火の鳥「はやぶさ」未来編 その24 ～可視光でみたリュウグウ～

巽 瑛理[1,2*], 杉田 精司[2], 本田 理恵[3], 諸田 智克[2], 亀田 真吾[4], 長 勇一郎[2], 澤田 弘崇[5], 横田 康弘[5], 坂谷 尚哉[4], 早川 雅彦[5], 松岡 萌[5], 山田 学[6], 神山 徹[7], 鈴木 秀彦[8], 本田 親寿[9], 吉岡 和夫[2], 小川 和律[5], 湯本 航生[2]

（要旨） ONC (Optical Navigation Camera; 光学航法カメラ) は探査機はやぶさ2の目であり，リュウグウを訪れた際には科学的にも工学的にも広報的にも幅広く活用された．ONCは広域撮像用のONC-W1，ONC-W2，望遠カメラ且つ7色のバンドパスフィルターをもつONC-Tで構成されている．ONC-Tは科学観測において特に重要で，フィルターを活用し小惑星表面の色の変化を記載することや解像度の高い画像から詳細な地形の観測を目的としている．試料採取地点の選定にも，粒径や風化作用の推定といった核となる情報を得て貢献してきた．本稿では，今後のサンプル分析を見据えて，主にONCチームのONC-Tを用いた分光観測における活動とその結果として得られた“仮説”を振り返りたいと思う．

1. はじめに

昨年末，小惑星リュウグウからのサンプルが成功裏に地球に到着したことは記憶に新しい．黒々としたサンプルがお披露目されてから，すでに半年が経とうとしている．これからいよいよ詳細なサンプル分析が始まる．小惑星リュウグウへのアプローチから，タッチダウンなどの低高度観測に至るまで，光学航法カメラONCはリュウグウとのランデブーを通して数々の観測を行ってきた．その中でONCや他のリモートセンシング機器から得られた情報からいくつかの“仮説”が立てられてきた．DawnやRosettaなどリモートセンシングを主目的とした探査機と違い，サンプルリターンを目的としたはやぶさ2ではその“仮説”を検証し，成否を詳らかにすることができる．ただし，サンプルがあれば何もかも分かるのかというとそうではない．採取地点のリュウグウにおけるコンテクストがわかって初めて，サンプル分析結果を解釈できる．また，サンプル分析結果を汲んで今後さらに画像や分光スペクトルなどのリモートセンシングデータの解釈が深まるという側面もあるだろう．つまり，サンプル分析とリモートセンシングデータは相互に価値を高め合うことができる．本稿では主にONC画像から今後のサンプル分析で解き明かされるであろう鍵となる“仮説”について紹介したい．ONCは広域撮像用のONC-W1，ONC-W2，望遠カメラ且つ7色のバンドパスフィルターをもつONC-Tで構成されている．ONC-Tは科学観測において特に重要で，フィルターを活用し小惑星表面の色の変化を記載することや解像度の高い画像から詳細な地形の観測を行うことができる．これまでのリモートセンシング観測から我々にとってリュウグウはすでにかなり理解の進み，全く未知な天体ではなくなっている．地球にもたらされたサンプルの画像を見て，ONCチームの中では「リュウグウの表面を見ている

1.カナリア天体物理学研究所
2.東京大学
3.高知大学
4.立教大学
5.宇宙航空研究開発機構
6.千葉工業大学
7.産業技術研究所
8.明治大学
9.会津大学
etatsumi@iac.es

