

令和 6 年 9 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00188

研究課題名（和文）新しい時代の太陽系物質科学：マルチスケールで見た含水小惑星の形成進化過程

研究課題名（英文）Material Science of the Solar System in a New Era: Formation and Evolution of Hydrated Asteroids at Different Scales

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） 35,600,000円

研究成果の概要（和文）：小惑星探査機はやぶさ2が回収した小惑星サンプル、および類似するCI炭素質隕石の放射光や電子顕微鏡などを用いた物質分析を行い、含水小惑星の形成位置、形成環境、形成後の天体内部での水質変成による化学進化を解明した。また、サンプルの物性を測定し、含水小惑星の衝突破壊のプロセスも推定することに成功した。成果はとりまとめ、サイエンス誌をはじめとする多くの学術誌に出版した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小惑星からのリターンサンプルを解析し、C型小惑星の起源や形成進化のプロセスを明らかにした。リュウグウのような小惑星が地球に生命の基礎物質や水をもたらした可能性を高めた。また、日本の探査機が持ち帰った小惑星サンプルを詳細に分析し、科学的価値が高いことを示せたのは社会的意義が高いと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Material analyses of asteroid samples recovered by the asteroid probe Hayabusa2 and similar CI carbonaceous meteorites using synchrotron radiation and electron microscopes were conducted to elucidate the formation position of hydrated asteroids, their formation environment, and chemical evolution by water quality metamorphism in the interior of the bodies after formation. The physical properties of the samples were also measured, and the impact destruction process of hydrated asteroids was successfully estimated. The results were compiled and published in many scientific journals including Science.

研究分野：惑星物質科学

キーワード：小惑星 Ryugu 炭素質隕石 Hayabusa2

### 1. 研究開始当初の背景

原始惑星系円盤にどのような物質が、動径方向に分布していたのかを知ることは、原始惑星系円盤内部における化学進化を理解するうえでベースとなる重要な事実である。しかしながら、観測では100万個をこえる小惑星が観測されているが、どんな物質(またはどんな隕石)で小惑星が形成されているのか、一部のタイプの除き解明されていなかった。はやぶさ初号機が行ったS型小惑星からのサンプルリターンで、S型小惑星は地球に最も落下する普通コンドライト隕石で構成されていることが判明した。一方、含水小惑星はmajorityとして小惑星帯に分布していることはわかっていたが、どのような炭素質隕石物質で形成されているのか、理解が進んでいなかった。小惑星探査機はやぶさ2が訪れたC型小惑星リュウグウも、地上からの観測ではどのタイプの炭素質隕石で構成されているのか、解明できなかった。

### 2. 研究目的

本研究でははやぶさ2探査機が回収したサンプルのスペクトル分析と詳細物質分析を行い、小惑星スペクトルタイプと含水炭素質隕石との関係や、含水小惑星の形成進化過程について重要な知見を得ることができた。

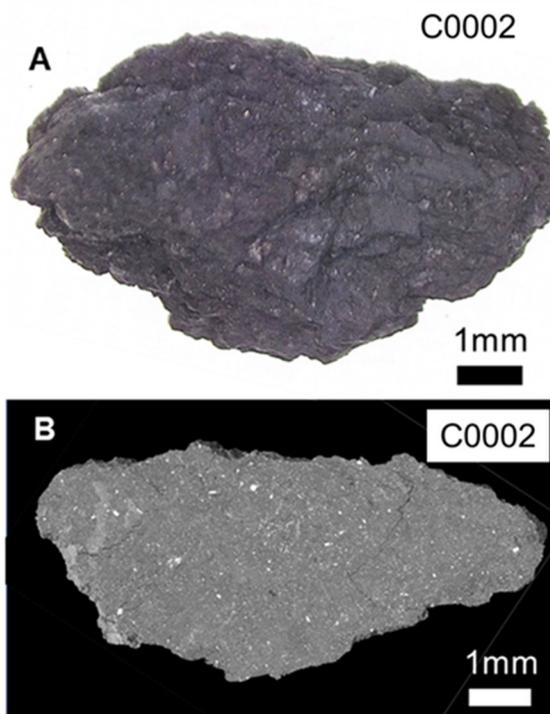


図1: 分析した中で最大のサンプルの全体像(A)とCTによる断面像(B)。

### 3. 研究方法

小惑星探査機はやぶさ2が回収したC型小惑星リュウグウの表層サンプル18粒子(多くは数mmの大きさであったが、一つだけ8mmの大きさのサンプルであった: 図1)を非破壊分析(スペクトル測定、ミュオン分析、放射光X線分析、密度測定)をまず行い、その後半破壊分析(電子顕微鏡観察、二次イオン質量分析計による同位体分析)、物性測定(破壊強度、熱拡散など)を行い、多くの物質情報を限られたサンプルから引き出すように分析を行った。非破壊分析のほとんどはサンプルの地球風化を防ぎ、小惑星の物性を保つために大気遮断の環境で測定を行った。

