火の鳥「はやぶさ」未来編 その21 ~熱撮像で明らかにされた 始原的小惑星の超高空隙な特徴~

岡田 達明^{1,2,*}, 福原 哲哉³, 田中 智¹, 坂谷 尚哉³, 嶌生 有理¹, 荒井 武彦⁴, 千秋 博紀⁵, 出村 裕英⁶, 神山 徹⁷, 関口 朋彦⁸, 「はやぶさ2」TIRチーム

(要旨)小惑星探査機「はやぶさ2」に搭載された中間赤外カメラTIRによって,C型小惑星Ryuguに対して全球の高解像度サーモグラフィ(熱撮像)が史上初めて実施された.表層温度と日変化から導出される熱慣性から,Ryuguの表面を覆う岩塊や岩片の大部分が,典型的な炭素質コンドライト隕石と比較して非常に高空隙な物質で構成されていることが分かった.この高空隙な性質は,表面重力の小さい始原的小惑星に共通であると考えられる.太陽系初期の微惑星も同様に高空隙で低強度の物質で構成されていたと考えられ,惑星形成時の力学進化過程の考察に影響を与える可能性を提起する重要な発見である.

1. はじめに

われわれの住む地球は1Gの重力下にある世界で あり,石と言えば稠密で硬いものという先入観があ るが,微小重力下の世界では石がどのような物理的 性質をもつのかよく分かっていない.例えば炭素質 コンドライトが地球大気に突入する際には,大気中 で崩壊して大部分が損失してしまい,強度の高い部 分だけが地上まで到達して隕石として発見される. 元の天体の平均的性質は少なくとも,発見された隕 石よりも脆弱であることは確実である.

C型小惑星は小惑星帯の雪線外側で最も多く存 在する種類の小惑星であり,水や有機物など揮発

1:宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
2.東京大学
3.立教大学
4.足利大学
5.千葉工業大学
6.会津大学
7.産業技術総合研究所
8.北海道教育大学
okada@planeta.sci.isas.jaxa.jp

性成分を含む炭素質コンドライト隕石の母天体と 考えられるが[1.2]. その物理的性質はほとんど分 かっていない.小惑星探査機「はやぶさ2」が小惑 星162173 Ryuguを訪れるまでは [3,4], NEAR-Shoemakerがフライバイ観測した253 Mathilde が唯一の直接観測されたC型小惑星であった [5]. その半径ほどの直径をもつ複数の巨大クレータ が天体を崩壊させずに形成されていることから. Mathildeは全体として非常に高空隙であり、収縮 することで衝撃波を減衰させられる構造であると推 察される. RyuguがMathildeのように大部分がフ カフカの「新雪 | が堆積したような小惑星である可能 性もあれば、小惑星25143 Itokawaのような岩塊 がむき出しになったラブルパイル天体 [6]. すなわち 母天体が衝突破壊によってばらばらになった後で再 集積して形成された「瓦礫の寄せ集め」の可能性も ある. 探査機で直接観測できるのは表層だけである が、ラブルパイル天体の場合、表面には前世代の内 部構造を構成する物質が岩塊として陳列された状態 にあり、実質的に母天体の内部構造の探査を行うこ とに相当する.



図1:「はやぶさ2」搭載の中間赤外カメラのセンサ部(TIR-S). (©JAXA)

「はやぶさ2」には小惑星Ryuguの現在の表層, そして母天体の内部構造についての物理的特徴を 調べることを目的に中間赤外カメラ(TIR)を搭載し た(図1) [7]. この装置は身体の健康チェックや非 破壊検査に使用されるサーモグラフィと同じ原理の ものであり、金星探査機「あかつき」搭載の中間赤外 カメラLIRと同型である [8]. 本報告ではTIRによ るRyuguの全球熱撮像を実施した初期成果につい て報告する. なお、本報告はNature誌(Online版 2020年3月16日, 冊子版2020年3月26日付)に掲載 された論文 [9] を基に説明を補足して分かりやすく 記載したものである.

