

# 小惑星学事始：リュウグウを解剖する!

Analysis of Uncontaminated Extraterrestrial Materials from Asteroid Ryugu:  
Alone We Can Do So Little; Together We Can Do So Much



国立研究開発法人海洋研究開発機構  
高知コア研究所  
主任研究員

伊藤 元雄 博士(理学)

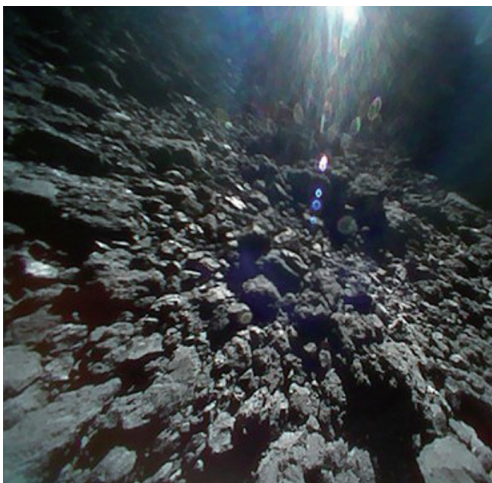
## 1. はやぶさ2探査

「小惑星リュウグウ」、その名前を聞いた人はどんなことを思うのでしょうか(図1)? 地球から3億 km 以上も離れた別世界、想像ができない、夢、太陽系(宇宙)はすごく広いなあなどが一般的に思うことかもしれません。しかし、我々、宇宙地球科学に身を置く研究者にとり「小惑星リュウグウ」は、特別な名前であり、太陽系と地球の形成に関して多くの重要なことを教えてくれます。

地球はその歴史の中で、加熱などによる様々な変成・変質を受け続けることにより、形成当時の情報を失いました。炭素を含む物質を主成分とするC型小惑星に分類される「小惑星リュウグウ」は熱による影響が少なかったと考えられています。そのため、太陽系が形成された約46億年前の出来事を、有機物や鉱物などの中に記録している可能性があります<sup>1)</sup>。このような有機物や鉱物の研究を進めることで、太陽系の形成史だけでなく、地球の水の起源や地球生命に至るまでの有機物の進化の解明も期待されることから、試料の直接採取が待ち望まれていました。

我々の知る代表的な地球外物質といえば隕石です。C型小惑星は、多くの隕石の中でも炭素質コンドライトと関連があると考えられており、おおよそ2重量パーセント程度の炭素質物質を含みます<sup>2)</sup>。大部分は、不溶性有機物と呼ばれる複雑な分子構造をもつ高分子有機化合物ですが、アミノ酸や芳香族炭化水素などの存在も報告されています<sup>3,4)</sup>。そのため「はやぶさ2」が訪れた小惑星リュウグウは、「はやぶさ初号機」によるS型(石型)小惑星イトカワと異なり、有機物と水に富むことが示唆されます。小惑星リュウグウは、地球でもよく見られる水を含まない鉱物(例えば、かんらん石)、含水鉱物(例えば、蛇紋石)、水が関与してできた鉱物(例えば、炭酸塩鉱物)そして有機物の混合物であると考えられています。小惑星リュウグウに存在する鉱物は地球の岩石と、水は海と、有機物は地球上の有機物、ひいては生命の起源と密接に関係しているかもしれません。その点だけでも、得られる科学的価値の重要さがわかっていただけたと思います。

小惑星リュウグウの表面



JAXAはやぶさ2探査機



図1 小惑星リュウグウの表面とJAXAはやぶさ2探査機  
画像クレジット：JAXA/Phase2 Kochi

「はやぶさ2」探査機は、2014年12月3日に JAXA 種子島宇宙センターから H2 ロケットにより「小惑星リュウグウ(1999 JU3)」を目指して打ち上げられました。2018年6月から約1年半にわたり小惑星リュウグウのリモートセンシング観測、MASCOT と MINERBA-II という小型着陸ランダーにより詳細な観測が行われ、天体の形状、密度、地質ならびに物理化学的情報が報告されています<sup>5-7)</sup>。

「はやぶさ2」惑星探査で期待されたことは、小惑星表面物質を地球に持ち帰ることです。探査機に搭載されたタンタル製弾丸発射型サンプル採取装置は、最大3ヶ所から、数ミリ程度の粒子を含み、全量で100ミリグラムの小惑星表面物質を採取できる設計になっていました<sup>1)</sup>。また小惑星の表面物質のみならず、地下物質を採取するべく小型衝突装置(SCI, Small Carry-on Impactor)と呼ばれる“純銅の弾丸”を小惑星表面に衝突させて人工クレーターを作り、剥き出しになった(あるいは周囲に散らばった)地下物質を採取することも計画しました<sup>1)</sup>。ほぼ予定通り「はやぶさ2」探査機は、2019年2月と7月に2度のタッチダウンを成功させ、それぞれの場所からの試料採取を実施しました。4月には小型衝突装置が順調に作動し、小惑星表面に大きな窪みができたことも確認されました<sup>8)</sup>。7月に行われた2度目のタッチダウンは、安全に着陸でき、かつ人工クレーター周辺の地下物質が多そうな領域に成功させ、そこからの物質採取を行いました<sup>9)</sup>。つまり「はやぶさ2」は、小惑星上の異なる2地点、かつ表面と地下からの物質を持ち帰ってくる偉業を成し遂げています<sup>10)</sup>。

