

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610177

研究課題名(和文) C型小惑星の含水量の定量的評価

研究課題名(英文) Quantitative estimation of water contents of C-type asteroids

## 研究代表者

中村 智樹 (Nakamura, Tomoki)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20260721

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：原始の小惑星に含まれる水分量を定量化する目的で、含水C型小惑星から飛来したマーチソン隕石の加熱実験を行い、加熱に伴う含水量や鉱物学的特性の変化を調べた。その結果、約600℃の加熱でC型小惑星の物質は脱水し、鉱物学的には無水ケイ酸塩が主体になることがわかった。加熱した隕石の3ミクロンバンドの吸収深さと水分量の相関関係が求まった。この関係をもとに、小惑星の含水量をスペクトルから推定することが可能になる。

研究成果の概要(英文)：Experimental heating of Murchison CM chondrite that came from hydrous C-type asteroid was carried out in order to estimate water contents of primitive asteroids. The experiments revealed changes of water contents and mineralogical characteristics of the heated Murchison samples with increasing heating temperatures. Heating at 600°C or higher results in almost complete loss of water from Murchison and thus changes hydrous mineralogy to anhydrous one. A correlation between depths of 3- $\mu\text{m}$  band and water contents was found from experimental heating of Murchison and, based on this relation, the water contents of the hydrous primitive asteroids will be estimated in the near future.

研究分野：惑星科学

キーワード：宇宙地球化学

### 1. 研究開始当初の背景

C型およびD型小惑星は小惑星帯の中央から外縁部にかけて広く分布し、木星型惑星の起源天体として知られている。両者は太陽からの赤外線(波長約3ミクロン)を吸収することから、含水鉱物または水分子そのものを含んでいることが反射スペクトル観測から示された。太陽系形成期に、これらの含水小惑星から飛来した大量の隕石が、地球の水の起源である可能性がある。しかしながら、含水小惑星に現在どの程度の含水鉱物や水分子が含まれているか、定量的な見積もりはされていない。一方、これらの小惑星から飛来する始原隕石には、含水鉱物や一部水分子を含むものが存在する。したがって、小惑星の反射スペクトルから定量的に含水量を推定する手法の開発が必要である。

### 2. 研究の目的

含水小惑星から飛来した始原炭素質隕石に対し、酸素分圧をコントロールした雰囲気中で加熱実験を行い、加熱温度上昇に伴う水分量と3ミクロン吸収強度との相関関係、脱水に伴う鉱物学的な変化を求める。そしてその関係を天体観測で求めたCおよびD型小惑星の反射スペクトルに適用し小惑星の水分量を定量化する基礎データとする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 加熱実験

小惑星表面での加熱脱水を再現するため、Murchison 隕石粉末試料( $<155\mu\text{m}$ )を真空化( $10^{-7}\sim 10^{-5}\text{torr}$ )の閉鎖系において、400、600、900 で 50 時間加熱を行った。実験の詳細な方法は Nakato et al.

(2008) とほぼ同じだが、本研究では SUS 管内に試料と共に鉄粉を入れることで、SUS 管内の酸素分圧を 1W にバッファードした。400、600、900 の各温度で用いた試料の質量は、それぞれ 160、160、200mg である。

#### (2) カールフィッシャー滴定法

未加熱および加熱後 Murchison、Jbilet Winselwan、Dho735 粉末試料( $<155\mu\text{m}$ )の水分量は、カールフィッシャー滴定法を用いて測定した。測定は水分気化装置(VA-122型)と電量滴定方自動水分測定装置(CA-100型)を用いて行った。水分気化装置の温度は、105、200、300、400、600、800、950 に設定した。

このように装置の設定温度を刻むことで、試料に付着した吸着水と試料の構成鉱物中の

水分を分けて検出することができる。各温度での測定時間は試料内の水分量にもよるが、およそ 10~30 分程度である。

#### (3) 反射スペクトル測定

東北大学にある FT-IR 装置(VERTEX 70v)により、バルクの未加熱および加熱後 Murchison および Dho735 粉末試料( $<155\mu\text{m}$ )のペレットの測定を行った。測定は真空下(2hPa)で行われ、ビーム径は約 4mm、位相角は 30 度(入射角 30 度、出射角 0 度)、測定波長範囲は  $0.38\sim 15\mu\text{m}$  であった。