2. 到着前の小惑星Ryugu

「はやぶさ2」の探査対象である小惑星Ryuguは, 地上観測によってある程度の特徴が事前に判明して おり[10],スペクトル型はC型,直径は約0.85 km, 自転周期は約7.63時間,反射率は約0.05,熱慣性 は150~300 J K⁻¹ s^{-0.5} m⁻² (以下,tiu)程度の地球近 傍小惑星である.自転に伴う反射強度の変化が小 さいことから,球形に近い形状とされていた.「はや ぶさ2」の第一の目的がC型小惑星からのサンプル リターンであるため,スペクトル型がC型で,エネル ギー的に往還運用が可能な地球近傍小惑星であり, かつ着陸によるサンプルの回収が可能なように比較 的自転周期が遅いことが条件であり,計画段階でほ ぼ唯一の探査対象であった [11].

熱慣性はバルク密度P, 熱伝導率k, 定圧比熱cpの

積の平方根、*pice*。で表される物理量であり、表層の物 理状態、特に粒径、空隙率、ラフネスなどの特徴の 指標となる.熱慣性が小さいほど昼夜の温度差がよ り大きくなり、熱慣性が大きいほど昼夜の温度差が より小さく、また最高温度の到達時刻が遅延する傾 向がある(図2).自転する小惑星について朝から夕 方まで(夜の領域も含めて)の温度日変化が得られ れば、各地点の熱慣性が導出できる.

小惑星の直径と熱慣性の関係が過去の研究で整 理されており [12],一般に天体サイズが大きいほど 熱慣性が小さい傾向があることが知られる.これは 天体衝突に伴うクレータ形成時のイジェクタが,天 体重力の大小によって表層に堆積しやすいかどうか の指標と考えられていた.つまり,より大きな天体ほ ど細粒のレゴリスが多く堆積するため空隙が多く, 熱慣性が小さい.一方で小さい天体ほどレゴリスの 堆積が少ないため表面の空隙が少なく,熱慣性が大 きい.直径1 km程度の天体の熱慣性が,典型的な 隕石の熱慣性よりも小さい理由はよく分かっていな かったが,微隕石の衝突や熱応力によって生じる破砕 物がレゴリスとして堆積している可能性が挙げられて いた.

Ryuguの場合, 熱慣性150~300 tiuを説明する 表層状態として, 粒径数~10 mm程度の砂礫質のレ



図2:太陽距離1 au, 自転周期7.63 hrのとき,凹凸の無い熱慣性1 の表層での温度日変化.



図3: 模擬小惑星Ryugoidの熱撮像の様子. 岩塊(Cold Spot)とレ ゴリスの熱慣性が1600及び300 tiu [9]. (原画像 [9]から改編)

ゴリスに, 稠密な岩石からなる岩塊が点在するような 状態が想定された [10].「はやぶさ2」の到着前に検 討されていた模擬小惑星(Ryugoidと称する)では, 大部分の表面がレゴリス(熱慣性300 tiu)で, そこ に稠密な岩石で構成された岩塊(1600 tiu)が点在す ると仮定された [9]. そのため,「はやぶさ2」が到着 直後に実施するような,小さい太陽角でRyugoidの 昼側を観測すると,高熱慣性の岩塊が低熱慣性の周 辺土壌に比べて低温の斑点(Cold Spot)に見えるよ うな結果が予測されていた(図3) [9].

3. 到着!小惑星Ryugu

2014年12月3日に打ち上げられた小惑星探査機 「はやぶさ2」は、1年後の地球スイングバイを経て、 2018年6月27日に小惑星Ryuguから20kmの距 離のホームポジションに到着した[3]. TIRによる Ryuguのファーストライトは6月6日で、1画素以下の 点光源として検知された[13]. 接近中も徐々に大き く明るくなるRyuguを継続的に観測し[14], ついに 到着した直後の6月30日に、第1回目の1自転全球観 測を実施した[9]. 太陽距離0.987au, 太陽位相角 18.5°で, Ryuguの視直径は50画素分、1画素あた り約18mの空間分解能で、1自転(6°毎に1枚)の熱 撮像を実施した. これが史上初めて実施された小惑 星の全球高解像度熱撮像である.