小惑星リュウグウの表面物質を携えた「はやぶさ2」サンプルカプセルは、2020年12月6日にオーストラリアのウーメラ砂漠への帰還を果たしました。そして、12月9日に JAXA 宇宙科学研究所の「はやぶさ2」キュレーション施設に、サンプルカプセルが運び込まれました。開封作業は12月14日から行われ、カプセル内に想像を超える量の黒色粒子が確認されました。その後、総量が約5.4グラムであること、多数のミリメートルサイズの粒子のほか、1センチメートルを超えるものが存在した事が報告されています<sup>11,12)</sup>。先に行われた小惑星近傍におけるリモートセンシング観測と地球に帰還する試料の分析から得られる詳細な化学組成、鉱物学的情報とを組み合わせて、多角的に研究を進めることで、過去46億年にわたる太陽系史の全体像などが明らかになる事が期待されます。最初の1年間は、国内の研究者がリードする8チームが小惑星リュウグウ試料の分析を担いました<sup>13)</sup>。その中の一つ、筆者が率いる『フェーズ2 高知』チームは、海洋研究開発機構・高知コア研究所を中心として、国内外研究機関(国立極地研究所, SPring-8/JASRI, 分子科学研究所・UVSOR, JAXA, オープン大学, UCLA, 名古屋大学, 東京都立大学, 大阪大学など)から構成されています。

## 2. リュウグウを解剖(研究)する!

博物館や美術館と同様、地球惑星科学においても「キュレーション(Curation)」と呼ばれる組織があることをご存知でしょうか? 我々の分野におけるキュレーションの目的は、地質学的試料を科学的な視点で収集し、化学分析データにより分類することで一層の科学的価値を持たせ、それらを研究コミュニティと共有し、研究目的で配布することです。つまり、地球や惑星の成り立ち、あるいは将来の姿をよりよく知るためには、惑星物質のキュレーションが重要な役割を果たすことは明らかです。日本国内の代表的な地球惑星科学系のキュレーション組織は、隕石の収集と分類を長く続けている国立極地研究所の南極隕石ラボラトリー、極地の氷床や氷河からのアイスコアを収集する国立極地研究所のアイスコア研究センター、地球掘削コア試料の拠点である高知コアセンター(JAMSTEC と高知大学の共同運営)、そして2010年以来、小惑星からの帰還試料(イトカワとリュウグウ)を扱っている JAXA キュレーション<sup>13)</sup>がよく知られています。

我々『フェーズ2 高知チーム』は、JAXA キュレーションとともに、「小惑星リュウグウ」試料の到着の前に分析するための分析技術のみならず、各研究機器専用・汎用の試料ホルダーやジグ、そして地球由来の汚染を防ぎながらの試料の取り扱いと国内外に安全に輸送するための専用容器などの開発に取り組みました<sup>14-19)</sup>。FFTC(Facility to facility transfer container)と呼ばれる試料輸送容器と個別試料容器(サファイヤ製)が代表的なものです(図2)<sup>14)</sup>。JAXA において「小惑星リュウグウ」試料を扱う窒素充填チャンバー内で定常的に使用することから、簡便に洗浄可能なこと、チャンバーと同じ物質を使用すること、そしてリュウグウ試料と明確に異なることがすぐにわかることなど挙げられます。そして、世界中の研究者が使用するために、開閉と取り扱いが簡便なことが求められました。FFTC は SPring-8 の研究者が中心となり、金属加工が専門の佐藤精機株式会社と作り上げました。また、サファイヤ製の個別試料容器は、市販製品をうまく組み合わせることでコスト削減と開発期間の短縮を実現しています。そして、分析に使用する試料ホルダー大気非暴露対応とそれらの化学的汚染評価も非常に重要で、「小惑星リュウグウ」試料を取り扱う際の地球物質とのクロスコンタミネーション防止の観点から力を注ぎました<sup>16,17)</sup>。一方、実試料を扱い始めると想定外のことは多く起こったので、現場での細かい調整や改善は絶えず行っていました。やはり「事件は会議室で起きてるんじゃない! 現場で起きてるんだ!!」という、とある映画のセリフは、研究の現場でも真実なのです。

