

別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目

Cosmochemical study on the heterogeneity and diversity of nucleosynthetic components in the early solar system inferred from Ba and Sr isotopic analyses of primitive planetary materials

(始原惑星物質中の Ba および Sr 同位体分析からみた初期太陽系の原子核合成成分の不均質性と多様性に関する宇宙化学的研究)

氏 名 佐久間 圭佑

論 文 内 容 の 要 旨

本研究では、始原惑星物質中の Ba および Sr 同位体分析に基づいて、初期太陽系における原子核合成成分の不均質性と多様性に関する詳細な議論を実施した。

太陽系の元素は、太陽系が形成される以前に存在していた複数の原子核合成成分から構成されている。これら原子核合成成分はその起源に依存した多様な同位体組成をもち、これらの核合成成分は初期太陽系形成後の物質進化過程において均質化された。しかし、近年の始原惑星物質中の複数の元素の高精度同位体分析の結果からは、その同位体組成は地球上の物質の同位体組成と比較してわずかな違いが認められ、これは核合成起源同位体異常（同位体異常）として認識されている。これらの結果は始原惑星物質が初期太陽系の同位体不均一性を保持していることを示唆している。また、始原惑星物質の同位体存在度は半減期($t_{1/2}$)が 1 億年以下の現在では完全に壊変してしまった放射性核種（消滅核種）の放射壊変の寄与によってその同位体存在度が変動する可能性がある。消滅核種の放射壊変起源の同位体過剰成分を定量的に見積もるためには、親核種と娘核種を含む元素データに相関をもつ娘核種の同位体過剰成分であることを示す必要がある。始原惑星物質中の複数元素の元素存在度と同位体組成を包括的に測定することで、初期太陽系における同位体組成変動の起源に関するシステマティックな議論を実施す

ることが可能となる。

Ba および Sr 同位体は初期太陽系における原子核合成成分の不均一性と多様性の議論に適した核化学的特徴を持つ。鉄より重い元素は主に s-過程、r-過程および p-過程によって合成される。Ba および Sr の複数の安定同位体は、s-過程、r-過程および p-過程から合成される全ての同位体を含む。また、 ^{135}Ba および ^{87}Sr の同位体存在度は放射性核種である ^{135}Cs ($t_{1/2} = 230$ 万年) および ^{87}Rb ($t_{1/2} = 488$ 億年) の放射壊変起成分の寄与を受けている場合がある。このため、始原惑星物質の元素濃度分析ならびに Ba および Sr 精密同位体組成分析からは、初期太陽系の原子核合成成分の不均質性に関する情報や、 ^{135}Cs – ^{135}Ba および ^{87}Rb – ^{87}Sr 壊変系に基づく年代学的な考察が可能である。一方で、太陽系初期における ^{135}Cs の同位体存在度は 1978 年以降いくつかの試みを実施されているものの、その見積もり値($^{135}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$)は $2.8 \times 10^{-6} \sim 6.8 \times 10^{-4}$ と大きなばらつきがあり、未だ統一的な見解が得られていない。その理由として、始原惑星物質の Cs/Ba 元素濃度比が著しく低いこと (Cs/Ba = 0.0799)、その Ba 同位体組成は核合成起源同位体異常が見られること、これらの要因により ^{135}Cs の放射壊変起源の ^{135}Ba 同位体過剰成分の検出が困難なためである。本研究では、始原惑星物質中の Ba および Sr 同位体分析ならびに微量元素濃度分析に基づいて、初期太陽系における原子核合成成分の不均質性と多様性に関する詳細な議論を実施した。さらに、始原惑星物質中の Ba 同位体に含まれる放射壊変起源の ^{135}Ba 同位体過剰成分の検出を試み、Cs/Ba 元素濃度比を組みあわせることで ^{135}Cs の初期存在度の見積もりを試みた。

