

2022. 9. 23

報道関係者 各位

< 配信枚数4枚 >

小惑星リュウグウのサンプルに液体の水が入っていた！  
リュウグウの砂の3次元分析を行い、  
サンプル中の鉱物結晶に閉じ込められた液体の水を発見

立命館大学総合科学技術研究機構の土山明教授らの研究グループは、大型放射光施設スプリング8に設置されたX線ナノCTを用いて、はやぶさ2探査機が採取した小惑星リュウグウの砂の3次元分析を行い、サンプル中の鉱物結晶に閉じ込められた液体の水を発見しました。本研究結果を含む「はやぶさ2」初期分析「石の物質分析チーム」(代表 中村智樹 東北大学教授)による研究成果は、9月22日(木)(日本時間9月23日(金)午前3時)にアメリカ科学振興協会(AAAS)サイエンス(Science)誌に掲載されました。

< 研究成果の概要 >

はやぶさ2探査機が採取した小惑星リュウグウ(図1)のサンプルの初期分析が行われ、「石の分析チーム」の研究成果が、アメリカ科学振興協会(AAAS)サイエンス(Science)誌に9月22日(木)(日本時間9月23日(金)午前3時)に発表されました。「石の分析チーム」は、中村智樹・東北大学理学研究科教授をリーダーとし、日米欧の放射光施設やミュオン施設や大学の多くの研究機関の研究者からなります。立命館大学からは、土山明教授、松野淳也・立命館大学総合科学技術研究機構専門研究員が参加しています。

本分析チームは、分析や物性の測定、実測値を用いたシミュレーションにより、リュウグウの太陽系内での形成位置、天体材料物質の情報、含まれていた氷の種類、天体表層および内部での水との反応による化学進化、天体衝突の影響など、リュウグウの形成進化プロセスを明らかにしました。

土山明教授をリーダーとした研究グループは、これら一連の研究の一環として、大型放射光施設スプリング8に設置されたX線ナノCTを用いて、リュウグウの砂の3次元分析を行い、サンプル中の鉱物結晶に閉じ込められた液体の水を発見しました。



図1 はやぶさ2探査機が撮影した  
小惑星リュウグウ

< 研究の背景 >

■リュウグウサンプルをX線ナノCTで「分析」する

大型放射光施設スプリング8のビームラインBL47XUでは、サンプルの3次元内部構造を非破壊で約100ナノメートルの分解能で「見る」ことができるX線ナノCTが設置されています。さらにこの装置を用いて、サンプルを構成する鉱物の種類や場合によってはその化学組成を知る(「分析する」)ことができます。

今回、土山明教授の研究グループは、この手法をスプリング8の研究員などの研究者との協力により開発し、はやぶさ2探査機が採取した小惑星イトカワのサンプル初期分析に適用しました(参考文献[1])。

また、この手法を発展させ、炭素質コンドライトと呼ばれる始原的な隕石に含まれる鉱物中に、CO<sub>2</sub>に富む流体を発見し、この隕石が木星軌道より外側の低温領域でできたことを2021年4月に明らかにしました(参考文献[2])。

今回はこの手法を、リュウグウサンプルに適応したものです。得られたCT像の一例を図2に示します。ここでは、同一サンプルに対して異なった手法で得られた3種類のCT像を、RGBで合成することにより、サンプルを構成する鉱物の違いが、色の違いとして認識されます。



SPring-8のビームラインBL47XUにて、X線ナノCT分析チームの集合写真

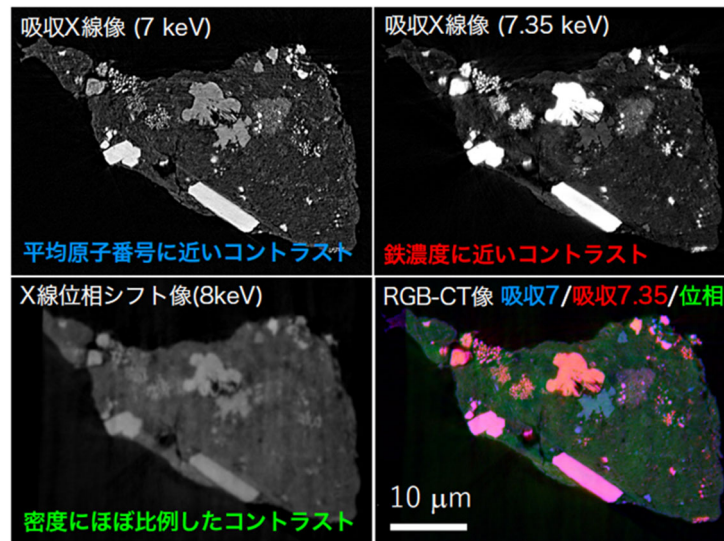


図2 小惑星リュウグウサンプルのX線ナノCT像(サンプル:C0103-FC007)

