

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18779

研究課題名(和文)木星型惑星の内部構成物質の初期進化過程の解明

研究課題名(英文) Hydrothermal evolution in the interior of a large hydrous planetesimal in the early solar system

研究代表者

中村 智樹 (Nakamura, Tomoki)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：20260721

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,600,000円

研究成果の概要(和文)：初期太陽系に存在した大型の含水微小天体における物質進化過程を明らかにするためには、含水炭素質隕石と超臨界水との反応を調べる熱水実験を行う必要がある。本研究ではその実験の手法を確立することを目的とした。地球の含水鉱物を用いて予備実験を行い、さらに含水炭素質隕石を用いた熱水加熱実験(600度 250気圧 50時間、水岩石比1)を2重構造のカプセルを用いて行った。実験後の回収サンプルに対し放射光を用いた分析を行った。その結果、隕石中の含水鉱物が、高温下の超臨界水との反応で部分脱水していることが確認できた。これにより含水炭素質隕石と超臨界水との反応を調べる熱水実験の手法を確立することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

惑星形成の初期段階で巨大化した含水微小天体では、天体内部の温度が上昇し、超臨界水が存在する状態での加熱現象が起こっていたと考えられる。この現象における解明すべき重要なポイントは、超臨界水により太陽系始原物質(小惑星由来の炭素質隕石)がどのように物質変化するかを理解することである。本研究では、この現象を調べるための熱水実験の手法を確立することができた。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the chemical and mineralogical evolution in the interior of large hydrous planetesimals, hydrothermal experiments must be performed using carbonaceous chondrites and super-critical water. The purpose of this study is to develop the experimental procedure such hydrothermal experiments. We carried out a preliminary experiment using terrestrial serpentine and a hydrothermal experiment using carbonaceous chondrite with conditions of 600 °C for temperature, 250atm for pressure, 50hours for experimental duration, and water/rock ratio of 1. The experimental product was analyzed by using synchrotron X-ray radiation for CT and XRD. The results indicate that hydrous phases in carbonaceous chondrite was decomposed and partially dehydrated. In this study, we developed the procedures of hydrothermal experiments using carbonaceous chondrites and super-critical water.

研究分野：惑星科学

キーワード：炭素質隕石 超臨界水 熱水反応

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

約46億年前の太陽系形成期には、中心の原始太陽を取り囲むようにガスと塵からなる原始太陽系円盤が存在した（図1）。円盤内部の温度は太陽から離れると低温になる。そのため雪線以遠の円盤領域は極低温になり円盤ガス中に氷粒子が存在する。それらは岩石の塵とともに集積し、太陽系で最初の氷岩石微小天体が誕生した。木星や土星などの外惑星領域には、このような氷岩石微小天体が多数存在していたと考えられる。これらの天体では、天体内部の放射性核種の崩壊熱で氷が溶け水となり、天体内部で水岩石反応（水質変成）が起こった。水質変成は微小天体形成後、500万年程度続いたことがわかっている。この水質変成で天体内部には大量の層状ケイ酸塩（含水鉱物）が生成された。その後、時間経過とともに、短寿命核種の存在度が減少し、天体内部の温度が下降し、水質変成は反応を停止した。多くの小惑星には、このような太陽系初期の水質変成の証拠が残っている。含水小惑星から飛来する炭素質コンドライト隕石の研究から、小惑星の形成進化史の解明が進んでいる。

