

準惑星セレスの形成・熱進化の理解に向けた熱水実験生成物の化学・鉱物分析 Formation and thermal evolution of Ceres inferred from hydrothermal experiments and mineralogical analyses

森 愛美^{1*}, 関根 康人², 桑谷立², 澁谷岳造³, 鈴木勝彦⁴, 正木裕香⁴

Megumi MORI^{1*}, Yasuhito Sekine², KUWATANI, Tatsu², SHIBUYA, Takazo³, SIZUKI, Katsuhiko⁴, MASAKI, Yuka⁴

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻, ² 東京大学新領域創成科学研究科複雑理工学専攻, ³ JAMSTEC・プレカンブリアンエコシステムラボ, ⁴ JAMSTEC・IFREE

¹ Dept. Earth & Planet. Sci., Univ. Tokyo, ² Dept. Complexity Sci. & Engr., Univ. Tokyo, ³ Precambrian Ecosys. Lab., JAMSTEC, ⁴ IFREE, JAMSTEC

準惑星セレスは、小惑星帯における最大の天体であり、原始惑星の姿を現在まで留めている数少ない天体のひとつである。また、その密度や形状から、セレス内部は岩石コアと氷マントルに分化している可能性が示唆されている。熱史モデルによると、このような内部構造を説明するためには、セレスは形成初期に大規模融解を経験した可能性が高いことが示唆されている [Castillo-Rogez and McCord, 2010]。その場合、内部では熱水反応に伴い、オリビンなどの始原的鉱物が水質変成を経験したと考えられる。このような水質変成で形成される二次鉱物の組成は、温度条件や水溶液組成によっても大きく異なる。したがって、セレスの鉱物組成を知ることは、その集積時期、微惑星の化学組成や初期太陽系の温度構造を知る上で大変重要となる。近年の地上望遠鏡によるセレスの反射スペクトルから、表面にはオリビンの熱水反応によってできるブルーサイト、鉄に富む蛇紋石、マグネシウムに富む炭酸塩、磁鉄鉱が存在することが示唆された [Milliken and Rivkin, 2009]。しかしながら、これらの鉱物がどのような温度条件・水溶液組成で生成されるのか、各条件の違いが生成される鉱物・化学組成にどのような影響を及ぼすのかについてはよくわかっていない。

本研究では、このような二次鉱物が生成される条件を明らかにするため、オリビンの熱水反応実験を行なった。特に、温度と水溶液中のCO₂量に注目し、この二つのパラメータを変化させて、形成される二次鉱物の化学組成にどのような影響が出るのか調べた。熱水実験には、インコネル合金製オートクレーブを用い、初期鉱物としてサンカルロス産オリビンの粉末 (Mg/(Mg+Fe) = 0.9) を用いた。水溶液にはCO₂源としてNaHCO₃を0.02%もしくは0.6%加え、NH₃を~1%加えた。圧力は400気圧で固定し、温度は200、300、400で行なった。実験後、固体成分を回収し、その鉱物組成をX線回折で分析し、構造や化学組成を電子線マイクロアナライザで分析した。

二次鉱物組成に対する温度依存性については、2価鉄の酸化反応の反応速度の違いがこれに大きく影響することがわかった。200では300に比べて磁鉄鉱が形成されにくく、蛇紋石中のFe/Mg比は300に比べて、200の方が高くなることがわかった。さらに、ブルーサイトは200では固体成分中に存在しなかったが、300では多く存在していた。これらの結果は、300では、オリビンに含まれていた2価鉄が効率的に酸化され磁鉄鉱になるため、蛇紋石がマグネシウムに相対的に富むことになったと解釈される。一方、200では、鉄の多くが2価のまま蛇紋石に留まったと解釈される。400ではオリビンが熱力学的に安定となり、二次鉱物はほとんど生成されなかった。

二次鉱物組成に対する初期CO₂量依存性については、炭酸塩生成による二次鉱物間の元素分配の変化が重要となることがわかった。ブルーサイトはCO₂が少ない条件では固体成分中に多く存在し、CO₂が多い条件では非常に稀にしか存在しなかった。反対に、炭酸塩は、CO₂が少ない条件では存在量は低く、CO₂が多い条件では、マグネシウムを含む炭酸塩が多く存在した。また、蛇紋石中のFe/Mg比は、CO₂が多い条件の方が少ない条件に比べて高くなることがわかった。これらの結果は、CO₂が多い場合、マグネシウムイオンの多くが炭酸塩に分配されるため、ブルーサイトが生成されにくく、マグネシウムが炭酸塩生成に使われるため蛇紋石中の鉄の割合も相対的に高くなったものと解釈される。

今回の実験においては、セレス表面スペクトルから推定される二次鉱物がすべてできる単一の条件(温度・CO₂量)は存在しなかった。特に、ブルーサイトはCO₂の少ない条件で生成しやすいのに対し、鉄に富む蛇紋石は比較的低温(<~200)でCO₂の多い条件で生成しやすい傾向がある。したがって、セレスの表面はクレーター形成などにより、異なる条件で生成した内部物質が露出・放出され、組成的に不均質になっている可能性が考えられる。本実験結果は、ブルーサイトが大量に生成するためには、初期セレスの内部温度が少なくとも300程度まで上昇する必要があることを示唆している。熱史モデル [Castillo-Rogez and McCord, 2010] によると、内部がこのような高温になるには、セレスが太陽系形成からおおよそ200~300万年後に集積する必要があることを示しており、本研究は、セレスのような原始惑星は、このような太陽系形成後の比較的早い段階で形成していた可能性があることを示唆する。

キーワード: 熱水反応, セレス, 初期太陽系, 鉱物分析

Keywords: hydrothermal reactions, Ceres, early solar system, mineralogical analysis