

火の鳥「はやぶさ」未来編 その32 ～リュウグウ「砂の物質分析班」の紹介～

野口 高明¹, 砂の物質分析班

(要旨) 探査機はやぶさ2によって地球に持ち帰られた小惑星リュウグウの物質は、1年間にわたって分析が行われた。著者らの砂の物質分析班は初期分析の一つとして砂サイズ(直径約100 μm 以下)の物質分析を行った。渡された試料量はわずか0.7 mgであり、初期分析チームだけで考えても配付された試料の0.2%に過ぎなかった。そのような微量の試料を使い、いろいろな困難を伴いながらも一定の成果を挙げることができた。本稿では、微小なリターンサンプルを使って砂の物質分析班が、どのように試行錯誤して初期分析を行っていったかについて紹介したい。

1. はじめに

初期分析が終了してすでに1年半が経とうとしているが、幸いなことに、まだ初期分析成果論文の出版・投稿は続いている。最近、一般向けのリュウグウ解説書も出版された[1]。その本では我々砂の物質分析班の研究も解説されているので、本稿ではそれ以外のこと、具体的には、砂の物質分析班の第一目的であるC型小惑星の宇宙風化の解明という目標に向かってどのように試行錯誤して初期分析を行っていったかについて書きたいと思う。そして最後に、小惑星リュウグウの宇宙風化の特徴について簡潔に説明したい。

2. 宇宙風化:月とイトカワ

はやぶさ初号機ミッションにおいて、筆者はS型小惑星の宇宙風化の解明を担当した。遊・星・人の読者はよくご存じと思うが、念のため説明したい。大気の無い天体表面が惑星間空間に長期にわたり曝露される間に、徐々に表面が変化することを宇宙風化という。宇宙風化の主な原因は、低エネルギー(数

keV)のプラズマ流である太陽風による照射損傷と、(マイクロ)メテオロイドの高速衝突による表面物質の加熱・溶融・蒸発・再凝縮である[e.g., 2]。月の宇宙風化では太陽光の反射スペクトルの変化が顕著であり、その原因として照射損傷と表面物質の再凝縮のどちらが有効であるかという論争が1990年代にあった。そして、後者が有効と結論された。スペクトルを変化させる要因として、物質表面にある再凝縮層中の数から約10 nmの金属鉄(nanophase iron: npFe⁰)が重要であるとされた[e.g., 2, 3]。

ところが、(走査)透過電子顕微鏡((S)TEM)を使って観察したイトカワの宇宙風化では、再凝縮層はせいぜい15 nm程度であり、層中にはnpFe⁰ではなくnmサイズの硫化鉄が存在していた(凝縮物の種類や化学組成は周囲の鉱物に依存する)。その下層のオリビンや輝石内部の局所的に非晶質化しているところにnpFe⁰が存在していた[e.g., 4, 5]。発表当初、月研究の大先達からの拒絶反応は著しかった。だが、その後の中国のChang'e 5による嵐の大洋からのリターンサンプルの研究では、非晶質化したオリビンや輝石中から照射損傷によって形成されたnpFe⁰が、表面物質の再凝縮物とともに発見されている[e.g., 6, 7]。大気のない天体表面でどのような変化が起きているかという観点では、二者択一の議

