

太陽系の起源をめぐる探査・物質科学と惑星系形成領域の化学



橘 省 吾

〈東京大学大学院理学系研究科宇宙惑星科学機構 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1〉

e-mail: tachi@eps.s.u-tokyo.ac.jp

探査機による始原小天体の近傍観測やサンプルリターンにより、太陽系の起源や初期進化に関する物質情報を太陽系の構造とともに理解する土台ができつつある。原始惑星系円盤内の化学構造の観測も進み、太陽系探査と天文観測の成果が同等の空間スケールで議論ができるようになってきた。太陽系における近年の始原小天体探査の成果を概説するとともに、惑星系形成領域の化学観測との融合により、太陽系の起源と初期進化を惑星系形成の一般論の中に位置づけることへの期待を述べる。

1. 太陽系の化学

太陽系の誕生、地球をはじめとする太陽系惑星の形成や進化、地球における生命の起源の理解は地球惑星科学分野の中心課題のひとつである [1]。天文学においても、太陽ならびに太陽系は、私たちがもっともよく知る恒星や惑星系として、たとえば、太陽の元素存在度（太陽光球に見られる元素の吸収線および始原隕石CIコンドライトの元素組成から決定される [2]）は、宇宙の元素存在度の基準として用いられる。また、系外惑星の発見以降、太陽系の惑星や太陽系の全体構造は私たちのよく知る基準（もしくは比較対象）となっている。

恒星や惑星系の形成は、複合的物理過程の結果であり、初期条件や各過程の寄与の程度の違いに応じて、多様なシステムが形成される。しかし、「太陽系」「地球」といった唯一無二の天体の形成や進化を議論するためには、太陽系や地球の辿った道をなんらかの方法で知る必要がある。どのようにして太陽系の歴史をさかのぼるのか。そのた

めに、太陽系誕生直後や太陽系史にわたる進化のさまざまな場面を記憶する物質が利用されてきた。たとえば、鉱物は天然に算出する結晶であり、その構造や化学組成は、鉱物がつくられた環境の物理・化学条件を反映する。物質の同位体組成も形成環境を反映したり、異なる起源をもつ物質の混合の証拠を提示したりする。そのため、これまで隕石などの地球外物質の分析や太陽系天体の物質科学的探査により、太陽系の歴史をさかのぼるための事実の積み上げが行われてきた。

本稿では、太陽系探査や地球外物質分析から見えてくる太陽系の起源と初期進化、そして天文学との融合に向けた期待や取り組みについて、紹介したい。

2. 太陽系始原物質

太陽系の起源や初期進化の記録が残るのは、彗星や小惑星といった小型天体である。これらのなかには太陽系最初期に形成され、その後、岩石成分が融けるような大規模な溶融やそれに伴う分化（たとえば、地球のような惑星では、溶融の結果

として、金属の核と岩石のマントルが分離した密度成層構造がつくられた)を経験していないと考えられるものがある。このような未分化天体には太陽系や惑星の材料(太陽系始原物質)が平衡化せずに保存されていることが期待される。非平衡であるからこそ、これらの物質から太陽系初期の物理進化、物質進化のさまざまな段階を探求することが可能となる。

太陽系始原物質として、これまで研究が進められてきたのは地球に落下してくる隕石である。現在までに数万個が発見されている地球上の隕石には、月や火星、ベスタといった分化した天体から飛来した隕石もあるが、大半は未分化な隕石(コンドライトとよばれる)である。

コンドライトの研究を通じて、太陽系の成り立ちや進化の議論が行われてきた[3]。たとえば、太陽系内でつくられた最古の物質の年齢がおよそ45億6,700万年前であること(これをもって、太陽系の誕生年代とされている)、太陽系の材料となった核種が銀河系内のさまざまな恒星を起源とし、極めてよく混合されていること、コンドライトには化学組成の多様性があること(すなわち、惑星形成以前に化学的分別過程があった)、一部の隕石には水を結晶構造に含んだ鉱物や有機物を含むものが存在することなど多くのことがわかっている。

