

# 惑星形成論研究者はリュウグウサンプル分析結果のどこに注目するのか

JAXA 宇宙科学研究所 兵頭龍樹

2023 年 1 月 11 日

## 1. はじめに

はやぶさ 2・ミッションオペレーションが 100 点満点中 1000 点の成功を収めたことで、小惑星リュウグウの試料サンプルからリュウグウとその母天体の形成と進化に関する情報が多く得られました。一方、惑星形成論者が手にしたいのは、リュウグウそのものだけでなく、「太陽系や多様な惑星系がどのように生まれるのか？」という難問を紐解く鍵です。

まず結論から申し上げますと、リュウグウの試料分析によって、(i) 懸念していた隕石バイアスが明確となった (2 章)、(ii) 太陽系はその“誕生時から”大動乱だったことが示唆された (3 章)、そして (iii) 惑星形成論者が取り組むべき新たな挑戦が生まれた (4 章)、ということに尽きます。以下、一つずつお話しします。

## 2. 懸念していた隕石バイアスが明確となった

これまで太陽系形成論は、地球に降ってくる隕石から得られる情報をその土台として組み立ててきました。誤解を恐れずに極論を言うと、「これまで我々は、隕石から太陽系の物質の全てを知っている気になっていた」部分があります。もちろん我々はそのままで愚かではないので、隕石にはバイアスがあるだろうと頭の片隅には懸念が存在していました (つまり、地球に落ちてきやすい化学組成や軌道があるだろうと)。しかしそれを確かたる物証はこれまで不十分であったし、既知事実の外で形成論を組み立てることは基本的にはタブーであります (観測事実や試料データに沿わない理論は、机上の空論であると言われかねない)。

初期分析の結果、リュウグウ試料サンプルが、我々の隕石コレクションの中では非常に珍しい CI コンドライトと酷似することが明らかになりました (Tachibana et al. 2022; Yokoyama et al. 2022, Nakamura et al. 2022; Okazaki et al. 2022; Hopp et al. 2022; Paquet et al. 2022)。

どのくらい珍しいかという点、発見された ~70,000 個ほどの隕石のうち 9 個のみが CI コンドライトというものです。これはある意味でパラドックスに思えます。なぜなら地球近傍や小惑星帯には無数に小天体 (隕石の母天体) が存在しているのに、はやぶさ 2 が訪れたリュウグウが珍しい CI コンドライトの母天体だったわけです。また、地球で隕石として見つかる CI コンドライトは、地球上で非常に汚染されていることが判明しました (つまり、太陽系の標準物質としてこれまで扱われてきた CI コンドライトですが、実際は標準物質として適切でないことが分かり、汚染されていないリュウグウ試料を新たな基準とすべきことを意味します; Yokoyama et al. 2022)。

これらの結果から我々が強く論されたことは、「隕石で得られる情報にはバイアスがある」ということである（例えば、宇宙空間では、CI コンドライト母天体の存在が珍しくない可能性が大きい）。そしてそれは言い換えると、太陽系のことを知りたいなら、「待つのではなく、自ら取りに行くことが重要である」ということが、確固たる証拠を持って明らかになったということです。太陽系にはまだまだ我々の知らない物質が眠っているでしょう。

### 3. 太陽系はその“誕生時から”大動乱だったことが示唆された

古典的な太陽系形成論は、太陽系は“その場”で物質が凝縮し、合体成長するというものがあります（図1）。太陽からの距離（動径距離）に応じて典型的な温度が変わるので、凝縮する化学組成が異なります。しかし現在の太陽系を見ると、特に小惑星帯には、さまざまな化学組成を持つと思われる小惑星が同じ動径距離に存在しています（DeMeo & Carry 2014）。

これらの観測事実から、小惑星程度のサイズ（~10-100 km）まで成長した天体は巨大ガス惑星（木星と土星）の成長と軌道進化によってかき混ぜられ、現在観測される分布に落ち着いたと提案されてきました（図2；

