

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月15日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740353

研究課題名（和文） コンドリュールを用いた小惑星における流体の研究

研究課題名（英文） A study to evaluate fluid-related process on asteroids by chondrules

研究代表者

国広 卓也（KUNIHIRO TAKUYA）

岡山大学・地球物質科学研究センター・准教授

研究者番号：30432628

研究成果の概要（和文）：本研究は、コンドライト隕石を構成するコンドリュールの元素解析を通じ、小惑星において流体によってもたらされた元素再分配のプロセスを物理化学的に記述することを目的とした。結果として、分析の最適化と標準試料の整備により、流体との反応性が高いホウ素の高感度局所定量分析法を確立した。コンドリュールに分析を適用し、構成鉱物毎のホウ素の元素分布を得ることに成功し、流体プロセスによる状態変化の検討を試みた。

研究成果の概要（英文）：The main subject of this research is to develop in-situ analytical technique to determine concentration of fluid-mobile elements and discuss elemental re-distribution at small bodies on the Solar system by fluid related processes. The author succeeded to optimize sample preparation and to have reliable olivine standards by conventional technique, and established in-situ boron-quantitative-analysis with sub-ppm level. The technique was applied to chondrules and abundances of boron in each phase were determined.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学，地球宇宙化学

キーワード：元素分布，小惑星，局所分析，微量元素，コンドリュール，コンドライト，二次イオン質量分析法

## 1. 研究開始当初の背景

我々の暮らす太陽系には、太陽・惑星・小惑星などといった天体が存在し、それぞれの天体内部に様々な化学構造が形成されている。惑星進化は化学分化の歴史を反映しており、例えば物質の融解に伴う物質分化は、元素分配や物質移動、あるいはエネルギーの輸送な

どに重要な役割を果たしてきた。惑星規模の融解を経験した地球の場合は、金属鉄の核とマントルが分離し、様々な元素の再分配が行われ現在の地球を形作っている。しかし興味深い点は、このような融解過程の痕跡がみられない小惑星のかけらであるコンドライトにもネビュラでの高温プロセスだけでは説明の

できない化学的多様性が観察されることである。コンドライトはそれぞれが特徴的な組成を持ち、含水鉱物を有するだけでなく、数百万年というタイムスケールで加熱を受けた。大規模な融解を伴わない小惑星 (=コンドライト母天体) に観察される化学分化を引き起こしたメカニズムとは何か。その候補として拡散と物質を媒体とする元素の輸送が挙げられる。地球のように大きな天体においては双方とも重要な役割を果たしてきたと考えられるが、融解を経験していない小天体の場合は拡散の効果が限られる。コンドライトに観察される典型的な鉄拡散の距離はミクロンオーダーであり、コンドライトの化学的多様性を固体拡散で説明するには不十分である。

コンドライトの 99% が水質変質を経験しており、水の存在は太陽系小天体の進化にとってより本質的であると考えられる。もし流体による元素再分配が存在したのであれば、元素の輸送スケールは小天体スケールへ拡張される。つまりシリケイトが融解を経験していない小惑星といった太陽系小天体においては、固体拡散に加え流体プロセスがその化学進化においては重要な役割を果たした可能性が強く示唆される。

## 2. 研究の目的

本研究においては、その内容を大きく二つに分けることができる。

(1) コンドリュールの構成鉱物毎にホウ素を定量する局所分析手法を構築する。本研究の特徴は、コンドリュール構成鉱物毎にホウ素の定量を行うことにある。さまざまな元素の中、とりわけリチウムとホウ素は水に対する溶解度が高く流体が寄与する反応に敏感な元素である。流体プロセスを理解する上で、ホウ素とリチウムと挙動の違いは、個々の元素の固有の分配や拡散速度に起因していると

考えることができる。またホウ素とリチウムとは小惑星が集積してからは安定同位体として振る舞う。その相対質量の大きさから流体との反応が同位体情報として強く保持されていることが期待され、さらに同位体情報を組み合わせることでプロセスの定量化を可能とする元素組み合わせである。本研究では、鉱物間の反応性や空間関係に着目し、岩石薄片/厚片試料を用いた局所ホウ素定量技術を確立する。

(2) 本研究では、コンドライトの経験したさまざまなプロセスから、小惑星形成後のプロセスを読み解き、特に流体による小天体内の元素再分配についての検討をめざす。元素再分配をおこしたプロセスを認定し、それがいつ、どこで、どのようにできたかを定量的に決定し、コンドライト、そして小惑星の多様性を説明することを見据えている。小惑星を構成すると考えられるコンドライトは異なる起源をもつ物体の機械的混合であり、コンドリュールは太陽系円盤で生成した主要構成物体である。本研究ではコンドリュールに注目し、その太陽系円盤で獲得された元素分布の状態変化を記述し、流体プロセスのダイナミクスの解析を行う。

## 3. 研究の方法

本研究は、

- (1) 試料マウント物質の検討および試料洗浄法の確立
- (2) 二次イオン質量分析法を活用したホウ素測定の最適化
- (3) 低濃度ホウ素を含む標準試料の作成
- (4) 微量試料に対するホウ素を含む多元素測定法の確立
- (5) コンドリュールへの分析法の応用、小惑星における流体プロセスを含むダイナミクスの解析

の手順で研究を進めた。試料マウント物質と

試料洗浄法の評価には研究代表者の所属する研究機関に導入済みの二次イオン質量計を用いた。標準試料の作成にあたっては均一性を局所分析で評価したのちに、低ブランク全岩ホウ素分析をクリーンルームで実施し、標準試料の作成を行った。分析法の確立後、コンドリュールにホウ素局所分析を実施した。