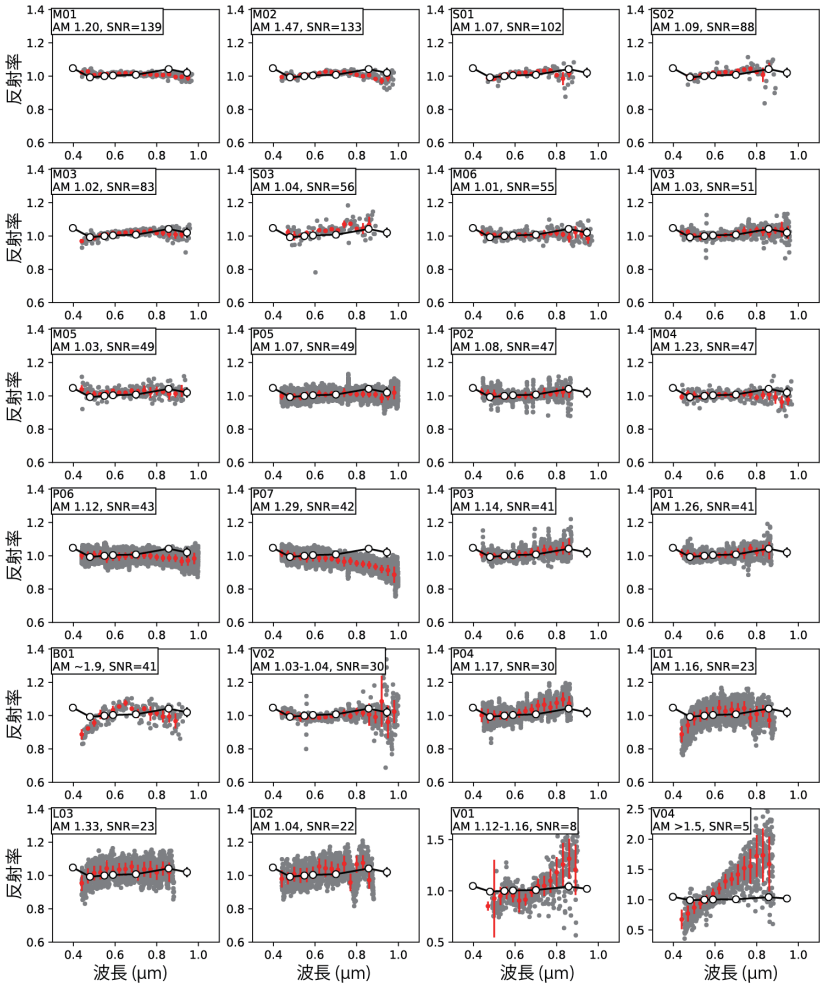

図1: はやぶさ2リュウグウ到着前の地上観測可視光スペクトル. シグナルノイズ比 (SNR) の順で左上から並んでいる. 灰色と赤色が地上観測スペクトル, 黒線がONC-Tにより観測された全球平均スペクトル([3]から改変).

ようだ」という感想も聞かれたほどだ. サンプル分析から、ここで紹介する“仮説”より一歩進んだリュウグウ及びその母天体の理解が期待されている.

2. 地上観測

遡ること, はやぶさ2がリュウグウに到着する前, 世界最大級のGemini望遠鏡やVLT望遠鏡をはじめとした多くの望遠鏡によってリュウグウの分光観測が行われた (図1). 地上で最も多く分光観測された小惑星かもしれない. 全ての観測でリュウグウの可視反射スペクトルは広義のC型であると分類されたが, いくつかの観測では層状珪酸塩鉱物の存在を強く示唆する0.7μmの吸収や近紫外域の吸収が報告されていた[1,2]. 当時, スペクトルの違いはリュウグウの地域性の違いを反映しているかもれしれないと期待された. 実際にはリュウグウにおいて, 地上観測で報告されたほどのスペクトル変化というものは認められず, のちにこれらはおそらく地上観測の不確定性であったと結論づけられる. しかし, 到着前にはプロジェクト目標や機器の校正目標を左右する重大な観測結果であり, 観測結果に大きな影響力があったことには間違いない. また, 拡張ミッションを含む今後のミッションターゲット選定に対して, 小さ