実際に観測された小惑星Ryuguは、コマ型の 形状で自転軸がほぼ公転軌道に垂直の逆行自転で あった [4,15]. 南極付近に最大の岩塊Otohime(長 径160 m以上) があり, そのほか大小の岩塊が存在 するが, 小惑星Itokawaにみられたような平坦地は 存在しないことが分かった [6,16].

TIRによる熱撮像観測では、表面温度が2次元 的に分かる、昼側表面の温度は300~370 Kで、形 状モデルによる凹凸を考慮(面素内の微小凹凸によ るみかけの輝度変化は考慮しない) した熱モデル 計算 [17] によって導出される熱慣性の値は地上観 測の結果と整合する値(約300 ± 100 tiu)である ことが分かった [9]. 但し、到着前の予測と異なり、 Otohimeなどの岩塊はCold Spotにはなっておら ず. 岩塊と周辺土壌では温度もその日変化の特徴も 同様であった.この熱慣性の値は,通常の炭素質コ ンドライト隕石(> 600~1000 tiu [18]) に比べて低 い. 即ちRyuguは稠密な岩塊ではなく、チョップし たら壊れるほどの高空隙な状態であれば説明でき る。一方、表層全体が約1cmサイズの砂利で覆われ ている場合も同様の特徴となり得るため、より高解 像度の観測による確認が必要であった.

4. 高解像度の熱撮像

2018年8月1日に「はやぶさ2」は高度5 kmまで低 下して、ホームポジションよりも4倍の空間分解能で Ryuguを観測する「中高度観測」を実施した [3,4]. 太陽距離1.057 au, 太陽位相角19.0°で, より高解 像度で観測することによって科学的精度の向上を図 るとともに、着陸地点選定のための情報収集が目的 であった. TIRは中高度観測において、1画素あた り4.5 mの空間分解能で1自転分の熱撮像を実施し た(図4)[9]. Otohimeなど最大級の岩塊だけでな く、直径10 m以上の多数の岩塊やその他の代表的 地形が検知された. その結果, 岩塊の温度はやはり 周辺土壌とほぼ同じであった.形状モデルの凹凸を 考慮し、日陰や向き合う面同士の自己加熱の影響を 取り入れた熱モデル計算[17]の結果と比較すると、 みかけの熱慣性は、ホームポジションと同様に300 ± 100 tiu程度でよく一致した(図5)[9]. 可視カメ ラONCの撮像で発見された、部分的に堆積物に覆 われている岩塊について、堆積物に覆われた箇所と 覆われていない箇所で温度がほぼ同じであることが 確認された [15]. それは岩塊と堆積物(おそらく周



図4: 高度5 kmの中高度観測からの小惑星Ryuguの熱撮像(4方向):a) Otohime(オトヒメ岩塊), b) Catafo(カタフォ岩塊), c) Cendllion(サ ンドリヨンクレータ), d) Momotaro(モモタロウクレータ), e) Kibidango(キビダンゴクレータ), f) Urashima(ウラシマクレータ), g) Ejima (エジマ岩塊), h) Kintaro(キンタロウクレータ), i) Tokoyo(トコヨ地溝帯), j) Brabo(ブラボークレータ), k) Kolobok(コロボッククレータ), l) Ryujin(リュウジン尾根=赤道リッジ)(原画像 [9]から改編).

辺土壌と同様のもの)の熱慣性がほぼ一致すること を意味する.即ち、周辺土壌は1日(自転周期の7.63 時間)に熱が浸み込む深さ(スキンデプス:D ~ 35 mm)よりも大きいサイズの高空隙な岩塊で覆われて いることを示唆する.