また上記の分析法を応用した極微量試料に対するホウ素を含む多元素測定法を確立し、酸素同位体を含む地球化学的解析を小惑星回収試料に適用し、太陽系円盤から現在のコンドライト母天体に至るまでの小惑星の物質進化を検討した。

#### 4. 研究成果

二次イオン質量分析法における基礎技術開発として、試料準備法、標準試料の整備と測定の最適化を行い、局所ホウ素定量法の開発を行った。コンドライトの全岩ホウ素存在度は 0.001% (1  $\mu\text{g/g}$ ) 程度と報告されている。このような微量元素濃度域におけるホウ素分析の懸念は汚染である。本研究では分析における汚染の寄与の低減をはかった。汚染は試料マウント用樹脂からのもの、研磨プロセスによる他試料からの混入が考えられる。岩石片を固定するのに用いる典型的なエポキシ系樹脂に含まれるホウ素濃度はコンドライトの全岩と比較し 100 倍にも及ぶため、試料マウントに用いる樹脂を検討、適切なものを選択した。また洗浄に超純度イオン水を用い、試料表面をフッ酸処理することで表面の汚染軽減をはかった。更にイオンを照射し表面のスパッタを用いブランク・レベルの低減をはかった。二次イオン質量分析法における分析精度は標準試料に依存するため、低濃度かつ均一である試料を吟味し、クリーンルームにおいて全岩分析用い正確な濃度決定を行い、ホウ素低濃度標準試料を作成した。

標準試料の整備と分析法の最適化により空間分解能 20  $\mu\text{m}$  において 0.001  $\mu\text{g/g}$  レベルのホウ素定量分析が可能となった。ホウ素は既に述べたように、流体プロセスに敏感なトレーサーであり、この定量技術は地球外物質にとどまらず、他の試料に応用可能であり、汎用性の高い技術といえる。

この分析手法をコンドリュールに応用した。ホウ素存在度はコンドリュールの主要構成物質であるカンラン石において 0.01  $\mu\text{g/g}$  以下が占め、ホウ素のホストはコンドリュール内部ではガラス、コンドライトではマトリクスであった。カンラン石の化学組成とホウ素存在度の関係は、ホウ素元素分布が流体プロセスによって平衡に達しておらず、ダイナミクスを反映していること意味する。また、マトリクスとコンドリュール・ガラスのホウ素濃度の類似性は生成/変成環境の相関を示唆する。本研究成果は現在論文としてまとめているが、この手法をリチウム同位体組成と関連づけて流体システムシクスを系統的に理解するために、今後も研究を継続する。

ホウ素を含む多元素同時分析手法を極微量試料に特化したものを確立し、小惑星イトカワから持ち帰られた試料に適用した。局所酸素同位体分析と同時に実施した多元素分析の結果は、コンドライトが小惑星を起源とする物質であることを支持する。本成果は論文として取りまとめ、国際誌である *Proceedings of the National Academy of Sciences* の 109 号において発表している。

#### 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 3 件)

- ① Nakamura, E., Makishima, A., Moriguti, T., Kobayashi, K., Tanaka, R., Kunihiro, T., Tsujimori, T. 他計 18 名, Space environment of an asteroid preserved on micrograins returned by

- the Hayabusa spacecraft," PNAS Plus, 109(11), 4031-4032, 2012. 査読有
- ② Brophy, J.G., Ota, T., Kunihiro, T., Tsujimori, T., Nakamura, E., In situ ion-microprobe determination of trace element partition coefficients for hornblende, plagioclase, orthopyroxene, and apatite in equilibrium with natural rhyolitic glass, Little Glass Mountain Rhyolite, California, Am. Min., 96, 1838-1850, 2011. 査読有
- ③ Mckeegan, K.D., Kallio, A.P.A., Heber, V.S., Jarzebinski, G., Mao, P.H., Coath, C.D., Kunihiro, T., Wiens, R.C., Nordholt, J.E., Moses Jr, R.W., Reisenfeld, D.B., Jurewicz, A.J.G., Burnett, D.S., The Oxygen Isotopic Composition of the Sun Inferred from Captured Solar Wind, Science, 332, 1528-1532, 2011. 査読有

[学会発表] (計5件)

- ① Nakamura, E. et al., Space environment of an asteroid preserved on micrograins returned by the Hayabusa spacecraft, 43rd Lunar and Planetary Science Conference, 2012/03/22, The Woodlands, Texas (USA)

- ② Kunihiro, T. et al., Initial analysis of the Hayabusa recovery materials: Trace-element and isotope abundance, 日本地球惑星連合 2011 大会, 2011/05/26, 幕張 (千葉県)
- ③ Tsujimori, T. al., Initial analysis of the Hayabusa recovery materials: Petrographical characterization, 日本地球惑星連合 2011 大会, 2011/05/26, 幕張 (千葉県)
- ④ Kobayashi, K. et al., Initial analysis of the Hayabusa recovery materials: Laboratory processing of individual grains, 日本地球惑星連合 2011 大会, 2011/05/26, 幕張 (千葉県)
- ⑤ Nakamura, E. et al., Initial analysis of the Hayabusa recovery materials: Overview and highlights at Misasa, 日本地球惑星連合 2011 大会, 2011/05/26, 幕張 (千葉県)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

国広 卓也 (KUNIHIRO TAKUYA)

岡山大学・地球物質科学研究センター・准教授

研究者番号 : 30432628