

「2023年度最優秀発表賞受賞論文」 「はやぶさ2」搭載光学航法カメラとOSIRIS-REx 搭載MapCamの相互校正による小惑星Ryugu・ Bennuのスペクトル進化の比較分析

湯本 航生^{1, 2}, 巽 瑛理², 神山 徹³, D.R. Golish⁴, 長 勇一郎⁵, 諸田 智克⁵,
亀田 真吾^{6, 2}, 佐藤 広幸², B. Rizk⁴, D.N. DellaGiustina⁴, 横田 康弘², 鈴木 秀彦⁷,
J. de León⁸, H. Campins⁹, J. Licandro⁸, M. Popescu¹⁰, J.L. Rijos^{11, 12},
本田 理恵¹³, 山田 学¹⁴, 坂谷 尚哉², 本田 親寿¹⁵, 松岡 萌³, 早川 雅彦², 澤田 弘崇²,
小川 和律², 山本 幸生², D. S. Lauretta⁴, 杉田精司^{5, 14},
はやぶさ2チーム, OSIRIS-RExチーム.

2024年10月7日受領, 査読を経て2025年1月23日受理

(要旨) これまでに1万を超える小惑星の可視スペクトルが地上望遠鏡によって観測され、太陽系内の物質分布の全体像を理解するための重要なデータの一つとなっている。RyuguとBennuは、暗いアルベドを持つC型小惑星の中でも、異なるスペクトル型を持つ天体である。一方、炭素質コンドライト (C型小惑星起源と考えられている隕石群) の多様性の中で見ると、RyuguとBennuは似た物質で構成されている可能性が、帰還試料分析から示された。即ち、望遠鏡で観測される可視スペクトルの多様性は、必ずしも実際の物質多様性に対応しない可能性が浮き彫りになりつつある。本研究では、この原因を解明するため、「はやぶさ2」とOSIRIS-RExに搭載された可視マルチバンド分光カメラの相互校正を行い、RyuguとBennuのリモートセンシングデータを高精度で比較した。その結果、カメラ間の感度に13%もの系統差があることが分かり、これを補正して初めて、RyuguとBennuの新鮮なクレーターは、非常に似たスペクトルを持っていることが明らかとなった。更に、クレーターの年齢とスペクトルの対応関係から、両天体のスペクトルは、同じトレンド線を正反対方向に進化したことが分かった。これらの結果は、両天体のスペクトルの違いが、形成後の宇宙風化に起因していることを示唆する。また、この結果は、C型小惑星がそのスペクトルの多様性から推測されるよりも、むしろ均質な物質で構成されている可能性を示唆している。そのため、太陽系内の物質分布を理解するには、スペクトル進化のメカニズムを解明することが不可欠であり、特に、静電浮遊による粒度分布の進化など、これまであまり注目されてこなかったメカニズムが重要である可能性がある。

1. パリ天文台

2. 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

3. 産業技術総合研究所

4. アリゾナ大学

5. 東京大学

6. 立教大学

7. 明治大学

8. ラ・ラグーナ大学

9. セントラルフロリダ大学

10. ルーマニアアカデミー天文研究所

11. アンダルシア天体物理学研究所

12. メリーランド大学

13. 愛媛大学 (故人)

14. 千葉工業大学

15. 会津大学

kyyumoto@gmail.com

1. はじめに

RyuguとBennuの帰還試料は、これまで2000個以上見つかった炭素質隕石の中でも、9個しか見つかっていない稀少なIvuna型炭素質コンドライト(CI)と類似した元素量比・鉱物量比・同位体比・密度を持っている[1, 2]. Bennuの方がRyuguより炭素量や $\delta^{15}\text{N}$ が僅かに高いことが報告されており[2], 両試料は同一でないことに注意を要するが、炭素質コンドライト全体の多様性の中で見ると、RyuguとBennu試料の差異は小さいと言えそうである。これは、RyuguやBennuのようなCI的な物質が、太陽系内に普遍的に存在している可能性を示唆する。しかし、リモートセンシング観測からは、RyuguとBennuは必ずしも似た物質で構成されていると思われていなかった。これまで、小惑星間の組成類似性は、地上望遠鏡による分光スペクトル観測に基づいて推定されてきたが、RyuguとBennuは異なるスペクトル型に分類される天体であるためである[3, 4など]. そのため、太陽系におけるCI的な物質の普遍性を解明するには、両天体のスペクトルが異なる原因を特定する必要がある、この知見を元に小惑星のスペクトルデータを再解釈することが重要である。

RyuguとBennuはどちらもコマ型の形状を持つ近地球C型小惑星である[5, 6]. 表面には殆どレゴリスが存在せず、メートルサイズの岩塊に覆われている。このように、物理的な特性は似ているものの、スペクトル情報では違いが目立った(図1・表1). Ryuguの可視スペクトルは、平らでかつ僅かに正の傾斜(波長480-850 nmで反射率が4%増)を持っており、C型の中でもCb型に細分される[7]. 一方、Bennuの可視スペクトルは平らでかつ負の傾斜(波長480-850 nmで反射率が4%減)を持っており、B型に細分される[8]. 即ち、RyuguとBennuはどちらも暗い天体(幾何アルベド約0.04)であるが、僅かにRyuguは赤い色、Bennuは青い色を持っている。一見僅かな違いであるが、C型小惑星は総じて平らなスペクトルを持つ天体群であり、その中の違いとしては大きい。例えば、C型小惑星から無作為に2天体を選んだ場合、それらのスペクトル傾斜の差がRyuguとBennuの差を上回る確率は30%以下である。可視域だけでなく、近赤外域のスペクトル、特に

含水鉱物に由来する2.7 μm 吸収帯の深さや幅にも違いが見られる[9, 10] (図1c). Ryuguの2.7 μm 帯の形状は、炭素質コンドライトの中でも脱水したCIとよく似ており、一方Bennuのそれは、Mighei型炭素質コンドライト(CM)に典型的である。更に、RyuguとBennuの表面には外因性の明るい岩塊が見つかるが、これらのスペクトルも異なっている。Ryuguの外因性岩塊のスペクトルはS型小惑星と類似しており[11], BennuのそれはV型小惑星と類似している[12]. この事実は、RyuguとBennu物質の相違性を直接示唆するものではないが、少なくとも両天体の一世代前の母天体が異なっていることを示唆した。