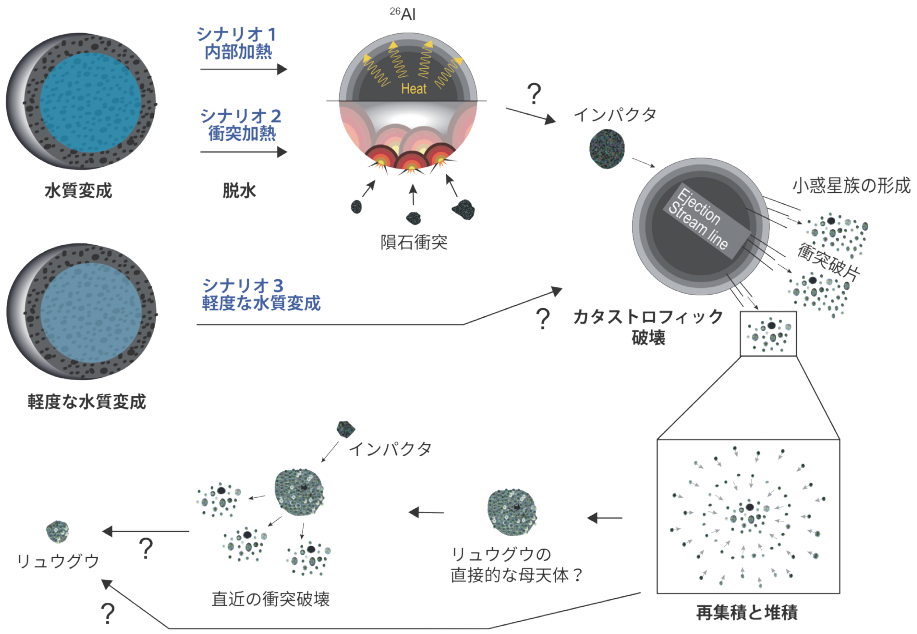

図2: 全球観測から得られたリュウグウ及び母天体の進化仮説 ([8]より改変).

な天体の分光に伴う大きな不確定性の教訓ともなるだろう．リュウグウでも望遠鏡口径や，エアマス(大気の厚さ) などの条件が良い計測では，探査機と同等な結果が得られているため，観測条件および複数回の観測が非常に重要であることがわかる．

3. リュウグウの全球平均スペクトル

到着直後の2018年7月，リモートセンシング機器の全球観測運用が行われた (Box-A運用)．地上観測からは，約40度の自転軸傾斜か直立か判別できなかったため[4]，観測がより複雑な傾斜のケースで計画が準備されたが，リュウグウの自転軸が公転面に対してほぼ直立していることが到着してすぐに分かった[5]．つまり，リュウグウに到着直後の全球観測 (20km高度，1自転観測) でリュウグウのほとんど全ての面を観測することができた．ONC-Tは7色のバンドパスフィルターで0.40–0.95μmの波長範囲を分光して見ることができる (ul: 0.40μm, b: 0.48μm, v: 0.55μm, Na: 0.59μm, w: 0.7μm, x: 0.86μm, p: 0.95μm) [6-8]．リュウグウの幾何アルベドは4.0±0.5%[3]で，全球での変化はわずか10%程度であった．この反射率は探査された天体の中で最も低く，脱水された炭素質コンドライトやIDPなどと同程度もしくはそれよりも暗い[3,8]．また低反射率から炭素含有量は2 wt%以上であると推定される[3]．リュウグウの全球平均スペクトルは図1でもわかる通り，観測波長域に渡って平坦な形状をしており，ECAS分類のC/F型[3]，SMASSII分類のCb型[8]に分類される．いずれの分類でも近紫外に吸収がないことが特徴的である．この平坦なスペクトル形状や，全球で反射率が低く、また2.7μmの吸収が小さくほぼ一様[8,9]であることから，母天体の多くの部分が高温である程度脱水した可能性が高い．全球のスペクトル変化はCMやCIコンドライトの脱水による進化傾向と同じ傾向を表しており，この点からもリュウグウの母天体が部分的な脱水を経験したことを示唆している[8]．部分脱水の熱源として，①^{26}Alなどの集積初期の放射性熱源，②衝突による加熱，③太陽放射による加熱などが考えられる．③はSCIクレーター内部の脱水状態が平均値と大きく違わないことから可能性が低い[10]．②については，

