

# 小惑星リュウグウは500万年前に近地球軌道に —リュウグウ試料希ガス同位体分析からの発見—

岡崎 隆司

Okazaki Ryuji

## 1. はじめに

宇宙航空研究開発機構（JAXA）は2014年12月に小惑星リュウグウに向け探査機「はやぶさ2」を打ち上げた。はやぶさ2ミッションは、初代はやぶさ探査機に継ぐ「小惑星サンプルリターンミッション」であり、「はやぶさ」の探査したS型（Stony-type）小惑星とは異なる化学的性質を持つC型（Carbonaceous-type）小惑星を目指した<sup>1)</sup>。小惑星は表面の反射スペクトルで特徴づけられている。S型小惑星は無水鉱物主体の岩石質天体、C型小惑星は炭素質コンドライトと類似した天体である。S型小惑星は主小惑星帯の内側（小惑星帯中央より太陽に近い領域）に存在する天体の大部分を占めており、C型小惑星はより太陽から遠い領域に多く存在する<sup>2)</sup>。太陽から離れた場所に位置するC型小惑星や彗星等は、S型小惑星に比べて揮発性に富む元素や化合物を多く含んでいる。したがって、リュウグウには小惑星イトカワには含まれていなかった揮発性物質である水や有機物が含まれていると期待される。はやぶさ2ミッションでは、地球の大気、海洋、生命の起源や進化に関する新しい情報を小惑星リュウグウから取得することを主要な科学目標とした。

一方、地球上で入手することのできる地球外物質としては、隕石や宇宙塵があり、それらの一部はC型小惑星や彗星由来と思われ、地球の大気・水・有機物等の起源物質の関連性が議論されてきた。しかし、大気圏突入時の加熱、地上での生物起源物質による汚染、空気中の水蒸気・雨等による汚染や変質・風化作用等、様々な物質科学的な情報の劣化が免れな

い。一方、はやぶさ2が地球に持ち帰った試料は、そのような汚染等の影響はこれまでに報告されていない<sup>3,4)</sup>。加えて、探査機に搭載された様々なリモートセンシング観測機器によって得られたリュウグウの物理情報（体積、重力、表面構造、反射スペクトル等）は、隕石等では入手不可能なものであり、これまでの隕石研究だけでは手の届かなかった太陽系の物質進化に関する知見を得ることが可能となった。

本稿では希ガス同位体を用いた地球・宇宙物質科学の1つとして、はやぶさ2の回収した小惑星リュウグウ試料の希ガス分析の成果について紹介する。希ガスは化学的に不活性で惑星物質（岩石）には含まれにくい元素であるため、恒星内部での原子核合成、放射壊変、高エネルギー粒子との反応、外部からの付加（太陽風インプラネーションや地球大気による汚染）等、惑星物質が経験する様々な物理化学過程による同位体組成の変化を記録している。様々な起源の希ガスは異なる同位体組成を持っており、これらを個々に分離・判別することで諸過程の痕跡を辿ることが可能である。

## 2. はやぶさ2帰還カプセルとリュウグウ試料

はやぶさ2探査機は小惑星近傍でのリモートセンシング観測、ローバー・ランダーの投下、小型衝突装置による人工クレーター形成、2回の小惑星試料採取等予定されていたすべての運用・実験を成功させた<sup>5-7)</sup>。試料採取は直径8mm、質量5gのタンタル弾丸を秒速300mで衝突させ、表層数cmの物質を舞い上がらせることで行われた<sup>8)</sup>。はやぶさ2探