もう一つ重要なRyuguとBennuの相違点は、「スペクトル進化」の進行方向である。小惑星の最表層物質は、様々な外的要因に晒されることで変質し、見かけのスペクトルが長期的に進化する¹。この変質過程は「宇宙風化」と総称され、太陽風の照射と微小隕石の衝突が主な要因であると考えられてきた。この背景には、宇宙風化を模擬したイオン・レーザー照射実験が大きな役割を果たしてきた。これらの模擬実験により、月やイトカワ試料の中で見つかったナノ鉄粒子などの宇宙風化生成物が再現されただけでなく、リモートセンシングで観測された月やS型小惑星のスペクトル進化傾向(例えば、スペクトルの赤化や波長1 μm の吸収帯の浅化)の再現にも成功した[13, 14]. 同様に、C型小惑星のスペクトル進化を明らかにすべく、炭素質コンドライトへの宇宙風化模擬実験が精力的に行われてきた。しかし、炭素質コンドライトの場合、試料の様々な物理化学状態によって、スペクトル進化の進行方向が複雑に変化することが明らかとなった(4章で詳述)。実際、RyuguとBennuは逆方向のスペクトル進化を経験したことを示す証拠が見つかる。各天体が経たスペクトル進化史は、大きさの異なるクレーターのスペクトルを比較することで推定できる。なぜなら、小さいクレーターは地震動などによる表面の更新で消えやすく、その結果、大きなクレーターの内部よりも初期状態を反映した新鮮な物質が露出しやすいためである。Ryuguでは直径10 m級の比較的小さなクレー

¹ 例えば、太陽風照射による変質の場合、典型的な時間スケールは 10^3 - 10^4 年であり、空間スケールは厚みにして数100 nmである[41].

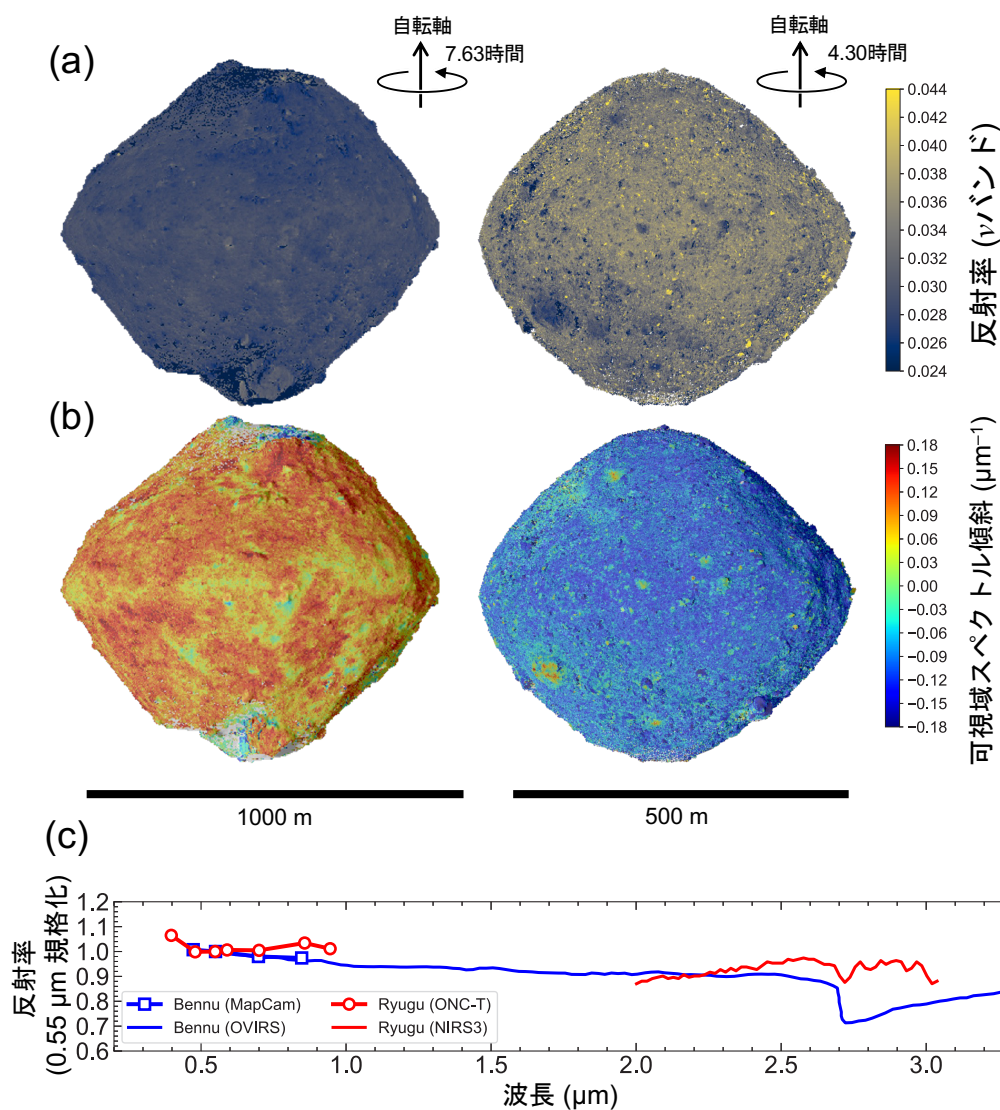


図1: Ryugu (左列)とBennu (右列) の(a) v バンド (波長550 nm) での反射率, (b) 可視域 (波長480–850 nm) スペクトル傾斜, 及び, (c) 全球平均スペクトル. 可視スペクトルについては, 本研究の相互校正結果を適用し, 同じ絶対スケールで両天体を比較している. 反射率は, 完全拡散反射面を入射角 0° で照明した時の放射輝度に対して, 天体地表面を入射角 10° , 出射角 0° , 位相角 10° で観測した時の放射輝度の比 (Radiance factor)を示す. (a), (b)の諸元データは[17]より. (c)の諸元データは[9, 10, 17]より.

ターの内部は, 大きなクレーターの内部よりも青いスペクトルであるのに対して, Bennuでは赤いスペクトルである (図2). これは, Ryuguのスペクトル進化が赤化傾向であるのに対し, Bennuでは逆の青化傾向であることを示唆する[8, 15].

RyuguとBennuのスペクトル差の成因を解明する上で, この逆のスペクトル進化にこそ重要な手が

かりがある可能性がある. その理由は, 両天体の小さく新鮮と思われるクレーターが似たスペクトル傾斜を持っているからである (図2). しかし, 異なる装置で観測された2つの天体のスペクトルを同じ絶対スケールで精密に比較し, 類似性を議論することは容易ではない. 特に, 可視域のマルチバンドスペクトルを観測した, 「はやぶさ2」のTelescopic Optical