#### 【ご参考】RGB-CT像の各種動画素材

<https://youtu.be/Rc8TCrgOFyo>

[https://youtube.com/shorts/5ype\\_Esq9y4](https://youtube.com/shorts/5ype_Esq9y4)

<https://youtube.com/shorts/QeoRN4Lrelk>

<https://youtube.com/shorts/aReTo9GOzig>

#### <研究の内容>

##### ■ 鉱物に閉じ込められた液体の水の発見

小惑星リュウグウの母天体は、太陽系形成時に鉱物や氷が集まってできたと考えられ、氷が融けた液体の水と鉱物とが反応し(水質変成という)、この液体から様々な鉱物が析出(結晶成長)したと考えられています。

このような鉱物には成長した時に閉じ込められた液体の水(液体包有物という)が存在するはずであり、今回のX線ナノCT分析の目的の一つは、非破壊でこのような液体包有物を探査することでした。

これにより、磁硫鉄鉱(Fe<sub>1-x</sub>S)と呼ばれる鉱物の結晶中に閉じ込められた、液体包有物と思われるものを見いだすことができました(図3)。

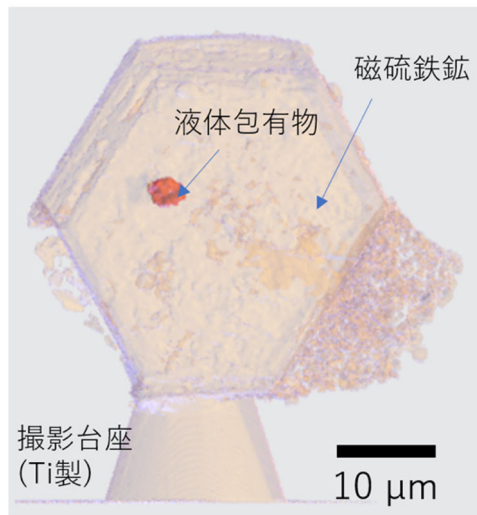


図3 磁硫鉄鉱の内部に見出された液体包有物のナノCT像  
(サンプル:C0002-FC012)

CT スライス像の動画 <https://youtu.be/BllrWIPitEU>

### <研究の意義>

#### ■液体の化学組成とその意義

図3に示された磁硫鉄鉱の結晶は、X線ナノCT撮影後、アメリカのNASAに送られ、マイク・ゾレンスキーさん(NASA ジョンソン宇宙センター)たちによって、化学分析が行われました。

分析は、サンプルを $-120^{\circ}\text{C}$ の低温にして内部の液体を凍らせ、イオンビームで削りながらTOF-SIMS(時間飛行型2次イオン分析)という装置を用いて行われました。これにより、液体は単純な $\text{H}_2\text{O}$ の水ではなく、 $\text{CO}_2$ や硫黄、塩素を含むことがわかりました(図4)。すなわちこの液体は、炭酸を含む温泉水のようなものとも言えます。

かつてリュウグウ母天体を作った氷にはドライアイス( $\text{CO}_2$ 氷)も含まれており、リュウグウ母天体が太陽系初期に、 $-200$ 度以下の極低温の場所で誕生したことを示しています。

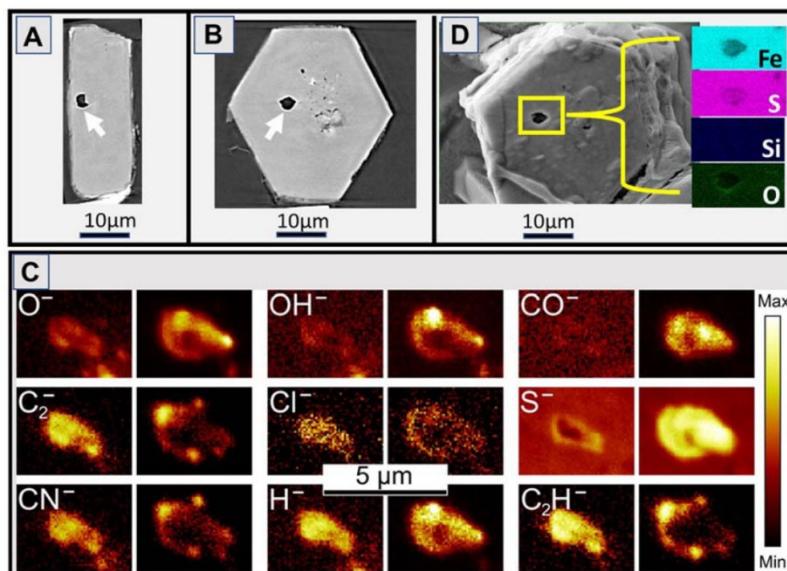


図4 液体包有物のTOF-SIMSによる分析(Nakamura et al., 2022より)(サンプル:C0002-FC012)

