

[E] 口頭発表 | セッション記号 P (宇宙惑星科学) : P-PS 惑星科学

■ 2019年5月28日(火) 10:45 ~ 12:15 | 会場 A01 東京ベイ幕張ホール

[P-PS03] Solar System Small Bodies: A New Frontier Arising Hayabusa 2, OSIRIS-REx and Other Projects

コンピーナ:石黒 正晃(ソウル大学物理天文学科)、中本 泰史(東京工業大学)、安部 正真(宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所)、Olivier S Barnouin(Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory)、座長:Masateru Ishiguro(Seoul National University)

2018年6月、小惑星探査機「はやぶさ2」が約3年半の航海を経て、目的地リュウグウに到着した。また、別の小惑星探査機「OSIRIS-REx」も探査天体Bennuに間もなく到着しようとしている。これらの探査によって、太陽系小天体研究は、今まさに新しい局面を迎えようとしている。本セッションは、2012年から開催されてきたもので、これまでに実験、観測、探査、理論、さらにサンプル分析の観点から太陽系小天体の研究に関して議論を行ってきた。特に今回は、はやぶさ2とOSIRIS-RExの初期成果を中心に太陽系小天体に関する最新研究を持ち寄り、今後の展望を議論することを目的とする。はやぶさ2、OSIRIS-REx以外の研究成果発表も歓迎する。

10:45 ~ 11:00

[PPS03-01] ラブルパイル小惑星リュウグウの形状と起源

★招待講演

*渡邊 誠一郎^{1,5}、平林 正俊²、平田 成³、平田 直之⁴、野口 里奈⁵、嵩生 有理⁵、池田 人⁶、巽 瑛理⁷、吉川 真⁵、菊地 翔太⁵、藪田 ひかる⁸、中村 智樹⁹、橘 省吾^{7,5}、石原 吉明¹⁰、諸田 智克¹、北里 宏平³、坂谷 尚哉⁵、松本 晃治^{11,12}、和田 浩二¹³、千秋 博紀¹³、本田 親寿³、道上 達広¹⁴、竹内 央⁵、神山 徹¹⁵、本田 理恵¹⁶、Robert Gaskell¹⁷、Eric Palmer¹⁷、Olivier Barnouin¹⁸、Patrick Michel¹⁹、Paul Abell²⁰、山本 幸生⁵、田中 智⁵、白井 慶⁵、松岡 萌⁵、杉田 精司^{5,7}、岡田 達明⁵、並木 則行¹¹、荒川 政彦⁴、石黒 正晃²¹、小川 和律⁴、照井 冬人⁵、佐伯 孝尚⁵、中澤 暁⁵、津田 雄一⁵、はやぶさ2サイエンスチーム (1.名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻、2.オーバン大学、3.会津大学、4.神戸大学、5.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、6.宇宙航空研究開発機構 研究開発部門、7.東京大学、8.広島大学、9.東北大学、10.国立環境研究所、11.国立天文台、12.総合研究院大学、13.千葉工業大学、14.近畿大学、15.産業技術総合研究所、16.高知大学、17.惑星科学研究所、18.ジョンホプキンス大学、19.コート・ダジュール大学/観測所、20.NASA ジョンソンスペースセンター、21.ソウル大学)

11:00 ~ 11:15

[PPS03-02] Results of Hayabusa2 Near Infrared Spectroscopy at Asteroid Ryugu

*岩田 隆浩¹、北里 宏平²、安部 正真¹、大竹 真紀子¹、仲内 悠祐¹、松岡 萌¹、津村 耕司³、松浦 周二⁴、Riu Lucie¹、NIRS3 チーム (1.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、2.会津大学、3.東北大学、4.関西学院大学)