分析技術の進展に伴って、高精度分析が可能となり、核種の均一化はかなり進んでいるものの、元素によっては%レベルから0.01%レベルでの同位体組成の不均一が隕石ごとに見られ、これらが初期太陽系の構造進化や物質進化のなんらかの証拠となりうることも指摘されている[4]。なお、マイクロメートルサイズやそれ以下のサイズの微粒子には、太陽系の平均から大きくずれた同位体組成をもつものも発見される(最大でも100 ppm程度)。これらはプレソーラー粒子(先太陽系粒子)とよばれ、晩期型星周塵が、太陽系材料としての同位体均一化プロセスを免れ、個々の恒星で

の元素合成を反映した同位体組成を保っている粒子であると考えられる[5]。また、一部の有機物には重水素や ^{15}N が濃集しているものも発見されている[6]。星間分子雲で重水素の濃集した分子が発見されていることと合わせて、これらの有機物には太陽系をつくった分子雲での化学プロセスが記録されていることが期待される。さらには、地球外物質から抽出される有機物にはアミノ酸や糖、核酸塩基なども見つかり、初期地球には宇宙から生命前駆物質となる有機物が届けられていたこともわかっている[7]。

隕石はどこから来るのか。地上の隕石の大半を占める普通コンドライトはS型小惑星と反射スペクトルが似ていること、5%程度の存在度ではあるが、水や有機物を含む炭素質コンドライトは小惑星帯の主要天体であるC型小惑星[8]と反射スペクトルの類似性が見られることが知られ、それぞれ、これらの小惑星に起源をもつと考えられてきた。

隕石以外の地球外物質として、1-2 mmを下回るサイズの宇宙塵や微隕石がある。地球への到達量としては、隕石より多く、年間1万トンを超えると考えられているが、多くが地上に到達する前に大気圏で消失し、また、地上に落下しても地球上の塵との区別が簡単ではない。そのため、成層圏で浮遊する塵を飛行機で回収したり、南極の氷や雪を溶かして、ろ過することで採取したりといったことが行われてきた。これらの宇宙塵や微隕石は、隕石とは異なり、普通コンドライトに似たものは少なく、一方で炭素質コンドライトに類似し、含水鉱物を含むものが多く見られる。有機物を豊富に含み、無水の鉱物からなるものも存在する[9]。これらの粒子は氷成分が昇華した彗星からの塵ではないかと考えられている。

地球外物質の元素、同位体、鉱物、有機物、物性、組織の詳細分析によって、物質にたたままれた太陽系初期の物質進化プロセスは部分的には詳細が明らかになっている。しかし、地球外物質

研究が抱える本質的問題としては、それらの物質が太陽系のどの天体から来たのか（予想はあるが）はっきりしないこと、地球大気がフィルターの役割を果たし、物質強度によるサンプリングバイアスがあることが挙げられる。これらは、物質から明らかになる初期進化の過程が、太陽系のどこでどのように起きたのかがわからないという問題へとつながっていく。また、地球上での汚染（特に水や有機物）の影響が少なからずあることも無視できない。

これらの問題を解決するひとつの手段が太陽系探査であるといえる [10]。太陽系内のあらゆる小天体を探査するわけにはいかないが、代表的なものを近傍で探査し、時にサンプルを地球に持ち帰り（サンプルリターン）、分析することで、地球外物質からこれまでに得られてきた情報が太陽系の空間構造とつながっていく。

3. 始原小天体探査

1980年代に国際協働で実施されたハレー彗星探査や、21世紀初頭のNEARシューメーカーによる小惑星エロス探査や表面への着陸、現在も運用中の探査機New Horizonsによる太陽系外縁天体のフライバイ探査など、さまざまな太陽系始原小天体を対象とした多くの探査が行われてきた。

ここではいくつか絞りに絞って、米国のStardust探査（81P/Wild2彗星からの放出塵サンプルリターン）、欧州のRosetta探査（67P/Churyumov-Gerasimenko彗星の近傍・着陸探査）、日本の「はやぶさ」探査（近地球S型小惑星（25143）イトカワ表面粒子サンプルリターン）、「はやぶさ2」探査（近地球C型小惑星（162173）リュウグウ表面粒子サンプルリターン）、米国のOSIRIS-REx探査（近地球B型小惑星（101955）Bennu表面粒子サンプルリターン探査）について、探査でわかってきたことを紹介する。