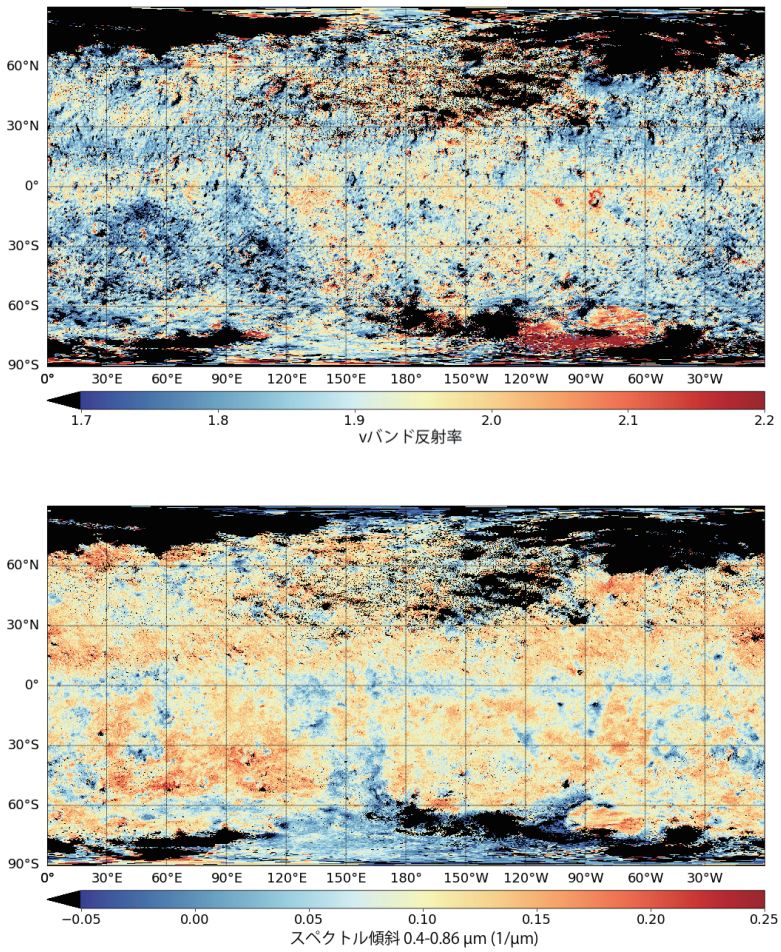

図3: (上)リュウグウのvバンド反射率マップ ([8]より改変). (下) リュウグウの0.4–0.86 μmスペクトル傾斜マップ ([8]より改変).

1回のカタストロフィック衝突で直径100km級の大きな母天体から1km以下の小さなリュウグウやベヌーが直接生まれる場合に可能であることが数値計算で示された[11]. しかし，この場合には圧縮がかなり働くという問題点がある. リュウグウの岩塊の空隙率が高いので高度な衝突圧縮とは相容れない. さらに，個々の岩塊のスペクトルが均一であるという観測事実[8]から，①の仮説が有力なのではないかと思う. 全球観測の結果から図2のような仮説が提示された. いずれにせよ重要なことは，リュウグウのリモートセンシング観測から得られたスペクトルと完全に一致するような隕石は現状では見つかっていないことであろう. リュウグウのサンプルは太陽系形成を理解するためのミッシングピースかもしれない.