### 4. 研究成果

その結果、リュウグウ粒子のすべては含水ケイ酸塩(サポナイト、サーペンティン)を主成分とし、炭酸塩鉱物、リン酸塩鉱物、マグネタイト、ピロタイトなどの鉱物と有機物の混合物であることが分かった。含水ケイ酸塩はMg(Mg# ~85)に富む傾向があり、これは水質変成が進んだ炭素質隕石の特性と一致する。また、炭酸塩鉱物の化学組成や各種鉱物の組成と相対存在度、および高温生成物であるCAIやコンドリュールが含まれないことから、リュウグウサンプルはCI炭素質隕石に類似することが分かった。つまりリュウグウサンプルは小惑星内部で強い水岩石反応を経て形成されたものであった。興味深いのは、リュウグウの母天体内部で液体の水からテーブルサンゴのような形をした結晶が成長していたことである(図2)。どのような組成の水から晶出したのが未解明であるが、リュウグウ母天体の内部には地球の海に似た環境が存在していたと考えられる。

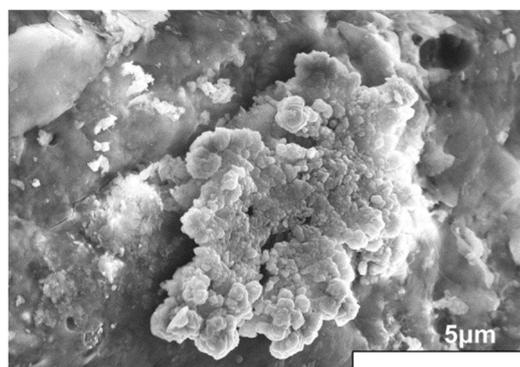


図2: サンプル表面に見つかったサンゴのような形をした結晶

以下に分析結果のまとめを、すでに公表した解説文(中村智樹他、2023、遊星人32巻、3号に掲載)の文章を修正抜粋して紹介する。

リュウグウサンプル16粒子の体積をSPRing-8で精密に求めた(空間解像度約0.9ミクロン)。

サンプルの質量は吸着水の影響を避けるため大気遮断のグローブボックス内で測定した。その結果、サンプルの平均密度は  $1.79 \pm 0.08 \text{ g/cm}^3$  であった。この値は探査機からの観測で見積もった小惑星リュウグウ全体の密度 ( $1.19 \text{ g/cm}^3$ ) より大きく、小惑星内部に 30% 以上の隙間があることを示唆する。このことは現在のリュウグウが母天体の破壊の結果形成された、第二世代のラブルパイルであることと整合的である。

J-PARC にてリュウグウサンプル 10 粒子 (総計 126 mg) に対してミュオンビームを照射することにより発生したミュオン X 線を解析し、軽元素 C, N, O を含む元素組成分析をおこなった。リュウグウの窒素や炭素を含め主要元素の存在度は CI 炭素質隕石 (=太陽) に近く、リュウグウの元素存在度は極めて未分化であることがわかった。一方、リュウグウの酸素濃度はオルゲイユ CI コンドライトよりも約 25% 少なかった。これは CI 隕石が地上に落下後、大気中の水分を吸収し、さらに大気下で酸化されたことを示唆する。

放射光 CT や電子顕微鏡による分析の結果、リュウグウサンプルの多くは ~1 mm 程度の微小岩片が集まってできた角礫岩であった。それぞれの岩片の構成鉱物が多様であることは、水質変成の際の条件の違い (水岩石比  $W/R$  など) で説明できる。岩片は低い水岩石比 ( $W/R < 0.2$ ) でできた物質と、それより高い  $0.2 < W/R < 0.9$  でできた物質があった。前者は母天体の表層付近の低温で氷が溶けにくかった環境でできた岩片であり、後者は母天体内部の水が豊富な環境でできた物質であると推定される。水質変成時の水温は、変成時に形成された硫化鉄の安定関係や結晶構造からおおよそ 25 °C であったと推定される。後者の物質がリュウグウサンプルの大部分を占める。水質変成後の大規模衝突で母天体が破壊され、母天体内部と表層の物質が混合された結果、現在の水質変成度の異なる角礫岩からなるリュウグウが形成されたと考えられる。