1. 京都大学大学院理学研究科
noguchi.takaaki.2i@kyoto-u.ac.jp

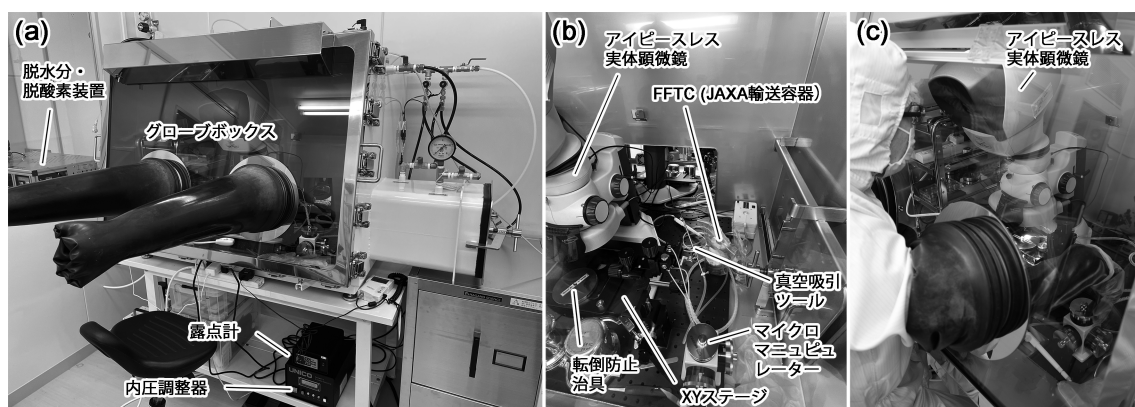


図1: 京都大のクリーンルーム内に設置されている窒素置換グローブボックス。(a)全体像。ボックス内の雰囲気は脱水分・脱酸素装置によって制御されており、露点温度 -70°C 台、酸素濃度は $\sim 20\text{ppm}$ となっている。(b)アイビースレス実体顕微鏡(ヴィジョンエンジニアリング製)にXYステージ(ニコン製)、透過照明(ハヤシレピック製)を装着し、光学定盤(エドモンド製)上に、この顕微鏡と、油圧マニピュレータ(ナリシゲ製)、真空吸着装置(マイクロサポート製)を組み合わせて設置している。(c)アイビースレス実体顕微鏡を使ったリュウグウ微粒子のハンドリング。他機関の同様な機器の原型である。

論は意味が無かったといえよう。ただ、イトカワ試料の宇宙風化の研究で論争があったからこそ、大気の無い天体の宇宙風化について理解が深まったともいえるだろう。

3. 砂の物質分析班

はやぶさ2リターンサンプル初期分析サブチームの一つである、砂の物質分析班(通称、砂班)の班長に選んでいただいた時にまず行ったことは、はやぶさ2試料の宇宙風化で論争した人たちに、はやぶさ2回収試料の宇宙風化研究に加わってもらうことであった。小惑星リュウグウの宇宙風化を多角的に検討しておきたいと考えたためである。また、水質変成を強く受けた隕石や宇宙塵を長年研究してきた研究者にも参加していただくことも考えた。第50回小惑星科学会議(LPSC)の会場で話をしメンバーに入ってもらっただけでなく、その場にいなかった人には、メールで砂班に加わっていただくことをお願いした。

試料サイズが小さいものが配布されるため、微小試料から最大限の成果を出すために、小さな薄い試料を分析する装置である(S)TEMを研究の主要な手段としている研究者に集中的に声をかけた。(S)TEMを使って一人一人の観察することのできる面積は少ないため、多くの研究者の観察・分析結果を集積する必要があったからだ。リュウグウの岩石鉱物

学的特徴に、微粒子からどこまで迫れるかという挑戦でもあった。

最終的に班員は65名となった。一緒に研究する人達を1つのユニットとし、65名を16ユニットに分けて試料配布し研究していただいた。副班長は宮原正明さん(広島大)とHope A. Ishiiさん(ハワイ大)である。また、松本徹さん、三宅亮さん、伊神洋平さん(京都大)、富岡尚敬さん(JAMSTEC高知コア研)、瀬戸雄介さん(神戸大、現大阪公大)、宮原さんの6名とは研究の進め方についてしばしば検討・修正し、Ishiiさんと各ユニット代表に連絡を取って研究を進めていった。

4. 微小リュウグウ試料の大気非曝露ハンドリング

日本のサンプルリターンの一番重要な特徴は、できる限り大気との接触を遮断し試料を回収・保管していることである。筆者ははやぶさ初号機リターン試料以来、大気非曝露の分析にこだわってきた。本研究では、試料の開封やハンドリングは、はやぶさ初号機試料の初期分析終了後に導入した大気圧型の窒素置換グローブボックスと、その中に設置した、マイクロマニピュレータ付のアイビースレス実体顕微鏡を使って行った。分析開始時点ですでに7年間使い込んだ装置である(図1)。ただし、はやぶさ2初期分