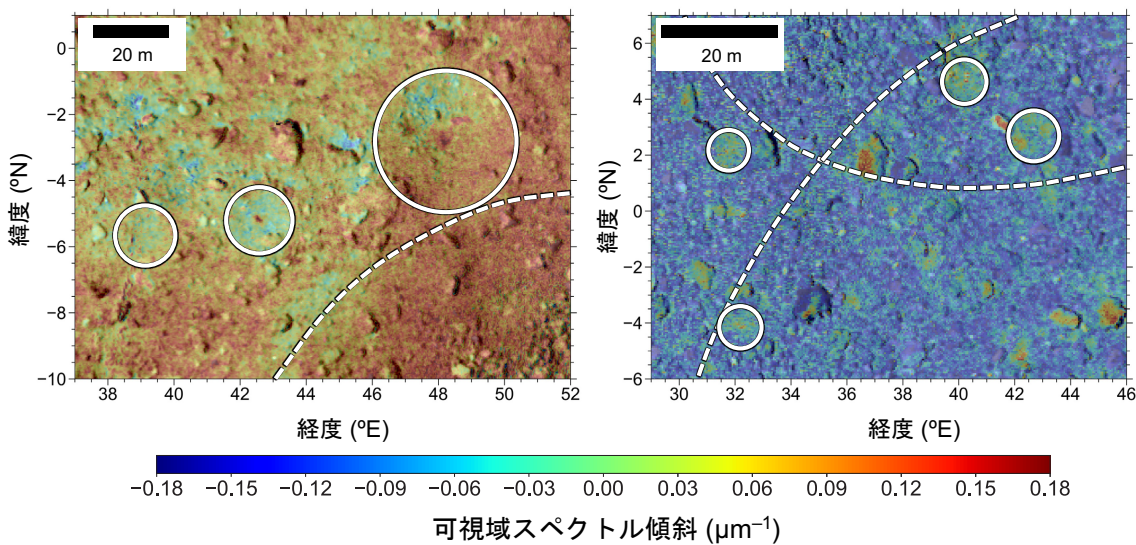


図2: (a) Ryuguと(b) Bennuのクレーターの可視域スペクトル傾斜マップ。本研究の相互校正結果を適用し、同じ絶対スケールで両天体を比較している。点線は天体上で最大規模のクレーター（直径115–170 m）の輪郭を、実線は最小規模のクレーター（直径 5–35 m）の輪郭を示す。より小さなクレーターは、表面更新によって消去されやすく、形成頻度も高いため、大きなクレーターよりも新鮮な物質を露出していると考えられる。Ryuguの新鮮クレーターは古いクレーターよりも青い色を持つ一方、Bennuではより赤い色を持つ傾向が見られる。小さなクレーターの間にもスペクトルの多様性が見られる（図6）が、本図では最も新鮮な物質を露出していると考えられるスペクトルを持ち、かつ同サイズ範囲のクレーターの平均スペクトルとの差が 2σ 以内であるものを代表例として示している。

表1: リモートセンシング観測及び帰還試料分析から明らかになったRyuguとBennuの相違。

	Ryugu	Bennu
赤道直径 (m)	1004 [5]	550 [6]
バルク密度 (kg/m^3)	1190 ± 20 [5]	1190 ± 13 [6]
自転周期と向き	7.63 時間 (逆行) [5]	4.30 時間 (逆行) [6]
熱慣性 ($\text{J m}^{-2} \text{K}^{-1} \text{s}^{-1/2}$)	225 ± 45 [18]	300 ± 30 [19]
幾何アルベド	0.041 ± 0.001 [16]	0.049 ± 0.001 [16]
スペクトル分類	Cb [7]	B [8]
スペクトル傾斜 (μm^{-1})	0.091 [17]	-0.093 [17]
スペクトル進化傾向	赤化・黒化 [15]	青化・明化 [8]
2.7 μm 帯の形状	細い [9] (CIによく見られる)	広い [10] (CMによく見られる)
帰還試料の鉱物容量比・元素量比	CI と近い[1]	CI と近い[2]

Navigation Camera (ONC-T)とOSIRIS-RExのMapCamは、それぞれ別の天体を用いて校正されていたために、装置間の感度には10%以上もの系統差がある恐れがあった(2章)。これに対して、RyuguとBennuのスペクトル差は小さく、どちらの天体の反射率が高いかすら判別できないほどであった。

そこで、本研究[16, 17]では、ONC-TとMapCamの相互校正を行い、クレーターのスペクトルを精密に比較分析することで、両天体のスペクトル進化傾向の相対関係を明らかにした。これらの観測結果を元に、RyuguとBennuのスペクトルが異なる原因について議論する。

2. 手法

ONC-TとMapCamは共通した4つの波長帯で、それぞれRyuguとBennuの観測を行った。これらの波長帯は b, v, w, x バンドと呼ばれ、それぞれ中心波長480, 550, 700, 850 nmである²。しかし、両データを直接比較するには、装置間の系統的な感度差の補正が必要である。ONC-TとMapCam間で感度差が生じる要因は、絶対感度校正係数(Radiometric calibration coefficient; RCC)と太陽放射照度(J)の求め方が異なっているからである。相互校正の主眼は、装置間の感度差を同じ校正源で補正することである。

RCCは、カメラのデジタル信号を物理量(放射輝度)に変換するための係数であり、放射輝度(または放射照度)が既知の光源を実際に観測することで求まる。例えば、ONC-Tは航行中に8つの標準星の明るさを観測し、これらを地上望遠鏡観測によって求められた放射照度と照合することで、RCCが決定された[20]。一方、MapCamはスイングバイ時に月を観測し、そのデータを地上望遠鏡Robotic Lunar Observatory (ROLO)で求められた月面の放射輝度と照合することでRCCを決定した[21]。MapCamの校正に星が用いられなかった理由は、検出器の特性にある。各検出素子(1画素に対応)の表面のうち、感光部が占める面積割合が、ONC-Tでは100%であるのに対し、MapCamでは76%である

(残りの面積は転送回路が占め、高速読出しを可能にしている)。MapCamのように、素子内に感度ムラがある検出器を用いて、星のような点光源を観測する場合、光源が素子内のどの位置に映るかによって信号強度が大きく変化してしまう[21]。その結果、ONC-Tでは高精度(～1%)で星の明るさを観測できるのに対し、MapCamでは観測精度が数10%と低くなってしまう。

地上望遠鏡によって求められた標準星の放射照度には2-3%の誤差があり、ROLOによって求められた月の放射輝度には5-10%の誤差があると推定されている。月の方で誤差が大きい理由として、月の放射輝度が観測時の測光条件(太陽光の入射角など)や観測領域に依存して変わることが挙げられるが、ROLOに固有の系統誤差が主要因である可能性も指摘されている。例えば、Velikodsky et al. [22]やSaiki et al. [23]によって観測された月面放射輝度と比べて、ROLOで観測された月面放射輝度は13%過小評価である。このような、校正源データに潜在する系統誤差が、ONC-TとMapCamの感度差を生む。

そのため、ONCとMapCamの感度差を補正するには、両カメラで同じ光源を観測し、直接比較することが必要である。本研究ではONC-TとMapCamが撮影した合計90枚の月面観測画像(r_{obs} ; 図3a)を用いて、ONC-Tに対するMapCamの感度補正係数(f_{RCC})を以下の式により求めた。

$$f_{RCC_n} = \left[\frac{r_{sim,n}}{r_{obs,n}} \right]^{MapCam} / \left[\frac{r_{sim,n}}{r_{obs,n}} \right]^{ONC} \quad (1)$$