Ryuguの温度日変化には大きな特徴がある. 午



図5: 中高度観測でのTIRの熱画像(緯度0°)と数値計算(凹凸無 し)の比較: a) 観測結果, b)-i) 熱慣性 50, 100, 200, 300, 400, 500, 750, 1000 tiuの場合の熱計算結果.(原画像[9] から改編)

前から南中時、午後にかけての温度変化が、平らな 表面を仮定した場合の単純熱モデルによる計算結 果に比べて変化に乏しく平坦であり、かつ日没後に わずかに見える夜間領域で温度が急降下する(図 6). このような特徴は、極端に激しい凹凸のある表 面に対してみられることがモデル計算では示されて いたが [19]、実際の惑星探査で確認された実例は 過去になかった. 表層の熱慣性とラフネスを数値モ デル化した計算例では、熱慣性327 ± 127 tiu, ラ フネス0.4 ± 0.05で近似的に表すことが可能であ る [20]. より詳細な計算結果と議論については後続 の論文にゆだねる [21]. 彗星では同様に温度日変 化の乏しい例として、9P/Tempel第1彗星、103P/ Heartlev 第2彗星のフライバイ時に観測されてい るが [22]、それらの表層状態は確認できていない、 Rvuguでは表面凹凸を詳細に確認できる初めての チャンスであり、より高解像度での観測が期待され た.

5. 降下運用中の超高解像度観測

2018年9月以降,「はやぶさ2」は表面着陸探査用 の小型ホッピングローバ(MINERVA-II)[23]や欧州協 力による小型ランダ(MASCOT = Mobile Asteroid Surface SCOuT)[24]の分離運用や、サンプル回収



図6: 中高度観測時のTIR熱画像(緯度0°)と温度分布:a) 1自転中の最高温度, b)-g) 各点b-gでの温度日変化と同地点の熱慣性別計算結果(凹 凸無し)との比較.(原画像[9]から改編)

のための2回のタッチダウン運用(TD1. TD2)とそ のリハーサルのために、低高度への降下運用を開始 した. TIRでは高度500m以下に到達後、ローバ・ ランダ分離運用では高度60mまで、タッチダウンリ ハーサルでは高度20mまで熱撮像を実施した(ター ゲットマーカ分離やタッチダウン時には高度10m以 下まで実施) 前者の最高空間分解能は画素当た り約54mm, 後者は約18mmである。一例として、 太陽距離1.273 au. 太陽位相角10.8°で2018年10 月15日に実施されたTD1リハーサルA運用(TD1-R1-A)での熱画像を示す(図7)[9]. どの降下運用で も、表層の大部分が岩塊や長径100 mm 以上の岩 片で覆われていることが分かった. 岩塊は土砂で覆 われておらず、さざれ石のように岩石中の組織まで 観察できるものが多く存在することが分かった.ま た、一部の岩塊はやや平坦な境界を持つものも含ま れることがTIRでも確認された.

頻度は少ないものの,周囲よりも20 K以上低い,明 らかに低温の岩塊が存在することが分かった(図7) [9]. 到着前に存在を予測していたCold Spotに相当 する. この岩塊の熱慣性を輝度温度から導出すると 600~1000 tiu程度であり,典型的な炭素質コンドラ イト隕石の熱慣性 [18]と同等であることが分かった. つまり,高空隙な岩塊の中に,普通の隕石のような岩 塊がわずかに含まれている.これは同じ母天体内の深 部でより高い圧密を受けた部分で形成されたかもしれ ない.あるいは衝突破壊をもたらした衝突天体の破 片が残った外部起源の可能性も残される [25]. TIRの結果は、MASCOT搭載カメラMasCAM による表層撮像によって調査された結果と整合的で ある [26]. すなわち、大部分の岩塊の表面はカリフ ラワー状のデコボコで脆弱そうであり、また、ごく一 部の岩塊の表面は比較的平面的であり、そしてレゴ リス状の細粒土壌は見られない.また、MASCOT 搭載熱放射計MARAによって、1か所のみである がデコボコ表面の岩塊の熱慣性を1昼夜に渡って計 測された結果が約282(247~375)tiuであり [27]、 TIRの全球観測の結果と整合することが分かった. すなわちMASCOTが観測した岩塊はRyugu上の 典型的な岩塊であり、Ryuguの表面は同様な状態 が全球的に広がっているのだろう.