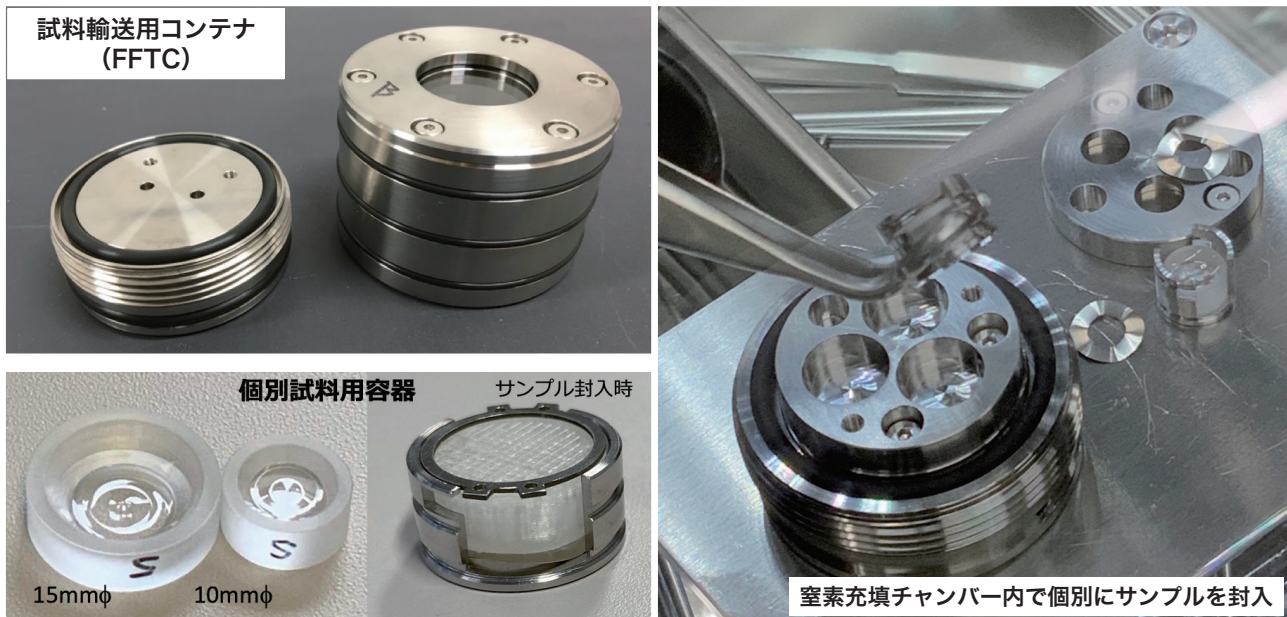


図2 Phase2キュレーション高知チームによる「はやぶさ2試料」輸送のための技術開発  
 画像クレジット：JAMSTEC/Phase2 Kochi

隕石を代表とする地球外物質は、我々研究者の手に渡るまでに色々な過程を経ます。例えば、手で触るなどによる人為的な汚染、長い年月の間に地球上の大気や水による化学変化、そして大気圏通過時の加熱による影響が考えられています。たとえ、専門の博物館や研究施設で厳重に温度や湿度が管理されていたとしても、その影響を排除することはできません。そのため、持ち帰られた「リュウグウ」試料は、我々が手にすることができる研究対象としては『最も新鮮な地球外物質』と言えるでしょう(図3)。一方、その試料中には鉱物と有機物が微小・微細な組織として複雑に共存します。そこから、太陽系46億年にわたる過去を遡り、低温の分子雲であった最初期、高温期に起きたと考えられる化学反応、そして熱と水により複雑な過程を経る小惑星上での進化の痕跡を読み取ることで、「小惑星リュウグウ」の理解につながります。限られた試料量である上に微細組織を網羅的に観察するために、現在までに確立されている試料調整法と既存の分析技術組み合わせ、お互いに相補的な物質科学的情報を得ることが重要と考えています。岩石・鉱物、有機物や含水鉱物中の様々な元素の量や同位体組成、鉱物組織とそれらの組み合わせなどを、我々が目指す“リュウグウで解き明かしたい科学”に合わせて、最適な分析機器の選択と分析手順の選定をする必要があります。そこで、試料全体を理解する「バルク分析」と「サブミクロンスケールでの二次元・その場分析」を両立した研究により、既存の地球外物質(多様な隕石、宇宙塵、小惑星イトカワや Wild2 彗星から獲得した塵など)との類似性、そして共存する鉱物と有機物の化学的な関連性を明らかにできると考えていました<sup>19)</sup>。

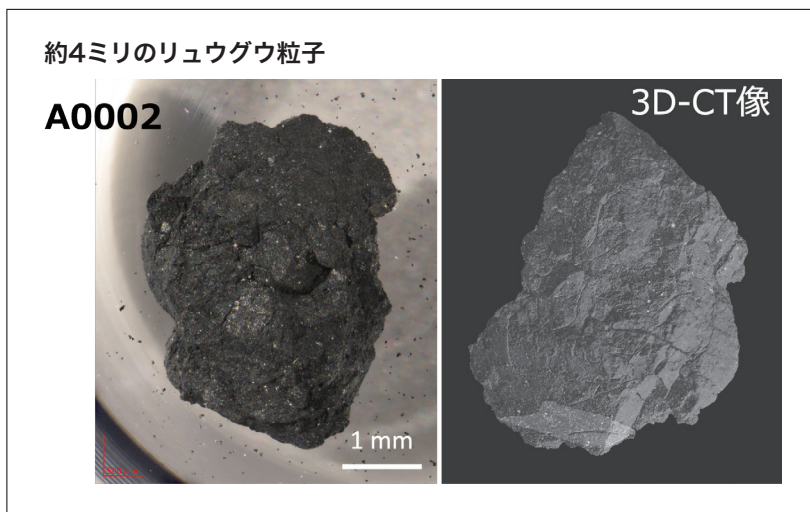


図3 Phase2キュレーション高知チームに配分された最も大きい「リュウグウ試料」(左)、SPring-8で取得した放射光X線CT像(右)  
 画像クレジット：JAMSTEC/Phase2 Kochi