ここで、 r_{sim} は月周回衛星Lunar reconnaissance orbiterに搭載されているWide Angle Camera (WAC)と、「かぐや」に搭載されているSpectral Profiler (SP)のデータに基づいて作成した模擬画像(図3b)であり、 n は4つの波長帯($n = b, v, w, x$ バンド)を示す。分子および分母のオーバーラインは、月が映っているピクセルのうち、模擬画像の作成精度が低いとされる入射角 $> 60^\circ$ または出射角 $> 30^\circ$ の領域を除外し、残りの全ピクセルの平均を取ったことを示す。模擬画像の諸元データに地上望遠鏡ではなく周回衛星データを使用した理由は、ONC-TとMapCamによる月面画像がほとんど反地球側のものであったためである(図3a)。WACデータは $b \cdot v \cdot b$

² ONCとMapCamの中心波長・バンド幅は厳密には同じではないが、その影響は殆ど無視できる[16]。

ンド, SPデータは $v \cdot w \cdot x$ バンドの波長帯をカバーしている. 特に v バンドはWACとSPの両方がカバーしているため, 諸元データの違いによる系統誤差を評価できた. また, ONCは打ち上げ直後と帰還時の2回にわたり月面観測を実施している(図3a上段・中段). この間, Ryuguへの2回のタッチダウンによって約10%の感度劣化が生じたことが, 定期的な恒星観測により明らかになっている[24]. そのため, 帰還時の月画像は f_{RCC} の導出には使用しなかったものの, 月観測から得られた感度劣化幅が恒星観測結果と誤差範囲内で一致していることを確認し, 本研究手法の妥当性を検証するために活用した.

更に, 小惑星の反射率を求めるには, 観測された放射輝度を太陽の放射照度で割る必要があるが, ここで使用する太陽放射照度モデルも, カメラ間で異なっている. ONC-Tでは, ASTM-e490の太陽放射照度モデル³を使用しているのに対し, MapCamではThuillier et al. [25]のモデルを使用している. これら2つのモデルの間には, フラウンホーファー線の深さに最大2%程度の差異があるため, 分光データを扱う際には, このようなモデル依存性に注意する必要がある. このモデル差を補正する係数(f_j)は, 以下の式により求まる.

$$f_{jn} = (J_n^{\text{MapCam}} / J_n^{\text{MapCam}})^{-1} \quad (2)$$

ここで, J^{MapCam} はThuillier et al. [25]に基づくMapCamの元の太陽放射照度, J'^{MapCam} はONC-Tと同じASTM-e490モデルを用いて再計算したMapCamの太陽放射照度である.

これらの合計補正係数 $F_n = f_{\text{RCC}_n} \cdot f_{jn}$ をMapCamで観測されたBennuの反射率⁴で公開に掛けることで, カメラ間の感度差を補正でき, Ryuguの反射率⁵で公開と正確に比較可能になる⁶.

上記の手法によって相互校正したデータを用い

³ <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-astm-e490.html>

⁴ https://sbnarchive.psi.edu/pds4/orex/orex.ocams/data_calibrated/

⁵ https://sbnarchive.psi.edu/pds4/hayabusa2/hyb2_onc/data_iof/

⁶ MapCamとONC-Tの相対比較をする限りでは, ONC-Tのデータを補正係数 F_n で割っても良い. しかし, ONC-Tデータはそのままに, MapCamデータに補正係数を掛ける方が, より正確な絶対値が得られる(3.1章で詳述).

て, RyuguとBennuのクレーターの可視スペクトルを比較した. Ryuguでは322個 [26], Bennuでは1560個 [27]のクレーターが見つかった. 本研究では, これらのクレーター内部の反射率と, 480から850 nmにかけてのスペクトル傾斜を算出し, クレーターの大きさ(年齢)とスペクトルとの関係を調べた. 反射率とスペクトル傾斜に注目した理由は, クレーター間のスペクトル多様性の90%以上を担う最も重要な特徴量だからである. また, 両天体ともに, 解像度0.3 m/pix, 位相角10°で観測されたデータを用いることで, 観測条件を揃えた比較を行った.

3. 結果

3.1 相互校正

ONC-TとMapCamの感度差補正係数(F_n)は, v バンドで 1.132 ± 0.015 であると求まり(図3d), MapCamはONC-Tに対して系統的に13%感度が低かったことが明らかになった. この13%の感度差のうち, 殆どが校正光源の違い(f_{RCC})によるものであり, 太陽放射照度モデルの違い(f_j)による寄与は<2%であった. 即ち, 感度差の支配的要因は, ONCの絶対値校正に使用された標準星の放射照度データに対して, MapCamの校正に使用されたROLOの月面放射輝度データが, 系統的に10%以上過小評価であったためである. 本研究で明らかになった標準星データ対ROLOデータ間の系統差は, Velikodsky et al. [22]やSaiki et al. [23]による月面観測データ対ROLOデータ間の系統差と整合的である. RyuguとBennuの反射率を正確に比較するためには, この系統差の補正が必要である. 一方, 感度差は全てのバンドで同様(バンド間の差異は $\pm 2\%$)であり, 有意な差はない. そのため, 標準星とROLOのどちらを校正源とした場合でも, スペクトル傾斜は整合的なものを得られることが分かった.

ここで, 将来の探査の為に, 標準星とROLOのどちらがより確からしい校正源であったかを考察する. RyuguとBennuの幾何アルベドは, 独立した他機器でも観測されてきた. 例えば, OSIRIS-RExに搭載されている近赤外分光計OSIRIS-REx Visible and Infrared Spectrometer (OVIRS)の感度は, 地球およびBennuの観測データを基に