析に備えた改良を行った。アイピースレス実体顕微鏡には、もともと透過照明もXYステージも付属していなかった。リュウグウ試料は黒い微小粒子と予想し、九州大理学部工場でアダプターを作成していただきこれらを顕微鏡架台に組み込んだ。また、砂状の試料が入る石英ガラス製小容器を保持するホルダを固定することで転倒による試料飛散事故を防ぐ治具も設計し、工場で作成していただいた。こうした準備ができたのは、宇宙研惑星物質試料受入れ設備が本番と同じ試料輸送容器FFTC [8]を貸与して下さったためである。

イトカワ試料の場合、静電気で試料をマイクロマニピュレーターのプローブ先端に付着させてハンドリングを行っていた。一方、宇宙研惑星物質試料受入れ設備では、リュウグウ試料のハンドリングに備えて、真空吸引ツールを使っているとの情報をいただき、今回はこのハンドリング法を採用することにした。直径数十 μm 以下の小さい粒子が吸引ツールに吸い込まれないようにするため、先端開口径5, 10, 20 μm の既製品のマイクロピペットを用意すると共に、所有するブーラーとマイクロフォージを用いて、小容器から微粒子をピックアップしやすい形のマイクロピペットも作成した。これらのツールを用いて Tagish Lake や Tarda といった脆い炭素質コンドライトの粉体のハンドリングテストを繰り返し、試料を壊さずに吸引できる吸い込み圧に調整した。宇宙研惑星物質試料受け入れ設備では、万一オイル漏れが起きた場合に備えて、機械式マニピュレータを使用していることは承知していたが、機械的振動の少なさとプローブのドリフトの少なさを考慮し、油圧式マニピュレータを用いた。

プローブ先端に微粒子を試料台に置く操作は、試料台が鏡面であることが望ましい。特に、プローブ先端径が5から10 μm 程度と非常に細くなると、高倍率でも視認性が悪いからである。試料台が鏡面ならば、プローブの鏡像が試料台に映り、プローブ先端とそこに付いた微粒子の試料台への接地が認識しやすい。油圧プレスで0.3 mm厚のAu板を押し鏡面化し、それをSEMのピンスタブにカーボンテープで貼り付けて試料台とした。

この試料台に微粒子を固定する最適な方法を見つけるには、多くの試行錯誤があった。当初、電子線

硬化樹脂を使った試料固定をテストしたが、前述の脆い炭素質コンドライト隕石に樹脂が染み込み、試料が崩壊した。やや粘性の高いエポキシ樹脂ならば試料が崩壊しないため、導電性はないが使用することにした。後述のとおり、試料サイズが想定よりも小さく、Au板にごく薄く樹脂を塗布する必要があった。塗布方法はリュウグウ試料現物を取り扱いながら改良した。最終的には、Au板に薄く塗ったエポキシ樹脂をカミソリの刃で何度も拭うことで、ごく薄い膜が得られるようになった。幾度にもわたるトレーニングの結果、エポキシ樹脂が硬化するまでの約40分程度の間に、グローブボックス内の実体顕微鏡下での手動マイクロマニピュレーション作業で、数十個のリュウグウ微小試料をAu板上に碁盤の目を引いたように並べられるようになった。いざとなれば、オートステージがなくともどうにかなるものである。ごく薄いエポキシ樹脂ならば、高真空モードでの走査電子顕微鏡(SEM)観察・分析や集束イオンビーム(FIB)-SEMでチャージアップは生じず、加工・観察に大きな支障はなかった。

5. リュウグウ試料の受け取りと研究の開始

小惑星探査機「はやぶさ2」が小惑星リュウグウから、2020年12月に小惑星試料を地球に持ち帰って間もなく、ISASの宇宙研惑星物質試料受入れ設備での開封後に試料の像を見るリモート会合があった。画像を見た瞬間に非加熱のCIコンドライト隕石と同様の物質と確信した。

2021年6月3日に、筆者と松本徹さんとで試料を受け取りに宇宙研惑星物質試料受入れ設備に赴き、試料を京都に持ち帰った。そして、翌日に室素置換グローブボックス内で容器を開封した。思った以上に試料サイズは小さく、試料量も少なかった。100 μm 程度の大きさの粒子が配布されると期待していたが、実際に我々に配分された粒子の平均径は1回目タッチダウン試料で約70 μm 、2回目タッチダウン試料で約50 μm 、総量は0.7 mgであった。あとで分かったことだが、この試料量は、初期分析チームへの総配分量の0.2%に過ぎなかった。ごくわずかな試料の分析で成果を出せるか心配にならなかったかといえば嘘