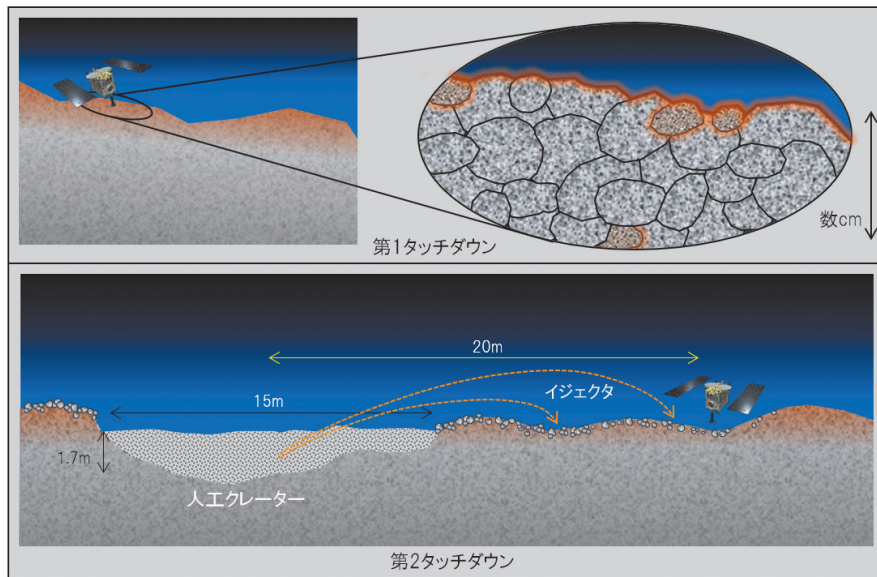


図1 リュウグウ表層試料採取

第1タッチダウン（上段）では表層から数cmの物質が採取された（右上丸囲み）。第2タッチダウンでは人工クレーター形成時に放出されたイジェクタを含む物質がクレーターから約20m離れた場所で採取された（下段）

査機の試料格納容器は3回の試料採取を想定し、Chamber-A、-B、-Cの3部屋構造となっていた。1回目の試料採取による表層物質はChamber-Aに、2回目の人工クレーター形成後の表層物質と地下物質の混合試料がChamber-Cに格納された（図1）。Chamber-Bは1回目と2回目の試料採取運用の間に行われた人工クレーター形成やその他の小惑星への降下運用の際は開放状態にあり、2回目採取運用前に封止された。

すべての小惑星近傍での運用を終えた探査機は2019年11月に小惑星を出発し、リュウグウ試料を収納した帰還カプセルを2020年12月6日に地球へ帰還させた。その後、探査機本体は拡張ミッションへと旅立った<sup>9)</sup>。オーストラリア・ウーメラ砂漠で回収された帰還カプセルはJAXA・宇宙科学研究所（ISAS）の相模原キャンパスにあるキュレーション施設に持ち込まれ、回収試料の初期記載・回収・配分作業が行われた。その後、地球帰還から半年後の2021年6月には6つのサブチームからなる「はやぶさ2初期分析チーム」へのリュウグウ試料配分が開始された<sup>10)</sup>。

初期分析チームの1つである揮発性成分分析チームには、直径約1mm程度の粒子からなるRyugu-A試料とRyugu-C試料、それぞれおよそ4mgずつが配分された（図2上段）。これらの粒子を1粒ずつ、

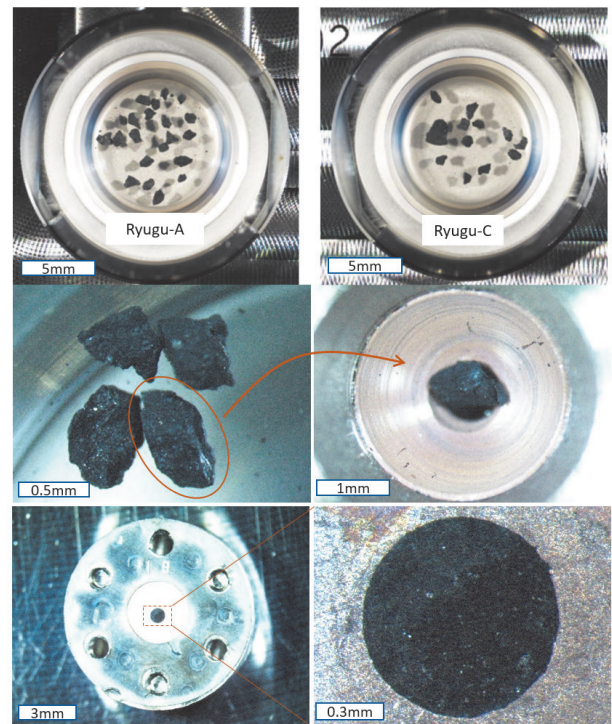


図2 リュウグウ試料

揮発性成分分析班に配布された試料（上段）。個々の粒子（中段左）をペレット作成用銅ディスクに入れ（中段右）加圧しペレット化した（下段左）。試料表面は表面観察、顕微鏡分析に適したフラットな面を持つ（下段右）

特製のジグを用いて平坦な表面を持つようペレット状（図2中段、下段）にし<sup>11)</sup>、その表面の赤外分光及び電子顕微鏡観察を行った。その結果、リュウ

グウ試料はイブナ型炭素質隕石（CI コンドライト）と呼ばれる希少な種類の隕石と似ていることが判明した。CI コンドライトの元素存在度は太陽の値とよく一致しており、天体内部での元素分別を免れた太陽系進化初期段階の情報を保存している始原的な物質と考えられている。リュウグウ表面の反射スペクトル分光では、別種の隕石（加熱を受け脱水したCM コンドライト）との類似性が示唆されていたが、帰還試料の分析はそれとは異なる結果であった。この主な要因は、反射スペクトルの参照データは隕石をもとにしていたが、地球での吸着水の影響等を正しく補正できていなかったためである。隕石では入手不可能な標本を得たわけであり、この点だけでもサンプルリターンミッションとしての価値が十分にある。