11:15 ~ 11:30

[PPS03-03] はやぶさ2 SCI/DCAM3による人工クレーターの形成と観測

★招待講演

*荒川 政彦¹、佐伯 孝尚²、門野 敏彦³、高木 靖彦⁴、和田 浩二⁵、飯島 祐一²、今村 裕志²、岡本 千里¹、嵩生 有理²、白井 慶²、中澤 暁²、早川 雅彦²、平田 成⁶、矢野 創²、澤田 弘崇²、小川 和律¹、石橋 高⁵、木村 宏⁵、小林 正規⁵、坂谷 尚哉²、早川 基²、本田 理恵⁷、杉田 精司⁸、諸田 智克⁹、亀田 真吾¹⁰、巽 瑛理⁸、本田 親寿⁶、横田 康弘²、神山 徹¹¹、山田 学⁵、鈴木 秀彦¹²、吉岡 和夫¹³、長 勇一郎⁸、松岡 萌² (1.神戸大学大学院理学研究科、2.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、3.産業医科大学医学部、4.愛知東邦大学、5.千葉工業大学惑星探査研究センター、6.会津大学 コンピュータ理工学部、7.高知大学自然科学系理工学部、8.東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、9.名古屋大学大学院環境学研究科、10.立教大学理学部、11.産業技術総合研究所、12.明治大学理工学部物理学科、13.東京大学大学院新領域創成科学研究科)

11:30 ~ 11:45

[PPS03-04] サイズ分布をもつガラスビーズ層へのクレーター形成実験：小惑星Ryuguのクレーター形成過程の解明

*保井 みなみ¹、荒川 政彦¹、長谷川 直²、山本 裕也¹、杉村 瞭¹ (1.神戸大学大学院理学研究科、2.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所)

11:45 ~ 12:00

[PPS03-05] Enhancement of impact heating in strength-supported media

*黒澤 耕介¹、玄田 英典²、脇田 茂²、Thomas Davison³、兵頭 龍樹²、中村 智樹⁴ (1.千葉工業大学 惑星探査研究センター、2.東京工業大学 地球生命研究所、3.Department of Earth Science & Engineering, Imperial College London、4.東北大学 地球惑星物質科学科・地学専攻)

12:00 ~ 12:15

[PPS03-06] Global Thermal Inertia and Surface Roughness of Asteroid 162173 Ryugu by TIR on Hayabusa2

*寫生 有理¹、千秋 博紀²、坂谷 尚哉¹、岡田 達明^{1,3}、福原 哲哉⁴、田中 智¹、田口 真⁴、荒井 武彦⁵、出村 裕英⁶、小川 佳子⁶、須古 健太郎⁶、関口 朋彦⁷、神山 徹⁸、滝田 隼⁹、松永 恒雄¹⁰、今村 剛³、和田 武彦¹、長谷川 直¹ (1.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、2.千葉工業大学、3.東京大学、4.立教大学、5.足利大学、6.会津大学、7.北海道教育大学、8.産業技術総合研究所、9.北海道北見北斗高校、10.国立環境研究所)

ラブルパイル小惑星リュウグウの形状と起源

The shape and origin of the rubble-pile asteroid Ryugu

*渡邊 誠一郎^{1,5}、平林 正俊²、平田 成³、平田 直之⁴、野口 里奈⁵、鳶生 有理⁵、池田 人⁶、巽 瑛理⁷、吉川 真⁵、菊地 翔太⁵、藪田 ひかる⁸、中村 智樹⁹、橘 省吾^{7,5}、石原 吉明¹⁰、諸田 智克¹、北里 宏平³、坂谷 尚哉⁵、松本 晃治^{11,12}、和田 浩二¹³、千秋 博紀¹³、本田 親寿³、道上 達広¹⁴、竹内 央⁵、神山 徹¹⁵、本田 理恵¹⁶、Robert Gaskell¹⁷、Eric Palmer¹⁷、Olivier Barnouin¹⁸、Patrick Michel¹⁹、Paul Abell²⁰、山本 幸生⁵、田中 智⁵、白井 慶⁵、松岡 萌⁵、杉田 精司^{5,7}、岡田 達明⁵、並木 則行¹¹、荒川 政彦⁴、石黒 正晃²¹、小川 和律⁴、照井 冬人⁵、佐伯 孝尚⁵、中澤 暁⁵、津田 雄一⁵、はやぶさ2 サイエンスチーム