4. リュウグウの可視スペクトルの地域差

高度20 kmからの全球観測により2m/pixの解像度で全球の反射率マップおよびスペクトル傾斜マップ (0.48-0.85μm) が作成された (図3). ONC-T分光による最初の発見は非常にかすかな濃淡とコントラストのついた赤青の帯だった. リュウグウの全球における傾向として，青明から赤暗というトレンドがみられた[8,12]. リュウグウの色分布の面白い特徴として，赤道域と極域が青く，中緯度域が赤いという

パターンが明らかになった (図3). これはリュウグウの自転と深く関係している. リュウグウ程度の小天体では万有引力が小さく, 自転による遠心力が重力ポテンシャル分布に大きく影響する. つまり, 自転速度の変化が重力ポテンシャルの変化を生じる. 現在の自転周期P=7.63h [5]では赤道帯と極域の重力ポテンシャルが高く, 中緯度域がポテンシャルが低いという分布になっている. そのため, 物が赤道域及び極域から中緯度域に移動しやすいという構造になっている. 実際, 表面のレゴリスが赤道域から流れた地形的痕跡が発見された[8]. このことから, リュウグウの赤道域と極域は新鮮な比較的青い物質が露出していると考えられており, リュウグウでは青いものは比較的新鮮であり, 赤いものは宇宙風化や加熱などの作用を受けていると考えられている. さらに, 最近では非常に微小だが, 赤道帯で層状珪酸塩鉱物の特徴である0.7μmの吸収が比較的強くなっているという報告があり, 赤道帯に新鮮な物質があることは強い仮説であると考えられる[13]. この理由からサンプル採集地点はかなり初めの段階から赤道帯近辺が選ばれている[14].

リュウグウがコマ型であるということから, リュウグウは過去に赤道帯が低ポテンシャルになるような高速自転 (P< 3.75h) していたものと考えられている[5]. つまり, 重力ポテンシャル分布は過去から現在にかけて変化してきたということである. 自転速度の変化はYORP (Yarkovsky–O'Keefe–Radzievskii–Paddack) 効果によるものと考えられているが, その変化率は形状とサイズに大きく依存している. また, リュウグウには地溝 (150°Eと70°Wあたり)という東西に分断する構造があり, 東西半球でアルベドやクレーターや岩塊の数密度が異なることが報告されている[8,15,16]. 形状モデルを使ったFEM計算から自転速度が速い(P= 3-3.5 h) 時に東西半球の違いが形成されたと考えられている[17].

リュウグウ表面の岩塊の色を調べると, 明るさと形態にある程度相関が見られることがわかった[8]. 多くの岩塊は, 暗く凹凸に富むもの (e.g. エジマ)と明るくスムーズな表面を持つものに分類できることがわかった. 一方でこれらと少し異なる, 明るく凹凸に富むもの (e.g. 通称:キツネ, [18]でC型ブライトボルダーと分類される)が存在することがわかった. 岩塊も全体の色分布と同様, 青明から赤暗という連続的な分布があることがわかっている[8,12].

クレーターにも赤いものと青いものがあることが報告されている. このクレーター底部の赤青分布は二峰性を持った分布になっており, ある時期に急激に赤化が進んだことを示唆している. このことから, リュウグウが太陽に近づいて, 太陽放射熱もしくは宇宙風化を強く受けた時期があったという仮説が立てられた[14].

5. ブライトボルダー

2018年10月3－4日にMASCOT運用のためのホバリング観測 (以下, MASCOTホバリング) ではやぶさ2は高度3-4kmで赤道帯を中心とする2自転分の観測を行った. 広範囲に渡ってこの近距離での観測を行うことは珍しく, 位相角が比較的小さく影が少ないことも手伝い, 現在でも貴重な分光のデータセットになっている. この観測でのONC-T画像解像度は0.3m/pixel. これ以前に行われた重力降下観測でも明るい岩(ブライトボルダー)がところどころにあることが指摘されていたが, MASCOTホバリングでも多くのブライトボルダーを確認できた. これらの岩のうち数10cm以上の比較的大きな21個の分光解析を行うと, 突出して明るい岩と, リュウグウの平均から連続しているような明るさの岩を見つけることができた. これらはそれぞれ, 普通コンドライトに似た1μmにかけての吸収を持つS型のブライトボルダーと平坦なスペクトル形状を持つC型に分類することができた (図4). S型のものについては近赤外の分光も行われたが輝石の特徴である2μmの強い吸収は確認されなかった. このことからS型のブライトボルダーは普通コンドライトで構成されたS型小惑星起源と考えられる. この発見によりリュウグウの母天体とS型小惑星が衝突, カタストロフィック破壊から再集積を経て現在のようなリュウグウが形成されたという仮説が立てられた[18]. 特に, リュウグウのふるさとと思われている内側小惑星帯にはS型が多く, さらにS型とC型が混在するニーサ・ポラーナ族という大きく広がる小惑星族があることが知られている. この領域ではC型とS型の小惑星衝突が頻繁に起

