

氏 名 横山 立憲

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1600 号

学位授与の日付 平成25年3月22日

学位授与の要件 複合科学研究科 極域科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 角礫岩コンドライトに含まれるアルカリに富む岩片の
同位体年代学研究

論文審査委員 主 査 准教授 三澤 啓司
教授 小島 秀康
助教 海田 博司
教授 海老原 充 首都大学東京
教授 長尾 敬介 東京大学

論文内容の要旨

炭素質コンドライト、普通コンドライト、および大規模分化を経験した分化天体を起源とするエコンドライトの揮発性元素および中程度揮発性元素存在度は、太陽系の化学組成を保持している CI コンドライトの元素存在度に比べ、低いことが知られている。このような惑星物質の揮発性元素、および中程度揮発性元素の損失は、原始太陽系星雲中での蒸発-凝縮過程で起きたと考えられている。蒸発-凝縮過程によって揮発性に応じた元素分別が起きたならば、難揮発性元素の凝縮の後に揮発性の高い元素に富んだ凝縮物が生成されるはずである。しかしながら、揮発性の高い元素に富んだ物質の報告例は極めて少なく、また、これらの元素がどのような過程で母天体から失われたのか長年に渡り議論されてきた。

角礫岩コンドライトである Bholā (LL3-6), Krähenberg (LL5), Acfer 111 (H3-6), Siena (LL5), Yamato (Y)-74442 (LL4) から、著しくアルカリ元素に富む岩片が報告されている。アルカリ元素は中程度揮発性元素で親石元素に分類されるが、イオン半径が大きく結晶分化作用において液相に濃集する不適合元素である。これらの岩片のアルカリ元素存在度はナトリウムに乏しく、原子番号の大きなアルカリ元素ほど高い。Bholā, Krähenberg に含まれる岩片のアルカリ元素分別は気相を介した元素の交換反応によって起きたものと解釈されていたが、元素分別過程、および岩片の形成についての理解は不十分であった。本論では、Bholā, Krähenberg, Y-74442 に含まれるアルカリに富む岩片の岩石鉱物学研究から岩片の組織観察と主要元素化学組成分析をおこない、Bholā, Krähenberg, Y-74442 に含まれる岩片の化学的特徴の比較、および形成環境の解明を試みた。また、岩片の形成年代の決定、および起源物質の化学的特徴を解明することを目的として Y-74442, Bholā に含まれる岩片について同位体年代学研究をおこなった。

Bholā, Krähenberg, Y-74442 に含まれるアルカリ元素に富む岩片の岩石鉱物学研究から、これらの岩片の組織は類似していることがわかった。また、岩片の主要元素化学組成は隕石間で良く一致し、カリウムに富んでいること、およびナトリウムの損失を除いてそれぞれのホストの化学組成と一致した。このことから、Bholā, Krähenberg, Y-74442 に含まれるアルカリ元素に富む岩片の起源物質は、同一もしくは同様の過程により形成されたことが示唆された。

Y-74442 に含まれるアルカリ元素に富む岩片の Rb-Sr 同位体分析から、岩片のルビジウム濃度は CI コンドライトの濃度と比較して[~]70 倍の濃集していた。Y-74442 の岩片 9 試料から得られた Rb-Sr アイソクロン年代は 4429 ± 54 Ma、初生 Sr 同位体比は $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7144 \pm 0.0094$ であった。岩片試料それぞれの Rb/Sr 比は均質ではなく、変動が認められた (Rb/Sr: 2.28-15.1)。また、K-Ca 同位体分析からは、⁴⁰K を壊変起源とする ⁴⁰Ca の同位体過剰が確認できた。そこで、K-Ca 同位体系を岩片の年代決定の同位体系として適用した。K-Ca 同位体系から得られた K-Ca アイソクロン年代は 4513 ± 230 Ma となり、Rb-Sr 同位体系から得られた年代と誤差の範囲内で一致した。Rb-Sr、および K-Ca 同位体系より得られたアイソクロン年代は、アルカリに富む岩片が結晶化した年代を示していると解釈された。また、初生 Ca 同位体比は $^{40}\text{Ca}/^{44}\text{Ca} = 47.1587 \pm 0.0032$ であった。