6. 低熱慣性の小惑星

C型小惑星Ryuguの熱慣性が約300 ± 100 tiu 程度であることが判明したが [9],同様にNASA の小惑星探査機OSIRIS-RExによるB型小惑星 101955 Bennuの観測でも同程度の低熱慣性が得 られており[28],低熱慣性は始原的小惑星で一般的 な性質である可能性が高い.小惑星のサイズと熱慣 性の関係において,大きな天体ほど低熱慣性である 原因はレゴリスの堆積によると考えられるが,小型 の小惑星が隕石よりも低熱慣性である原因は,以前 に考えられていたレゴリスの堆積による影響ではな く,高空隙な岩塊が表層を覆っているためであると 考えられる(図8) [9,21].



図7: 2018年10月15日のTD1リハーサル降下運用(TD1-R1-A)中の熱画像:a) 13:34:44 (UTC),高度78.8mでの撮像,b) a)内のCold Spotを 含む温度分布,c) 13:44:20 (UTC),高度21.9mでの撮像,d) c)内のCold Spotを含む温度分布.(原画像[9]から改編)

C型小惑星で熱慣性約300 tiuの場合,熱伝導率は 約0.1 W m⁻¹ K⁻¹,空隙率は30~50 %に相当する[9,27]. なお,Ryuguのバルク密度が1190 ± 20 kg m⁻³ [4]で あることを説明するには,炭素質コンドライト隕石 (CI:~2420 kg m⁻³やCM:~2960 kg m⁻³)[18] を 仮定すると,さらに50~60% 程度の空隙が必要 になる.Ryuguを構成する岩塊や岩片の間の隙間 (macro-porosity)は大きく見積もっても20 %以下 (実際はもっと小さい)が妥当であり,岩塊内部の空



図8:小惑星の直径と熱慣性の関係の図(原画像 [12]から改編) に到着前の予測[10],小惑星Ryuguの平均熱慣性,Cold Spotの熱慣性と典型的な炭素質コンドライト[17]との比較.

隙率(micro-porosity)が50%程度はあると考えられる.

以上より,小惑星Ryuguの表面を覆う岩塊や岩 片は,通常の隕石のバルク密度が半分になるほど の「超」高空隙で脆弱な構造であると考えられる.ま た,岩塊の周辺土壌は熱の浸み込み深さ(スキンデ プス)である約35 mmよりも大きなサイズの岩片が 大部分を占めるため,熱物性的には岩塊と同様の振 る舞いになると考えられる.岩塊や岩片で覆われる 表層はTIRの観測波長帯(約10 µm)に対して激し い表面凹凸のある状態であり,温度日変化が平坦な 特徴を示すと考えられる.

7.小惑星Ryuguの形成史

小惑星Ryuguの形成シナリオについて既に提案 されているが[15], TIRの観測によって以下のように 制約されるだろう. 1) 原始太陽系の星雲ガス中で形 成された微粒子(太陽系前駆物質も含まれる)から 付着によって超高空隙でフワフワの塵が形成され, 徐々に成長した. 2) 多少の圧密は受けるものの, 高 空隙な状態を保持したまま成長してゆき, 微惑星が 形成された [29]. 3) ある程度(数10 km以上)のサ イズになると内部で熱変成や水質変成がある程度は 進行するとしても, Ryugu母天体ではそれらに伴う



図9: 小惑星Ryuguの形成シナリオ. 大部分の岩塊が低熱慣性(高空隙率)であり、ごく一部が「普通の隕石」程度であることを説明するモデル. (原画像[9]から改編)