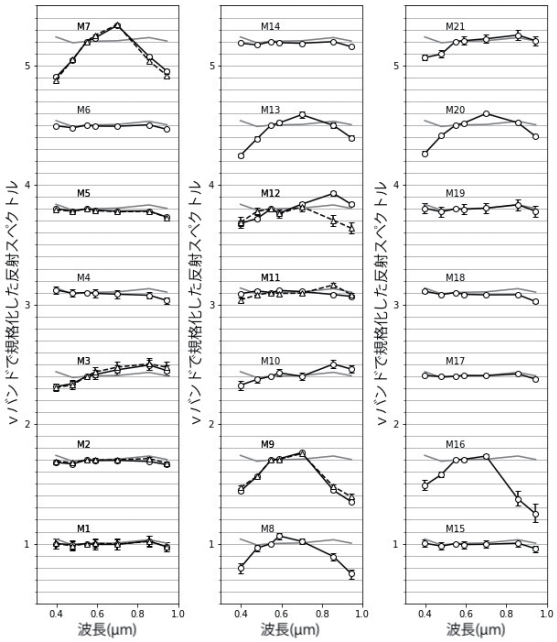

図4：ブライトボルダーの可視スペクトル(黒) とリュウグウの平均スペクトル(灰色).
M7, M8, M9, M13, M16, M20がS型のブライトボルダー([18]から改変).

こっていた可能性があり，この仮説とも整合的だ．

また，C型のブライトボルダーの可視スペクトルはリュウグウの平均的な形状から大きく異なっていることがわかった．特に近紫外領域での吸収が平均よりも強いという特徴がある．この可視スペクトルの変化はCM，CIの加熱実験で観察される変化によって説明できる．つまり，C型ブライトボルダーは母天体内の熱変成度の違いを反映しているかもしれない．面白いことに，小さなサイズの石ほどC型ブライトボルダーの割合が多いことがわかっている[19]．一方でS型の全体に対する割合は減っている．つまり，地球にもたらされたサンプルに，このC型のブライトボルダーが入っている可能性は高いということを示している．C型のブライトボルダーから母天体内部の構造および熱進化が明らかになるかもしれない．

6. 似て非なる小惑星ベヌー

B型小惑星ベヌーは探査機OSIRIS-RExのサンプル採取天体である[20]．こちらは2018年12月に小惑星に到着し，2021年に小惑星を離脱，2023年にサンプルを地球に持ち帰る予定である．リュウグウとベヌーはどちらも内側小惑星帯起源であると考えられており，この２つの天体が同じ母天体かというのは大きな関心事である．リュウグウとベヌーには大局的な共通点と相違点がある．共通点としては全体の低い密度（ベヌー：1,190 ± 13 kg/m^3 [20]，リュウグウ:1,190 ± 20 kg/m^3 [5]），そして非常に低い熱慣性（ベヌー：350±20 tiu [20]，リュウグウ：300±100 tiu [21]），また非常に低い幾何アルベド（ベヌー：4.4±0.2% [22]，リュウグウ：4.0±0.5%[3]）である．一方で，水質変成度を示す2.7μm 吸収はリュウグウでは弱く尖った形状をしているのに対して，ベヌーでは15%程度のやや丸みのある広がった吸収がある[23]．これらの大局的な特徴は，一つの母天体の破壊で加熱度合いの違いを作り分けることもできると指摘されている[11]．しかし，はやぶさ２，OSIRIS-RExでそれぞれ詳細な観測が進んでいくに従い，より細かい違いが明らかとなっている．