### 3. リュウグウ材料物質の希ガス同位体組成

Ryugu-A 試料から作成したペレット試料 10 個、Ryugu-C 試料のペレット 6 個を希ガス同位体分析の対象試料とした。ペレット試料は 1 つずつ高純度アルミカプセルに包み、質量分析装置に接続された真空加熱装置に導入した。試料を約 100~1800℃まで数段階に分けて加熱し、各温度で放出された希ガス（He, Ne, Ar, Kr, Xe）安定同位体の質量分析を行った。

Ne 及び Xe の同位体組成から、Ryugu-A 試料も Ryugu-C 試料のどちらにも、太陽系形成時に存在し

ていた始原的希ガス（P1 希ガスと呼ばれる）を含んだ炭素質物質が大量に含まれていたことが判明した（図 3, 4）。Xe 同位体組成は炭素質コンドライトの一種である CI コンドライトのものと酷似していたが、リュウグウ物質に含まれる P1 希ガスの濃度は、CI コンドライトや他のコンドライトよりも多いことが分かった。また、太陽系が形成される以前に存在した恒星由来の希ガス（[先太陽系] ダイヤモンド等）に含まれる希ガス等）も CI コンドライトに比べると多く含まれていた。一方、リュウグウには二酸化炭素や水の氷が過去に存在していた痕跡が報告されている<sup>12)</sup>。したがって、リュウグウ母天体形成領域は、水や二酸化炭素の氷、始原的な希ガス等の揮発性に富む物質が多く存在していたと考えられる。リュウグウの前身にあたる天体(母天体)は、雪線（水の気相と固相の境界線）より遠方、つまり小惑星あるいは木星軌道よりも太陽から遠い場所にあった物質が集積し誕生した。その後、母天体の破壊とその破片の再集積によってリュウグウが形成された（図 5）。では、小惑星帯あるいは木星よりも遠い領域で誕生したリュウグウは、いつ現在の近地球軌道天体となったのだろうか。C 型小惑星は地球の海、大気、生命の起源天体候補の 1 つであり、その軌道進化は太陽系内物質移動を理解する上で重要である。