になるだろう。

砂班の最重要課題は、C型小惑星リュウグウの宇宙風化を明らかにすることである。多少の実験的研究はあったが[e.g., 9, 10], それらが小惑星リュウグウの宇宙風化を探索する指針になるという保証はなかった。その上、はやぶさ2のタッチダウンの動画は、直径数cmのタンタル製のプロジェクタイトルの衝突によって、膨大な量の岩片が飛散したことを示しており、宇宙空間への曝露面が、無傷でどのくらい残っているかも気になる点であった。

貴重な微小試料を確実にハンドリングできる研究者は予想以上に少なかった。このため、京都大鉱物学講座のFIB-SEMで作成した超薄切片試料を班員に送るか、先述の方法で固定した試料を送る必要があった。130枚に及ぶ多数の超薄切片試料作成は、三宅さんの尽力がなければできなかった。130枚のうち約40枚は内外の班員に送付した。さらに、Au板に貼り付けた試料を受け取った海外の班員によっても約30枚の超薄切片が作成・研究された。海外の班員が7割を占めるため、大量の試料を海外に送る必要が生じた。その送料だけで120万円以上かかったので、科研費「海外研究協力強化(B)」に採択されていなければ研究遂行は不可能だった。

SEMでリュウグウ試料表面を一粒ずつ詳細に観察し、少しでも宇宙風化が疑われる試料は超薄切片を作成し、京都大鉱物学講座の(S)TEMで三宅さん・伊神さん・松本さんと観察・分析するとともに、班員の治田充貴さん(京都大化学研)と電子線エネルギー損失分光装置(EELS)を取り付けた(S)TEMを用いて粒子表面のバブル組織内部の軽元素分析を行った。これは、月ではヘリウムに満たされたバブルを持つイルメナイトが存在するためである[11]。平行して国内外の班員に超薄切片試料の配布を行い、TEMによる一般的な鉱物学記載と宇宙風化に関係しそうな微細組織の探索を依頼した。

6. 小惑星リュウグウの宇宙風化の探索など

宇宙風化組織の探索と鉱物学的な特徴の記載を行っていったが、リュウグウ試料のTEM観察・分析結果が着々と蓄積されていくのに対して、宇宙風

化組織の確実なものがなかなか発見できずにいた。2021年7月後半に開かれた初期分析チームの班長会で、化学班班長の塚本尚義さん(北海道大)から、分析中の断面研磨試料の縁、つまり表面に特徴的な組織があることが報告された。粒子表面の数から約10 μm が溶融・発泡していることが明らかであった。化学班の分析終了後にこの粒子を送って下さること、この部分の超薄切片試料の作成許可を塚本さんをお願いし了解をいただいた。相前後して、京都大でも溶融メルトの付着やナノクレーターが生じた炭酸塩を見つけ、その断面から最初の照射損傷組織を確認できた。リュウグウは大きさ1 km以下の小惑星であるにも関わらず、太陽風照射損傷による宇宙風化と共にメテオロイド衝突による層状ケイ酸塩の溶融による宇宙風化が起きていることに気付いた。

班長会後すぐに、リュウグウ微小試料の観察方針を変えることにした。それまで2ヶ月かけて20個程度の粒子を観察していたのを、1日に数十個をSEM観察し、層状珪酸塩の溶融・発泡組織の探索に集中することに切り替えた。京都大では完全な大気非曝露はできないが、SEM、FIB-SEM、TEMの脇まで試料を密閉容器で持っていき、大気曝露は装置に入れる間の数分間ずつに留めることに注意した。SEMで表面が溶融した試料を探すだけでなく、イトカワ試料の照射損傷組織のSEM観察で実績のある松本さんが、勘所をおさえた無水鉱物の損傷組織の探索を行っていった。筆者は膨大な試料を効率よく調べるために、SEM観察試料の準備役に徹した。多数の試料を観察するという変更は功を奏し、北海道大からの試料が到着する前に、表面の溶融組織と照射損傷組織が次々と発見され、TEMでも観察を行っていった。このタイミングで北海道大試料が到着し、表面が溶融している超薄切片試料を7つの海外の研究者ユニットに送ることができただけでなく、さらに、すべてのユニットにそれぞれ20個以上の粒子を貼り付けた試料台を2度送り、宇宙風化組織の探索、FIB-SEM加工、(S)TEM観察・分析を依頼できた。