*Sei-ichiro WATANABE^{1,5}, Masatoshi Hirabayashi², Naru Hirata³, Naoyuki Hirata⁴, Rina Noguchi⁵, Yuri Shimaki⁵, Hitoshi Ikeda⁶, Eri Tatsumi⁷, Makoto Yoshikawa⁵, Shota Kikuchi⁵, Hikaru Yabuta⁸, Tomoki Nakamura⁹, Shogo Tachibana^{7,5}, Yoshiaki Ishihara¹⁰, Tomokatsu Morota¹, Kohei Kitazato³, Naoya Sakatani⁵, Koji Matsumoto^{11,12}, Koji Wada¹³, Hiroki Senshu¹³, Chikatoshi Honda³, Tatsuhiro Michikami¹⁴, Hiroshi Takeuchi⁵, Toru Kouyama¹⁵, Rie Honda¹⁶, Robert Gaskell¹⁷, Eric Palmer¹⁷, Olivier S. Barnouin¹⁸, Patrick Michel¹⁹, Paul Abell²⁰, Yukio Yamamoto⁵, Satoshi Tanaka⁵, Kei Shirai⁵, Moe Matsuoka⁵, Seiji Sugita^{5,7}, Tatsuaki Okada⁵, Noriyuki Namiki¹¹, Masahiko Arakawa⁴, Masateru Ishiguro²¹, Kazunori Ogawa⁴, Fuyuto Terui⁵, Takanao Saiki⁵, Satoru Nakazawa⁵, Yuichi Tsuda⁵, Hayabusa2 Science Team

1. 名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻、2. オーバン大学、3. 会津大学、4. 神戸大学、5. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、6. 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門、7. 東京大学、8. 広島大学、9. 東北大学、10. 国立環境研究所、11. 国立天文台、12. 総合研究院大学、13. 千葉工業大学、14. 近畿大学、15. 産業技術総合研究所、16. 高知大学、17. 惑星科学研究所、18. ジョンホプキンス大学、19. コート・ダジュール大学/観測所、20. NASA ジョンソンスペースセンター、21. ソウル大学

1. Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Nagoya University, 2. Auburn University, 3. University of Aizu, 4. Kobe University, 5. ISAS, JAXA, 6. Research and Development Directorate, JAXA, 7. University of Tokyo, 8. Hiroshima University, 9. Tohoku University, 10. National Institute for Environmental Studies, 11. National Astronomical Observatory of Japan, 12. SOKENDAI, 13. Chiba Institute of Technology, 14. Kindai University, 15. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 16. Kochi University, 17. Planetary Science Institute, 18. John Hopkins University, 19. Universite Cote d'Azur, Observatoire de la Cote d'Azur, 20. NASA, Johnson Space Center, 21. Seoul National University

はやぶさ2は2018年6月に地球接近小惑星リュウグウに到着し、高度20 kmもしくはそれ以下の高度からのリモートセンシング観測を行ってきた[1, 2]。また、ローバーMINERVA-IIA、ランダーMASCOTの投下・観測に成功した。はやぶさ2搭載の可視カメラONC-Tの画像から、短期間で信頼できるものを作成するためにSPC[3]とSfM[4]という2つの手法で形状モデルを作成した。両者の比較から、高緯度地域や岩塊周辺を除いて2m以内の精度で形状復元ができていたことを確認した[1]。

作成されたSPC形状モデルから得られたリュウグウの全体積は $0.377 \pm 0.005 \text{ km}^3$ であり、2018年8月の重力計測観測から求められた質量は $(4.50 \pm 0.06) \times 10^{11} \text{ kg}$ であった。これより、バルク密度は $1.19 \pm 0.03 \text{ g cm}^{-3}$ と求められた[1]。これは波長 $0.7 \mu\text{m}$ の吸収（水質変成）を持つCgh, Ch型の小惑星のうち質量測定されているもののバルク密度範囲（ $1.6 - 2.4 \text{ g cm}^{-3}$ ）より有意に低い、その吸収を持たず非加熱氷小惑星起源の可能性のあるBCG型小惑星（B, Cb, C, Cg型）のバルク密度の測定範囲（ $0.8 - 1.5 \text{ g cm}^{-3}$ ）とは同程度である[5]。このことは、リュウグウはCb型のスペクトルを持ち、 $0.7 \mu\text{m}$ の吸収は見られないことと調和的である[2, 6]。リュウグウ表面には含水鉱物が存在することがNIRS3の分光観測から明らかになった[6]。リュウグウの放