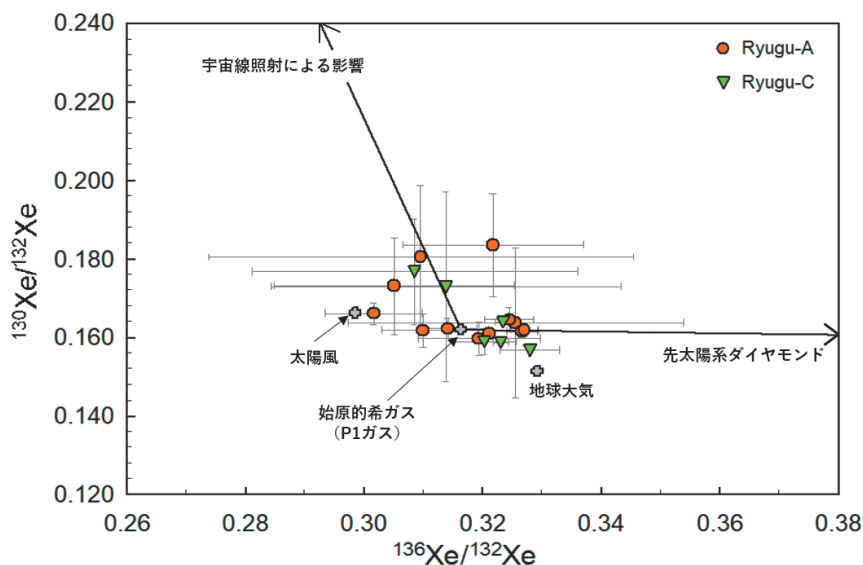


図 3 Xe 同位体組成

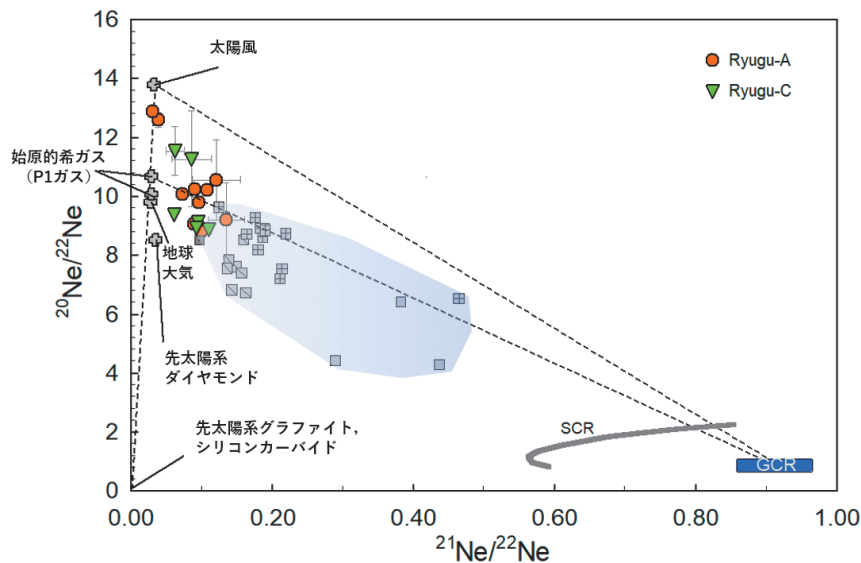


図4 Ne 同位体組成

リュウグウ試料の組成はオレンジ丸及び緑三角で示した。また、炭素質コンドライトの組成（四角及び薄紫の網掛け）を比較のために示した。SCR, GCR は太陽宇宙線及び銀河宇宙線の照射によって生成される組成を示す。多くのリュウグウ試料は原始的希ガス、先太陽系ダイヤモンド、GCR の混合である。2 粒の Ryugu-A 試料にのみ、大量の太陽風が検出された

#### 4. リュウグウ表層物質に残された軌道進化

Ne の同位体組成から、太陽系形成時の原始的ガス以外にも、太陽宇宙線 (Solar Cosmic Ray, SCR) や銀河宇宙線 (Galactic Cosmic Ray, GCR) によって生成された希ガスと太陽風インプラネーション起源 (Solar Wind, SW) の2種類の希ガスも含まれていたことが判明した (図4)。SW は1核子当たり数 keV 程度の運動エネルギーを持つ荷電粒子流であり、岩石物質に対する飛程は短く、物質の表層部 (深さ 50-100 nm) にのみ到達できる。SCR は MeV, GCR は GeV に及ぶ高エネルギー粒子であり、その照射の影響は核破碎反応や中性子捕獲反応で生成された同位体として深さ 1-2 m にある岩石中にも残る。SW-Ne 同位体組成は  $^{20}\text{Ne}$  に卓越しているが、宇宙線照射によって生成される Ne の同位体比は  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ ,  $^{22}\text{Ne}$  の3つの同位体の割合はほぼ同じである。

Ne 同位体分析には Ryugu-A 試料を 10 個, Ryugu-C 試料を 6 個用いたが、大量の SW 希ガスは 2 個の Ryugu-A 試料にのみ含まれていた。これら 2 粒子に含まれる SW-Ne の量から、現在の軌道での SW 照射期間はそれぞれ 3500 年間, 250 年間と計算された。一方、多くのリュウグウ粒子に含まれていた SW 希

ガス量はわずかであり、SW 照射期間は数十年以下であった。回収したリュウグウ表層物質の多くは数十年程度の短期間しか天体の最表面に滞在できなかったと考えられる。

次に、リュウグウ表層物質が高エネルギー宇宙線に照射された期間を見積もってみる。宇宙線照射によって生成された Ne の量を算出し、Ryugu-A, Ryugu-C 試料それぞれの平均値を求めた。宇宙線照射による Ne の生成速度は天体表層からの深さに依存するため、Ryugu-A は表層 (深さ数 cm), Ryugu-C は深さ約 1.5 m での照射を仮定し、Ne 生成速度を計算した。これらの値から得られた Ryugu-A, Ryugu-C 試料の宇宙線照射期間はどちらも約 500 万年であった。SW 希ガスの結果と合わせて考えると、リュウグウ表層から深さ 1-2 m の領域は隕石衝突等による大規模な攪拌は起こっていなかったと言える。しかし、リュウグウ表層物質の宇宙線照射期間は表層 1-2 m の物質がそこに滞在した期間を示すが、いつ照射が起きたのかという情報は持っていない。

一方、はやぶさ 2 探査機によるリモートセンシング観測によって、リュウグウ表面のクレーター分布及び数密度が詳細に求められている<sup>13,14)</sup>。それらのデータをもとに、リュウグウ形成後に表面構造が