現在、巨大惑星の成長と軌道進化に関して複数のモデルが提案されていて、一長一短であるが、観測分布を説明している）。ちなみに、ここでの小天体のかき混ぜは、小天体が十分に形成されてからの現象であるので、太陽系形成の“後期過程”に起こるものです（図2）。

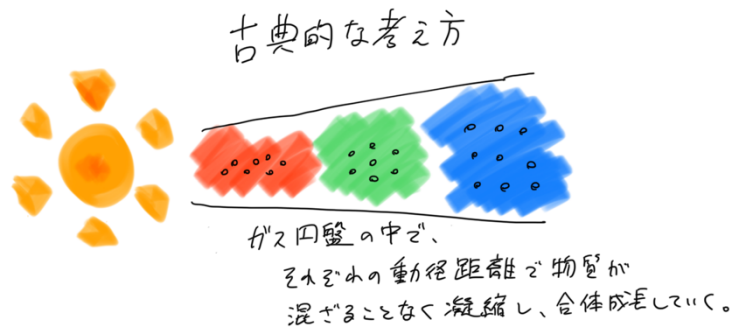


図 1. 古典的な太陽系の物質凝縮モデル（その場での形成）。

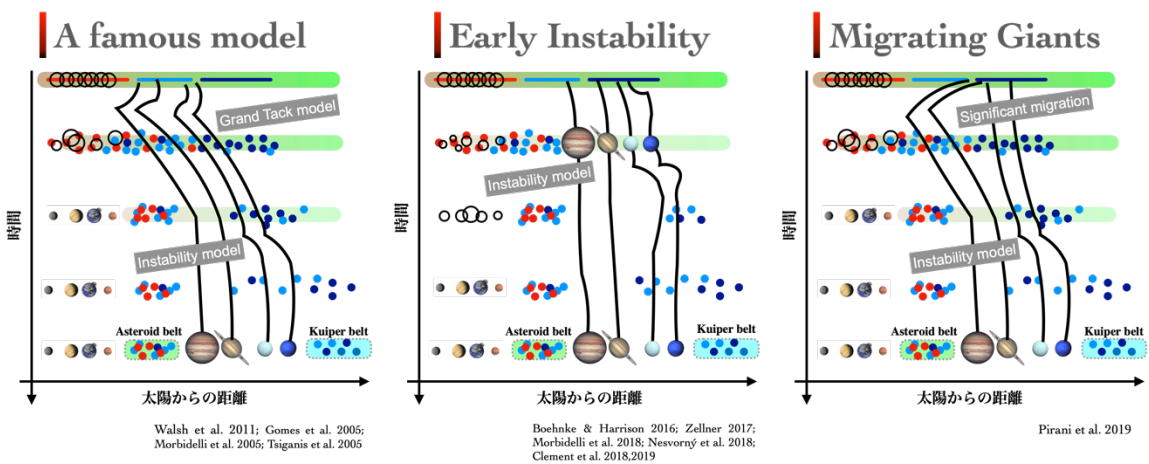


図 2. 太陽系形成の“後期過程”で起こる大動乱の3つの異なるモデル。木星や土星の形成のタイミングと動径距離、その後の軌道進化の仕方が異なる。各モデルは、一長一短であるが、現在観測される小惑星や地球型惑星の分布を説明する。

では、リュウグウ試料サンプルが我々にもたらした知見は何なのか？ — まず鋳物中に水や CO<sub>2</sub> に富む流体が発見され、リュウグウが木星軌道より外側の低温領域で形成されたことが示唆されました (Nakamura et al. 2022; Hopp et al. 2022). また銅や亜鉛の同位体組成から、リュウグウ的な物質が地球に存在し、それは地球質量の約 5% に相当することが明らかになりました (Paquet et al. 2022). このような結果は、上述の太陽系形成の後期過程の物質混合 (太陽系外縁部から地球に水や揮発性物質が運ばれたこと) を裏付ける証拠です。さらに、リュウグウ試料サンプルには磁鉄鉱 (太陽系ガス円盤の磁場が記録されていた) が含まれており、その記録された磁場の強度から、円盤ガスの散逸前にリュウグウ母天体が太陽系の内側に運ばれたことが示唆されました (これは、巨大ガス惑星の形成や太陽系形成の後期過程の物質混合が起こった時間を制約する一つの鍵となる; Nakamura et al. 2022; Sato et al. 2022).