3.1 Stardust (1999–2006)

NASA Stardust探査機は、81P/Wild2彗星（ピ

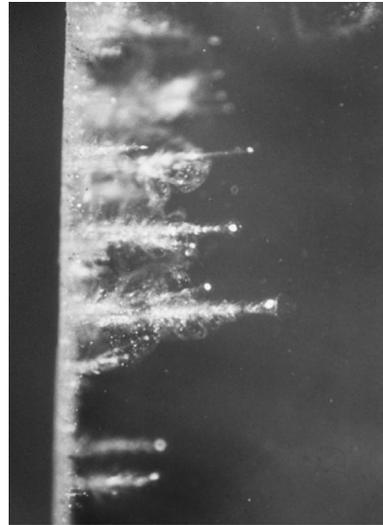


図1 エアロゲルに捕獲された彗星塵。写真左から粒子は突入し、突入痕の先端にとどまる。
©NASA.

ルト第二彗星）を探査し、彗星から放出された塵をエアロゲルでつくられた捕集器で、相対速度約6 km/sで採取した [11]。氷など揮発性成分を豊富に含む彗星は、太陽系初期に低温環境で形成され、氷が融けるような温度上昇を経験しないまま、彗星をつくった物質がそのまま残る太陽系の化石と考えられている。すなわち、太陽系の材料となったプレソーラー粒子が豊富に含まれるのではないかと考えられていた。しかし、2006年に地球に持ち帰られた粒子（図1）の大半の同位体組成は太陽系の平均値に近かった。太陽系においては、彗星材料にいたるまで、核種の混合が進んでいたことがわかる。

さらには、太陽系初期にパルス的に起きたと考えられる加熱イベントでケイ酸塩ダストが溶融の後、急冷されてつくられたと考えられるコンドリユールとよばれる球粒や、主要ケイ酸塩が蒸発するような高温条件で安定な鉱物を主成分とする難揮発性包有物が含まれていた [12, 13]。氷などの低温物質だけではなく、彗星に高温物質まで含まれているというのは予想外であり、太陽系初期

に低温物質から高温物質までが混合されていたことが示唆された。

3.2 Rosetta (2004–2016)

ESA Rosetta 探査機は2014年、67P/Churyumov-Gerasimenko 彗星 (図2) に到着し、約2年にわたる近傍探査を行った。それまでの彗星探査はフライバイが中心であり、Rosettaによる初めての彗星近傍探査で、彗星の物理的・化学的特徴の詳細が明らかとなった。天体のバルク密度は 533 kg/m^3 であり、空隙率は70–80%と推定され、圧密を受けておらず、太陽系初期に存在した鉱物質ダスト、氷、有機物が集積した天体であることがわかる [14]。氷の主成分は H_2O 、 CO_2 、 CO などであり、表面が有機物に富むことも明らかになった [14]。

また、彗星から放出される気体成分の質量分析により、多様な分子が発見された。 N_2 、 O_2 といった分子、メタン、エタン、プロパン、ブタン、ペンタン、ヘキサン、ヘプタンなど脂肪族炭化水素、ベンゼン、ナフタレンといった芳香族炭化水素、硫化水素、一酸化硫黄などの含硫黄分子が検出された他 [15]、生体関連分子であるアミノ酸・グリシンと考えられる分子も見つかった (た

だし、質量分析データの解析に基づくものであり、検出された分子がグリシンの構造異性体である可能性は完全には否定できない) [16]。水のD/H比の測定も行われ、 $\text{D/H} = (5.3 \pm 0.7) \times 10^{-4}$ と報告された [17]。この値は地球海水の平均値として与えられる $\text{D/H} = 1.55 \times 10^{-4}$ より高く、彗星の水氷が地球海水の直接の起源とは考えにくいことを示唆する。

3.3 はやぶさ (2003–2010)

JAXA 「はやぶさ」探査機はサンプルリターンに必要な工学技術の実証を目的とした探査機であった。種々のトラブルには見舞われたものの、近地球S型小惑星イトカワの近傍探査および表面微粒子の地球帰還に成功した。持ち帰られた微粒子 (最大サイズで $100 \mu\text{m}$ 程度であった) (図3) の分析によって、地球上の隕石コレクションの大半を占める普通コンドライトがS型小惑星を起源とすることが初めて明らかとなった [18]。