我々のチームでは、試料の調整法から分析の順序にもっとも時間をかけて検討してきました。0.1から0.5ミリメートルの粒子を余すことなく分析をするために、集束イオンビーム装置(FIB)により超薄切片を作成してのち、透過型電子顕微鏡(TEM)、超高解像度二次イオン質量分析装置(NanoSIMS)、そして放射光を用いた走査型透過X線顕微鏡(STXM)を組み合わせたリンケージ分析を長く検討してきました(図4に代表的な機器を示す)。具体的には、FIBを用いて試料の物質科学的価値のもっとも高い領域を切り出し、STXMにより有機物を構成する炭素の化学種の空間分布の解析、NanoSIMSを用いた同位体・元素イメージング、最後にTEMによる組織・結晶構造観察を横断的に組み合わせています。次に簡単ですが、実際の「リュウグウ試料」分析について触れます<sup>20)</sup>。

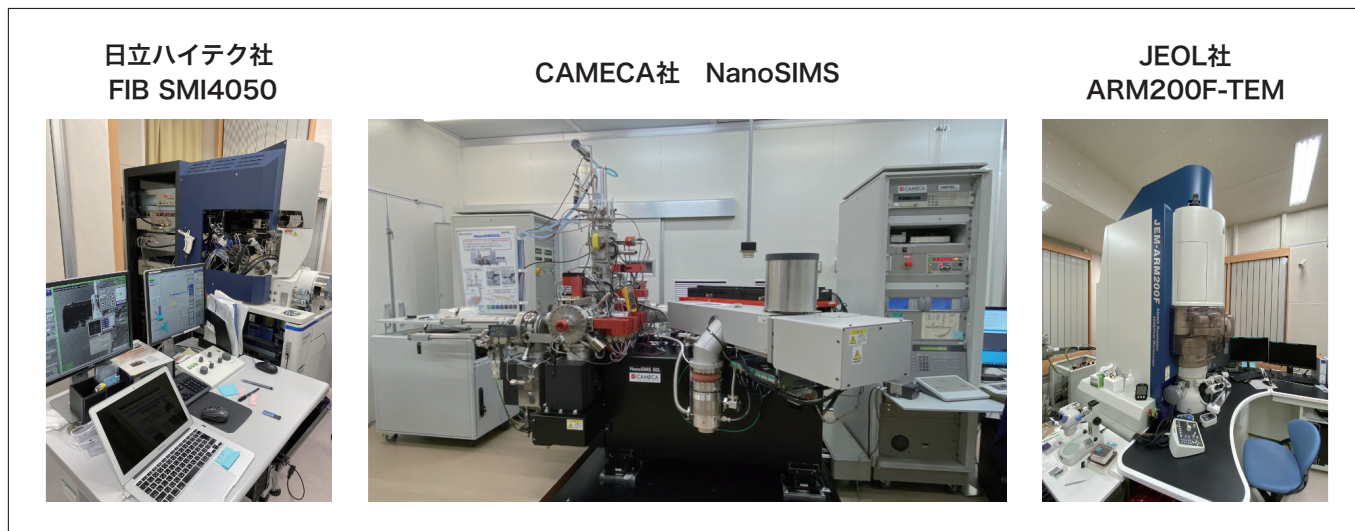


図4 JAMSTEC高知コア研究所所有の集束イオンビーム装置(FIB)、ナノスケール走査型二次イオン質量分析器(NanoSIMS)と透過型電子顕微鏡(TEM)。試料調整の要を担っているFIBはリュウグウの研究に大活躍した。

画像クレジット：JAMSTEC/Phase2 Kochi

我々“Phase-2キュレーション高知チーム”には、まず8個(1～4ミリメートル)、合計50ミリグラム程度のリュウグウ粒子が配分されました。2021年6月中旬から大型放射光施設 SPring-8のBL20XUにてX線CT撮影を行い、各粒子の形状や内部構造を取得することで、どの部分がどの分析に適しているかを決定しました。その後、国内外研究機関それぞれに、リュウグウ粒子を地球大気に触れぬよう輸送しました。貴重なリュウグウ試料の国外輸送にあたっては、駐日英国大使館、外務省、文部科学省の協力を得て、英国オープン大学と米国UCLAに安全かつスピーディに試料を送ることができました。