Rb-Sr 同位体系から得られた若い形成年代と高い初生 Sr 同位体比は、岩片のアルカリ元素分別過程が、太陽系初期に起きたことを強く示唆していた。また、アルカリに富む岩

片の Rb/Sr の変動は、4429 Ma の岩片形成時に元素分別があったことを示唆していた。すなわち、アルカリ元素に富む岩片は、太陽系初期 (~4568 Ma) と、母天体上での最後の溶融-固化過程時 (~4429 Ma) に元素分別を経験したことが示唆された。4568 から 4429 Ma にかけての Sr 同位体比の進化からみて、Y-74442 のアルカリ元素に富む岩片の起源物質の Rb/Sr 比は、マグマの結晶分化作用による元素分別過程の痕跡を残す Kodaikanal IIE 鉄隕石中のシリケート包有物や、月試料中の花崗岩片と比較して 2 倍以上高い組成をもっていたことがわかった。このことから、Y-74442 の岩片の元素分別は結晶分化作用により生じたとは考えられない。そこで、これまで提唱されていたモデルを含めて検討した結果、太陽系初期に元素分別したアルカリに富む凝縮物 (成分 A) と一般的にコンドライトを構成する苦鉄質成分に富んだ物質 (成分 B) とが 4429 Ma に混合し、Y-74442 に含まれるアルカリ元素に富む岩片が形成されたと仮定した。その結果、アルカリ元素に富む岩片のストロンチウム、およびカルシウム同位体の進化から、成分 A の Rb/Sr、および K/Ca 比は Rb/Sr = 20-30000, K/Ca ~ 5-180 であり、混合比 A:B = 1:99-10:90 の混合によって岩片が形成されたことが示唆された。さらに、母天体上での混合 (溶融-固化) 過程の際に、気相に存在した Rb の岩片への付加があったと考えられる。アルカリに富む岩片の起源物質と考えられるアルカリに富む凝縮物 (成分 A) は、原始太陽系星雲中での難揮発性元素の凝縮過程の後に起こり得る、中程度揮発性元素の凝縮物であると考えられる。

原始太陽系星雲中でアルカリ元素に富む凝縮物 (成分 A) が 4568 Ma に形成された後、約 1 億年間 (4568 から 4429 Ma の間) 他の惑星物質との反応から逃れ、4429 Ma に成分 B と衝撃溶融作用によって母天体上で混合したと結論した。母天体上での混合過程によって、アルカリに富む岩片が形成され、直後に気相に存在した Rb の付加を受けたと考えられる。その後、岩片は母天体での角礫岩化作用によって粉碎され、Y-74442 に取り込まれた。

アルカリに富む岩片の元素分別が、原始太陽系星雲で起きたならば、50%凝縮温度を 1000-800 K とする、親石元素であるアルカリ元素の選択的な凝縮があったことが示唆された。このことから、原始太陽系星雲中において、凝縮温度また、元素の特性に依存した凝縮過程があったと結論された。

本論文は、角礫岩コンドライト隕石中に含まれるアルカリ元素に富む岩片の起源と進化過程を、同位体年代学研究から解明しようとしたものである。出願者は、CI コンドライト隕石を除いた惑星物質が、中程度の揮発性を示す元素、その中でもアルカリ元素に欠乏していることに着目し、その元素分別は何に起因したのか、解明する手立てを探した。そこで欠乏ではなく、アルカリに富む物質に着目し、惑星物質の元素分別過程を類推するという手法をとった。

角礫岩コンドライト Yamato (Y) -74442, Bhole, Krähenberg から、アルカリに富む岩片が報告されていた。Y-74442, Bhole, Krähenberg 岩片の組織、構成鉱物、化学組成に基づいて、その起源物質と形成環境を推定した。また、岩片の形成年代と起源物質の化学的特徴を明らかにするために、Y-74442, Bhole 岩片について Rb-Sr, K-Ca 同位体年代学研究を行った。