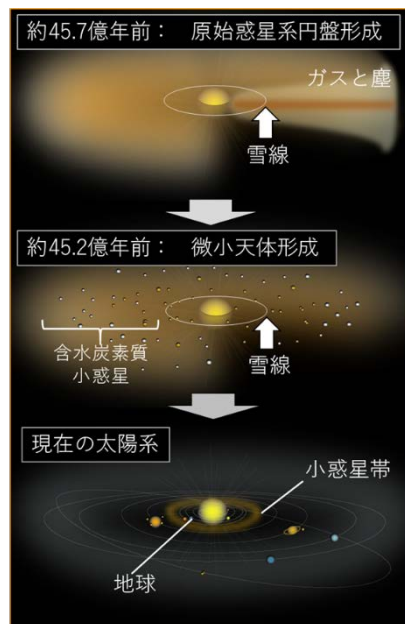


図1 太陽系の形成過程

しかしながら、水質変成により形成された含水鉱物を研究して得られる情報は、天体内部が低温に保たれた微小天体の物質進化に関するものに過ぎない。つまり、含水鉱物が熱分解しない温度での物質進化の情報しかわからないということである。これは明らかに重要なプロセスを見逃している。雪線付近の微小天体の一部は急激に成長し、他の微小天体をその大きな重力で捕獲しながら成長することと考えられている。このように寡占状態で成長した微小天体が最終的に木星になる。大きく成長した含水微小天体では、放射性元素の壊変熱に加え、天体表面への衝突加熱（集積加熱）という熱源が加わり、さらに天体内部の温度は上昇する。その結果、天体内部では水は超臨界状態になり、水の存在下での高温高压変成が起こり、天体の構成物質（結晶や有機物）は確実に大きな影響を受けることになる。このプロセスを理解することは木星型惑星（木星～海王星）の初期の形成過程を解明する上で非常に重要である。本研究では、超臨界水の太陽系始原物質への影響を実験的に再現することを最終的な目標とする。超高温下での水質変成と一般的な低温下での水質変成との差異を理解することを目指す。例えば、超臨界水の存在下では、元素の再分配速度や結晶の成長速度が飛躍的に増大すると予測され、巨大惑星の形成時に起こった鉱物分化や元素分別のプロセスの特異性が解明されることが期待される。

### 2. 研究の目的

雪線以遠に存在した大型の含水微小天体内部における物質進化過程を明らかにするために、雪線以遠の領域の始原物質である含水炭素質隕石に対し、超臨界水存在下での水熱実験を行うのが本研究の目的である。惑星形成の初期段階で巨大化した含水微小天体では、天体内部の温度が上昇し、超臨界水が存在する高压下での加熱現象が起こっていたと考えられる。本実験において解明すべき重要なポイントは、超臨界水により太陽系始原物質がどのように物質変化するかを理解することである。高温高压（374℃以上、218気圧以上）で生じる超臨界水は通常の水とは異なる特性を持つ。太陽系の未分化物質（始原隕石）と超臨界水との反応については何一つ解明されていないが、この反応こそが巨大惑星へ進化する含水微小天体内部で起こった大きな物質変化を引き起こしたと考えている。本研究は萌芽研究という限られた期間とリソースで行うため、含水炭素質隕石と超臨界水の反応実験の方法を確立することに主眼を置き、体系的な実験は萌芽研究に引き続いて行っていく予定である。

### 3. 研究の方法

実験1：地球の含水鉱物 (Serpentine) を用いて、超臨界水と含水鉱物の実験手法を確立するための実験を行った。高温高压時の漏水を押さえるために、水と岩石を二重カプセル方式の封入方法を検討した。Mg#が約 80 の Serpentine を水岩石重量比 1 で、500°C、220 atm の条件で約 50 時間の熱水加熱実験を行った。その結果、実験の終了時に実験前に封入した水が漏れずに残っていることを確認した。実験サンプルは放射光 X 線による X 線回折実験や、走査型電子顕微鏡による解析を行った。

実験2：実験1で同様の実験手法を適用し、11.5mg の含水炭素質隕石 (Murchison CM 隕石) を水岩石モル比 1 で 600 度 250 気圧 50 時間 の条件で熱水加熱実験を行った。Au チューブに Murchison 隕石、水、AgPd チューブを封入した。AgPd チューブには Co と CoO と水を封入した。したがって、Au チューブと AgPd チューブの 2 重構造である。実験後、水が封入した水が漏れずに残っていることを実験前後の重量変化で確認し、隕石サンプルを回収した (図2)。水熱実験後の Murchison 試料は放射光 X 線による X 線回折実験と CT 分析を行った。