本研究では、始原惑星物質である 5 つの炭素質コンドライト(Cold Bokkeveld (CM2.2)、Murray (CM2.4/2.5)、Nogoya (CM2.2)、NWA 4428 (CM anomalous)、Tagish Lake (C2-ungrouped))を使用した。これら始原惑星物質中の同位体組成の均質性を評価するために、酸による段階溶出実験を行った。細紛した各隕石試料(400~1000 mg)の大部分に対して、0.1 M CH_3COOH – $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 、0.1 M HCl、2 M HCl、王水の順に酸溶出を行った。最終的な酸残渣および分取した全岩用試料(< 100 mg)は最終的に HF– HClO_4 によって完全に分解した。各試料溶液は蒸発乾固後、2 M HCl を用いて再溶解し、その約 90%は所定のイオン交換法を用いて Sr および Ba を化学分離し、表面電離型質量分析計(TRITON–Plus)による高精度同位体比測定のために、残り約 10%は ICP 質量分析計(Agilent 7700x)を用いて Rb, Sr, Cs, Ba および希土類元素の濃度測定のために用いた。

炭素質コンドライト隕石全岩の Ba および Sr 同位体データは、多くの場合、わずかな同位体異常が確認された。一方で、炭素質コンドライト隕石の各酸溶出フラクションの Ba および Sr 同位体データは、全岩に見られた同位体異常に比べて大きな同位体異常が見られた。これら酸溶出フラクションの同位体異常に見られた多様性は、始原惑星物質中には初期太陽系における原子核合成成分の不均質性に関する情報が保持されていることを示唆している。酸による段階溶出実験は、全岩試料の分析からは検出できない、太陽系始原物質中の原子核合成成分の不均質性に関する考察に適していたアプローチである。

一方、NWA 4428 の全岩試料および酸溶出フラクションの Ba 及び Sr 同位体異常は他の炭素質コンドライトの同位体異常と比較してその大きさが小さく、誤差範囲を

超えた同位体異常が見られない場合もあった。NWA 4428 の全岩石試料に見られた Sr および Ba の高い元素濃度は砂漠隕石にみられる風化の影響に伴う化学組成の変化の特徴と類似している。この結果から、本研究で使用した NWA 4428 の化学組成と同位体組成は地球上での汚染に伴う風化の影響により典型的な炭素質コンドライトのそれらとは異なる可能性が考えられる。したがって、NWA 4428 の同位体データは同位体異常の起源に関する議論から除外した。

多くの炭素質コンドライトの酸溶出フラクションの Ba 同位体データは、 ^{135}Ba に相関を持つ ^{137}Ba および ^{138}Ba の同位体異常が見られた。また、本研究で使用した全ての炭素質コンドライトの酸残渣の同位体データは、 ^{130}Ba 、 ^{132}Ba 、 ^{135}Ba 、 ^{137}Ba および ^{138}Ba に顕著な負の同位体異常が見られた。この結果は s-過程原子核合成成分のキャリア物質である耐酸性プレソーラー SiC 粒子の存在に起因すると考えられている。しかし、測定された Ba 同位体データには、s-過程原子核合成成分の寄与だけでは説明できない同位体異常が見られた。さらに、Cold Bokkeveld、Murray、Nogoya の酸残渣の ^{135}Ba 、 ^{137}Ba および ^{138}Ba 同位体データの相関に基づく考察からは、これら酸残渣の同位体異常には s-過程の原子核合成成分の寄与のみでは説明できない ^{138}Ba の同位体異常が認められた。これら酸残渣の元素濃度データを考慮した結果、この酸残渣の Ba 同位体異常は ^{138}Ba に顕著な正の同位体異常をもつプレソーラー X 粒子に起因する可能性を見出した。

本研究では、原始太陽系における ^{135}Cs の存在度の見積もりを行うために、これら酸残渣の Ba 同位体異常から s-過程原子核合成成分および X 粒子の寄与を差し引くことで、測定した Ba 同位体データに含まれる ^{135}Cs 放射壊変起源の ^{135}Ba 同位体過剰成分の上限値を見積もった。さらに酸残渣の Cs/Ba 元素濃度分析の結果を組み合わせることで、消滅核種の ^{135}Cs の同位体存在度の上限値($^{135}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$)として、 $(2.28 \pm 0.43/2.28 \pm 0.41) \times 10^{-4}$ (Cold Bokkeveld)、 $(1.40 \pm 1.21/1.39 \pm 0.85) \times 10^{-4}$ (Murray)、および $(4.32 \pm 0.68/4.31 \pm 0.65) \times 10^{-4}$ (Nogoya) と見積もることができた。