リュウグウ試料は層間水が失われたサボナイト(含水層状珪酸塩の一種)を多く含むため、ごく短時間で大気中の水分を吸収する。このため、全工程大気遮断での(S)TEM観察はより重要になった。全行程大気非曝露での(S)TEM試料加工観察は班員の



図2: 九州大総合理工学において使用した、大気非曝露(S)TEM試料作成・観察・分析のための装置。(a)真空グローブボックスをAr置換グローブボックスとして使用。(b)大気非曝露FIB-SEMホルダー全景。(c)同ホルダーをFIB-SEMに装着したところ。ホルダー全体写真はMel-Build社写真提供。(d)大気非曝露(S)TEMホルダーとホルダー架台。(e)グローブボックス内で大気非曝露FIB-SEMホルダーから大気非曝露(S)TEMホルダーに載せ替えてホルダーを取り出したあとの様子。

齊藤光さん・波多聰さん(九州大総合理工学)と行った。企業では全行程大気非曝露での試料加工観察はリチウム電池や触媒研究で用いられているが、大学でこれが可能なところは数少ない。松本さんの観察から数十個に1個の粒子は宇宙風化組織を持つと分かったため、十分な数の粒子を前述の方法で準備し、毎週のように九大総理工に持って行った。九大では、大気遮断容器に入れた試料をアルゴン置換グローブボックス内で容器開封して大気遮断FIB-SEMホルダーにセットし、作成した超薄切片は再びアルゴン置換グローブボックス内で大気遮断FIB-SEMホルダーから大気遮断TEMホルダーに移し替えて、(S)TEM観察・分析を行った(図2)。

国内外のメンバーから、一般的な鉱物学的特徴だけでなく、宇宙風化についてのデータが集まってくるようになった。砂班の研究が軌道に乗るのに、他班より2ヶ月強余計にかかったことになる。また、初期分析統括者の橘省吾さん(東京大)より、試料容器の外にこぼれていた粒子で宇宙風化している物を送っていただいた。また、こぼれていた別の粒子を使って、層状珪酸塩が太陽風照射損傷を受けたと考えられる組織を、瀧川晶さん(東京大)と仲内悠祐さん(JAXA, 現立命館大)にリュウグウ試料への低エネルギーヘリウムイオン照射実験を行って再現していただいた。たくさんの微粒子が回収されたからこそできた実験である。

ところが、好事魔多し、論文の出版は容易ではなかった。初期分析チームはScienceに特集号を組んでもらう予定になっていた。しかし、はやぶさ2特集号(379, 2023)には我々の論文は入っていない。Scienceの編集者には投稿前に1ページサマリーの提出を求められ、その時点では問題は全く指摘されなかった。ところが驚いたことに、実際に投稿したところ、査読にまわることなく編集者判断のrejectであった。1ページサマリーでは宇宙風化についてのみ書いていたが、鉱物学的特徴について詳細に記述した上で宇宙風化について書くべきという強い意見が海外の一部の班員から出たため、それに合わせて内容を広げた投稿原稿を準備した。このため中途半端な内容となったのが、編集者が態度を豹変させる原因の一つではないかと思った。そこで、リュウグウの宇宙風化の顕著な性質にだけに絞って書き直すことを、班員に承認してもらった。クレーター数密度の測定を行う試料を中村智樹さん(東北大、石班班長兼砂班班員)から送っていただき測定することもできた。今度は再投稿するための道は自ら探らねばならなかったが、Nature Astronomyでもリュウグウ試料の分析研究が特集されることを耳にした。急いで改訂原稿を準備し投稿したところ、編集者に内容に興味を持っていただき、無事、砂班の初成果論文を出版することができた[12]。この論文を皮切りに、宇宙風化論文第2弾やその他の論文を出版できた[e.g., 13-17]。当班の班員が主著者の論文は出版見込みのものまで入れると10本程度にはなるはずで、配付された試料のわずか0.2%を分析しただけであることを考えるとかなり健闘したと思う。