#### (4) 放射光 X 線回折実験

高エネルギー加速器研究機構の放射光放射光科学研究施設 フォトンファクトリービームライン 3A にて、ガンドルフィカメラを用いてバルクの未加熱および加熱後 Murchison 粉末試料( $<155\mu\text{m}$ )の放射光 X 線回折実験を行った。試料はグリコールフタレートを用いてカーボンファイバーの先端に取り付けた。X 線の波長は  $2.161\pm 0.001$ 、X 線照射時間は 10~30 分程度である。

### 4. 研究成果

Murchison、Jbilet Winselwan、Dho735 試料の分析の結果、以下に示す事実が明らかになった。

(1) XRD 分析結果から、加熱によって Murchison 試料の構成鉱物が変化した(図1)。未加熱 Murchison 試料は構成鉱物として、serpentine、tochilinite、pentlandite、gypsum が確認された。400 では tochilinite と gypsum の回折線が消滅し、serpentine の(001)反射がかなり小さくなっていったが、prism 反射は残っていた。600 では serpentine の回折線が完全に消滅し、taenite が生成していた。金属鉄である taenite の存在から、加熱実験の際、SUS 管内の酸素分圧が 1W で保たれていたことが言える。また、600 加熱では二次的な olivine が形成されていた。900 では、olivine の回折線がより大きく、シャープになっていることから、二次的な olivine の結晶化が進行していることがわかった。

図2に Jbilet Winselwan と Dho735 試料の

XRD 分析結果を示す。加熱ステージ II に分類される Jbilet Winselwan 試料は、主な構成鉱物として olivine、serpentine、low-Ca pyroxene、pentlandite、low-crystalline magnetite、calcite が含まれていた。加熱ステージ IV に分類される Dho735 は、主な構成鉱物として olivine、low-Ca pyroxene、troilite、taenite、kamacite が含まれていた。

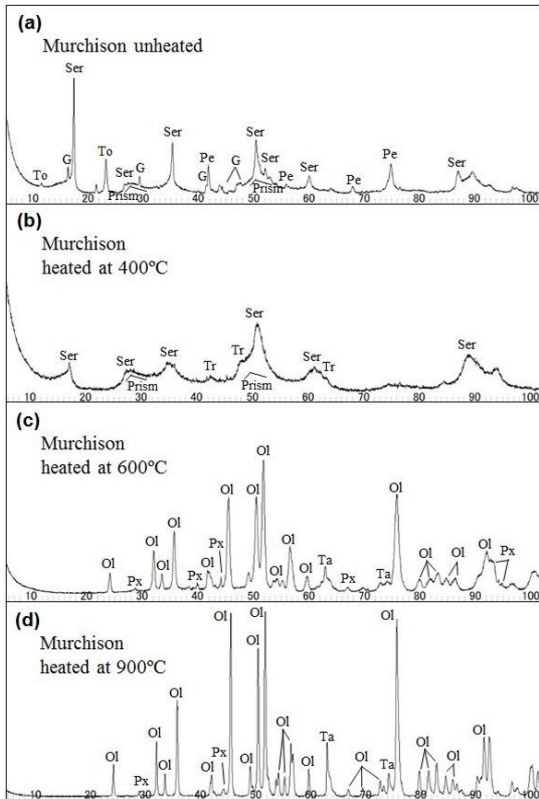


図 1: 未加熱および加熱後 Murchison 試料の XRD 分析結果

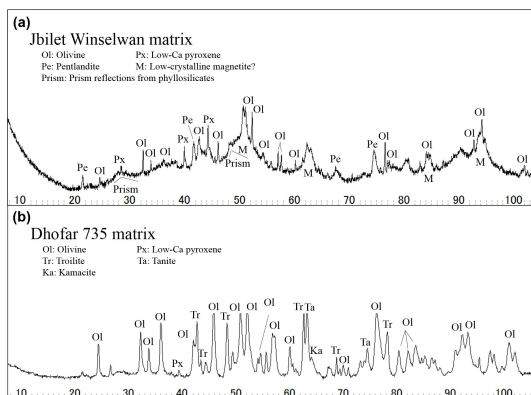


図 2: 未加熱および加熱後 Murchison 試料の XRD 分析結果

(2) 未加熱、400、600、900 加熱 Murchison 試料の含水量はそれぞれ 10.02、6.55、1.18、0.59wt%で、加熱温度上昇と共に減少していた。また、Jbilet Winselwan、Dho735 試料の含水量はそれぞれ 5.39wt%と 2.42wt%であった。