#### ■リュウグウサンプルには高温物質も存在

リュウグウサンプルには、約 $1500^{\circ}\text{C}$ 程度の高温で作られたコンドリュールと呼ばれるものが、水質変成を受けたと考えられる微小物体も存在していました(図5)。

このような高温微小物体は太陽近くで形成され、リュウグウ母天体が形成された太陽系外側まで移動したもので、太陽系誕生時の大規模物質混合の証拠と考えられます。



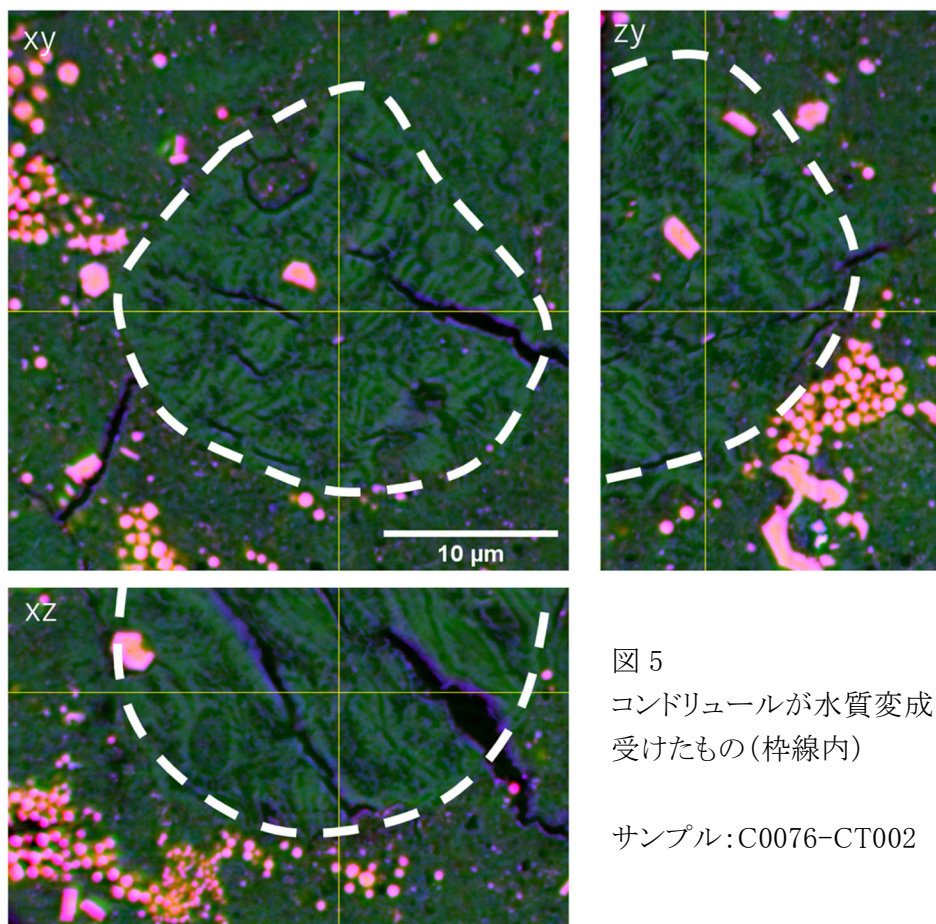


図 5  
 コンドリュールが水質変成を受けたもの(枠線内)

サンプル:C0076-CT002

### <論文情報>

タイトル：炭素質小惑星リュウグウの形成と進化：リターンサンプルから得た証拠  
 原 題：Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples  
 著 者：T. Nakamura et al.  
 発表雑誌：Science  
 掲載日：2022年9月22日(木)(日本時間9月23日(金)午前3時)  
 D O I：10.1126/science.abn8671  
 U R L：https://www.science.org/doi/10.1126/science.abn8671

### <参考文献>

- [1] A. Tsuchiyama et al. (2011) Three-Dimensional Structure of Hayabusa Samples: Origin and Evolution of Itokawa Regolith. *Science*, 333, 1125–1128. DOI:10.1126/science.1207807  
 [2] A. Tsuchiyama et al. (2021) Discovery of primitive CO<sub>2</sub>-bearing fluid in an aqueously-altered carbonaceous chondrite. *Science Advances*, 7, eabg9707. DOI: 10.1126/sciadv.abg9707

### ●本件に関するお問い合わせ先

(研究内容について)

立命館大学総合科学技術研究機構 教授 土山明

Email. atsuchi@fc.ritsumei.ac.jp

(報道について)

立命館大学広報課 担当:名和

TEL.090-6975-0250 Email. r-koho@st.ritsumei.ac.jp