一新されるようなイベントが起こり、その後、隕石・小惑星物質の衝突によるクレーター形成によって現在の表面構造を獲得したと言われて<sup>14, 15)</sup>。また、人工クレーター形成実験からリュウグウ表層物質の物理特性が得られ、現在のリュウグウ表面のクレーターがどのくらいの数や規模の天体衝突の結果によるものか見積もられた<sup>13-15)</sup>。宇宙空間における天体衝突頻度は小惑星帯領域と近地球軌道においては大きく異なっており、小惑星領域では近地球軌道の約30倍も高い<sup>16, 17)</sup>。したがって、クレーター形成期間を計算する際は、どの軌道で主にクレーター形成が起こったのかという仮定に大きく依存する。小惑星帯での衝突を仮定した場合のクレーター年代は10-30万年、近地球軌道の場合は200-800万年となる<sup>13-15)</sup>。後者の近地球軌道でのクレーター形成は、希ガス同位体から求めた宇宙線照射年代とよく一致していることが分かった。それにより、リュウグウが小惑星帯から現在の近地球軌道に移動したのは約500万年前であると考え、リモートセンシング観測と希ガス同位体分析の結果を統合的に説明できる(図5)。

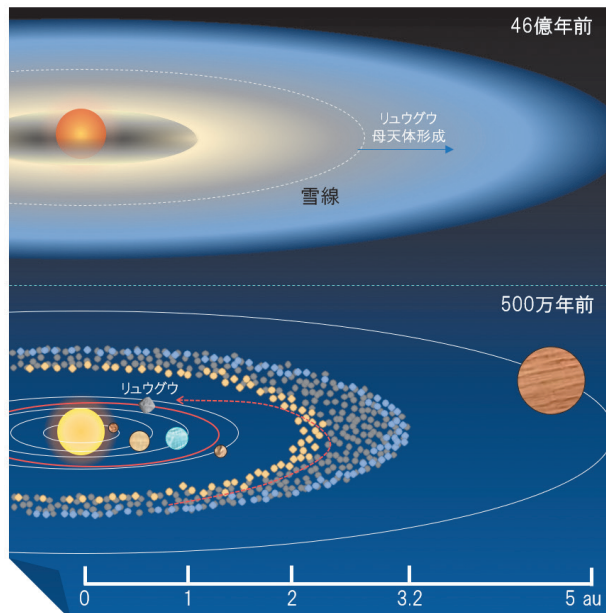


図5 リュウグウ進化の概念図

## 5. おわりに

「はやぶさ」からの技術進歩として人工クレーター形成と地下物質の採取に成功した。これらの回収試料の化学分析とリモートセンシング観測の結果を結びつけることで、新しい科学的知見を得ることができた。日本の次期サンプルリターンミッションとして、火星衛星探査(Martian Moons eXploration, MMX)の打ち上げが2024年度に迫っている。その成功は更なる技術と科学の飛躍をもたらすだろう。

## 参考文献

- 1) Tsuda, Y., *et al.*, *Acta Astronautica*, **91**, 356-263 (2013)
- 2) DeMeo, F.E. & Carry, B., *Nature*, **505**, 629-634 (2014)
- 3) Okazaki, R., *et al.*, *Science Advances*, eabo7239 (2022)
- 4) Yokoyama, T., *et al.*, *Science*, eabn7850 (2022)
- 5) Tsuda, Y., *et al.*, *Acta Astronautica*, **171**, 42-54 (2013)
- 6) Saiki, T., *et al.*, *Acta Astronautica*, **84**, 227-236 (2013)
- 7) Tachibana, S., *et al.*, *Science*, **375**, 1011-1016 (2022)
- 8) Tachibana, S., *et al.*, *Geochemical Journal*, **48**, 571-587 (2014)
- 9) Hirabayashi, M., *et al.*, *Advances in Space Research*, **68**, 1533-1555 (2021)
- 10) Yada, T., *et al.*, *Nature Astronomy*, **6**, 214-220 (2022)
- 11) Okazaki, R., *et al.*, *Earth, Planets and Space*, **74**, 190 (2022)
- 12) Nakamura, T., *et al.*, *Science*, eabn8671 (2022)
- 13) Sugita, S., *et al.*, *Science*, **364**, eaaw0422 (2019)
- 14) Morota, T., *et al.*, *Science*, **368**, 654-659 (2020)
- 15) Cho, Y., *et al.*, *J. Geophys. Res.: Planets*, **126**, e06572 (2021)
- 16) Bottke Jr., W.F., *et al.*, *Icarus*, **179**, 63094 (2005)
- 17) O'Brien, D.P., *et al.*, *Icarus*, **178**, 179-212 (2005)

(九州大学大学院理学研究院)