隕石試料の各温度での脱水量変化を図 3 に示す。加熱後 Murchison の結果に着目すると、加熱炉を用いた加熱実験の後に、試料に再度取り込まれた水が検出されている。例えば、600 に加熱した Murchison 試料から、水分量分析時に 100 ~ 600 の温度域で水分が検出されている。比較的高温域で水分が検出されていることから、吸着水とは異なる復水と呼ばれる水分が検出されていると考えられる。復水というのは物質の加熱脱水後、大気中の水分が物質内に再び取り込まれることで、吸着よりも物質に強く結合している状態を示している。以上より、隕石試料に元々含まれていた水分量は、総脱水量から吸着水と復水を引いた値となるので、未加熱、400、600、900 加熱 Murchison 試料の真の水分量は、7.46、2.75、0.04、0wt%である。

Dho735 試料は、母天体上で 900 以上に加熱を受けているにも関わらず (Nakato et al., 2012) 900 加熱 Murchison 試料の水分量より約 2wt%多かった。脱水は主に 600 以下で起きていることから、Dho735 試料が地球上で長時間大気にさらされたことにより、吸着水や復水の影響を大きく受けたため、900 加熱 Murchison 試料よりも水分量が多かったと考えられる。つまり、隕石が母天体上で受けた加熱温度を、その隕石の水分量から推定することは困難であることがわかった。

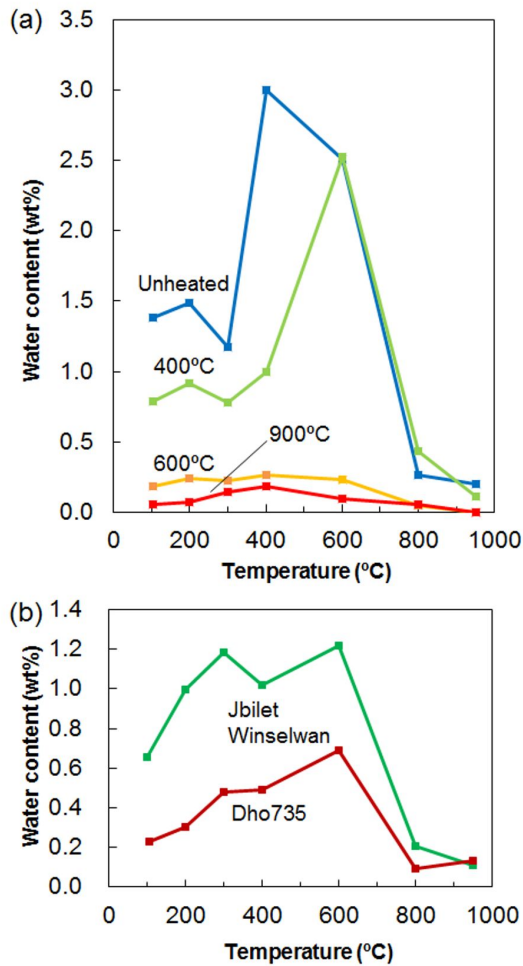


図 3: 各温度での脱水量変化 (a) 未加熱および加熱後 Murchison (b) Jbilet Winselwan および Dho735

(3) 反射スペクトル測定によって得られた各試料の  $3\mu\text{m}$  吸収帯を図 4 に示す。Murchison 試料に着目すると、未加熱から 400 加熱にかけて吸収帯のピーク位置が  $2.8\mu\text{m}$  から  $2.7\mu\text{m}$  へ移動していた。これは 400 で  $2.77\mu\text{m}$  に吸収ピークを持つ tochilinite が脱水分解したことによる変化であると考えられる。また、未加熱から 400 にかけて、吸収帯の深さは約 40%浅くなり、 $2.7\mu\text{m}$  を中心にシャープになっていた。600 以上の加熱では、吸収帯の深さは未加熱に比べて 7%程度であり、形状も  $2.9\mu\text{m}$  を中心にかなりブロードになっていた。