さらに、粒子を構成する鉱物 (斜方輝石、単斜輝石、斜長石) 間の元素分配から、これらの鉱物が 800°C 程度で熱平衡に達していたことが明らかとなった [19]。太陽系初期の小天体の加熱源として有力視される半減期72万年の短寿命放射性核

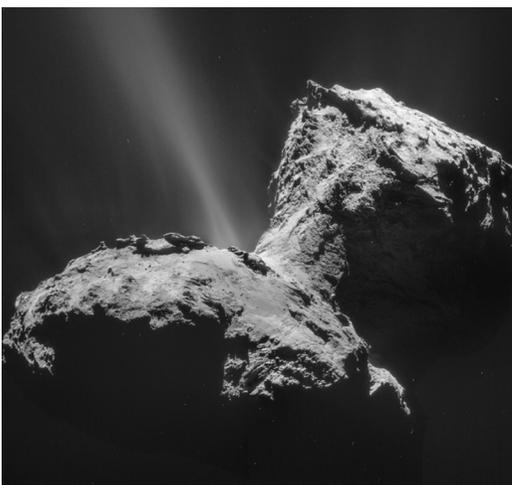


図2 Rosetta 探査機が撮影した 67P/Churyumov-Gerasimenko 彗星。©ESA.

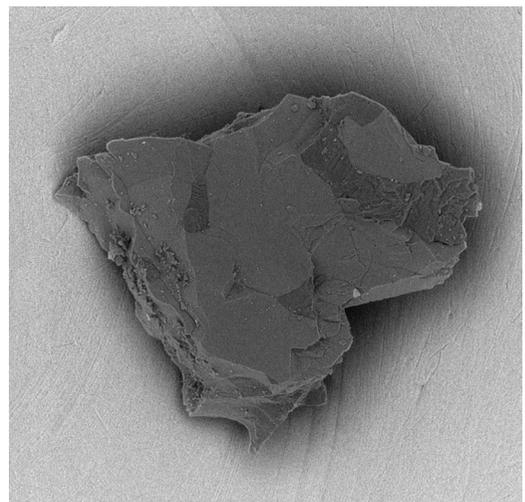


図3 「はやぶさ」が採取した小惑星イトカワ表面微粒子。サイズは約 $100 \mu\text{m}$ 。©JAXA.

種²⁶Alの放射壊変熱が熱源として考えると、イトカワはかつて20 kmを超える微惑星であったことが推定される。また、太陽風や微小隕石の衝突で、表面では地形更新や粒子放出などが起きていることも明らかとなった[20-22]。

3.4 はやぶさ2 (2014-2020)

「はやぶさ」の後継機として打ち上げられた小惑星探査機「はやぶさ2」は、理学探査を行うことを目的に、近地球C型小惑星リュウグウ(図4)をターゲットとした[23]。

小惑星は反射スペクトル観測によって分類され、C型小惑星は反射スペクトルの類似性から、炭素質コンドライトとよばれる始原隕石との関連が指摘されてきた。C型小惑星は小惑星帯に存在する代表的な小惑星である。一方、炭素質コンドライトは地上の隕石コレクションの中では5%程度しか存在しない。炭素質コンドライトのほとんどは普通コンドライトとよばれる大半の隕石(上述のようにS型小惑星イトカワに相当)に比べ、熱による変成を受けていない。そのため、太陽系初期、惑星形成以前に起きた物質進化のプロセスを記憶している。また、一部の炭素質コンドライト

には含水鉱物や有機物が含まれ、全岩のD/H比が、前述の彗星とは異なり、地球海水のD/H比に近いために、炭素質コンドライト様物質が地球の海の材料となる水、さらには生命の材料となる有機物を原始地球にもたらしたのではないかという仮説が提唱されてきた。これらから「水や有機物を含む炭素質コンドライト=C型小惑星」という前提で、C型小惑星が地球に水や有機物を供給しうるかという議論が行われてきた。

しかし、これらの仮説や議論の前提条件「水や有機物を含む炭素質コンドライト=C型小惑星」が正しいかどうかははっきりしていない。また、炭素質コンドライトはその他の隕石よりもろく、地球大気圏で燃え尽き、地上まで到達する割合が低い可能性もある。地上に到達しているものは強度が高く、代表的なものではないかもしれない。「はやぶさ2」は小惑星近傍での観測とリターンサンプルの分析を通じて、C型小惑星とはなにか、地上の隕石コレクションと関連はあるのか、太陽系初期の記憶を残すのか、地球に水や有機物をもたらした可能性はあるのかを解明することをめざした[23]。

