

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540567

研究課題名(和文)SIMSによる初期太陽系における親鉄性元素の分別に関する研究

研究課題名(英文)An ion microprobe study on fractionation of siderophile elements in the early solar system

研究代表者

比屋根 肇(Hiyagon, Hajime)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70192292

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：(1) マーチソン隕石のCAI中に超難揮発性メタル粒子を発見した。白金族元素の濃集パターンからCAIが蒸発を経験した温度を推定したところ、摂氏1600度以上の高温であることがわかった。(2) 標準試料(親鉄性元素を含む合金)をいくつか作成し、SIMS分析における親鉄性元素の相対感度係数を求めた。(3) Y-81020コンドライト中のメタル粒子のSIMS分析をおこなった。白金族元素は、マトリックス中のメタル粒子にはほとんど含まれないが、コンドライト中の微小なメタル粒子中の濃度には大きなバリエーションが見られた。これは原始太陽系において超難揮発性メタル粒子が不均一に分布していたことを示す。

研究成果の概要(英文)：(1) Ultra-refractory (UR) metal grains were found in some CAIs from Murchison (CM2) chondrite, which show strong Mg-isotopic fractionation suggesting evaporative loss of Mg. Based on the PGE patterns in the UR metal grains, the evaporation temperature was estimated to be >1600C. (2) Metal standards (Fe-based alloys containing various siderophile elements) were prepared for the SIMS analysis, and relative sensitivity factors for siderophile elements and Fe were determined. (3) Siderophile element analyses were conducted for metal grains in Y-81020 (CO 3.05) chondrite. PGE concentrations were low in large metal grains in the matrix, but large variation were observed in the metal grains in chondrules. This suggests rather heterogeneous distribution of UR metal grains in the early solar system at the time of chondrule formation.

研究分野：惑星科学

キーワード：親鉄性元素 元素分別 初期太陽系 SIMS 相対感度係数 コンドライト 超難揮発性メタル 白金族元素

1. 研究開始当初の背景

- (1) さまざまなコンドライト(始原的隕石)グループにおける鉄の存在量(たとえば Urey-Craig diagram)などから、初期太陽系において金属鉄 - シリケートの分別が起きていたことがわかっている。また、親石元素である希土類元素では、揮発性に依存した特徴的な元素分別パターンがCAIなどに見られるが、親鉄性元素においても同様の分別が起きていた可能性がある。しかしながら、原始太陽系星雲における親鉄性元素の分別メカニズムに関しては、ほとんど未解明の状態である。
- (2) 原始太陽系星雲内における親鉄性元素の分別を知るためには、隕石中のメタル粒子(鉄が主成分)に含まれる微量の親鉄性元素(白金族元素など)の分析が不可欠である。しかし、SIMS により親鉄性元素の分析を系統的におこなった例はほとんどなく、分析のための標準試料(スタンダード)も整備されていない。

2. 研究の目的

- (1) 本研究では、主としてコンドライトに含まれるメタル粒子中の微量親鉄性元素(白金族元素など)の詳細な分布を SIMS 分析により明らかにし、親鉄性元素の分別という観点から、原始太陽系星雲内における物質進化の解明を目指すものである。
- (2) 今後の研究の進展に資するため、SIMS 分析法の開発とともに、適切なスタンダードの作成をおこなう。

3. 研究の方法

- (1) 本研究においては、まず SIMS による親鉄性元素分析のためのスタンダード試料の作成をおこなった。具体的には、鉄を主成分(概ね Fe>95 重量%以上)とし、数種類の親鉄性元素を各 1-2 重量%程度含む合金を作成した。その際、SEM-EDS(あるいは EPMA)分析の際に元素の特性 X 線のピークが重なりあわないように微量親鉄性元素の組合せを考慮した。また、SIMS 分析におけるピーク同定用に、準備したすべての微量親鉄性元素を含んだ合金(各親鉄性元素の濃度は 0.2 重量%程度)を作成した。
- (2) 次に、作成したスタンダードを用いて SIMS 分析をおこない、各親鉄性元素イオンと鉄イオンとの相対感度係数を決定した。その際、酸素(-)の一次イオンによる陽イオン分析、セシウム(+)の一次イオンによる陰イオン分析の両方の分析条件を用いた。
- (3) 実際の隕石試料に含まれるメタル粒子の分析をおこなった。マーチソン隕石(CM2)から抽出したヒボナイトを含む包有物の中に、マグネシウムが著しい質量依存同位体分別を示すものが見つかり、そのうち2個にはミクロンサイズの超難揮発性(ultra-refractory; 以後 UR と略記)のメタル粒子が存在することがわかった。UR メタル粒子白金族元素を高濃