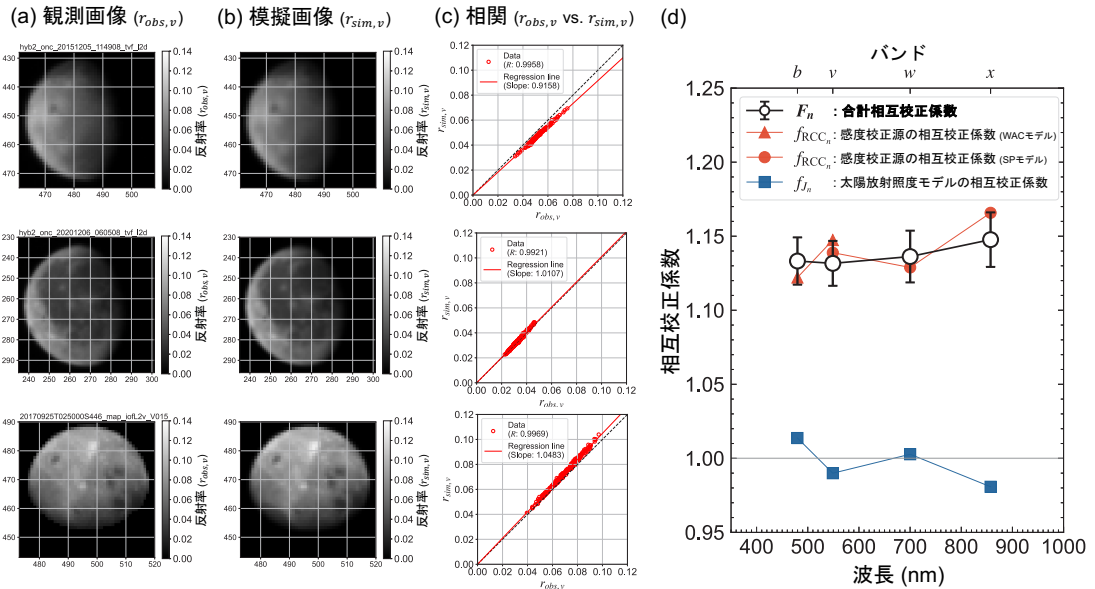


図3: ONC-TとMapCamの相互校正結果. (a) ONCとMapCamによって観測された月観測画像. 上段は2015年12月5日のONC観測画像, 中段は帰還後2020年12月6日のONC観測画像. 下段は2017年9月25日のMapCam観測画像. (b) WACデータを元に作成した, (a)に対応する模擬画像. (c) 観測画像と模擬画像の間の相関. (d) 月画像を元に求められた相互校正係数. 感度校正源の違い及び太陽放射照度モデルの違いを補正するための校正係数(それぞれ f_{RCC} , f_n)を比較すると, 前者が支配的である. これらの合計相互校正係数($F_n = f_{RCC_n} \cdot f_n$)をBennuの反射率データに掛けることで, ONCとMapCamの間の系統的な感度差を補正できる. Yumoto et al. [16]の図を一部改変して掲載.

校正されており, MapCamとは独立した手法を用いて感度校正されている. 元来, MapCamが観測したBennuの幾何アルベドは, OVIRSの観測結果より10%以上低いことが知られていた[28]. しかし, ONC-Tの標準星校正を真として, 本研究の相互校正結果を元に, MapCamの感度を+13%補正すると, MapCamとOVIRSの観測結果は誤差範囲の中で整合的になることが分かった(図4). 同様に, MapCamと地上望遠鏡の観測結果もより整合的になる(図4). 一方, MapCamのROLO校正を真として, ONC-Tの感度を-13%補正すると, ONC-Tが観測したRyuguの幾何アルベドは, 地上観測結果と整合的でなくなってしまう. これらの結果から, 標準星とROLOを比較した場合, 標準星による校正結果の方がより信頼でき, ROLOの方に-13%の系統誤差がある可能性が高いと考えられる.

このROLOの系統誤差の要因はまだ特定できていないが, 今後の探査機搭載装置では, 星を用いた校正もできるよう, なるべく受光面積割合が大きい検出素子を採用することが推奨される. 一方で, 月を

用いた校正が須く不適切なわけではない. 先述の通り, [22]や[23]など, 標準星の観測値と整合的な月観測データも存在するためである. WACやSPなどの周回衛星のデータも有用であるが, 打ち上げ後の絶対感度校正にROLOデータが使用されている場合があり[29], その結果, ROLOと同じ系統誤差を含む可能性がある点に注意が必要である. 将来の探査で月を利用した高精度な感度校正を実現するには, 地球周回衛星を含む多様な観測器との比較から, これまで信頼されてきたROLOデータの再評価を行うとともに, 最適なりファレンスデータを再開発する研究[30など]が求められる.

3.2 クレーターのスペクトル比較分析

相互校正を行う前は, RyuguとBennu上のクレーターのスペクトル分布は, 共に似た傾きを持っていながらも, オフセットしていた(図5a). しかし, 相互校正結果を適用し, 主にBennuの反射率を+13%補正すると, このオフセットが解消することが分かった(図5b). 即ち, 両天体のクレーターのスペクトル分

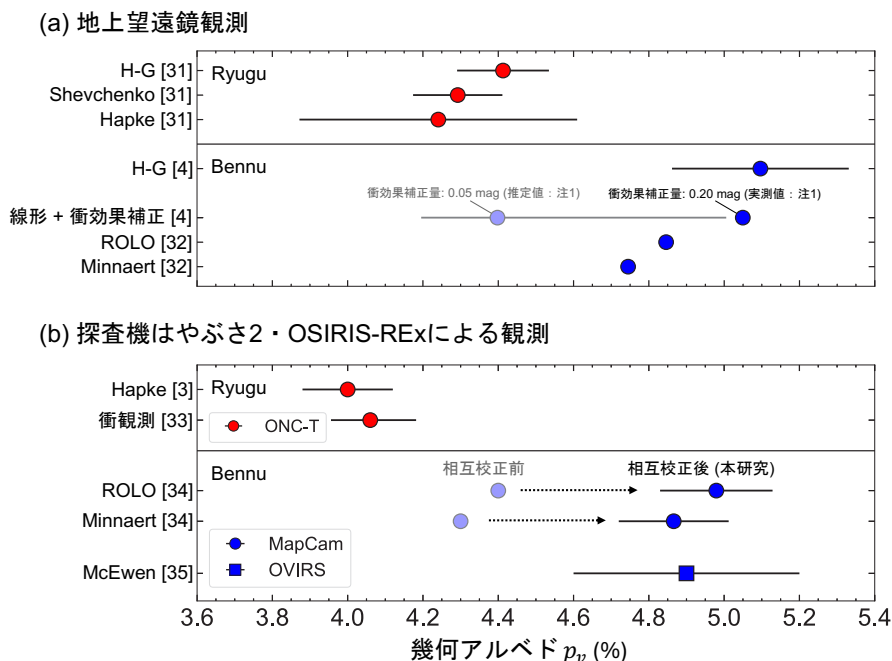


図4: 様々な装置による, RyuguとBennuの幾何アルベド (p_v ; 位相角0度で観測した時の半球積分反射率) の観測結果. (a)は地上望遠鏡, (b)は探査機による観測結果. 小惑星を直接位相角0度で観測できる機会は少ないため, p_v は一般に位相角0度以上の観測データをフィッティングすることで推定される. 縦軸は, このフィッティングに使用された測光関数の種別名を示す (ここでの「ROLO」は望遠鏡ではなく, 関数名を指していることに注意されたい). MapCamで観測されたBennuの幾何アルベド[34]に相互校正結果を適用し, +13%上昇補正すると, 他の観測装置による観測結果とより整合的になる. Yumoto et al. [16]の図を一部改変して掲載.

注1: 探査機が到着する以前, Bennuの地上望遠鏡観測では位相角15度までのデータしか得られておらず, 衝効果(位相角10度以下で反射率が急激に上昇する現象)の度合いが未知であった. その結果, p_v の推定値には大きな誤差が含まれていた. 特に, 「線形+衝効果補正 [4]」関数による p_v の推定値は, 他の測光関数を用いた推定値よりも低い値を示していたが, これは衝効果補正量が過小評価されていたためであることが探査機到着後に判明した. 探査機による実測結果を元に衝効果を再補正すると, 他の推定値とより整合的となる.

布は, 実は一つの連続的な分布を呈していることが分かった.