圧密過程は低度にしか起きなかった(圧密不完全で 高空隙な状態のまま).相対的に高温高圧となる天 体の深部では圧密がより進行し、通常の隕石が形成 された可能性はあるが、母天体の体積の大部分で は高空隙率な状態が保持された。4) 大規模な衝突 破壊によって分裂し、バラバラになる.5)破片が再 集合して、緩く寄せ集まったラブルパイル天体が形 成された.その際.元の天体の内部構造の様々な深 さにあった高空隙な物質が岩塊として表層に点在し た. Cold Spotとなる「普通の隕石」的な岩塊は深部 から来た岩塊の可能性があるが、破壊の原因となっ た衝突天体を起源とする可能性もある(岩塊にS型 小惑星的な分光特性を示すものがあり、それらは衝 突天体起源と考えられる[25]). 周辺土壌は細かい 高空隙な衝突破片であるか、岩塊がその後の隕石 衝突や熱応力によって破砕し、堆積したものである。 6) YORP効果 [30] などによる自転速度の変化等に よって、緩く寄せ集まったラブルパイルが変形・流動 して現在のコマ型の形状になった [4].

このシナリオでは,超高空隙でフワフワな塵から 出発し,地球の岩石のような稠密で硬い岩石になっ たことが一度もなく,常に高空隙であり続けたとい う仮説で,現在のRyuguのほぼ全球の岩塊が高空 隙な状態に保持されている理由を説明している [9]. これは小惑星Ryugu(および小惑星Bennu)だけ でなく,太陽系史を通じて低重力な天体では一般的 に起きる現象と捉えるのが妥当だろう.太陽系内で 現存する小惑星で低密度な天体は同様な過程で形 成され,高空隙な物質(micro-porosityが高い)で 構成されていると考えられる [31].おそらくC型小 惑星でも一般的な性質であり,炭素質隕石が大気突 入時に崩壊して固い部分のみ生き残るのはこの性質 のためと考えられる.また,高空隙率によって可視 近赤外の反射率の低下とスペクトル形状の変化を生 じるため,どの隕石のスペクトルともよく一致しない 原因にもなるだろう.

この高空隙な特徴は、太陽系初期の微惑星も同様に当てはまる。高空隙に伴う衝撃減衰の効果により、衝突時のクレータ形成や破壊の進行が低減し、 その結果として天体成長のタイムスケールを変化 させるなど、惑星形成過程にも影響を与えるだろう [32].小惑星Ryuguは塵から稠密な固い天体に至る 惑星形成過程の途中にある状態を具現するものかも しれない.

以上の議論は小惑星Ryuguの物質が炭素質 隕石と同様の物質であることを前提としている が、ESAの彗星探査機Rosettaが探査した67P/ Churumov-Gerasimenko彗星の塵の質量分析で 判明したように [33]. 有機物が半分以上を占める高 炭素質物質によって低バルク密度と低熱慣性を実現 している可能性は否定できない. これらの問題の解 決には2020年12月に帰還予定のRyuguサンプルの 分析が期待される [34].

8. まとめと今後にむけて

「はやぶさ2」搭載TIRによる,惑星探査史上初 の「熱撮像」によって,C型小惑星Ryuguを構成す る物質が典型的な炭素質コンドライト隕石よりもずっ と高空隙である特徴を捉えることに成功した.おそ らくC型小惑星に一般的な性質であり、また重力の 大きな原始惑星に成長する前の段階の微惑星にも共 通する一般的な性質であったと考えられる.小惑星 探査機「はやぶさ」で初めて人類が「ラブルパイル小 惑星」を見たのと同様に、「はやぶさ2」では「高空隙 な岩塊からなる小惑星」を確認した最初の例となっ た.この特徴は今後、惑星形成過程などに実例とし て応用されることになると期待される.