度で含むため、SEM-EDS により各元素濃度を決定した。UR メタルの成因を調べるため、太陽組成のメタル粒子の蒸発シミュレーションをおこなった。

- (4) 次に、きわめて熱変成の少ない Y-81020 隕石(CO 3.05)中のメタル粒子に対して SIMS 分析をおこなった。マトリックス中に独立して存在する大きな(50-100 ミクロンサイズ)メタル粒子、およびコンドライト中のオリビン粒子などに取り込まれた微細な(10-20 ミクロン)メタル粒子数個の詳細な SIMS 分析をおこなった。

4. 研究成果

- (1) 親鉄性元素分析用スタンダードの作成: 7種類のメタルスタンダードを作成し、それを用いて SIMS による相対感度係数を決定した。それ以外に、ほとんどすべての親鉄性元素を微量に含むピークセンタリング用のスタンダードを1個作成した。
- (2) マーチソン隕石から抽出した超難揮発性(UR)メタル粒子を含むヒボナイト包有物に関する研究:

みつかった包有物の起源を調べるため、SIMS による Mg, Si, O, Ca, Ti の同位体分析をおこなった。その結果、Mg, Si, O に大きな質量依存同位体分別が存在し(図1)、包有物が激しい蒸発イベントを経験したこと、⁴⁸Ca, ⁵⁰Ti に明らかな同位体異常が存在し(図2)、初期太陽系における同位体不均一の痕跡を残していること、が明らかになった。すなわち、ふたつの包有物は、いわゆる FUN 包有物であることが明らかになった。(ここで、F は質量依存同位体分別、UN は起源不明の同位体異常を表す。)

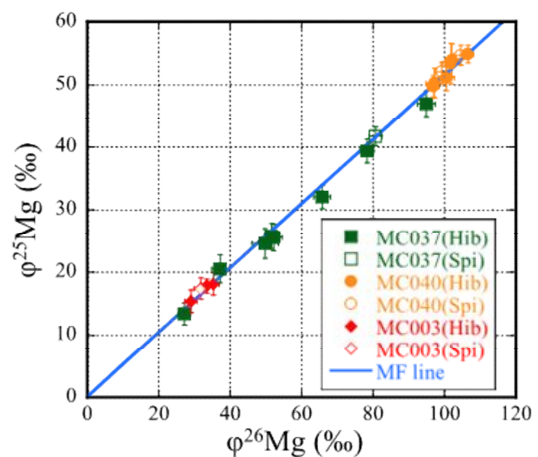


図1 マーチソン隕石から抽出されたヒボナイト包有物 MC037, MC040, MC003 のマグネシウム同位体組成。 ²⁵Mg, ²⁶Mg はそれぞれ ²⁵Mg/²⁴Mg, ²⁵Mg/²⁴Mg 比のスタンダードからのずれ(千分率表記)。青い直線(MF line)は質量依存同位体分別線。包有物すべてが MF line 上に乗り、過剰 ²⁶Mg(直線から右方向へのずれ)を示さない。MC037, MC040 からはミクロンサイズの UR メタルが見つかった。

