

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03952

研究課題名(和文)小惑星における流体存続期間の推定

研究課題名(英文)Duration of fluid existence on an asteroid

研究代表者

国広 卓也(Kunihiro, Takuya)

岡山大学・惑星物質研究所・准教授

研究者番号：30432628

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：局所分析法をコンドリュール構成鉱物に応用し、26 微量元素の空間分布を求めた。全岩分析およびマスバランス計算の結果、コンドリュールが水質変質に加え、水質変質以前にケイ素メルトと反応したことがわかった。酸を用いたステップワイズリーチング法を応用し、コンドリュールをガラスと非ガラスに分離した。これらに対し系統的に Rb-Sr 年代測定法を応用した。Rb-Sr 年代測定法により求められる年代は、Pb-Pb 年代測定法によるそれより数億年若い年代を示した。水もしくは氷がこの期間小惑星に存在したことを示唆する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小惑星は太陽系円盤にて形成した物質が 46 億年前に集積した天体で、様々な化学及び物理プロセスを経て多様性を獲得した。これらのプロセスが太陽系初期に限定されると考えられるところ、本研究の意義は、物質に多様性を与える流体プロセスの継続時間を求めることである。流体に対し反応性が高いアルカリ元素の分布を利用し流体プロセスの年代を測定し、流体活動の継続時間が数億年であること求めた。サンプルリターン・ミッションにより回収される試料が、近年の物質進化を反映しうることを示唆される。

研究成果の概要(英文)：Twenty-six trace-element-abundances of chondrule constituents were determined using micro beam techniques. According to mass balance calculation, a chondrule has been interacted with Si-rich melt prior to aqueous alteration on an asteroid. Step-wise leaching technique using acid was applied to chondrules to extract glass. Rubidium-Sr dating was applied to the separated chondrules and yielded age of a few hundreds million after the birth of the solar system. Existence of ice or fluid on the asteroid in such time scale was implied.

研究分野：宇宙化学

キーワード：コンドライト コンドリュール 流体プロセス 小惑星 微量元素

## 1. 研究開始当初の背景

サンプルリターンを含む小天体ミッションにより、小天体と隕石の関係が明らかになりつつある。はやぶさ及びスターダストは小天体から固体試料を回収し、現存する小天体とコンドライトとの類似性を示した。ジェネシスは太陽風を回収し、小惑星が太陽から同位体的に進化した物質であることに言及した。ロゼッタは彗星の外観を詳細に観察し、彗星と小惑星の類似性を示すと同時に、氷及び流体が小天体における物質進化に介在する可能性を示した。

コンドライトが含水鉱物及び化学的に均質な鉱物を含むため、小惑星は太陽系初期数百万年の間に集積、水質変質、そして熱変質という地質学的プロセスを経て現在に至ったと考えられる。その一方、直径が 500 m に満たない瓦礫の集合体である小惑星イトカワが、化学平衡に達した物質によって構成されるという観察は、小天体構成物質が熱変質を受けた後に再集積したことを示す。同様に、彗星がコンドリュールなどの高温生成物を含む観察は、これらが氷と共に再集積したことを示す。すなわち小天体における物質進化は太陽系初期に限定されず、離散並びに再集積を繰り返し現在まで継続していると考えられる。太陽系における物質進化を時間軸に沿って連続的に理解する上で、小惑星における地質学的プロセスの発生時期並びに継続時期を求めることは重要な課題といえる。

水質変質は小惑星集積から現在に至る物質進化に作用する重要なプロセスであるが、その後熱変質が連なり平衡化が進むため、その継続期間を求めることは難しかった。

## 2. 研究の目的

小惑星物質は初期数百万年の間に、集積、水質変質、並びに熱変質の三つのプロセスを経て現在に至ったとされる。しかし、イトカワ回収試料の観察により現在の小惑星表面の詳細が記述され、近年の小惑星における物質進化が顕著であることが明らかになった。そうでなければ熱変質により 900 度に達したと考えられるイトカワ構成物質が水を 500  $\mu\text{g/g}$  を含む事実をどのように説明したらよいのだろうか。この観察は、小惑星構成物質が熱変質を受けた後に流体と反応したと、そして同時に、流体が小天体を進化させる重要なメディアであることを示唆する。