これだけではありません。ここから著者が特に注目するポイントを説明していきます。それは、「太陽系形成の“初期段階 (誕生時から)” の物質混合 (大動乱)」を示唆するものです。

太陽系の全ての天体の材料物質は、元は  $\mu\text{m}$  サイズの程度の塵 (ダスト) です。未だほとんど解明されていませんが、このダストがガス円盤中で集まり、小惑星サイズまで成長すると考えられています。小惑星サイズまで成長すると、そこからは重力が支配的になるので、衝突合体 (時には破壊) を繰り返して、惑星サイズまで成長すると信じられています。

リュウグウの大部分の材料物質は、上に述べた通り水や CO<sub>2</sub> が凝縮するような低温環境で形成されたものです (つまり形成場所は太陽から遠い場所)。さらにそれに加えて、太陽近くの高温下でできた粒子 (Ca, Al に富む包有物など) が発見されました (Nakamura et al. 2022; Kawasaki et al. 2022). つまりリュウグウ母天体は、低温物質 (氷とドライアイス) と高温環境下でできた物質が混合する場所で集積したことになります。高温微粒子 (ダスト) は太陽近くから太陽系外側まで移動したと考えられます。これは、太陽系誕生時 (太陽系形成過程の初期段階) の内側と外側の大規模物質混合 (大動乱) の証拠です。このような証拠は、他の隕石からも報告されています

(Joswiak et al. 2017; Desch et al. 2018).

これは古典的な描像 (図 1) とは異なるものです。

しかし一方で、太陽系の物質は少なくとも二分されていることが報告されています

(図 3; Dauphas 2017; Fischer-Gödde & Kleine 2017). これは同位体分析によって

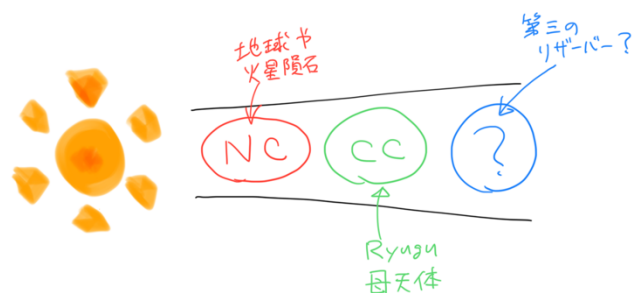


図 3. 太陽系物質が空間的に分断されていること  
の概念図。太陽系外縁部には第三のリザーブとなる  
物質が存在しているかもしれない (4 章を参考)。

明らかにされたことで、non-carbonaceous (NC) リザーバーと carbonaceous chondrite (CC) リザーバーに明確に分断できることが知られています。これは太陽系物質が(時間 or/and)空間的に分断されていたことを示唆しています。ちなみに、地球や火星隕石は NC であり、リュウグウは CC に属することが明らかになりました (Yokoyama et al. 2022; Hopp et al. 2022)。

ここで惑星形成論者に難しい課題が手渡されることとなります。リュウグウ試料サンプルによると物質はダストの段階(太陽系形成の初期段階)から太陽系の広範囲で混合すべきだが、同位体的に物質は均質化してほしくない — これを説明しなければならないのです。

#### 4. 惑星形成論者が取り組むべき新たな挑戦が生まれた

2章と3章を踏まえて最後に一人の惑星形成論者としての思いと考えを語ります。結論をまず述べると、「太陽系形成論は、もはや惑星の形成だけの問題ではなくなった」「太陽系の初期段階での物質の混合過程や環境が重要ということは、これは星形成過程を含む課題である」ということです。