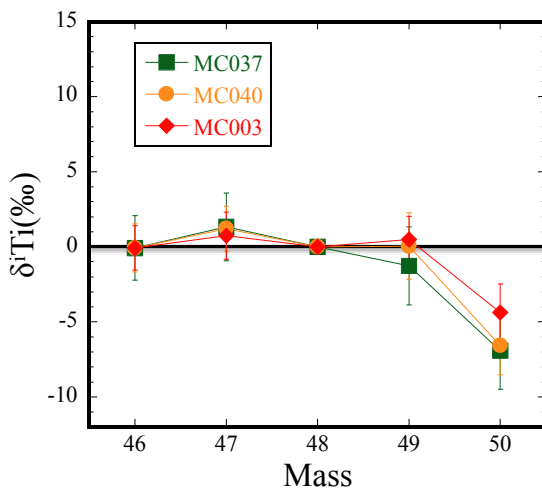
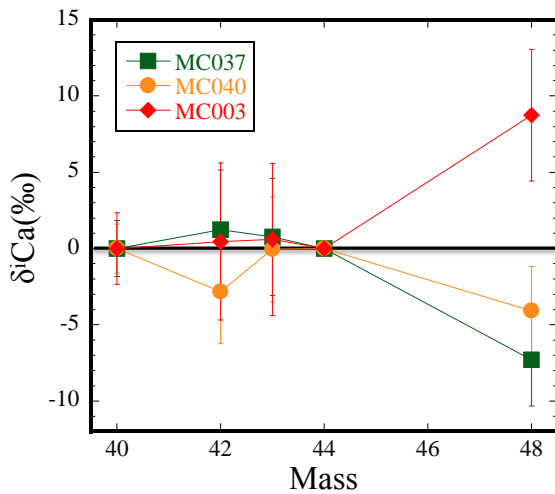


図2. MC037, MC040, MC003 の Ca(上図) および Ti(下図)の同位体組成。 ^{48}Ca , ^{50}Ti に明らかな同位体異常が見える。

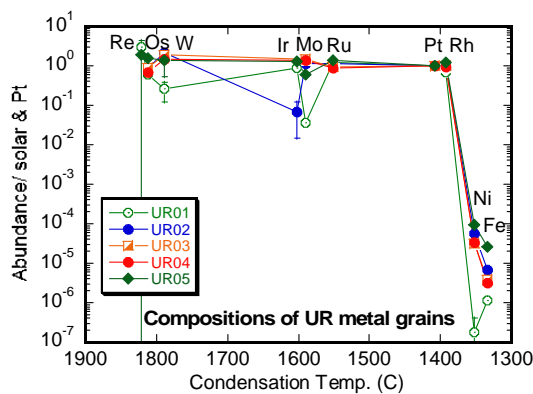


図3. マーチソン隕石から抽出されたヒボナイト包有物中の超難揮発性(UR)メタル粒子の化学組成。横軸は親鉄性元素の凝縮温度。

UR メタルの組成を見ると、ロジウム(Rh)や白金(Pt)よりも凝縮温度の高い親鉄性元素はまったく分別を示していないのに対し、鉄(Fe)やニッケル(Ni)は著しい欠乏を示すこ

とがわかる(図3)。このようなパターンは、包有物が高温の蒸発イベントを経験した際に生成されたと考えられる。

UR メタル粒子の生成シミュレーションをおこなった。半径 100 μm の太陽組成の金属粒子を仮定し、それが真空中で加熱され、レイリー蒸発により組成が変化していったとする。メタル粒子中の親鉄性元素は理想溶液としてふるまうと仮定し、熱力学データ(各元素の蒸気圧)を用いて、粒子のサイズ変化と組成変化をシミュレートした。その結果、鉄が溶融した 1600 以上の高温で蒸発が起こると、Fe, Ni が 5-6 桁以上の著しい欠乏を示した段階でも Rh 以上の難揮発性元素はほとんど分別しないことが示された(図4)。