一方、炭素質コンドライトの酸残渣以外の酸溶出フラクションおよび全岩試料の Ba 同位体データからは、Cs/Ba 比に相関をもつ ^{135}Ba 同位体過剰成分の検出は困難であり、 ^{135}Cs の存在度に関する定量的な議論を行うことはできなかった。この結果は、隕石母天体での水質変性に伴い ^{135}Cs – ^{135}Ba 壊変系が乱されていること、s-過程以外の原子核合成成分の寄与による Ba 同位体異常が原因であると考えられる。始原惑星物質中の Ba 同位体データから ^{135}Cs の放射壊変に伴う ^{135}Ba 同位体過剰成分を見出すためには、Cs/Ba 比が高い特定部位 (Cs/Ba > 1) の同位体分析を実施する必要がある。しかし、始原惑星物質に対して行った酸による段階溶出実験で得られた酸溶出フラクションにおいてもその Cs/Ba 元素比は低く (Cs/Ba < 0.11)、高精度 Ba 同位体データおよび Cs/Ba 元素濃度比に基づいて ^{135}Cs の初期存在量を議論するためには、太陽系始原物質中の複数の原始核合成成分の寄与を差し引く必要がある。

4 つの炭素質コンドライト (Cold Bokkeveld、Murray、Nogoya、Tagish Lake) の酸溶出フラクションの Ba 同位体データは、p-過程同位体である ^{130}Ba および ^{132}Ba に同位体異常が見られた。さらに、これら酸溶出フラクションの $^{130}\text{Ba}/^{132}\text{Ba}$ 同位体比を見積もった結果、この同位体比には様々な程度の変動 ($^{130}\text{Ba}/^{132}\text{Ba} = 0.9556 \sim 0.9577$) が

確認できた。先行研究のプレソーラーSiC 粒子の $^{130}\text{Ba}/^{132}\text{Ba}$ 同位体比にも顕著な変動が認められ、これらの結果は太陽系初期における p-過程同位体の不均質性を示唆していると思われる。したがって、炭素質コンドライトの酸残差の $^{130}\text{Ba}/^{132}\text{Ba}$ 同位体比の変動は耐酸性プレソーラーSiC 粒子に見られた p-過程同位体の不均質に起因する同位体異常であると考えられる。一方で、その他の酸溶出フラクションの $^{130}\text{Ba}/^{132}\text{Ba}$ 同位体比の変動は酸に可溶性なプレソーラー粒子の寄与を反映している可能性がある。

本研究で使用した炭素質コンドライトの全岩試料および酸溶出フラクションは p-過程同位体である ^{84}Sr に検出可能な程度の同位体異常が見られた。一方で、酸残差に見られた顕著な ^{84}Sr の負の同位体異常は、プレソーラーSiC 粒子が農集した際に生じる見かけ上の ^{84}Sr 同位体異常であると解釈されている。したがって、本研究で確認された ^{84}Sr 同位体異常は、s-過程同位体の寄与に伴う同位体分析時の質量分別の誤った補正によって生じた見かけ上の同位体異常である可能性が示唆される。

本研究の炭素質コンドライトの全岩試料および酸溶出フラクション $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ データは Rb/Sr 比にわずかな正相関が見られたが、 ^{87}Rb – ^{87}Sr 壊変系に基づく年代学データを得るには至らなかった。この結果は先行研究においても確認されており、炭素質コンドライト母天体での水質変性に伴い再分配された Rb と Sr を含む様々な相が、酸による段階溶出実験においてこれらの相から Rb や Sr が不完全に溶出した可能性が指摘されている。一方で、酸溶出フラクションにしばしば見られた全岩試料よりも高い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比が ^{87}Rb の放射壊変起源の寄与を示している可能性を考慮すると、本研究で使用した炭素質コンドライトの ^{87}Rb – ^{87}Sr 壊変系は隕石母天体を破壊したような激しい衝突イベントに伴う擾乱を受けている可能性がある。この衝突イベントは炭素質コンドライト隕石の ^{135}Cs – ^{135}Ba 壊変系を乱す要因のひとつとして考える必要がある。