「はやぶさ2」は17ヵ月にわたり、リュウグウ近傍で観測を行った。直径約1 kmでそろばん玉のような形状をした小惑星の表面に多数存在する10 mを超える岩塊は、現在観測されるクレーターからの放出物と考えるには大きく、また、天体のバルク密度($1190 \pm 20 \text{ kg m}^{-3}$)が炭素質コンドライトなどの隕石の密度より小さいということもあり、リュウグウは前世代の天体が破壊された破片の再集積でつくられたラブルパイル(瓦礫)天体であると結論づけられた[24, 25]。また、典型的な炭素質コンドライトに比べて暗く、平均反射率が2%程度であること、表面全域で $2.72 \mu\text{m}$ の赤外吸収が存在することが明らかとなった[26]。この吸収は含水鉱物中のO-H伸縮振動に対応し、含水鉱物が表面に存在することを意味する。

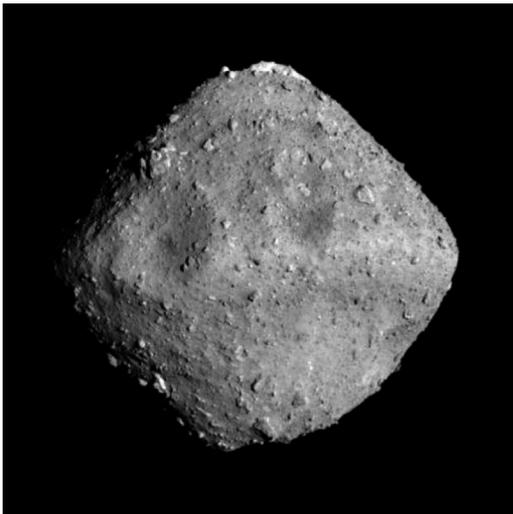


図4 「はやぶさ2」が撮影したC型小惑星リュウグウ。
©JAXA, 東京大など。

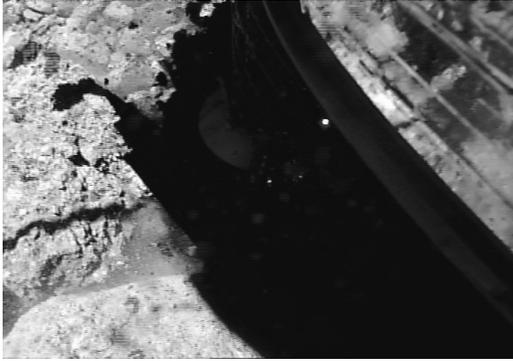


図5 小型カメラCAM-Hが撮影した第一着地2秒後のリュウグウ表面. ©JAXA.

人工クレーター形成実験も行われた。2 km s⁻¹で2 kgの銅の衝突体がリュウグウの赤道付近に打ち込まれ、直径18 m程度のクレーターが形成されたことが確認された。表面物質の凝集力が弱く、このサイズのクレーターが形成されたと考えられる [27]。分離カメラによるクレーター形成の瞬間の画像撮影にも成功した。

「はやぶさ2」のリュウグウ表面でのサンプル採取は2019年2月と7月の二回実施された [28, 29]。探査機が着地の瞬間を検知したタイミングで弾丸が発射され、サンプル採取機構の下部から弾丸発射に伴う飛散物（イジェクタ）の様子が小型カメラCAM-H（一般の方々からの寄付で開発された）で撮影された [29]（図5）。2019年7月に行われた二回目の着地は、人工クレーターから20 m離れた地点で、クレーターからの放出物（すなわち地下物質）を含むサンプルの採取を試みた。探査機のサンプル格納室は、最大三地点でのサンプル採取に対応する三部屋構造をしており [30, 31]、一回目の着地とは違う場所に二回目の試料の格納が行われた。

「はやぶさ2」は2020年12月に地球に再突入カプセルを着地させた。地球大気の混入を最小限に抑えたサンプルコンテナは真空チャンバー内で開封され、持ち帰られたサンプルの総量は約5 gであった（図6）。月以外の天体から持ち帰られた



図6 「はやぶさ2」が一回目の着地で採取したリュウグウサンプル。表紙にカラー写真があります。©JAXA.