まず，ベヌーの表面にも外来物質が発見されている．ベヌーの外来物質は輝石を含む玄武岩質で1μmと2μmに強い吸収があることがわかっている[24]．

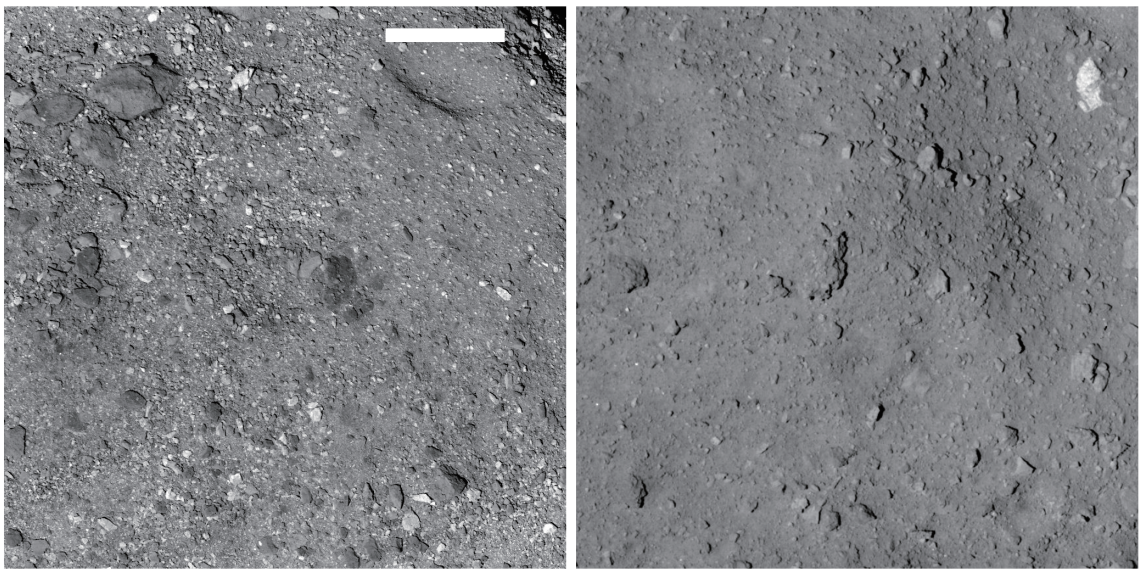

図5: ベヌー (左, 画像ID:20190314T183102S215)とリュウグウ (右, 画像ID:hyb2_onc_20181003_171510) のスケール, 色スケールを合わせて比較したもの. リュウグウ画像の右上に写っているのはブライトボルダーの一つ, 通称キツネボルダー. スケールバーは50 m.

このことからベヌーの外来物質は内部小惑星帯に存在するベスタ族起源であると考えられている. つまり, リュウグウとベヌーは異なるインパクターによる衝突を経てきているということが明らかになった.

さらに特徴的なのはベヌーの反射率の多様性である (図5). また, ベヌーの可視光域スペクトル傾斜マップを見ると, リュウグウとは違い, 緯度方向の赤青の傾向が見られない [25]. ベヌーでは岩塊のそれぞれの色が局所的な地域性を作っている. これに加えて, リュウグウでは岩塊の色と反射率の変化は比較的連続的であるのに対して, ベヌーでは岩塊の色と反射率に明らかに二分性が存在する[25]. 形態的な違いも明らかで, リュウグウでは岩塊が埋まっているような地形がベヌーに比べて多数存在する (図5). このような表面の反射率分布や形態の違いは, ベヌーとリュウグウの物質移動モードの違いを反映しているかもしれない.