熱撮像による探査方法の有効性が実証されたこ とから、今後の探査計画においてスペクトル型の異 なる様々な物質からなる小惑星や、直径が異なり表 面重力の異なる小惑星に対して熱撮像を実施する ことは極めて有意義である。例えば「はやぶさ2」の 帰還後に運用を延長し、別のスペクトル型や直径の 小惑星を訪問することができれば、新たな知見が得 られるだろう [35]. 欧州の小惑星探査計画Heraは 二重小惑星Didymosの探査を実施する予定である が、Heraに熱撮像カメラの搭載が計画されており [36]、実現すれば史上初のS型小惑星の熱撮像が実 現でき、太陽系科学の発展に大きく貢献できると期 待される。

謝辞

小惑星探査機「はやぶさ2」の開発や運用を通じ て本研究の実現に協働して頂いた全ての「はやぶさ 2」プロジェクトの関係者,科学的議論に参加した 「はやぶさ2」国際サイエンスチームのメンバーの多 大なる協力に感謝する.本研究は日本学術振興会 科学研究費(JP26287108, JP17H06459),および JSPS Core-to-Coreプログラム「惑星科学国際研 究ネットワークの構築」の助成を受けている.

参考文献

- [1] Tholen, D. J., 1989, in Asteroids II, 1139.
- [2] DeMeo, F. E. et al., 2015, in Asteroids IV, 13.
- [3] Tsuda, Y. et al., 2020, Acta Astronaut. 171, 42.
- [4] Watanabe, S. et al., 2019, Science 364, 268.
- [5] Veverka, J. et al., 1999, Icarus 140, 3.
- [6] Fujiwara, A. et al., 2006, Science 312, 1330.
- [7] Okada, T. et al., 2017, Space Sci. Rev. 208, 255.

- [8] Fukuhara, T. et al., 2011, Earth Planets Space 63, 1009.
- [9] Okada, T. et al., 2020, Nature 579, 518.
- [10] e.g., Mueller, T. G. et al., 2017, Astron. Astrophys. 599, A103.
- [11] Yoshikawa, M. et al., 2014, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan 12, 29
- [12] Delbo, M. et al., 2015, in Asteroids IV, 107.
- [13] Okada, T. et al., 2018, Planet. Space Sci. 158, 46.
- [14] Okada, T., 2020, Appl. Sci. 10, 2158.
- [15] Sugita, S. et al., 2019, Science 364, 552.
- [16] Saito, J. et al., 2006, Science 312, 1341.
- [17] Takita, J. et al., 2017, Space Sci. Rev. 208, 287.
- [18] Flynn, G. J. et al., 2018, Chemie der Erde 78, 269.
- [19] Rozitis, B. and Green, S. F., 2011, Mon. Not. R. Astron. Soc. 415, 2042.
- [20] Shimaki, Y. et al., 2019, Lunar Planet. Sci. Conf. 50, 1724.
- [21] Shimaki, T. et al., 2020, Icarus 348, 113835.
- [22] Groussin, O. et al., 2013, Icarus 220, 580.
- [23] Yoshimitsu, T. et al., 2015, in 11th Low Cost Planetary Missions Conf. Abstract.
- [24] Ho, T.-M. et al., 2017, Space Sci. Rev., 208, 339.
- [25] Tatsumi, E. et al., (in revision), Nat. Astronon.
- [26] Jaumann, R. et al., 2019, Science 365, 817.
- [27] Grott, M. et al., 2019, Nat. Astron. 3, 971.
- [28] DellaGiustina, D. N. and Emery, J. et al., 2019, Nat. Astron. 3, 341.
- [29] Arakawa, S. et al., 2017, Astron. Astrophys. 608, L7.
- [30] Rubincam, D., 2000, Icarus 148, 2.
- [31] Britt, D. T. et al., 2002, in Asteroid III, 485.
- [32] Housen, K. R. and Holsapple, K. A., 2011, Icarus, 856.
- [33] Bardyn, A. et al., 2017, Mon. Mot. R. Astron, Soc. 469, S712.
- [34] Tachibana, S. et al., 2014., Geochem. J. 48, 571.
- [35] 三桝裕也ほか, 2020, 第20回宇宙科学シンポジウム, P1.39
- [36] Okada, T. et al., 2020, Lunar Planet. Sci. Conf. 51, 1355.