水質変成で形成された六角板状の硫化鉄ピロータイト結晶内部の数ミクロン径の空孔に閉じ込められた液体の水を発見した (図 3)。水を凍らせて飛行時間型 2 次イオン質量分析計で分子種を調べると、水は塩や有機物を含む炭酸水であった。このことはリュウグウ形成時に水の氷だけではなく  $\text{CO}_2$  の氷を含んでいたことを示唆し、リュウグウは水や  $\text{CO}_2$  の雪線以遠で形成されたことを示す。

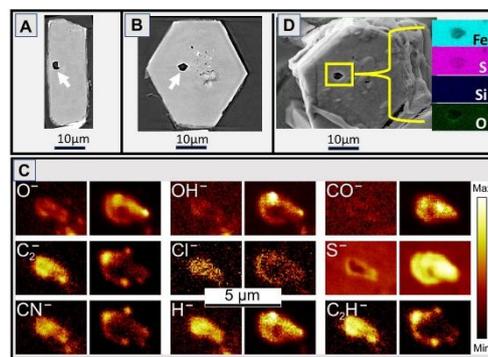


図 3: 六角板状のピロータイト結晶中の流体包有物の分析結果

上述したように、サンプル中に水質変成が進んでいない岩片が同定され、その岩片にリュウグウの集積時の情報やリュウグウ形成星雲領域のダストの情報が保存されている。変質が進んでいないリュウグウサンプルから、太陽近くの高温下でできた粒子 (Ca, Al に富む包有物やコンドリュール、以下では高温微粒子と呼ぶ) を発見した (図 4)。このことはリュウグウ母天体の極低温の形成領域に太陽の近くの高温でできた粒子が少量共存していたことを意味する。これらの高温微粒子はすべて小さく (約 30 ミクロン以下)、小さな粒子が選択的に太陽近くから太陽系外側まで移動したと考えられる。これは、太陽系誕生時の内側と外側の大規模物質混合の証拠となる。

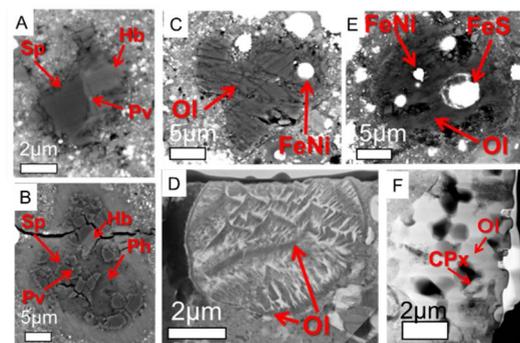


図 4: 高温生成物の電子顕微鏡像

上述したようにリュウグウサンプルの各種物性を測定した。今回の「物性」計測のハイライトは弾性波速度、曲げ強度、熱物性 (比熱、熱拡散率) の定量、電磁気学特性の定量である。基本的な量を小惑星リターンサンプルで計測できた世界初の例である。リュウグウサンプルにはマグネタイトが多く含まれており、上述した木村氏のグループのホログラフィー観察により特徴的な磁力線分布 (渦状磁区構造) が確認された。この構造は一般のハードディスクよりも安定で、太陽系の年代 (46 億年) 以上の長期間、磁場を保持できる。

母天体の誕生から、天体内部の昇温、水質変成の経時変化、大規模な衝突破壊の数値シミュレーション (図 5) を、実際の小惑星のサンプル物性の実測値を使って行った。小惑星から回収したサンプルの物性の測定結果を、その小惑星の形成進化の数値シミュレーションに使ったのは世界で初めてである。

放射性元素  $^{26}\text{Al}$  の崩壊熱による母天体内部の温度変化を数値シミュレーションで解析した。その結果、太陽系形成後約 200 万年後に  $-200 \text{ K}$  以下の環境で母天体が誕生し、約 300 万年後に水質変成が始まり、おおよそ 500 万年後に天体内部の各所が最高温度 ( $\sim 50 \text{ K}$ ) に達したことが分か

った,母天体の形成は一度に短時間でできたことを仮定しており,天体が段階的に成長した場合は,天体形跡時期は200万年よりも早くなる.

衝突シミュレーションの結果,衝突地点付近の非常に限られた物質のみが高温高圧を経験する(例えば,>10GPaに到達するのは母天体の0.2%体積程度),破壊強度は低いので,母天体のほとんどの部分が破壊されるが,高温高圧を経験していない.このことは,高い衝撃圧,衝撃温度を経験したリュウグウのサンプルほとんど見つからなかったこと,多くのリュウグウ粒子にクラックが観られることと整合的である.