我々の分析に基づくリュウグウ粒子の元素組成は、先に報告された研究成果<sup>21,22)</sup>と矛盾がなく、「リュウグウは太陽系全体の元素組成を代表する始原的な物質である」という確証を改めて得られました。また、粒子ごとに多少の違いはありますが、水が関与して形成したと考えられる鉱物が多く見られます(図5)。このことから、リュウグウには過去に氷が存在し、その氷が溶けてできた水と、もともと含まれていた鉱物が反応した結果、リュウグウを構成する鉱物が作られたと考えられます。

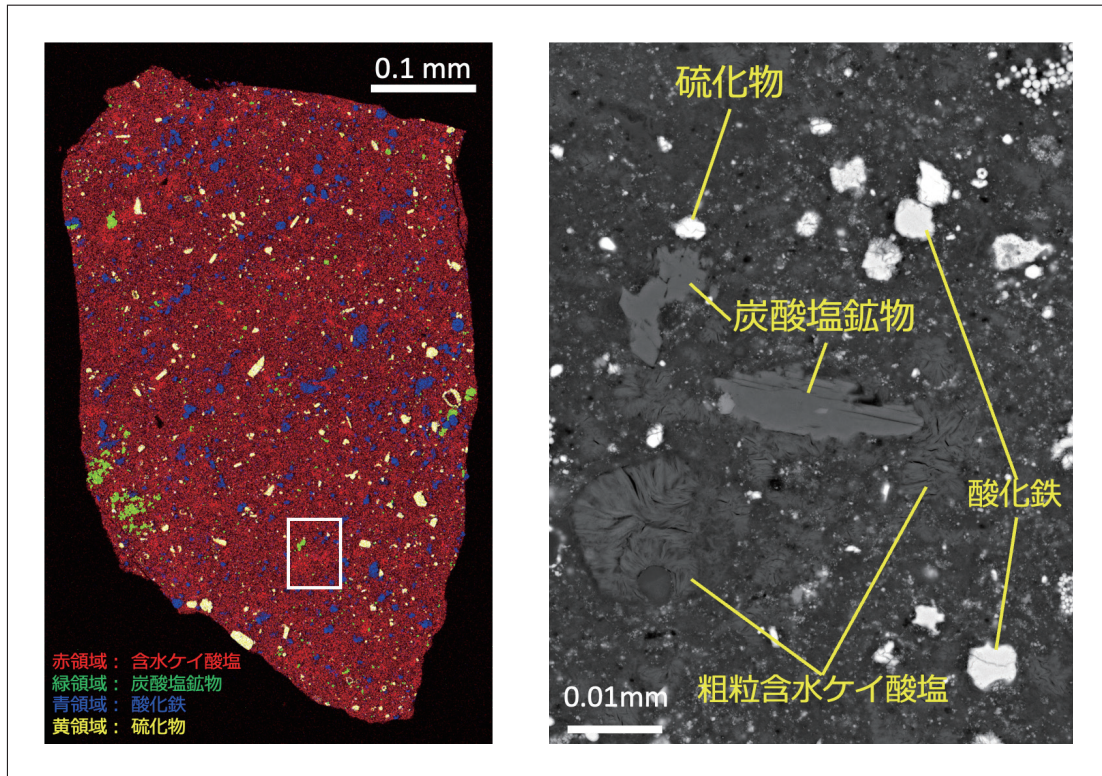


図5 リュウグウ試料の電子顕微鏡図：水を水酸基として含む、あるいは水が関与してできた鉱物から構成されている。  
 画像クレジット：JAMSTEC/Phase2 Kochi

もっと細かい物質がどうなっているのかを、NanoSIMSにより分析したところ、水素と窒素は、地球と比べると重い同位体成分に富んでいることがわかりました。この結果は、宇宙塵と良い一致を示すばかりではなく、彗星の値に近い傾向も見られます(図6)。このことは、リュウグウ粒子は熱の影響をあまり受けて、形成当時の物質科学的情報を保っていることを示唆しています。これらの粒子は太陽系の外縁部で形成後、現在の位置まで移動したと考えられます。