クレーターのサイズごとに分布を分けると, RyuguとBennuのスペクトル進化が逆方向に進行したことが分かる. どちらの天体でも, 直径120 m以上の大きいクレーターは全球平均値に近い反射率と色を持っているが, クレーターのサイズが小さくなるに従って, Ryuguではより明るく青いクレーターの数密度が増え, 一方で, Bennuではより暗く赤いものが増える (図6a). 小さいクレーターの方が, 表面物質の流動によって消されにくく, スペクトル進化の初期状態を反映している可能性が高いことから, Ryuguのスペクトルは暗く赤くなる方向 (図6aの左上方向) に進化したのに対し, Bennuは明るく青く

なる方向 (図6aの右下方向) に進化したと考えられる. 更に, 各天体で最も新鮮であると考えられるクレーターは, 相互校正誤差の範囲内で整合的なスペクトルを持っている (図7). この観測事実は, 少なくとも誤差の範囲内で両天体が似たスペクトルを持つ物質から進化したことを示唆している. 小さく新鮮なクレーターの間でもスペクトルに大きなばらつきが見られる理由は, これらのクレーターの年齢 (10^3 – 10^6 年[26]) よりも短いタイムスケールでの物質混合プロセス[36]によって, 全ての小クレーターで新鮮な物質が露出しているわけではないためだと考えられる. また, 各クレーター内部のスペクトルが必ずしも一様でないことにも留意する必要があるが, これは深さ方向の物質不均質を反映している可能性がある. 例え

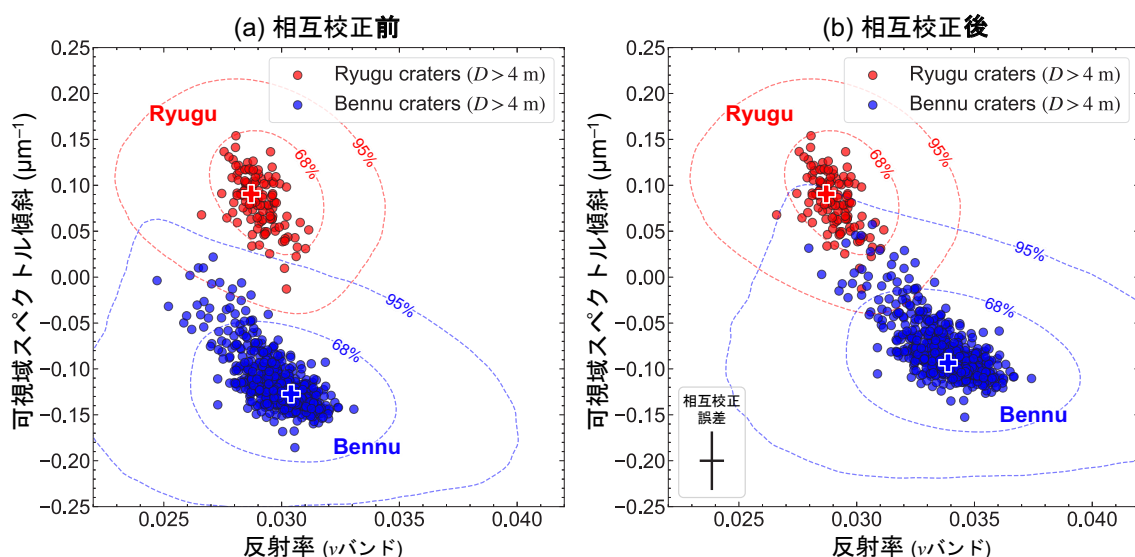


図5: クレーターの反射率-スペクトル傾斜分布。(a)は相互校正係数を掛ける前のデータ, (b)は相互係数を掛け、装置間の系統的な感度差を補正した後のデータ。+記号は全球平均値を示し、破線は北緯15度から南緯30度の全領域のスペクトル分布を示す。(b)の左下隅のエラーバーは、相互校正係数の誤差幅を示す。相互校正係数を適用する前は、両天体の分布はオフセットしていたが、相互校正結果を適用することで、両者は連続的な分布を成すことが分かった。Yumoto et al. [17]の図を一部改変して掲載。

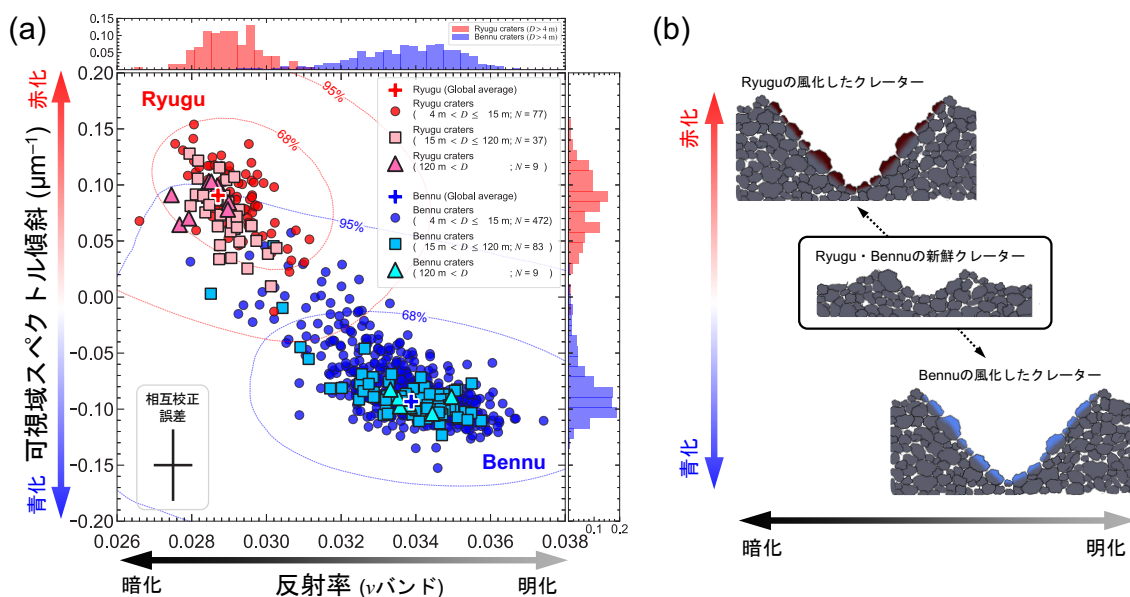


図6: (a) クレーターサイズごとの反射率-スペクトル傾斜分布と、(b) それから解釈されるクレーターの年齢とスペクトルの関係を表した模式図。図(a)中の+記号は全球平均値を示し、破線は北緯15度から南緯30度の全領域のスペクトル分布を示す。左下隅のエラーバーは、相互校正係数の誤差幅を示す。RyuguとBennuの新鮮なクレーターは似たスペクトルを持っているが、宇宙風化によってRyuguのクレーターは赤黒く進化し、Bennuのクレーターは真反対方向に青白くなったことを示唆する。Yumoto et al. [17]の図を一部改変して掲載。