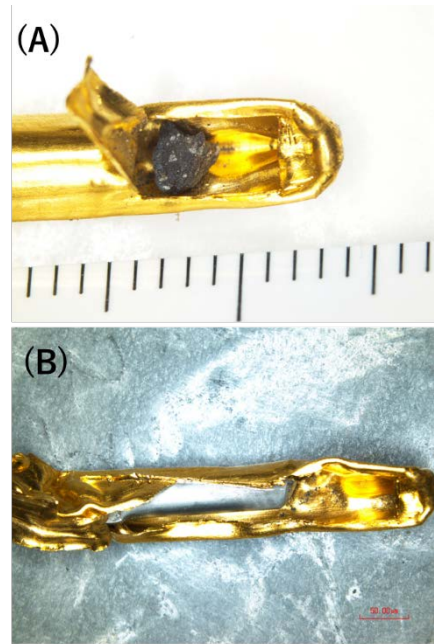


図2 (A) 水熱実験後のAuチューブ中のMurchison隕石 (B)水熱実験後のAuチューブ中のAgPdチューブ

### 4. 研究成果

実験1：熱水加熱した Serpentine の走査型電子顕微鏡の観察の結果、鉱物内部の構造に大きな変化は見られなかった (図3)。また、Serpentine の化学組成 (Mg/Fe 比) も実験前後で大きな変化は見られなかった。一方、熱水加熱した serpentine の方が分析値のトータルが約 5wt% が高いことが分かった (出発物質 70-85% vs 実験加熱物 75-90%)。したがって、Serpentine の一部が脱水していると推測される。高エネルギー加速器研究機構で、出発物質と実験加熱した Serpentine の X 線回折実験を行った。その結果、どちらの試料も Serpentine 以外の X 線回折線は検出されなかった。したがって、実験加熱物は一部が分解し、非晶質状態になっていると推測される。

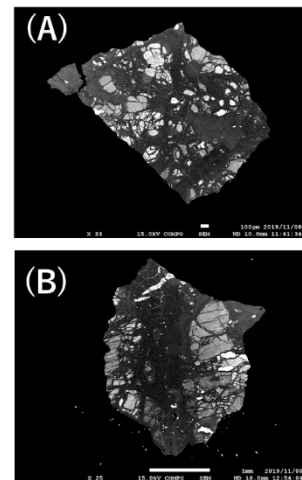


図3 水熱変成実験前 (A) と実験後 (B) の Serpentine

実験2：放射光 X 線 CT 分析の結果、熱水加熱した Murchison 隕石は、大きな構造の変化は見られなかったものの、マトリックスに多産する Fe と S に富む大きさ <math>< 50\mu\text{m}</math> 程度の Tochilinite-Cronstedtite-Intergrowth (TCIs) が確認されなかった (図4)。X 線回折分析の結果、Murchison 隕石の主成分である TCI と serpentine が検出されなかった。一方、二次的に形成されたと考えられる olivine と magnetite の強い回折線が確認された。また、(現在未同定である) 面間隔 9.7 Å を示す鉱物が確認された。

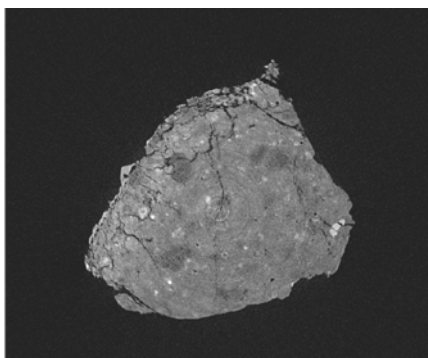


図4 水熱実験後のMurchisonのCT像。  
試料の横幅が3mm程度である。

この鉱物は非加熱の Murchison 隕石には含まれていないので、熱水加熱により生じたと考えられる。tochilinite や serpentine が分解され、olivine と magnetite に変化したことにより、Murchison の含水鉱物は脱水分解したと考えられる。一方、9.7 Å を示す相は含水ケイ酸塩の可能性もあり、元の含水相が分解すると同時に別の含水相が

形成された可能性がある。これらの鉱物学的変化は、水を入れないドライな系での Murchison 加熱実験（600 度加熱により olivine, low-Ca pyroxene, FeNi metal, FeS が生成：Yamashita et al. 2020 等）の鉱物変化と大きく異なることが示された。この実験により、含水炭素質隕石と超臨界水との熱水反応を調べる実験方法を確立することができた。今後は実験生成物のさらなる解析（9.7 Å を示す相の TEM による同定）、および、加熱温度と水岩石比を変えた系統的な実験を行っていく予定である。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6 . 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	三部 賢治  (Mibe Kenji)  (10372426)	東京大学・地震研究所・助教   (12601)	
研究 協 力 者	中村 美千彦  (Nakamura Michihiko)		