サンプルとして最大の量である。宇宙科学研究所キュレーション施設での半年間の初期記載の後、2021年6月より、「はやぶさ2」プロジェクトが主導するリターンサンプル分析が進んでいる（一年間の優先分析） [32]。これまでにリュウグウ表面を代表する粒子が回収できたこと、含水鉱物、有機物、炭酸塩に特徴的な赤外線吸収があることが判明している [29, 33, 34]。

3.5 OSIRIS-REx (2016-)

NASA OSIRIS-REx計画は、近地球B型小惑星Bennu（ベヌー）からのサンプルリターンをめざすミッションである [35]。B型小惑星は多数存在する天体ではないが、C型小惑星との類似性（すなわち炭素質コンドライトとの類似性）が指摘されている小惑星である。OSIRIS-REx探査機は2018年末から小惑星ベヌー（図7）の探査を開始し、赤外分光観測により、表面に含水鉱物、炭酸塩、有機物、磁鉄鉱の存在を確認した [36, 37]。また、ベヌー表面から時折、（彗星活動ほどではないが）粒子放出が起こることがわかった [38]。この放出は近日点付近で起こり、太陽光加熱による表面岩石の破壊や、含水鉱物の脱水による気体



図7 OSIRIS-REx探査機が撮影したB型小惑星ベヌー。直径約500 m。©NASA.

放出などの原因が考えられている（このような粒子放出は小惑星リュウグウでは確認されなかった）。

2020年10月には、表面物質のサンプリングに成功し、ミッション目標の60 gを超える試料が採取できたと考えられている。2021年5月にベヌーを離れた探査機は、2023年9月に地球にサンプルを届ける予定である。これまでの探査結果から、ベヌーとリュウグウは類似した天体であるものの、含水鉱物由来の赤外吸収がベヌーの方がより深いなどの相違点も確認されており、ベヌーからのリターンサンプルとリュウグウサンプルとの比較が待たれる。

4. 太陽系の起源をめぐる探査と観測

小惑星や彗星の近傍探査やサンプルリターンの進展により、太陽系の起源や初期進化に関する物質情報が太陽系の構造とともに理解する土台ができつつある。特に「はやぶさ2」やOSIRIS-RExが持ち帰るサンプルの分析を通じ、これまで太陽系のどこから地球に飛来したという以上のことがはっきりとしなかった始原隕石試料が太陽系天体に紐付けられることが期待される。

しかし、リターンサンプルや隕石は多様な物質進化の段階を経た最終物質であり、そこからすべての情報を引き出すことは容易ではない。物質からは化学反応を起こした諸条件の推定はできるが、惑星系形成という空間スケールでの構造形成の中にそれを位置づけることは簡単にはいかない。構造形成と物質をつなげるためには、他の惑星系形成領域の観測で得られる情報が重要である。特に現在は、原始惑星系円盤の化学構造に関する情報が観測で得られるようになり、太陽系探査と天文観測を同等の空間スケールで議論することが可能となりつつある。

太陽系の誕生・進化の解明は個別対象の歴史学に通じるものがあるが、構造形成の過程で起こる化学進化の観測情報と合わせることで、太陽系での構造形成史のより正確な理解につながり、また、宇宙における惑星系形成における普遍的プロセスの帰結として現在の太陽系があるのか、それとも極端現象であったのかを論じることが可能となる。たとえば、原始惑星系円盤に見られる有機分子の化学的多様性[39, 40]は星・惑星系形成領域の構造進化と関連して議論されるが[41, 42]、太陽系始原物質の有機物（元素組成、構造、同位体など）から太陽系の初期化学条件を引き出すことができれば、太陽系の構造形成を惑星系形成の一般論の中に位置づけることができるようになるだろう。そんなことを考えながら、リュウグウサンプルから得られつつあるデータを眺めている。