角礫岩コンドライト中のアルカリに富む岩片は、サイズが小さく、岩片の色や組織の特徴からは他の(アルカリに富んでいない、ありふれた)岩片と容易に識別できない。そこで、 ^{40}K の β -壊変(放射線)を利用してイメージングプレート(IP)を感光させることにより、破壊することなく同定する方法を確立した。

IPにより同定されたアルカリ元素に富む岩片について、同位体分析を行った。岩片のK, Rb 存在度は、CI コンドライトと比較して20-70倍の濃集が認められた。一方、Ca, Sr 存在度はコンドライト的、あるいはそれ以下であった。Y-74442 岩片9試料から、Rb-Sr 年代 4429 ± 54 Ma、初生比 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7144$ を得た。また、K-Ca 同位体分析から、 ^{40}K の β -壊変を起源とする ^{40}Ca の過剰が確認された。この ^{40}Ca の過剰が K/Ca 比と正の相関を示したことから、コンドライト物質に対して初めて K-Ca 同位体系を適用した。Y-74442 岩片6試料から、K-Ca 年代 4513 ± 230 Ma、初生 Ca 同位体比 $^{40}\text{Ca}/^{44}\text{Ca} = 47.1579$ を得た。誤差は大きい、K-Ca 年代は Rb-Sr 年代と一致した。

Rb-Sr 同位体系から得られた Y-74442 の形成年代と初生 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は、コンドライト物質と比較すると年代が若く初生比が高い。これは、岩片のアルカリ分別過程が太陽系のごく初期に起きたことを示唆していた。Y-74442 のアルカリ元素に富む岩片の起源物質の持つ Rb/Sr 比は、マグマの結晶分化によって形成された鉄隕石中のシリケート包有物や、アポロ月試料中の花崗岩片の Rb/Sr 比と比較しても2倍以上大きい。このことから、Y-74442 岩片にみられるアルカリの濃集は、結晶分化作用に伴う固相-液相間の元素分配により生じたものではないと結論した。

Y-74442 に含まれるアルカリ元素に富む岩片は、太陽系初期に元素分別したアルカリに富む物質(成分A)とコンドライト的な苦鉄質成分(成分B)とが4429 Maに混合し形成された、と仮定してアルカリ元素に富む端成分に制約を与えた。成分Aは、原始太陽系星雲中での難揮発性元素の凝縮後のガスから形成されたと考えられる。成分Aは、 ^{87}Rb からの放射起源 ^{87}Sr を蓄積し続け、4429 Maに成分Bと混合し、アルカリに富む岩片が形成されたと結論した。その後、岩片は母天体での角礫岩化作用によって粉碎され、最終的に Y-74442 に取り込まれたと考えた。

これらの結果をもとに、LL 角礫岩コンドライト中のアルカリに富む岩片の起源と分化過程について、以下のことが明らかになり、太陽系初期の元素分別を議論するうえで新たな制

約となった。(1) 共通した材料物質、酸化還元環境、熔融温度、冷却速度、結晶過程を経て形成された、(2) アルカリに富む岩片の起源物質は太陽系初期にアルカリ/アルカリ土類元素分別を起こした凝縮物と LL コンドライトから親鉄、親銅元素が除かれた物質の混合による、(3) 太陽系形成後約 1 億年経過してから上記 2 成分が混合し、衝撃溶融を経て形成された、(4) 衝撃溶融の際にさらにガス相からアルカリ元素を取り込んだ、(5) 中程度の揮発性を示す元素の分別は、原始太陽系星雲の材料となった分子雲で起こったものではない、(6) 角礫岩コンドライトには星雲過程での元素分別の記録を保持した物質が残されている。

角礫岩コンドライト中の岩片について、高精度の同位体分析を行い形成年代と起源物質の化学的特徴を推定したことは、中程度の揮発性元素の分別過程および惑星物質の初期進化過程に制約を与えるものであり、学術的に意義深い。IP を用いて K に富む相を同定したこと、さらにコンドライトの構成物質について初めて K-Ca 同位体系を適用したことは高く評価された。

論文審査、論文公開発表、口頭試問結果にもとづいて、博士論文審査委員会は、出願者から提出された論文が学位論文に値すると全会一致で判断し、合格とした。学位論文の研究分野から、付与する学位は、博士（理学）が適当である。