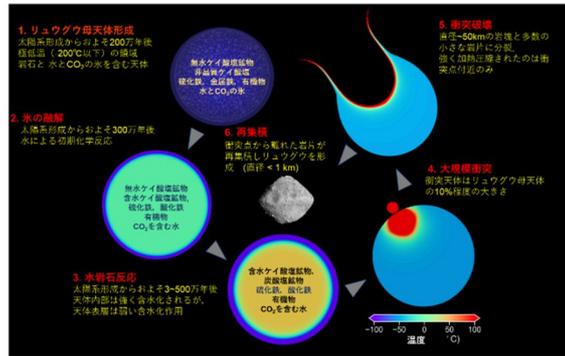


図5:リュウグウの形成進化のモデル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nakamura Tomoki et al.	4. 巻 379
2. 論文標題 Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/science.abn8671	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 該当する

1. 著者名 Nakashima Daisuke, Nakamura Tomoki et al.	4. 巻 14
2. 論文標題 Chondrule-like objects and Ca-Al-rich inclusions in Ryugu may potentially be the oldest Solar System materials	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-023-36268-8	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 該当する

1. 著者名 Tachibana S. et al.	4. 巻 375
2. 論文標題 Pebbles and sand on asteroid (162173) Ryugu: In situ observation and particles returned to Earth	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1011 ~ 1016
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/science.abj8624	査読の有無 無
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 Hiroi T., Kaiden H., Imae N., Misawa K., Kojima H., Sasaki S., Matsuoka M., Nakamura T., Bish D.L., Ohtsuka K., Howard K.T., Robertson K.R., Milliken R.E.	4. 巻 29
2. 論文標題 UV-visible-infrared spectral survey of Antarctic carbonaceous chondrite chips	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 100723 ~ 100723
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.polar.2021.100723	査読の有無 無
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 Dionnet Zelia, Brunetto Rosario, Al?on Toppani Alice, Rubino Stefano, Baklouti Donia, Borondics Ferenc, Buelllet Anne C?cile, Djouadi Zahia, King Andrew, Nakamura Tomoki, Rotundi Alessandra, Sandt Christophe, Troadec David, Tsuchiyama Akira	4. 巻 55
2. 論文標題 Combining IR and X ray microtomography data sets: Application to Itokawa particles and to Paris meteorite	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Meteoritics & Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1645 ~ 1664
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.13538	査読の有無 無
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 Tatsumi E., Sugimoto C., Riu L., Sugita S., Nakamura T., et al.	4. 巻 5
2. 論文標題 Collisional history of Ryugu 's parent body from bright surface boulders	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 39 ~ 45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-020-1179-z	査読の有無 無
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 Brunetto R., Lantz C., Nakamura T., Baklouti D., Le Pivert-Jolivet T., Kobayashi S., Borondics F.	4. 巻 345
2. 論文標題 Characterizing irradiated surfaces using IR spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 113722 ~ 113722
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2020.113722	査読の有無 無
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4件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Nakamura T. et al.
2. 発表標題 Analysis of "stone" samples from C-type asteroid Ryugu
3. 学会等名 Meteoritical Society Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村智樹 他
2. 発表標題 Aqueous alteration of Cb-type asteroid Ryugu
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nakamura T. et al.
2. 発表標題 Analysis of samples from asteroid Ryugu returned by Hayabusa2
3. 学会等名 COSPAR（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nakamura T. et al.
2. 発表標題 Early history of Ryugu's parent asteroid: evidence from return sample
3. 学会等名 Lunar Planetary Science conference（国際学会）
4. 発表年 2022年

〔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	牛久保 孝行  (Ushikubo Takayuki)  (10722837)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・主任研究員    (82706)	

6. 研究組織（つづき）

	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	上相 真之 (Uesugi Masayuki)  (20426521)	公益財団法人高輝度光科学研究センター・分光推進室・主幹 研究員  (84502)	
研究分担者	玄田 英典 (Genda Hidenori)  (90456260)	東京工業大学・地球生命研究所・教授  (12608)	
研究分担者	臼井 文彦 (Usui Fumihiko)  (30720669)	神戸大学・理学研究科・特命助教  (14501)	
研究分担者	三宅 亮 (Miyake Ryo)  (10324609)	京都大学・理学研究科・准教授  (14301)	

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1件

国際研究集会 Hayabusa2 return sample analysis science meeting -Scientific achievement by the Stone team -	開催年 2022年～2022年
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------

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
---------	---------