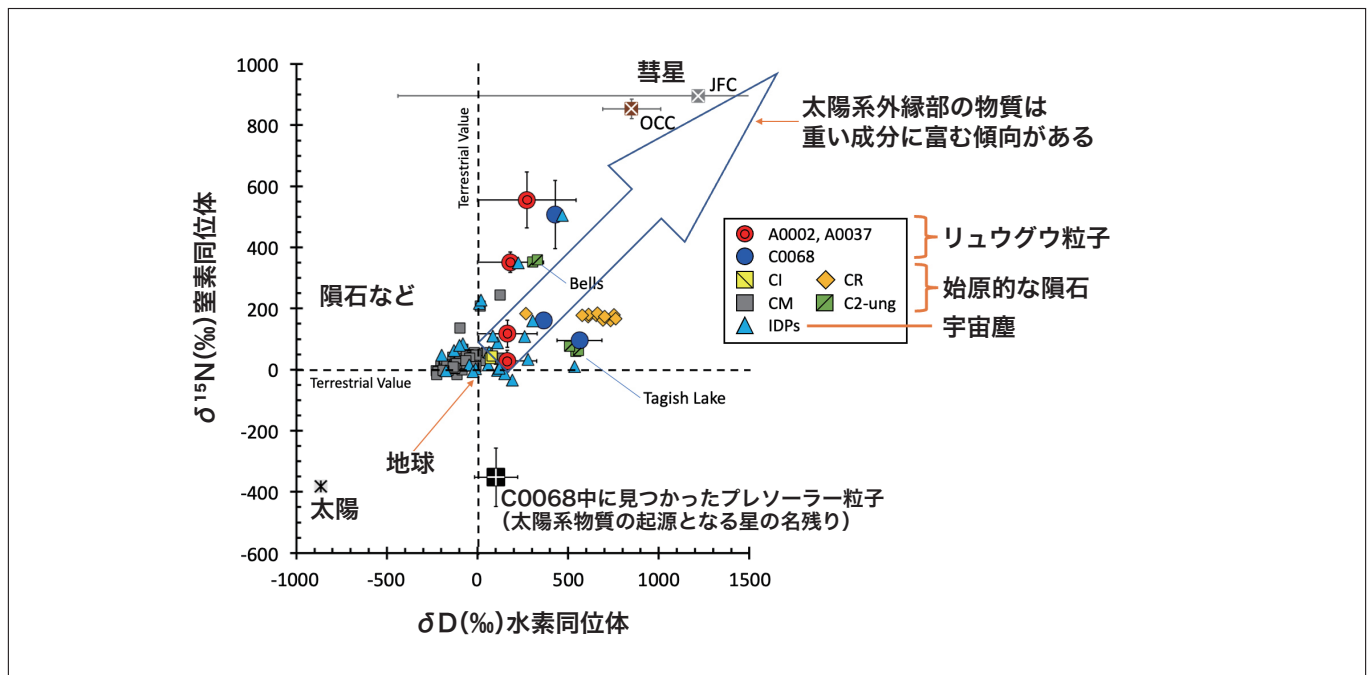


図6 水素と窒素同位体比の相関は、リュウグウの太陽系外縁部での形成を示唆している。  
 画像クレジット：JAMSTEC/Phase2 Kochi

STXMとTEMによる分析を組み合わせることで、脂肪族炭化水素に富む有機物は、粗粒の含水ケイ酸塩鉱物と複雑に入り混じった組織を持つことが明らかになりました(図7)。この組織は、有機物が水の存在下で鉱物と反応したことを示す直接的証拠です。また、脂肪族炭化水素に富む有機物は30度以上の温度になると分解するという研究報告があります。つまり、脂肪族炭化水素に富む有機物の存在から、リュウグウは30度以下の温度しか経験していないと考えられます。一方、どのような種類の有機物が該当する領域に含まれるのかは、今後の研究に続きます。