本研究の目的は、流体に対して反応性の高いアルカリ元素の分布から流体プロセスの痕跡を求め、初期数百万年に限定することなく、小惑星構成物質が最後に流体と反応したタイムスケールを求めることである。

本研究は分析対象をコンドリュールに設定する。コンドリュールは太陽系円盤で形成され、その形成年代は Pb-Pb 法などで正確に求められている。コンドリュールに含まれる、流体との反応性の高い部位に注目し、この年代を求めることで小惑星における最近の流体プロセスの検知を試みる。コンドリュールは、太陽系円盤における物質進化を論じる目的で解析されることが多いところ、これらの研究が熟したと認め、同コンドリュールを小惑星における流体による物質進化を論じる目的で解析するところに、本研究の独自性が認められる。

これまでにコンドライトに Mn-Cr 法及び Rb-Sr 法といった年代測定が適用され、初期数百万年の水史が議論されてきた。本研究は、それ以降に水質変質が発生したことを見据え、流体と反応したと考えられるガラスを含むメソスタシスと呼ばれる部位を酸により抽出し、それらに Rb-Sr 年代測定法を適用することで熱平衡以降の水質変質について時間情報を加味して議論する。

## 3. 研究の方法

小惑星における流体存続期間を求めるため、Rb-Sr 年代測定法をコンドリュールに適用する。コンドリュール構成要素のうち流体との反応性の高い、主にガラスから形成されるメソスタシスに注目する。メソスタシスを構成するガラス、輝石、並びに斜長石はその大きさが数十ミクロン程度で、ハンドピックによる鉱物分離は難しいところ、酸による抽出を試みる。メソスタシス構成鉱物に対して局所微量元素分析法を応用し、抽出の妥当性を検証する。

まず、レーザープローブ ICP 質量分析法と二次イオン質量分析法、それぞれの特長をいかし、局所微量元素分析法を確立する。

次に、コンドリュールの組織観察に基づき鉱物毎に微量元素定量を実施し、各コンドリュールに記録される水質変質プロセスを記述する。地球化学的挙動が類似するアルカリ並びにアルカリ土類の空間分布を系統的に記述することにより、コンドリュールの各粒に共通する流体プロセスを認定した上、抽出されたメソスタシスに対し Rb-Sr 年代測定法を適用する。水質変質の継続期間を求めるため、コンドリュールを分析する。

以上、小惑星の流体プロセスの痕跡の記述並びに年代測定を通じ、流体の起源、流体と反応した環境及び、当該流体プロセスの継続時間を明らかにすることを目指す。本研究は、局所微量元素分析法確立、隕石試料の記載、並びに流体プロセスの年代決定の三つの課題を計画する。まず、局所微量元素分析法を開発する。次に隕石からコンドリュールを分離し、岩石記載並びに微量元素の測定を実施しつつ、酸によるメソスタシス抽出法を確立する。以上が完了し次第、抽出したメソスタシスについて Rb-Sr 年代測定を応用する。

#### 4. 研究成果

小惑星は太陽系円盤にて形成した物質が 46 億年前に集積した天体で、現在に至る年月の中で化学及び物理プロセスを経て多様性を獲得する。本研究において、局所微量元素分析法の確立、隕石試料の記載、隕石試料に対する局所微量元素分析法の応用、並びに小惑星における流体プロセスの年代測定を実施した。