図1の古典的な描像では、中心星(我々の場合は太陽)がすでに形成し、かつ周囲にガス円盤(原始惑星系円盤)がしっかりと存在し、その中でダストから惑星が形成されるという描像でありました (Safronov, 1972; Hayashi et al. 1985)。しかしこのガス円盤は、星形成の副産物として形成されます。ガス円盤の形成過程(分子雲からの降着過程)は未だ理解が進んでいません(図4)。この理解を深められない限り、物質や同位体組成の混合過程に迫れない。またこの初期描像が不鮮明であるということは、後期の大動乱(図2)の真の描像にも迫れません。ここで古典的な描像(図1)と違うのは、星やガス円盤が形成されるのと同時に惑星(or/and その材料物質)の形成が起こりうるという考え方です。我々惑星形成論者は、星形成を学ばねばなりません。

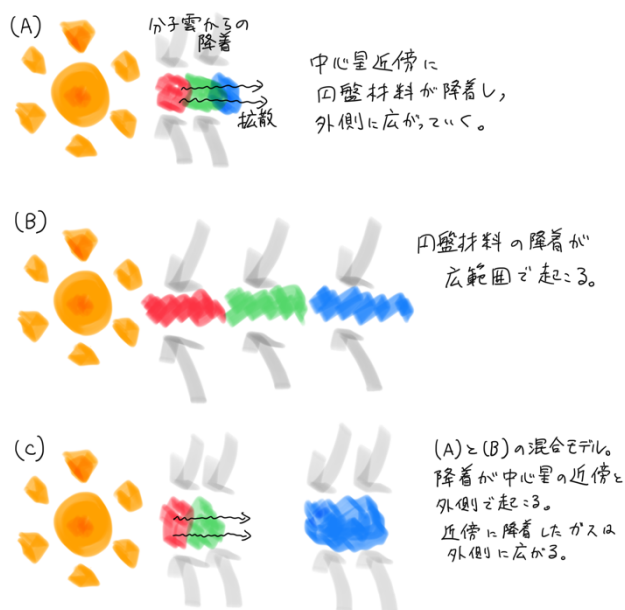


図4. 星形成に付随する原始惑星系円盤の形成過程の想像図。分子雲からの降着で星が成長し、原始惑星系円盤ができるが、その真の描像は明白でない。(A)-(C)は異なる降着過程を想像している。さらに現実には、時間的な変動も存在するだろう。

また現在、NC と CC という太陽系物質の二分性が明らかになっています（3章参照）。しかし我々が手にできる物質にはバイアスがあります（2章参照）。分子雲からの降着とガス円盤の形成のされ方によっては、太陽系のより外縁部に第三のリザーバー（分子雲の情報をより保存した始原的な物質）が存在している可能性があります（図3の“？”に対応）。もしそのような物質が見つければ、分子雲降着と円盤形成過程の強い制約に繋がり、惑星形成過程の理解に大いに資することになります。この第三のリザーバーの存在は、彗星、巨大惑星のリングや衛星、外惑星のトロヤ群に刻まれているかもしれません。ここに外惑星探査や彗星探査の科学価値を見出すことができます。

## 5. 最後に

惑星形成論は、惑星だけでなく、その中心にある星の形成まで包括的に扱うことが求められるステージに登りました。アルマ望遠鏡や JWST などの天文観測は太陽系外に手を伸ばし、星形成過程に迫っています。惑星形成論の今後の発展には、天文分野との学術的な融合が必須です。一方で、はやぶさ2の功績の上に、太陽系の形成と進化を明らかにする次世代探査の次なる一手は、太陽系外縁天体（彗星、巨大惑星リングおよび衛星、トロヤ群）かもしれません（今回は話しませんが、太陽系内側に存在する E 型小惑星の探査も太陽系形成史を紐解く鍵だと思っています）。惑星探査では、理学意義の構築だけでなく、工学的な実現可能性の議論が極めて重要です。さらに各国が独自の宇宙政策・探査計画を目まぐるしく進める状況で、多種多様なステークホルダーに資する必要があります。これらを意識しながら、「ISAS 内外で“日常レベルから”の理工の連携構築がその礎となる」と信じております。