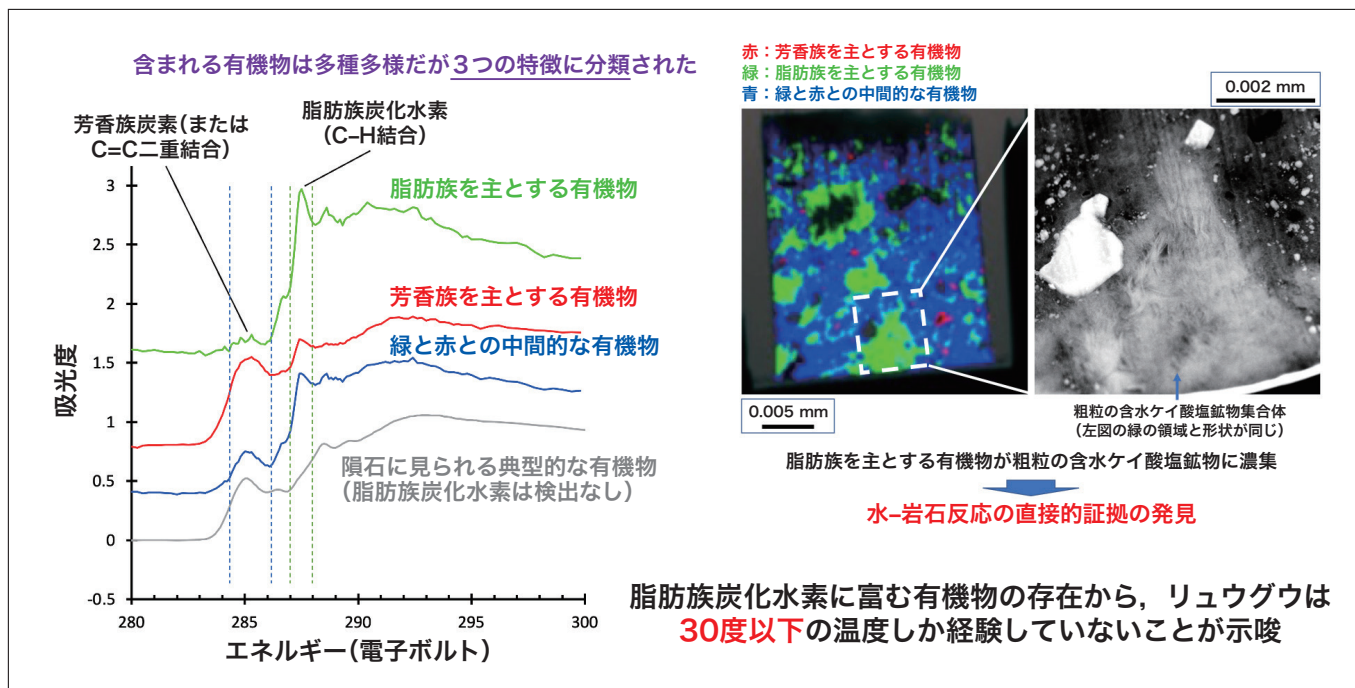


図7 リュウグウ粒子に含まれる多様な有機物は、大別すると三種類の異なる特徴を持つことがSTXMで分析によりわかった(左図)。リュウグウ粒子中(0.02 mm四方)の三種類の異なる特徴を持つ有機物ごとの分布を可視化し、点線の領域の透過電子顕微鏡による観察の結果、粗粒の含水ケイ酸塩鉱物の中に脂肪族炭化水素に富む有機物が濃集していることがわかった(右図)。

画像クレジット: JAMSTEC/Phase2 Kochi

### 3. まとめ

我々を含む8チームによりリュウグウ試料の分析が一斉に行われ、その成果が次々と発表されています<sup>20-27)</sup>。詳しくは各論文を参照していただくとして、リュウグウ試料には、宇宙地球科学の試料として第一級以上の科学的価値があることが分かってきました。

有機物や水が地球にどのように運ばれたか、未だに大きな議論が続いています。リュウグウ粒子中の粗粒の含水ケイ酸塩鉱物は、有機物や水の供給源の一つの可能性あります。粗粒の含水ケイ酸塩鉱物に含まれる有機物は、細粒の含水ケイ酸塩鉱物に含まれる有機物よりも、分解などに対し強いと考えられるため、そのままの状態地球に運ばれたかもしれません。一方、リュウグウ粒子の水素同位体は地球と比べて重い成分に富むため、リュウグウのような小惑星のみが地球への水の供給源とは言えません。一方、小惑星イトカワの粒子には、太陽風由来の軽い水素同位体組成を持つケイ酸塩鉱物が見つっています。様々な水素同位体組成を持つ成分が混じり合うことで、地球の水ができた可能性があります。「小惑星リュウグウを形づくった微粒子は、かつて太陽系の外側で形成され、水と有機物がたくさん含まれていた。このような始原的な小惑星は、その後太陽系の内側までやってきて、地球に水や有機物を供給した」という仮説を本研究で立てることができました。小惑星リュウグウ粒子の更なる分析成果や小惑星ベンヌ(NASAオサイリス・レックスミッション)の研究により、この仮説の検証ができると考えています。

我々の持つ科学の目は、隕石を代表とする地球外物質、そして「はやぶさ」や「はやぶさ2」により得られた小惑星物質の分析だけを見つめているわけではありません。そのほかにも、地球の衛星軌道上など宇宙空間に打ち上げられた宇宙望遠鏡(米国のハッブル、ジェームズ・ウェッブや日本のあかり、ひので)や地上に建設された巨大電波望遠鏡(アルマ望遠鏡など)を用い、より遠くの星や空間を観る研究も盛んに行われています。これらは、生命の構成要素となるような複雑な有機分子の観測も可能なため、宇宙空間における有機分子の形成と多様性が明らかになりつつあります。今後はますます、天体観測と惑星物質科学という異なる視点、そして空間・時間スケールの大きく異なる物質科学的な情報を結びつけることで、地球と太陽系のみならず宇宙そのものの理解につなげることができると考えています。

