

太陽系の形成と初期進化過程

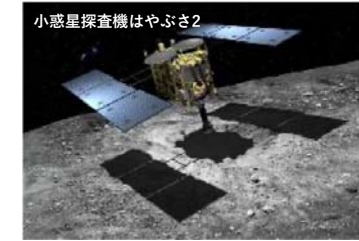
小惑星の科学的意義

小惑星は46億年前の太陽系で最初に誕生した微小天体である。したがって、小惑星を構成する岩石は太陽系の起源物質であり、太陽系の進化の情報が残っている。原始惑星系円盤の雪線(氷の凝縮温度150Kの領域)に遠くでは、水や炭素に富む岩石からなるC型小惑星(CはCarbonaceousの略)が形成され、それらは地球の生命や海の起源天体と考えられている。太陽系の形成進化を知る上で、C型小惑星の岩石(サンプル)を回収し有機物や含水鉱物を解析することは、第一級の科学価値がある。

小惑星探査機はやぶさ2とC型小惑星リュウグウ

C型小惑星リュウグウは、直径900m、密度1.2g/cc(空隙率50%程度)、自転周期7.6時間(過去は3.5時間)のそばん玉形の玉形をしたラブルパイル小惑星である。小惑星探査機「はやぶさ2」に搭載された分光計によるリモートセンシング観測により、以下が判明した(Watanabe et al. 2019; Sugita et al. 2019; Kitazato et al. 2019)

1. 大変暗く、有機物に富む。
2. 水を含む。含水鉱物の吸収を示す。ただし、吸収は弱い。
3. 含水鉱物の吸収が弱い。加熱脱水された可能性が示唆される。



回収サンプルの解析から、物的証拠に基づいたC型小惑星の起源と形成プロセスが解明されることが期待される。

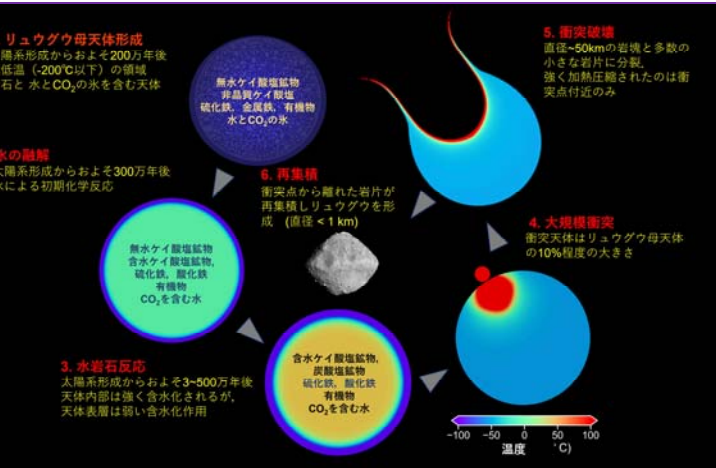
初期分析「石」チームの科学目標

リュウグウの形成史を岩石鉱物学的データ、スペクトルデータ、物性データから明らかにする。

- ・リュウグウの構成岩石、鉱物の決定とそれらの形成プロセスの推定
- ・含水鉱物の種類と存在度、および含水量の推定
- ・回収試料の反射スペクトル測定とリュウグウの反射スペクトルとの比較による物質分布推定
- ・回収試料の物性値(熱拡散係数、破壊強度など)の測定とリュウグウの衝突破壊、再集積のモデル化
- ・回収試料の粉末X線回折分析による加熱温度推定とリュウグウの加熱原因の推定

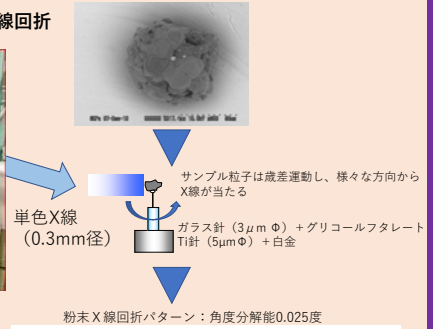
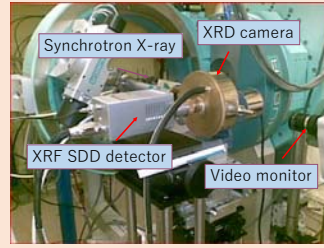
科学目標とKEKにおける分析: 小惑星リュウグウの形成進化過程の解明

我々は2021年6月からリュウグウサンプルの初期分析を行い、サンプルの岩石鉱物学および化学的特徴を調べている。KEKでは、多くのリュウグウ粒子に対し、放射光X線回折実験を行い、個々の粒子を構成する含水鉱物の特性や存在度から、リュウグウにおける水質変成条件やその後の加熱条件を推定することを目指している。リュウグウはラブルパイル型小惑星であり、個々の粒子の特徴を調べることで、破壊前のリュウグウ母天体で起こった水質変成や加熱変成が天体スケールでどのように起こったかを理解することができる。ビームライン3Aで行ったリュウグウサンプルのX線回折実験の結果から、リュウグウがどのような鉱物で形成されているか、その鉱物組み合わせや存在度、リュウグウの天体内部では、どのような水質変成が起こっていたのかを解明する。

