では、今回のデータをただちに初生 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比の不均一に結びつける議論には注意を要する。

さらに、分析上の問題点として、イオン交換樹脂を用いた Mg の分離とその収率 (yield) である。予備実験の段階では、Mg の収率が 90% を切る場合、 $\mu^{26}\text{Mg}^*$ が見掛け上負の値になる傾向がみられた。このことから、今後、さらに Mg の収率の向上と分析精度・確度の向上を図り、データを蓄積していく必要があると思われる。

(4)その他の研究

以上の研究と関連する共同研究として、CAI中の酸素同位体比とAl-Mg年代のデータをもとに酸素同位体リザーバーの存在期間について考察したUshikubo et al. (2017)の論文、CRコンドライト中に見つかった高圧鉱物を含む火成岩的なクラストの起源を考察したHivagon et al. (2016)の研究(酸素同位体不均一、希土類元素パターン、鉱物学的データをもとに議論)、マーチソン隕石中の炭酸塩の起源について、酸素・炭素同位体分析をもとに考察したFujiya et al. (2015)の論文、などをおこなった。

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 3 件)(全て査読有)

Ushikubo T., Tenner T. J., Hivagon H. and Kita N. T. (2017) A long duration of the ^{16}O -rich reservoir in the solar nebula, as recorded in fine-grained refractory inclusions from the least metamorphosed carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **201**, 103-122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2016.08.032>

Hivagon H., Sugiura N., Kita N. T., Kimura M., Morishita Y. and Takehana Y. (2016) Origin of the eclogitic clasts with graphite-bearing and graphite-free lithologies in the Northwest Africa 801 (CR2) chondrite: Possible origin from a Moon-sized planetary body inferred from chemistry, oxygen isotopes and REE abundances. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **186**, 32-48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2016.04.030>

Fujiya W., Sugiura N., Marrocchi T., Takahata N., Hope P., Shirai K., Sano Y. and Hivagon H. (2015) Comprehensive study of carbon and oxygen isotopic compositions, trace element abundances, and cathodoluminescence intensities in calcite in the Murchison CM2 chondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **161**, 101-117. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2015.04.010>

[学会発表](計 8 件)

福田航平, 藤谷渉, 比屋根肇, 杉浦直治, 鹿兒島渉悟, 高畑直人, 佐野有司, A combined study of Be-B and Al-Mg systematics on CH and CH/CB CAIs. 日本地球惑星科学連合2017年大会, 2017年5月23日, 幕張メッセ(千葉県千葉市美浜区)。

早川瑛庸, 福田航平, 飯塚毅, 比屋根肇, IC-ICPMSを用いた普通コンドライトコンドラールの高精度Mg同位体分析, 日本地球惑星科学連合2017年大会, 2017年5月23日, 幕張メッセ(千葉県千葉市美浜区)。

Hayakawa A., Fukuda K., Iizuka T. and Hivagon H. High precision magnesium isotopic

measurements for CV chondrite CAIs and LL 3.15 chondrite chondrules, 48th Lunar Planetary Science Conference, Abstr. #1923, 2017.3.20-24, Woodland, Texas, USA.

早川瑛庸, 福田航平, 飯塚毅, 比屋根肇, MC-ICPMSを用いたコンドライト隕石の高精度Mg同位体分析, 日本惑星科学会, 2016年9月12日, ノートルダム清心女子大学(岡山県岡山市北区)。

Fukuda K., Fujiya W., Hivagon H., Sugiura N., Takahata N. and Sano Y., An ion microprobe study of Be-B isotope systematics in melilite-rich CAIs based on newly determined Be/B relative sensitivity factors for glass standards. 79th Annual Meeting of the Meteoritical Society, 2016.8.12, Berlin, Germany.

福田航平, 比屋根肇, 高畑直人, 佐野有司, 橋元明彦, 質量依存同位体分別から考察するアエンデ隕石F(U N)包有物前駆物質の化学組成, 日本地球惑星科学連合2015年大会, 2015年5月28日, 幕張メッセ(千葉県千葉市美浜区)。

Fukuda K., H. Hivagon, N. Takahata, Y. Sano and A. Hashimoto, A silicon isotope study of a FUN-like forsterite-bearing inclusion from Allende, 46th Lunar and Planetary Science Conference, 2015.3.16-20 (Woodland, Texas, U.S.A.)

福田航平, 比屋根肇, 石田章純, 高畑直人, 佐野有司, 橋本明彦, 二次イオン質量分析計を用いた難揮発性包有物の質量依存同位体分別に関する研究, 日本質量分析学会同位体比部会, 2014年11月26-28日, 彩香の宿 一望(茨城県つくば市)。

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1)研究代表者

比屋根 肇 (HIYAGON Hajime)

東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号: 70192292

(2)研究分担者

森下 祐一 (MORISHITA Yuichi)

静岡大学・理学研究科・教授
研究者番号: 90358185