## 参考文献

- 1) 橘省吾, 澤田弘崇, 岡崎隆司, 高野淑識 (2014) 「はやぶさ 2」 サンプルリターン探査—太陽系始源天体探査における位置づけ—, *地球化学*, **48**, 265-278. doi.org/10.14934/chikyukagaku.48.265
- 2) Sephton M.A. and Botta O.(2005) Recognizing life in the Solar System: guidance from meteoritic organic matter, *International Journal of Astrobiology*, **4**, 269–276. doi.org/10.1017/S1473550405002806
- 3) 藪田ひかる (2008) 隕石有機物の構造・同位体分析による母天体変成過程の化学的解明, *Res. Org. Geochem.*, **23/24**, 73-97.
- 4) 癸生川陽子 (2016) 隕石母天体における有機物進化をひも解く, *地球化学*, **50**, 67–76. doi.org/10.14934/chikyukagaku.50.67
- 5) Kitazato K. *et al.*(2019) The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 near-infrared spectroscopy, *Science*, **364**, 272-275. doi.org/10.1126/science.aav7432
- 6) Sugita S. *et al.*(2019) The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes, *Science*, **364**, 252. doi.org/10.1126/science.aaw0422
- 7) Watanabe *et al.*(2019) Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu—A spinning top-shaped rubble pile, *Science*, **364**, 268-272. doi.org/10.1126/science.aav8032
- 8) Arakawa M. *et al.*(2020) An artificial impact on the asteroid (162173) Ryugu formed a crater in the gravity-dominated regime, *Science*, **368**, 67-71. doi.org/10.1126/science.aaz1701
- 9) Morota T. *et al.*(2020) Sample collection from asteroid (162173) Ryugu by Hayabusa2: Implications for surface evolution, *Science*, **368**, 654-659. doi.org/10.1126/science.aaz6306
- 10) Tachibana S. *et al.*(2022) Pebbles and sand on asteroid (162173) Ryugu: In situ observation and particles returned to Earth, *Science*, **375**, 1011-1016. doi.org/10.1126/science.abj8624
- 11) Yada T. *et al.*(2021) Preliminary analysis of the Hayabusa2 samples returned from C-type asteroid Ryugu, *Nature Astronomy*, **6**, 214-220. doi.org/10.1038/s41550-021-01550-6
- 12) Pilorget C. *et al.*(2021) First compositional analysis of Ryugu samples by the MicrOmega hyperspectral microscope, *Nature Astronomy*, **6**, 221-225. doi.org/10.1038/s41550-021-01549-z
- 13) 安部正真, 橘省吾, 小林桂, 伊藤元雄, 渡邊誠一郎 (2020) 火の鳥「はやぶさ」未来編 その20～小惑星リュウグウからのリターンサンプル分析の全体像～, *日本惑星科学会誌「遊星人」*, **29**, 28-37. doi.org/10.14909/yuseijin.29.1\_28
- 14) Ito M. and Tomioka N. *et al.*(2020) The universal sample holders of microanalytical instruments of FIB, TEM, NanoSIMS, and STXM-NEXAFS for the coordinated analysis of extraterrestrial materials, *Earth, Planets and Space*, **72**, 133. doi.org/10.1186/s40623-020-01267-2
- 15) Uesugi M. *et al.*(2020) Development of a sample holder for synchrotron radiation-based computed tomography and diffraction analysis of extraterrestrial materials, *Review of Scientific Instruments*, **91**. doi: 10.1063/1.5122672
- 16) Ito M. *et al.*(2021) Assessing the debris generated by the small carry-on impactor operated from the Hayabusa2 mission, *Geochemical Journal*, **55**, 223-239. doi.org/10.2343/geochemj.2.0632
- 17) Shirai N. *et al.*(2020) The effects of possible contamination by sample holders on samples to be returned by Hayabusa2, *Meteoritics & Planetary Science*, **55**, 1665-1680. doi.org/10.1111/maps.13480
- 18) Kodama Y. *et al.*(2020) Developments in microfabrication of mineral samples for simultaneous EBSD-EDS analysis utilizing an FIB-SEM instrument: study on an S-type cosmic spherule from Antarctica, *Journal of Mineralogical and Petrological Science*, **115**, 407-415. doi: 10.2465/jmps.181227
- 19) 伊藤元雄 (2017) はやぶさ2探査機がもたらす太陽系始原物質の分析に向けて, *ぶんせき*, **9**, 403-409.
- 20) Ito M. *et al.*(2022) A pristine record of outer Solar System materials from asteroid Ryugu's returned sample, *Nature Astronomy*, **6**, 1163-1171. doi.org/10.1038/s41550-022-01745-5
- 21) Nakamura E. *et al.*(2022) On the origin and evolution of the asteroid Ryugu: a comprehensive geochemical perspective, *Proceedings of The Japan Academy, Series B*, **98**, 227–282. doi.org/10.2183/pjab.98.015
- 22) Yokoyama T. *et al.*(2022) Samples returned from the asteroid Ryugu are similar to Ivuna-type carbonaceous meteorites, *Science*. doi.org/10.1126/science.abn7850
- 23) Nakamura T. *et al.*(2022) Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples, *Science*. doi.org/10.1126/science.abn8671
- 24) Noguchi T. *et al.*(2022) A dehydrated space-weathered skin cloaking the hydrated interior of Ryugu, *Nature Astronomy*. doi.org/10.1038/s41550-022-01841-6
- 25) Okazaki R. *et al.*(2022) Noble gases and nitrogen in samples of asteroid Ryugu record its volatile sources and recent surface evolution, *Science*. doi.org/10.1126/science.abo0431
- 26) Naraoka H. *et al.*(2023) Soluble organic molecules in samples of the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu, *Science*. doi.org/10.1126/science.abn9033
- 27) Yabuta H. *et al.*(2023) Macromolecular organic matter in samples of the asteroid (162173) Ryugu, *Science*. doi.org/10.1126/science.abn9057