射平衡温度は250 K程度とリュウグウ中心圧力 (~8 Pa) での氷の昇華温度 (230 K) よりも高く、熱拡散時間も地球接近小惑星としての寿命よりずっと短いため、水氷が内部にあるとは考えにくい。ただし、リュウグウが小惑星帯にあった時期に水氷を保持していて、それが抜けたために高空隙率となった可能性はある。

リュウグウの空隙率は、CMコンドライトの粒子密度[7]を仮定すると57–63%、CIコンドライトOrgueilのそれ[7]を仮定すると50–52%となる。この空隙率は、ラブルパイル小惑星イトカワ (44±4%) [8, 9]よりも高く、クレーターからの放出では説明できない大きなボルダーが表面に散在することと合わせて、リュウグウがラブルパイル天体であり、より大きな小惑星の破片が再集積してできたことを強く支持する。

はやぶさ2の観測により、リュウグウはいわゆるtop shapeをもち、顕著な赤道リッジを持つことが明らかになった。地球接近小惑星は地上レーダー観測からいくつもtop shapeを持つものが見つかるが、探査機が訪れたのはリュウグウが最初である。OSIRIS-RExが近傍探査しているBennuが2番目だが、リュウグウほど顕著な赤道リッジを持ってはいない。

リュウグウの現在の自転周期は約7.63時間で、中緯度帯が重力ポテンシャルの極小部分となっている。しかし、現在の形状のままリュウグウの自転周期を3.5時間にすると、赤道が重力ポテンシャルの極小となり、重力ポテンシャル面からの表面傾斜は広い範囲で31°程度となることが、明らかになった。これは、かつて高速回転していた時代に遠心力による変形でリュウグウが形成されたことを示唆する。変形は、形成期の再集積時[10]、もしくは後期になってYORP効果などによるスピナップ時に生じたと考えられる[11]。後者の場合、変形モードは表面地滑りもしくは内部変形が考えられる。表面粒子に大きなサイズ分別が見られないこと、赤道帯が新鮮な物質でできている可能性があることなどは、内部変形モードと調和的である。

NIRS3が観測した近赤外吸収は熱変成/衝撃変性を受けたCI/CMコンドライトと相似性が高い[6]。地上落下隕石に占めるこれら相似な隕石の割合はかなり低い一方、BCG型小惑星は小惑星メインベルトに豊富に存在する。今回、BCG型小惑星リュウグウが、高空隙率で、強度が弱いことが示唆されたが、このような小惑星破片が地球大気圏に突入した場合、破壊され地上に到達しにくいことが予想される。これはBCG型小惑星を母天体とする隕石が少ないことを説明し、惑星間塵にその対応物を探す意義[5]を示していると考えられる。地球への水・有機物の供給源を考える上で、炭素質の小惑星の組成のみでなく、その強度や内部状態の理解も重要であり、はやぶさ2およびOSIRIS-RExの更なる観測および帰還試料分析が、その鍵を握るはずである。

References: [1] S. Watanabe+ (2019) *Science*, under review, [2] S. Sugita+ (2019) *Science*, under review, [3] R.W. Gaskell+ (2008) *Meteoritics & Planet Sci.*, 43, 1049. [4] R. Szeliski (2010) *Computer Vision: Algorithms and Applications* (Science & Business Media, Springer, New York), [5] P. Vernazza+ (2015) *Astrophys. J.*, 806, 204, [6] K. Kitazato+ (2019) *Science*, under review, [7] R.J. Macke+ (2011) *Meteoritics & Planet Sci.*, 46, 1842, [8] A. Fujiwara+ (2006) *Science* 312, 1330, [9] A. Tsuchiyama+ (2011), *Science*, 333, 1125, [10] P. Michel+ (2001) *Science*, 294, 1696, [11] K. J. Walsh (2018) *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 56, 593.