宇宙風化についても違う２つの天体は違う傾向を示している. リュウグウの小さなクレーターが比較的青い[14]のに対して, ベヌーのクレーターは赤い[25]. この観測事実から, リュウグウでは宇宙風化(もしくは太陽加熱)によって赤化し, ベヌーでは宇宙風化によって青化すると考えられている. また, ベヌーは初期の青化から, さらに時間をかけてやや赤化するとも言われている[25].

リュウグウとベヌーが同じ母天体由来であるか否かは興味深い謎であり, サンプル分析から答えが出されることが期待される. 確率的には同じ母天体である可能性は低いと思われるが, 同じ母天体だとすると, 一つの天体で異なる水質変成度の炭素質コンドライトを作ることができるということになり, 熱水・脱水反応について新たな知見が得られるだろう. これまでリュウグウとベヌーは独立に議論されてきたが, これから本格的に比較研究が進むと思われる.

7. さいごに

現在, はやぶさ２は次なる目的地である2001 CC21と1998 KY26へ向けて航行中である. それぞれの天体へ到着するのは2026年と2031年の予定である. 1998 KY26は自転周期約10.7分と高速回転する天体であり, ONCによる観測運用も挑戦的なものになると考えられる. ONCを含めたリモートセンシング機器は延長ミッションに向けて, この5年, 10年の間, 科学観測はもとより機器の状態チェックを行い、延長ミッションに向けてできる限り良い状態を保つ

必要がある．現在機器に大きな問題はないが，タッチダウンの影響で光学特性に劣化が起きたことも把握されており，気が抜けない状態である[26]．それに加えて，現在もリュウグウで取得したデータの解析も進んでいる．今回紹介した論文は一部にすぎず，これからも新たな仮説が出てくるだろう．筆者らはONC画像を解析し仮説を立てる立場であり，サンプルからどのようなことが明らかになるのか，我々の仮説が正しかったのかどうか，楽しみでありまた同時に固唾を呑んでサンプル分析を見守っている．

参考文献

[1] Vilas, F., 2008, Astrophys. J. 135, 1101.
[2] Perna, D. et al., 2017, Astron. Astrophys. 599, L1.
[3] Tatsumi, E. et al., 2020, Astron. Astrophys. 639, A83.
[4] Müller, T. et al., 2017, Astron. Astrophys. 599, A103.
[5] Watanabe, S. et al., 2019, Science 364, 268.
[6] Kameda, S. et al., 2017, Space Sci. Rev. 208, 17.
[7] Tatsumi, E. et al., 2019, Icarus 325, 153.
[8] Sugita, S. et al., 2019, Science 364, 252.
[9] Kitazato, K. et al., 2019, Science 364, 272.
[10] Kitazato, K. et al., 2021, Nat. Astron. 5, 246.
[11] Michel, M. et al., 2020, Nat. Commun. 11, 2655.
[12] Yokota, Y. et al., PSJ (査読中).
[13] Kameda, S. et al., 2021, Icarus 360, 114348.
[14] Morota, K. et al., 2020, Science 368, 654.
[15] Michikami, T. et al., 2019, Icarus 331, 179.
[16] Hirata, N. et al., 2020, Icarus 338, 113527.
[17] Hirabayashi, M. et al., 2019, Astroph. J. Lett. 874, L10.
[18] Tatsumi, E. et al., 2021, Nat. Astron. 5, 39.
[19] Sugimoto, C. et al., 2021, Icarus, 114529.
[20] Lauretta, D. et al., 2019, Nature 568, 55.
[21] Okada, T. et al., 2020, Nature 579, 518.
[22] DellaGiustina, D. et al., 2019, Nat. Astron. 3, 341.
[23] Hamilton, V. et al., 2019, Nat. Astron. 3, 332.
[24] DellaGiustina, D. et al., 2021, Nat. Astron. 5, 31.
[25] DellaGiustina, D. et al., 2020, Science 370, eabc3660.
[26] Kouyama, T. et al., 2021, Icarus 360, 114353.