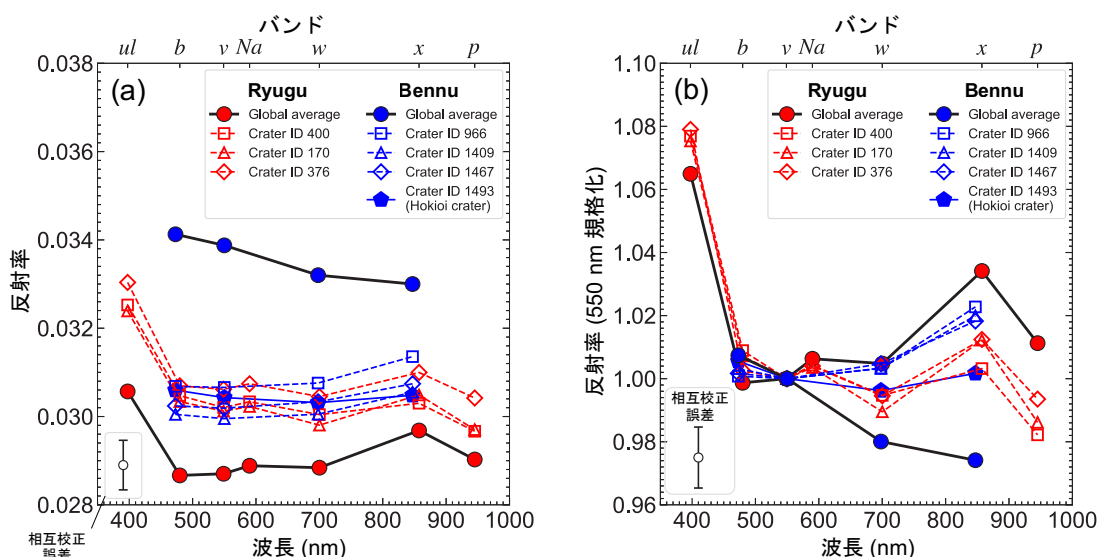


図7: RyuguとBenuにおける最も新鮮と考えられるクレーターのスペクトル比較. Ryugu上で最も青い(可視域スペクトル傾斜が最小の)3つのクレーターと, Benu上で最も赤い(可視域スペクトル傾斜が最大の)3つのクレーター, さらにBenu帰還試料が採取されたHokioiクレーターの(a)反射率スペクトルおよび(b) v バンド(550 nm)で規格化した反射率スペクトルを示す. RyuguとBenuの最も新鮮と考えられるクレーターのスペクトルが相互校正誤差(左下エラーバー)の範囲内で整合していることを示している. Yumoto et al. [17]の図を一部改変して掲載.

ば, Ryuguの新鮮クレーター内部は, 周囲と比較して大部分が青いスペクトルを呈すが, 最深部に対応する一部領域は周囲と同程度に赤いスペクトルを呈している(図2). 同様の構造は, 風化の影響を殆ど受けていない人工クレーターでも観察されている[37]. クレーターの掘削深度(1~10 m)に存在する地下物質は, 表層物質よりも粒径が小さいことが示唆されており[38], クレーター最深部が異質なスペクトルを呈す一因となっている可能性がある.

これらの観測事実から, RyuguとBenuは, 形成当初, 似た初期スペクトルを持っていたが, その後の宇宙風化作用によって, 正反対方向にスペクトルが進化し, スペクトル型の異なる天体になったと考えられる(図6b).

4. 議論:なぜRyuguとBenuのスペクトルは逆進化したか

似た物質で出来ているRyuguとBenuのスペクトルを正反対方向に進化させる宇宙風化過程とは何であろうか. 一見難解であるが, まだ様々な可能性が

残されている.

炭素質コンドライトへのイオンやレーザーの照射によって, 太陽風照射や微小隕石衝突による化学的変質(例えば, ナノ鉄粒子の生成や有機物の炭化)を模擬する実験が行われてきた. この結果, 風化作用が違えば, スペクトル進化の進行方向が逆になりうることが指摘されている. 例えば, 同じMurchison隕石でも, レーザーを照射すると青化し[39], イオンを照射すると逆に赤化する[40]ことが報告されている. 従って, スペクトル進化の主要因となる風化作用(太陽風照射, 微小隕石衝突, 太陽加熱など)がRyuguとBenuで異なっている場合, 逆のスペクトル進化が起こる可能性がある. Ryuguは一時的に太陽近くまで軌道遷移した可能性が提案されており[15], 太陽との接近によって, Benuとは異なる風化作用を経験したかもしれない. また, 風化を受ける物質の組成の違いによっても, 逆のスペクトル進化が起こりうることが指摘されている. 例えば, 同じイオン照射を行っても, CV・COコンドライトは赤化するのに対し, CIコンドライトは青化することが知られている[41]. そのため, RyuguとBenu

物質は似ているとはいえ、両者の僅かな組成の違いが効いている可能性も捨てきれない。

しかし、上記のような化学的変質を伴う宇宙風化過程では、RyuguとBennuのスペクトルが同一のトレンド上を、「正反対」に進行したという本研究の結果を、必然性を持って説明することが難しい。むしろ、共通したトレンドを正反対に進化したという観測事実は、両天体で共通した何らかの量が、一方の天体では増加し、もう一方では減少したことを示唆する。そこで、細粒の存在量の増減など、小惑星表面物質の物理状態が変質するという、これまで比較的注目されてこなかった宇宙風化過程を考慮することが重要かもしれない。小惑星の表面物質は、熱疲労による岩塊の破砕や天体衝突によって粒度が細くなっていく一方で、ある一定サイズ以下の細粒は、静電浮遊等によって表面から無くなっていく。このように、表面物質の粒径分布は時間と共に進化し、細粒の増減のバランスは、天体重力や物質の破壊強度に依存して決まる。Hsu et al. [42]のモデルによれば、小惑星表面の粒径分布進化は支配する主要なパラメータは、静電浮遊によって散逸できる限界粒径 a_{max} であり、大局的には、 a_{max} より小さい粒子は時間と共に減少し、それを超える粒子は増加することが提案されている。Ryuguのような直径1 kmの天体では、 a_{max} は約30 μm であるのに対し、Bennuのような直径0.5 kmの天体では約60 μm となる。そのため、重力条件の違いにより、30–60 μm の細粒は、Ryuguでは増加する一方で、Bennuでは減少することが期待される。可視スペクトルは、このような数10 μm の細粒の存在量に敏感であり、RyuguとBennuのスペクトル差以上の変化をもたらすことが、炭素質コンドライトを用いた実験でも報告されている[43]。このように、表面物質の物理状態が小惑星ごとに逆進化するというプロセスによって、RyuguとBennuで観測された正反対の可視スペクトル進化が説明できる可能性がある。一方で、2.7 μm 帯の形状は粒度による影響をあまり受けないことも報告されている[43]。そのため、RyuguとBennuにおける2.7 μm 帯の違い(図1c)を説明するには、別のメカニズムが必要かもしれない。