7. リュウグウの宇宙風化の特徴について

最後に、リュウグウの宇宙風化の特徴について簡単に触れておきたい。リュウグウ試料は強い水質変成作用を受けており、この作用で形成された二次鉱物が主要鉱物である。量の多い順に列举すると、含水層状珪酸塩鉱物(蛇紋石とサポナイト)、マグネサイト Fe_3O_4 、ピロータイト Fe_{1-x}S 、ペントランダイト $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ 、ドロマイト $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 、Feに富むマグネサイト $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{CO}_3$ である。これらの鉱物がそ

れぞれ独特の宇宙風化を受けている。

リュウグウ試料の宇宙風化で顕著なのはメテオロイド衝突による加熱・溶融組織である(図3a)。この二次電子像からリュウグウ粒子表面が融けて泡立っていることが分かる。我々はこれをFrothy layerと名付けた。図3bは断面の(S) TEM像(高角環状暗視野像: HAADF-STEM像)である。溶融層中に気泡(V)や輝点(Fe-Ni硫化鉱物)が存在する。CMコンドライトへのレーザーパルス照射実験でFrothy layerとよく似たものが形成さることから、frothy layerはメテオロイド衝突による加熱・溶融層であると考えられる。リュウグウ物質は数十vol.%もの微細な空隙を持つため熱伝導率が低い。このため、メテオロイド衝突によって粒子同士が擦れ合ったことで発生した熱が蓄積して温度が上昇し、溶融に至ると考えられる[12]。また、溶融によって層状珪酸塩鉱物は脱ヒドロキシ化し、ほぼ無水物になっている。

太陽風照射による層状珪酸塩鉱物の宇宙風化の二次電子像を図3cに示す。Smooth layerと書かれた部分が太陽風照射損傷を受けた層状珪酸塩である。図3dに断面のTEM像(明視野像)と、表層1カ所と内部2カ所の電子回折パターンを示す。電子回折パターンから、太陽風照射損傷を受けた層状珪酸塩は非晶質化し、それ以深では結晶構造が維持されている。リュウグウ試料に太陽風を模擬した低エネルギー He^+ イオンを照射すると、Smooth layerとよく似た層が形成されることから、Smooth layerは層状珪酸塩鉱物の照射損傷層と推測される[12]。

無水鉱物は含水層状珪酸塩鉱物とは全く異なる宇宙風化組織を持つ。太陽風照射を受けたピロータイト表面は多孔質化しており、その表面から図3eに示したような金属鉄ひげ結晶が形成されていた[11]。この金属鉄の生成は、太陽風照射や(マイクロ)メテオロイド衝突に伴い、数千年の期間で揮発性の高い元素が鉄化合物から選択的に消失することにより駆動されていると考えられる。我々はイトカワや月試料の硫化鉄でも同様のひげ結晶を発見しており[18, 19]、さらにこの結果も考慮すると、金属鉄の生成に至る硫化鉄中の Fe^{2+} イオンの還元は、表層物質の含水量等の違いや酸化還元環境の違いによらず、大気の無い天体表面では普遍的に起こると考えられる[13]。マグネサイトは太陽風照射によって表層