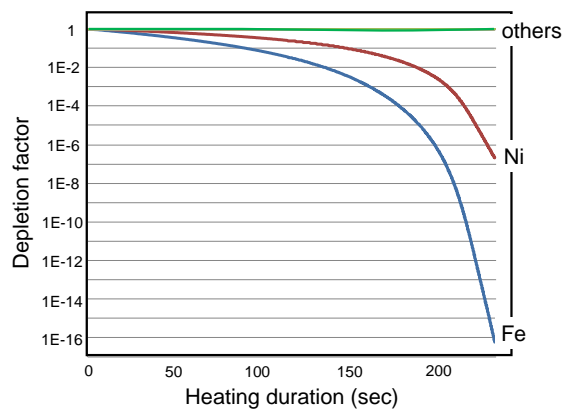


図4 太陽組成のメタル微粒子(半径 100 μm)の蒸発シミュレーション。1600-2000 の高温では、Fe, Ni が5ケタ以上欠乏した段階でも、Rh より難揮発性の親鉄性元素はまったく分別を示さない。これはマーチソン隕石包有物中に見つかった UR メタル粒子の組成と整合的である。

- (3) Y-81020 (CO 3.05) 隕石中のメタル粒子における微量親鉄性元素の分布に関する研究: 分析した元素は、Fe のほか、Ni, Co, Ru, Rh, W, Os, Ir, Pt, Au である。そのうち、とくに Pt, Ir の濃度に注目して解析をおこなった。

まず、マトリックス中に独立して存在する比較的大きなサイズ(50-100 μm)のメタル粒子を分析した。その結果、難揮発性の白金族元素である Pt と Ir はまったく検出されなかった。(数十 ppb 以下。)

次に、コンドルールオリピンの粒子中に存在する微小なメタル粒子(10-20 μm)の分析を試みた。その結果もとめられた Pt および Ir の濃度は、それぞれ 0.14-3.4 ppm、0.12-5.2 ppm であり、コンドルールごと、あるいはメタル粒子ごとに 30-40 倍程度に達する大きなばらつきがあることがわかった。太陽の Ir/Fe 比、Pt/Fe 比を超える値を持つメタル粒子と、その数十分の一の濃度しかないメタル粒子が混在することがわかった。

解釈: 本研究によって得られた結果は、超難揮発性の白金族元素に富むメタル

粒子(URメタル)が、すくなくともコンドラール形成期の原始太陽系星雲において、きわめて不均一に分布していたことを示す。URメタルの形成過程についてはよくわかっていないが、もし原始太陽近傍において形成されたものだとしたら、それらが何らかの方法でCOコンドライトのコンドラール形成領域まで輸送されなくてはならない。また、コンドラール形成イベントによる複数回の加熱によっても他の金属粒子と均一化されることなく生き残っている必要がある。これらのことは、今後原始太陽系星雲の形成と進化を考える上で重要な制約を与えることになるだろう。

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 0 件)

(学会発表)(計 19 件)

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(FUN)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)

Fukuda K., H. Hiyagon, N. Takahata, Y. Sano and A. Hashimoto, A silicon isotopic study of a FUN-like hibonite-bearing inclusion from Allende, 46th Lunar and Planetary Science Conference, 2015 年 3 月 19 日、Woodland (アメリカ)

福田航平、比屋根肇、石田章純、高畑直人、佐野有司、橋元明彦、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 28 日、彩香の宿 一望(茨城県)

福田航平、比屋根肇、佐々木翔吾、三河内岳、藤谷涉、高畑直人、佐野有司、森下祐二、低い Al/Mg 比を示す FUN ヒボナイト包有物の発見、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、2014 年 5 月 2 日、パシフィコ横浜(神奈川県)

比屋根肇、杉浦直治、木多紀子、木村眞、森下祐二、竹鼻祥恵、CR2コンドライト NWA801 中に見つかったエクロジヤイト的クラストの起源: 巨大な微惑星の頻繁な衝突破壊の証拠?、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、2014 年 5 月 1 日、パシフィコ横浜(神奈川県)

Fukuda K., H. Hiyagon, S. Sasaki, W. Fujiya, T. Mikouchi, N. Takahata, Y. Sano and Y. Morishita, Discovery of new hibonite-bearing FUN inclusions from the Murchison (CM2) meteorite, 36th Symposium on Antarctic