5. まとめと今後の展望

本研究では、「はやぶさ2」に搭載されている光学航法カメラとOSIRIS-RExに搭載されているMapCamの相互校正を行い、相互校正前の両カメラ間に13%もの系統的な感度差があることを突き止めた。この感度差を補正した結果、RyuguとBennuのクレーターの可視スペクトル分布は共通したトレンドに乗っていることが明らかとなった。この事実は、両天体が形成当初は似た初期スペクトルを持っていたが、その後の宇宙風化により正反対の方向に可視スペクトルが進化し、スペクトル型の異なる天体になったことを示唆する。この新たな観測事実を説明するには、天体衝突・熱破砕・静電浮遊などによる小惑星表面物質の物理状態の進化という、これまであまり注目されてこなかった宇宙風化過程の考慮が重要である可能性がある。

本研究の結果から、C型小惑星の可視スペクトルの非一様性が、宇宙風化によって後天的に生じる可能性が示された。これは、C型小惑星を構成している物質が、地上望遠鏡で観測される可視スペクトルのばらつきから推察されるよりも、はるかに一様である可能性を示唆する。一方で、Ryugu・Bennuで起こったスペクトル進化が、どこまで他のC型小惑星に一般化できるかを解明するには、更なる地上観測が必要かもしれない。例えば、4章で提案したように、天体重力に依存してスペクトル進化の方向が決まるならば、一般に小惑星のサイズとスペクトルが相関していることが期待される。実際、小惑星サイズが100 kmから3 kmにかけて小さくなるにつれて、C型小惑星の可視スペクトルが青くなる傾向が報告されており、小さい小惑星ほど表面物質が粗粒であるためだと解釈されている[44]。この全体的なトレンドは、Ryuguよりも小さいBennuがより青いスペクトルを持つという事実とも整合的であり、粒径が広範なC型小惑星のスペクトルに影響を与えている可能性を示唆している。しかし、RyuguやBennuと似た数kmから数100 mサイズのC型小惑星のスペクトルは、約20個しか報告されておらず[45等]、このサイズ範囲ではまだ有意なトレンドは見えていない。

太陽系におけるRyugu・Bennuのような物質の普遍性を明らかにするためには、RyuguとBennuの

スペクトル進化のメカニズムを解明することが重要である。そのためには、帰還試料を用いて、宇宙風化度の指標（粒径やマイクロクレーターの数密度など）と可視スペクトルの関係を調べるのが有効であろう。また、地上望遠鏡による類似天体のスペクトル観測データを増やし、太陽系における普遍性を検証していくことも求められるだろう。これらの知見は、フォボス上の可視スペクトルが異なる二つの地質ユニット[46]の解釈の幅を広げ、MMXのサンプル採取地点の選定においても重要な役割を果たすことが期待される。

謝辞

「はやぶさ2」およびOSIRIS-RExミッションを実現してくださったチームの皆様に、心より感謝申し上げます。また、査読者から有益なコメントを多数いただき、おかげさまで本稿を大きく改善することができました。

参考文献

- [1] Yokoyama, T. et al., 2022, *Science* 379, eabn7850.
- [2] Lauretta, D. S. et al., 2024, *MAPS* 59, 2453.
- [3] Tatsumi, E. et al., 2020, *A&A* 639, A83.
- [4] Hergenrother, C. W. et al., 2013, *Icarus* 226, 663.
- [5] Watanabe, S. et al., 2019, *Science* 364, 268.
- [6] Lauretta, D. S. et al., 2019, *Nature* 568, 55.
- [7] Sugita, S. et al., 2019, *Science* 364, eaaw0422.
- [8] DellaGiustina, D. N. et al., 2020, *Science* 370, eabc3660.
- [9] Kitazato, K. et al., 2019, *Science* 364, 272.
- [10] Hamilton, V. E. et al., 2019, *Nat. Astron.* 3, 332.
- [11] Tatsumi, E. et al., 2021, *Nat. Astron.* 5, 39.
- [12] DellaGiustina, D. N. et al., 2021, *Nat. Astron.* 5, 31.
- [13] Sasaki, S. et al., 2001, *Nature* 410, 555.
- [14] Hiroi, T. et al., 2006, *Nature* 443, 56.
- [15] Morota, T. et al., 2020, *Science* 368, 654.
- [16] Yumoto, K. et al., 2024, *Icarus* 417, 116122.
- [17] Yumoto, K. et al., 2024, *Icarus* 420, 116204.
- [18] Shimaki, Y. et al., 2020, *Icarus* 348, 113835.
- [19] Rozitis, B. et al., 2020, *Sci. Adv.* 6, eabc3699.
- [20] Tatsumi, E. et al., 2019, *Icarus* 325, 153.
- [21] Golish, D. R. et al., 2020, *SSR* 216, 1.
- [22] Velikodsky, Y. I. et al., 2011, *Icarus* 214, 30.
- [23] Saiki, K. et al., 2008, *EPS* 60, 417.
- [24] Kouyama, T. et al., 2021, *Icarus* 360, 114353.
- [25] Thuillier, G. et al., 2004, in *Geophysical Monograph Series (AGU Publications)*, 171.
- [26] Takaki, N. et al., 2022, *Icarus* 377, 114911.
- [27] Bierhaus, E. B. et al., 2022, *Nat. Geosci.* 15, 440.
- [28] Golish, D. R. et al., 2022, *SSR* 218, 5.
- [29] Mahanti, P. et al., 2016, *SSR* 200, 393.
- [30] Kieffer, H. H., 2022, *J. Appl. Remote Sens.* 16, 038502.
- [31] Ishiguro, M. et al., 2014, *Astrophys. J.* 792, 74.
- [32] Takir, D. et al., 2015, *Icarus* 252, 393.
- [33] Yokota, Y. et al., 2021, *PSJ* 2, 177.
- [34] Golish, D. R. et al., 2020, *Icarus* 357, 113724.
- [35] Zou, X. D. et al., 2021, *Icarus* 358, 114183.
- [36] Jawin, E. R. et al., 2022, *Icarus* 381, 114992.
- [37] Tatsumi, E. et al., 2021, 52nd LPSC No. 2548, 1338.
- [38] Bierhaus, E. B. et al., 2023, *Icarus* 406, 115736.
- [39] Thompson, M. S. et al., 2019, *Icarus* 319, 499.
- [40] Lacznia, D. L. et al., 2021, *Icarus* 364, 114479.
- [41] Lantz, C. et al., 2017, *Icarus* 285, 43.
- [42] Hsu, H. W. et al., 2022, *Nat. Astron.* 6, 1043.
- [43] Cantillo, D. C. et al., 2023, *PSJ* 4, 177.
- [44] Bech, P. and Poch, O., 2021, *Icarus* 365, 114494.
- [45] Devogèle, M. et al., 2019, *AJ* 158, 196.
- [46] Murchie, S. L. et al., 1991, *JGR* 96, 5925.