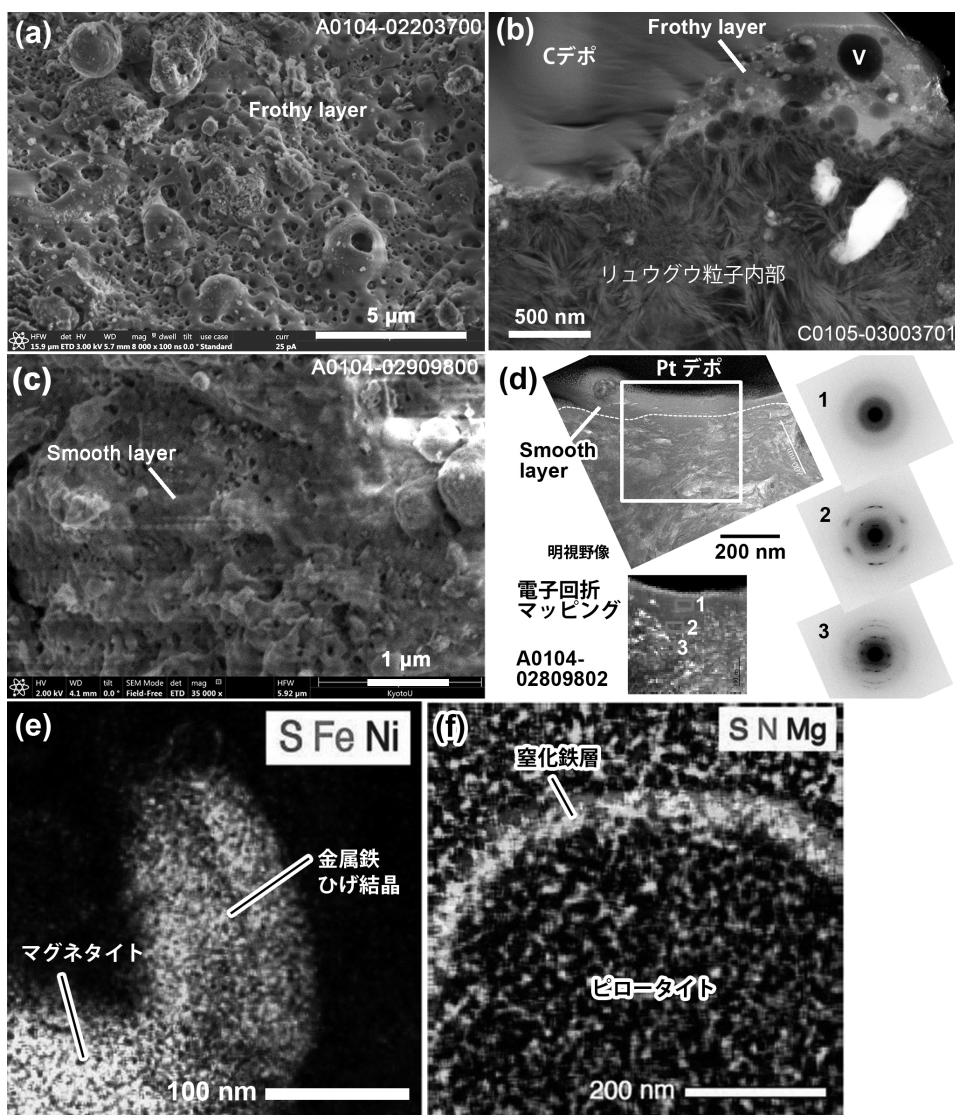


図3: 小惑星リュウグウの試料から見出されたさまざまな宇宙風化組織. (a)メテオロイド衝突による加熱・溶融による宇宙風化組織. (b) メテオロイド衝突による加熱・溶融による宇宙風化の断面組織. Frothy layerは発泡(V)しながら溶融したことが分かる. Frothy layer 中の明るい輝点は一旦溶融し球状になったあと結晶化したFe-Ni硫化物. (c)太陽風照射損傷による宇宙風化組織. 層状珪酸塩の場合. (d) 太陽風照射損傷による宇宙風化の断面組織. 電子回折パターンだとSmooth layer (1)のみが非晶質になっていることが分かる. (e) 太陽風照射損傷による宇宙風化組織. 硫化鉄表面から成長したFeひげ結晶. (f) 太陽風照射損傷による宇宙風化組織. 磁鉄鉱表面に形成された窒化鉄層.

から約100 nmまでが(Mg, Fe)O微細結晶の集合体に変化していた[12]. また、マグネタイト表面に窒化鉄を発見した. マグネタイトが太陽風照射を受けると金属鉄が形成され、それがさらに窒素と反応し窒化鉄が形成されていた. 窒素の起源はリュウグウに衝突した太陽系遠方起源の塵と推定される[13].