図 5 に含水量と  $3\mu\text{m}$  吸収帯深さの関係をグラフ化した図を示す。両者の間にはラフな相

関が見られた。また、600 以上に加熱された試料は、含水量も  $3\mu\text{m}$  吸収帯の深さも 0 を示すことがわかった。この結果と XRD 分析結果を合わせると、含水鉱物が脱水分解し、二次的な olivine の結晶化がある程度進行していると、その物質には水分がほとんど含まれず、 $3\mu\text{m}$  吸収帯も消滅していると言える。これは、小惑星の反射スペクトルからその表層物質の水分量や鉱物組成を見積もる大きな指針になると考えられる。

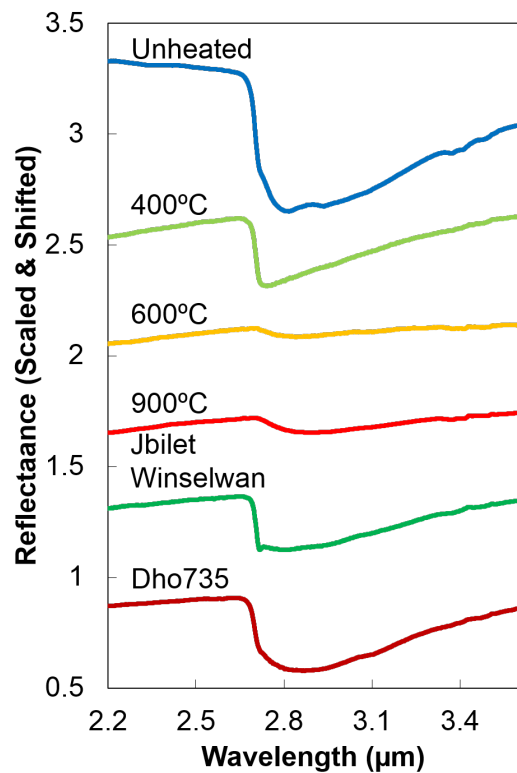


図 4: 各隕石試料の反射スペクトル測定結果 (波長範囲  $2.2 \sim 3.6\mu\text{m}$ )。縦軸の反射率は規格化し、見易いように縦方向に移動している。

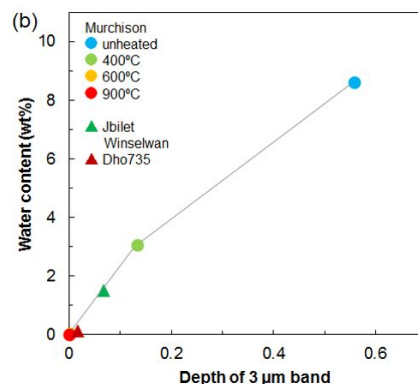


図 5:含水量と 3 $\mu$ m 吸収帯の深さとの関係。

## 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2件)

発表者:Yamashita S., Nakamura T., Jogo K., Matsuoka M., Okumura S.

発表タイトル: Progressive Changes in Mineralogy, Reflectance Spectra and Water Contents of Experimentally Heated Murchison at 400, 600, and 900 °C

学会名: The meteoritical society

発表日: 2015/07/28

場所: Berkeley USA

発表者: Nakamura T., Park J., Ahn I., S., Shirai N., Sekimoto S., Nakato A., Nakashima D., Turrin B. D., Lindsay F. N., Herzog G. F., Delaney J. S., Swisher C. C. III, Nagao K.

発表タイトル: Depletion of Volatiles and Timing of Heating Recorded in Thermally Metamorphosed Hydrous Carbonaceous Chondrites

学会名: The meteoritical society

発表日: 2015/07/28

場所: Berkeley USA

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

中村 智樹 (NAKAMURA, TOMOKI)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 20260721