コンドリュールの経験した流体プロセスの年代を測定するに先んじ、コンドリュールを構成する鉱物相を岩石学および地球化学的に記載する必要がある。まず、コンドリュールを構成する各鉱物のアルカリ元素（ルビジウム、リチウム、ないしセシウム）を含む 26 微量元素濃度を正確に測定する手法を検討した。隕石試料やサンプルリターン試料は希少であり、またそれを構成する鉱物の大きさはせいぜい数十ミクロンである。このような希少試料の分析には、マイクロビームを用いた分析が有用である。マイクロビームを用いた分析手法として、レーザープローブ ICP 質量分析法ならびに二次イオン質量分析法が挙げられる。迅速な分析が可能である前者に対し、後者は感度の高いことが定性的に知られる。しかし、コンドリュールなどの地球外物質を分析するにあたり、どちらの手法を用いるべきであるか、感度および測定誤差を、定量的に示す研究は存在しない。本研究では、濃度の異なる微量元素を含む 6 つの標準試料を用意し、これを用いてそれぞれの手法について感度、精度及び確度を定量的に調べた。

どちら分析手法についても、低濃度試料の分析においては統計誤差が精度を支配することを示した。また、高濃度元素の分析において、元素を問わず 10% よりすぐれた確度で定量できることを示した。軽元素について二次イオン質量分析法はレーザープローブ ICP 質量分析法より 1000 倍感度がすぐれ、重元素については数倍すぐれることがわかった（図 1）。これらの感度差を鑑みても十分に元素濃度が高いと予測される物質についてはレーザープローブ ICP 質量分析法を用いた分析が効率的である。元素濃度が必ずしも高いわけではない隕石試料やサンプルリターン試料についてはまず二次イオン質量分析法を応用し、分析対象が残るのであれば、これに追加してレーザープローブ ICP 質量分析法を適用する。このように、これら双方を組み合わせた分析手法が最適であることがわかった。

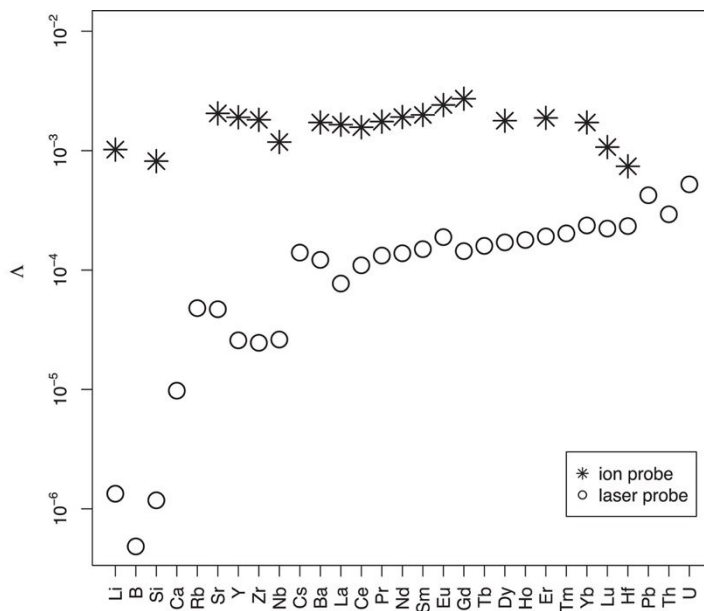


図 1: 二次イオン質量分析法 (ion probe) とレーザープローブ ICP 質量分析法 (laser probe) の感度比較。

この二種マイクロビーム分析を組み合わせた分析手法をコンドリュールに応用し、地球化学的記述を実施した。コンドリュールに含まれる変質ドメインを意識し、コンドリュール構成鉱物（カンラン石、高カルシウム輝石、低カルシウム輝石、斜長石、ソーダライト、およびネフェリン）に含まれる 26 微量元素を二次イオン質量分析法およびレーザープローブ ICP 質量分析法を用い求めた。また対象コンドリュールの破片に対し全岩分析を実施した。それぞれの鉱物の化学組成および面積を考慮したマスバランス計算を実施し、マイクロビームで分析することのできない、粒間物質の化学組成を求めた。

次にコンドリュールの中心部分を構成する鉱物組み合わせと、外部物質が反応して変質ドメインが形成したと考え、マスバランス計算を再度実施し、当該外部物質の化学組成を求めた。この物質は予期に反し、流体でなくケイ素に富むメルトと推測された。この物質はアルカリ元素のみならず希土類元素に富むことから、分化天体内部で発生したメルトであることが推察される。コンドリュールの一部は太陽系円盤で形成したのち、分化天体に滞在し、こののちに氷を含む天体に移動し水質変質を経験したと考えることができる。