参考文献

- [1] 日本地球惑星科学連合編, 2020, 地球・惑星・生命 (東京大学出版会)
- [2] Lodders, K., 2021, *Space Sci. Rev.*, 217, 44
- [3] Davis, A. M., ed, *Meteorites, Comets, and Planets: Treatise on Geochemistry 1* (Elsevier)
- [4] Kleine, T., et al., 2020, *Space Sci. Rev.*, 216, 55
- [5] Zinner, E., 2006, in *Meteorites, Comets, and Planets: Treatise on Geochemistry 1*, Davis, A. M., ed (Elsevier)
- [6] Busemann, H., et al., 2006, *Science*, 312, 727
- [7] Pizzarello, S., et al., 2006, in *Meteorites and the Early*

- Solar System II, Lauretta, D. S., & McSween, H. Y., eds (Univ. Arizona Press)
- [8] DeMeo, F. E., & Carry, B., 2014, *Nature*, 505, 629
- [9] Yabuta, H., et al., 2017, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 214, 172
- [10] Longobardo, A., ed, 2021, *Sample Return Missions—The Last Frontier of Solar System Exploration* (Elsevier)
- [11] Brownlee, D., et al., 2006, *Science*, 314, 1711
- [12] McKeegan, K. D., et al., 2006, *Science*, 314, 1724
- [13] Nakamura, T., et al., 2008, *Science*, 321, 1664
- [14] Taylor, M. G. G. T., et al., 2017, *Philos. Trans. R. Soc. A*, 375, 20160262
- [15] Altwegg, K., et al., 2017, *MNRAS*, 469, S130
- [16] Altwegg, K., et al., 2016, *Sci. Adv.* 2, e1600285
- [17] Altwegg, K., et al., 2015, *Science* 347, 1261952
- [18] Yurimoto, H., et al., 2011, *Science*, 333, 1116
- [19] Nakamura, T., et al., 2011, *Science*, 333, 1113
- [20] Tsuchiyama, A., et al., 2011, *Science*, 333, 1125
- [21] Noguchi, T., et al., 2011, *Science*, 333, 1121
- [22] Nagao, K., et al., 2011, *Science*, 333, 1128
- [23] Tachibana, S., et al., 2014, *Geochem. J.*, 48, 571
- [24] Watanabe, S., et al., 2019, *Science*, 364, 268
- [25] Sugita, S., et al., 2019, *Science*, 364, eaaw0422
- [26] Kitazato, K., et al., 2019, *Science*, 364, 272
- [27] Arakawa, M., et al., 2020, *Science*, 368, 67
- [28] Morota, T., et al., 2020, *Science*, 368, 654
- [29] Tachibana, S., et al., 2022, *Science*, 375, 1011
- [30] Sawada, H., et al., 2017, *Space Sci. Rev.*, 208, 81
- [31] Okazaki, R., et al., 2017, *Space Sci. Rev.*, 208, 107
- [32] Tachibana, S., 2021, in *Sample Return Missions—The Last Frontier of Solar System*, Longobardo, A., ed (Elsevier)
- [33] Yada, T., et al., 2021, *Nature Astron.*, 6, 214
- [34] Pilorget, C., et al., 2021, *Nature Astron.*, 6, 221
- [35] Lauretta, D. S., et al., 2019, *Nature*, 568, 55
- [36] Hamilton, V. E., et al., 2019, *Nature Astron.*, 3, 332
- [37] Simon, A. A., et al., 2020, *Science*, 370, eabc3522
- [38] Lauretta, D. S., et al., 2019, *Science*, 366, 1217
- [39] Sakai, N., et al., 2014, *Nature*, 507, 78
- [40] Oya, Y. et al., 2016, *ApJ* 824 88
- [41] Sakai, N., & Yamamoto, S., 2013, *Chem. Rev.* 113, 8981
- [42] 山本智, 2014, *天文月報*, 107, 620

Cosmochemistry and Exploration of the Solar System—Linkage with Observation of Protoplanetary Systems

Shogo TACHIBANA

Tokyo Organization for Planetary and Space Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Tokyo 113-0033, Japan
Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan

Abstract: Exploration of primitive small bodies and sample return provide clues to the origin and early evolution of the Solar System. Astronomical observations have enabled to spatially resolve the chemical structure of protoplanetary disks, making it possible to discuss Solar-System exploration and astronomical observations on the same spatial scale. Recent results of small body exploration, including sample return missions, are reviewed, and expectations for understanding the Solar System formation in the perspective of planetary system formation in space are presented.