キーワード：惑星探査、C型小惑星、ラブルパイル天体、はやぶさ2

Keywords: Planetary exploration, C-type asteroids, Rubble-pile objects, Hayabusa2

Results of Hayabusa2 Near Infrared Spectroscopy at Asteroid Ryugu

*岩田 隆浩¹、北里 宏平²、安部 正真¹、大竹 真紀子¹、仲内 悠祐¹、松岡 萌¹、津村 耕司³、松浦 周二⁴、Riu Lucie¹、NIRS3 チーム

*Takahiro Iwata¹, Kohei Kitazato², Masanao Abe¹, Makiko Ohtake¹, Yusuke Nakauchi¹, Moe Matsuoka¹, KOHJI TSUMURA³, Shuji Matsuura⁴, Lucie Riu¹, NIRS3 Team

1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、2. 会津大学、3. 東北大学、4. 関西学院大学

1. Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 2. The University of Aizu, 3. Tohoku University, 4. Kwansai Gakuin University

The Near Infrared Spectrometer (NIRS3) is installed on the Hayabusa2 spacecraft to observe the target C-type asteroid 162173 Ryugu at near infrared wavelengths of 1.8 to 3.2 μm . It aims to obtain reflectance spectra in order to detect absorption bands of hydrated and hydroxide minerals in the 3 μm -band spectral region. Spectra obtained during the cruising and proximity-operation phases have revealed that the performance of NIRS3, using the newly developed linear-image sensor with indium arsenide (InAs) photodiodes, are good enough as expected from the ground performance tests. Prior to the touch down of Hayabusa2 on the surface of Ryugu, NIRS3 has completed global observations from the Home Position, where the altitude is about 20 km above the surface. NIRS3 also performed low-altitude observations in several opportunities, such as the separation operation of the small rovers and lander, during which the lowest altitude was less than 30 m. Analyzing the spectra, NIRS3 contributed to estimate the temperature of the asteroid surface. After removing the thermal emission, we successfully detected a weak and narrow absorption feature centered at 2.72 μm , which suggests the existence of hydroxyl (OH)-bearing minerals formed by aqueous alteration. This feature is, however, almost uniform over the whole surface in terms of band depth and position. Additionally, it is remarkable that the albedo of Ryugu is extremely low. These results imply the following hypotheses; 1) dehydration caused by heating or space weathering, or 2) masking effects by dark materials on the surface. We will argue about the inspection of the evolution scenario of Ryugu inferred from the above results.

キーワード：はやぶさ2、リュウグウ、NIRS3、含水鉱物

Keywords: Hayabusa2, Ryugu, NIRS3, hydrated mineral

はやぶさ 2 SCI/DCAM3による人工クレーターの形成と観測

Impact experiment on asteroid Ryugu by Small-Carry on impactor of Hayabusa-2 and observation of the impact ejecta by a Deployable CAMera-3

*荒川 政彦¹、佐伯 孝尚²、門野 敏彦³、高木 靖彦⁴、和田 浩二⁵、飯島 祐一²、今村 裕志²、岡本 千里¹、
 嵩生 有理²、白井 慶²、中澤 暁²、早川 雅彦²、平田 成⁶、矢野 創²、澤田 弘崇²、小川 和律¹、石橋
 高⁵、木村 宏⁵、小林 正規⁵、坂谷 尚哉²、早川 基²、本田 理恵⁷、杉田 精司⁸、諸田 智克⁹、亀田 真吾¹⁰、
 巽 瑛理⁸、本田 親寿⁶、横田 康弘²、神山 徹¹¹、山田 学⁵、鈴木 秀彦¹²、吉岡 和夫¹³、長 勇一郎⁸
 、松岡 萌²