水質変質の痕跡はコンドリュールに含まれるガラスに記録される。水質変質によりアルカリ元素の分布がリセットされたと考えコンドリュールに酸を用いたステップワイズリーチング法を応用した。局所分析法と比較し、この手法によりコンドリュールが化学的にガラスと非ガラスに分離できたことを確認した。これら化学的に分離されたコンドリュールに対し系統的に Rb-Sr 年代測定法を応用した。求められた年代は、太陽系形成より数億年若い年代を示した。水もしくは氷がこの期間小惑星に存在し、その後にコンドリュールと反応したことを示す。小惑星における流体存続期間は、数百万年でなく数億年と推測される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Christian Potiszil, Ryoji Tanaka, Tsutomu Ota, Tak Kunihiro, Katsura Kobayashi, Eizo Nakamura	4. 巻 13
2. 論文標題 Concentration of meteoritic free organic matter by fluid transport and adsorption	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geochemical Perspectives Letters	6. 最初と最後の頁 30-35
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7185/geochemlet.2010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Christian Potiszil, Ryoji Tanaka, Katsura Kobayashi, Tak Kunihiro, Eizo Nakamura	4. 巻 20
2. 論文標題 The Albedo of Ryugu: Evidence for a High Organic Abundance, as Inferred from the Hayabusa2 Touchdown Maneuver	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astrobiology	6. 最初と最後の頁 916-921
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1089/ast.2019.2198	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Eizo Nakamura, Tak Kunihiro, Tsutomu Ota, Chie Sakaguchi, Ryoji Tanaka, Hiroshi Kitagawa, Katsura Kobayashi, Masahiro Yamanaka, Yuri Shimaki, Gray E. Bebout, Hitoshi Miura, Tetsuo Yamamoto, Vladimir Malkovets, Victor Grokhovsky, Olga Koroleva, and Konstantin Litasov	4. 巻 4
2. 論文標題 Hypervelocity collision and water-rock interaction in space preserved in the Chelyabinsk ordinary chondrite	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the Japan Academy, Series B	6. 最初と最後の頁 165-177
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2183/pjab.95.013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tak Kunihiro, Tsutomu Ota, Eizo Nakamura	4. 巻 252
2. 論文標題 Lithium- and oxygen-isotope compositions of chondrule constituents in the Allende meteorite	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 107-125
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/jb.gca.2019.02.038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tak Kunihiro, Tsutomu Ota, Masahiro Yamanaka, Christian Potyszil, Eizo Nakamura	4. 巻 57
2. 論文標題 The trace element composition of chondrule constituents: Implications for sample return methodologies and the chondrule silicate reservoir	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Meteoritics and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 429-449
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.13665	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wei Li, Shuyun Cao, Eizo Nakamura, Tsutomu Ota, Zhong Liu, Yanlong Dong, Tak Kunihiro	4. 巻 412-413
2. 論文標題 Magmatic-hydrothermal processes of the Laojunshan metamorphic massif in Southeastern Asia: Evidence from chemical and B-isotopic variations of deformed tourmalines	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Lithos	6. 最初と最後の頁 1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.lithos.2022.106609	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hitoshi Miura, Eizo Nakamura, Tak Kunihiro	4. 巻 925
2. 論文標題 The Asteroid 162173 Ryugu: a Cometary Origin	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac4bd5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. P. Nikitczuk, G. E. Bebout, T. Ota, T. Kunihiro, J. F. Mustard, R. L. Flemming, R. Tanaka, S. A. Halldorsson, E. Nakamura	4. 巻 125
2. 論文標題 Nitrogenous Altered Volcanic Glasses as Targets for Mars Sample Return: Examples From Antarctica and Iceland	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advancing Earth and Space Science	6. 最初と最後の頁 1-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JE007052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔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	小林 桂  (Kobayashi Katsura)  (20325129)	岡山大学・惑星物質研究所・教授    (15301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------