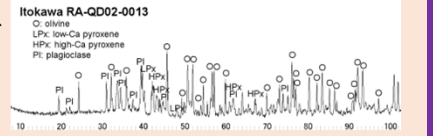


KEK 3Aにおける実験手法

ガンダルフイーカメラを用いた放射光X線回折



10µm ~ 200µm 以下の粒子の粉末X線回折パターンを、15分~1時間程度で取得できる

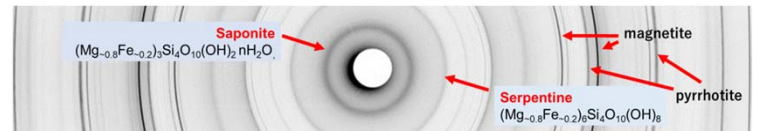
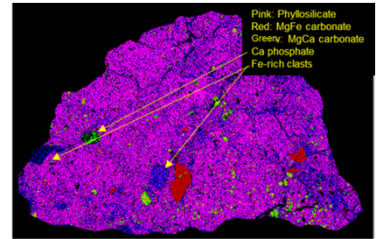
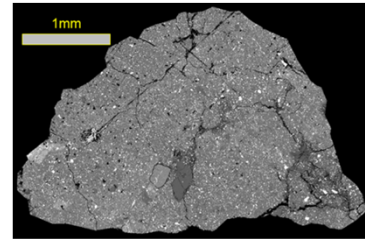


リュウグウサンプルは数µm以下の鉱物粒子の集合物と考えられ、粉末法を用いた解析が有利である。

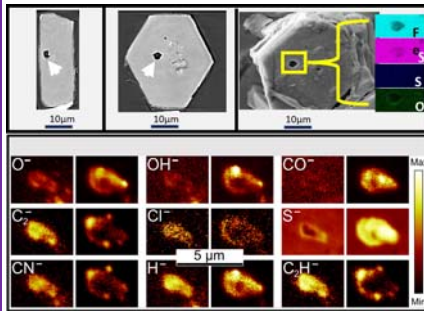
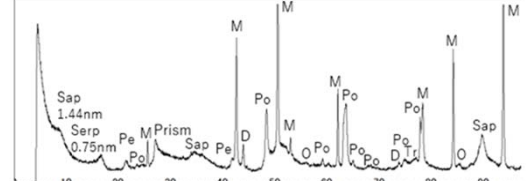
- ・1999年から20年間、改良を重ねながらKEKで実験を行ってきた。数多くの新しい発見をし、多数の論文を出版してきた(データベース登録済み)。したがって、X線回折実験は確実に遂行し最良のデータを取得できる。

分析結果と考察

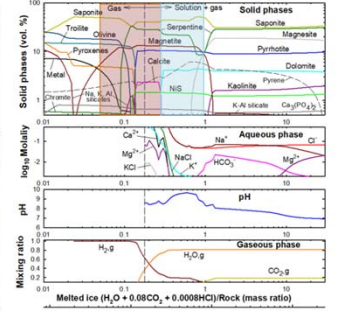
- ・放射光XRDの結果、リュウグウサンプルの大部分は含水鉱物であり、加えて炭酸塩鉱物、リン酸塩鉱物、磁鉄鉱、硫化鉄、および有機物から形成されていた。鉱物の組み合わせと存在度から、リュウグウにはかつて多くの水が含まれ、体積比でおよそ1:1の水(炭酸水)が存在していたことが分かった。
- ・硫化鉄結晶に閉じ込められた液体の水を発見した。炭酸水であった。
- ・リュウグウサンプルの硬さ、熱の伝わり方、比熱、密度などを実測した。
- ・この実測値を使って、リュウグウ母天体形成後の天体内部の加熱による温度変化、および衝突破壊プロセスの数値シミュレーションを行い、リュウグウの形成進化をコンピュータ上で再現した。



放射光XRD
横軸: 2θ
縦軸: 強度
D: Dolomite
M: Magnetite
Pe: Pentlandite
Po: Pyrrhotite
Sap: Saponite
Serp: Serpentine



硫化鉄(Pyrrhotite)宙に見つかった液体の水(有機物を含む炭酸水)



鉱物組み合わせと相対存在度に基づく水質変成の条件推定

結論

小惑星探査機「はやぶさ2」が回収した小惑星リュウグウのサンプル(探査機が回収した3番目に大きなサンプルを含む17粒子)を日米欧の放射光施設5か所、ミュオン施設などを利用し宇宙化学的・物理的手法による解析を行った。その結果、リュウグウの形成から衝突破壊までの歴史(太陽系内での形成とその位置、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)が判明した。リュウグウは水やCO₂の雪線に遠く(~10au)で無水ケイ酸塩、有機物、氷などから形成された。その後、天体内部が昇温し、液体の水と岩石が反応し、含水ケイ酸塩、炭酸塩などが形成された。天体は徐々に冷えていった。リュウグウ母天体の~1/10程度の大きさの天体が衝突し、母天体は破壊され多数の小惑星になり、そのうちの一部が再集積して現在のリュウグウが形成された(ラブルパイル型小惑星)。