Meteorites, 2013 年 11 月 15 日、国立極地研究所(東京都)

福田航平、比屋根肇、佐々木翔吾、藤谷涉、三河内岳、高畑直人、佐野有司、森下祐二、FUN ヒボナイト包有物に関する同位体的研究、日本地球化学会年会、2013 年 9 月 11 日、筑波大学(茨城県)

比屋根肇、福田航平、初期太陽系における同位体均一化プロセスの理解をめざして: マーチソン隕石から抽出した多様なヒボナイト包有物、日本地球化学会年会、2013 年 9 月 11 日、筑波大学(茨城県)

福田航平、比屋根肇、佐々木翔吾、藤谷涉、三河内岳、高畑直人、佐野有司、森下祐二、二次イオン質量分析計を用いた FUN ヒボナイト包有物に関する同位体的研究、第 46 回 月・惑星科学シンポジウム、2013 年 8 月 5 日、宇宙航空研究開発機構(神奈川県)

比屋根肇、杉浦直治、木多紀子、木村眞、三河内岳、平島崇男、森下祐二、竹鼻祥恵、CR2コンドライト NWA801 中に見つかった高圧鉱物相を含むエコンドライトのかげら: その起源と惑星科学における意味、第 46 回 月・惑星科学シンポジウム、2013 年 8 月 5 日、宇宙航空研究開発機構(神奈川県)

福田航平、比屋根肇、佐々木翔吾、藤谷涉、高畑直人、佐野有司、森下祐二、二次イオン質量分析計を用いた FUN ヒボナイト包有物に関する同位体的研究、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、2013 年 5 月 23 日、幕張メッセ(千葉県)

比屋根肇、杉浦直治、木多紀子、木村眞、三河内岳、森下祐二、竹鼻祥恵、NWA801 CR2 コンドライト中のグラファイトを含む岩相と含まない岩相を持つ火成岩的クラストの起源、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、2013 年 5 月 20 日、幕張メッセ(千葉県)

Fukuda K., H. Hiyagon, S. Sasaki, W. Fujiya, N. Takahata, Y. Sano and Y. Morishita, An ion microprobe study of FUN-like hibonite inclusions from the Murchison (CM2) meteorite, 2013 年 3 月 21 日、Woodlands (アメリカ)

Fukuda K., H. Hiyagon, S. Sasaki, W. Fujiya, N. Takahata, Y. Sano and Y. Morishita, Ultra-refractory metal grains in hibonite-bearing inclusions with highly fractionated Mg isotopes, 2012 年 11 月 30 日、国立極地研究所(東京都)

福田航平、比屋根肇、佐々木翔吾、藤谷涉、高畑直人、佐野有司、森下祐二、ヒボナイト包有物を用いた初期太陽系の同位体的研究、日本質量分析学会

同位体比部会、2012年11月22日、
仙台市(宮城県)
福田航平、比屋根肇、佐々木翔吾、大
きなマグネシウム同位体分別を示すヒ
ボナイト包有物中の難揮発性金属粒
子、日本地球化学会年会、2012年9
月12日、九州大学(福岡県)
佐々木翔吾、比屋根肇、藤谷渉、高畑
直人、佐野有司、森下祐二、二次イオ
ン質量分析計によるマーチソン隕石中
のヒボナイト包有物のマグネシウム同
位体分析、日本地球惑星科学連合
2012年大会、2012年5月25日、幕張
メッセ(千葉県)
Sasaki S., H. Hiyaon, W. Fujiya, N.
Takahata and Y. Sano, 34th Symposium
on Antarctic Meteorites, 2011年11月
17日、国立極地研究所(東京都)
佐々木翔吾、比屋根肇、藤谷渉、高畑
直人、佐野有司、マーチソン(CM2)隕
石から抽出したヒボナイト包有物の
NanoSIMSによるAl-Mg同位体分析、
日本惑星科学会2011年度秋季大会、
2011年10月23日、相模女子大学(神
奈川県)

(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