宇宙風化を起こす主要因は太陽風の照射損傷と

(マイクロ)メテオロイド衝突による加熱・溶融・蒸発・再凝縮である. だが、月、イトカワ、リュウグウと研究してみて、天体を構成する物質の違い、衝突してくる物質の違い、レゴリス層の構造、天体の質量、太陽からの距離の違いによって、多様な宇宙風化組織が存在することがわかってきた. 今まで見てきたように、共通点もあり相違点もある. 現在研究進行中

の小惑星ベヌーの宇宙風化はどのようなものだろうか？リュウグウとは似ているようで異なる宇宙風化をしていることだろう。

謝辞

まず、砂班班長として本稿共著者である砂班班員の皆さんに心から感謝したい。なかなか宇宙風化が見つからなくとも、少量の微小試料を根気よく研究し続けて下さった砂班班員の方々の頑張りが無ければ、少量の試料からこのような興味深い結果を得られなかったであろう。それから、化学班の塚本さん、坂本直哉さん、川崎教行さん(北海道大)に感謝したい。彼らが試料を貸与して下さったことで、海外班員にも十分にリュウグウの宇宙風化試料を配付できた。出版にあたっては、海洋研究開発機構の伊藤さんがNature Astronomyの編集者を紹介してくださったおかげで道が開けた。大いに感謝したい。また、大気非曝露(S)TEMホルダーの画像使用許可を下さった株式会社メルビルに感謝する。最後に、橘さん率いる初期分析チーム、はやぶさ2プロジェクトマネージャの津田雄一さん(JAXA)率いるはやぶさ2プロジェクトメンバー、はやぶさ2プロジェクトサイエンティストの渡邊誠一郎さん(名古屋大)に大いに感謝したい。この方々のおかげで、我々はリュウグウ試料を研究できたのである。

参考文献

- [1] 橘省吾, 2024, 「はやぶさ2」は何を持ち帰ったのか(岩波書店).
- [2] Clark, B. E. et al., 2006, in Meteorite and the Early Solar System II (University of Arizona Press).
- [3] Keller, L. P. and McKay, D. S., 1997, Geochim. Cosmochim. Acta 61, 2331.
- [4] Noguchi, T. et al., 2011, Science 333, 1121.
- [5] Noguchi, T. et al., 2014, Meteorit. Planet. Sci. 49, 185.
- [6] Gu, L. et al., 2022, Geophys. Res. Lett. 49, e2022GL097875.
- [7] Li, C. et al., 2022, Nat. Astron. 6, 1156.
- [8] Ito, M. et al., 2020, Earth Planet. Space 72, 1.
- [9] Thompson, M. S. et al., 2019, Icarus 319, 499.
- [10] Thompson, M. S. et al., 2020, Icarus 346, 113775.
- [11] Burgess, K. D. and Stroud, R. M., 2018, Geochim. Cosmochim. Acta 224, 64.
- [12] Noguchi, T. et al., 2023, Nat. Astron. 7, 170.
- [13] Matsumoto, T. et al., 2024, Nat. Astron. 8, 207.
- [14] Dobrică, E. et al., 2023, Geochim. Cosmochim. Acta 346, 65.
- [15] Leroux, H. et al., 2023, Meteorit. Planet. Sci., <https://doi.org/10.1111/maps.14101>.
- [16] Laforet, S. et al., 2024, Astrophys. J., in press.
- [17] Noguchi, T. et al., 2023, Meteorit. Planet. Sci., <https://doi.org/10.1111/maps.14093>.
- [18] Matsumoto, T. et al., 2020, Nat. Comm. 11, 1117.
- [19] Matsumoto, T. et al., 2021, Geochim. Cosmochim. Acta 299, 69.

著者紹介

野口 高明

京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻教授。東京大学理学系研究科博士課程地質学専攻修了。理学博士。日本学術振興会特別研究員、茨城大学理学部助手、助教授、准教授、教授、九州大学基幹教育院教授を経て、2021年3月より現職。専門は

隕石学・鉱物学。日本鉱物科学会、日本惑星科学会、日本顕微鏡学会、国際隕石学会、アメリカ鉱物学会に所属。日本惑星科学会学会賞選考委員会委員、日本鉱物科学会学会賞選考委員、国際隕石学会フェロー等を務める。