*Masahiko Arakawa¹, Takanao Saiki², Toshihiko Kadono³, Yasuhiko Takagi⁴, Koji Wada⁵, Yu-ichi Iijima²,
 Hiroshi Imamura², Chisato Okamoto¹, Yuri Shimaki², Kei Shirai², Satoru Nakazawa²,
 Masahiko Hayakawa², Naru Hirata⁶, Hajime Yano², Hiroataka Sawada², Kazunori Ogawa¹, Ko
 Ishibashi⁵, Hiroshi Kimura⁵, Masanori Kobayashi⁵, Naoya Sakatani², Hajime Hayakawa², Rie
 Honda⁷, Seiji Sugita⁸, Tomokatsu Morota⁹, Shingo Kameda¹⁰, ERI TATSUMI⁸, Chikatoshi Honda⁶,
 yokota yasuihiro², Toru Kouyama¹¹, Manabu Yamada⁵, Hidehiko Suzuki¹², Kazuo Yoshioka¹³,
 Yuichiro Cho⁸, Moe Matsuoka²

1. 神戸大学大学院理学研究科、2. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、3. 産業医科大学医学部、4. 愛知東邦大学、5. 千葉工業大学惑星探査研究センター、6. 会津大学 コンピュータ理工学部、7. 高知大学自然科学系理工学部門、8. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、9. 名古屋大学大学院環境学研究科、10. 立教大学理学部、11. 産業技術総合研究所、12. 明治大学理工学部物理学科、13. 東京大学大学院新領域創成科学研究科

1. Graduate School of Science, Kobe University, 2. Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3. University of Occupational and Environmental Health, 4. Aichi Toho University, 5. Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 6. Dep. of Computer Science and Engineering, Univ. of Aizu, 7. Department of Science and Technology, System of Natural Science, Kochi University, 8. Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 9. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 10. School of Science, Rikkyo University, 11. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 12. Department of physics, Meiji university, 13. Graduate School of frontier Science, The University of Tokyo

A small carry-on impactor (SCI) equipped on Hayabusa2 is scheduled to be propelled toward to the surface of asteroid Ryugu this spring. Cratering process on Ryugu made by the impactor will simultaneously be observed by a deployable camera 3 (DCAM3) detached from Hayabusa2. The mission objective of the impactor is to excavate the asteroid to expose a subsurface material as ejecta deposits around the crater. Thus, not only it enables us to give a good opportunity for obtaining a fresh or subsurface material by a sampler system, remote sensing instruments such as ONC, TIR, NIRS3 onboard Hayabusa2 will also have a good chance to observe the exposed subsurface material. Furthermore, this impact experiment on Ryugu is also a rare opportunity to verify the crater scaling law in the microgravity environment on the real asteroid materials, and is expected to enable us to improve the conventional scaling law, especially for the crater size and the ejecta velocity distribution.

After arrival at Ryugu, the surface morphology observation through remote sensing has turned out that a plenty of boulders cover throughout the surface, and many of the boulders are larger than 10 m. These boulders are distributed almost uniformly and the size frequency distribution of the boulders is a power law distribution with the power law index around -1, indicating relatively large boulders are dominant on

the surface. Therefore, taking into account that the precision of an actual impact point toward an aiming point expands several 10 m, the impactor possibly collides with a large boulder, otherwise with small boulders having the power law size distribution, wherever the impactor would aim at on the surface of Ryugu. If the impactor collides with a large boulder, a crater should be formed in the strength regime, and if the impactor collides into a finer-boulder area, a crater will be formed in the gravity regime. The DCAM3 was designed for the observation of not only the impact cratering in the strength regime but also that in the gravity regime.

We believe that we will success to observe impact ejecta induced by the impactor when the SCI and DCAM3 operations are conducted as scheduled. We are planning to present a first report of the DCAM3 observation in this talk, and discuss how to search the impact point on the Ryugu surface using the DCAM3 images, beforehand the onboard imaging instruments. Moreover, the morphology of the ejecta curtain imaged by DCAM3 will bring us a lot of information about the crater formation process. We report the surface condition around the impact point, such as a large block or a small-boulders area, and an excavated area corresponding to the crater size. The DCAM3 will also observe individual dusts in the ejecta curtain to obtain information of the ejecta velocity distribution, so that we may have a chance to introduce these images. However, please note that this presentation strongly depends on the success of the SCI/DCAM3 operation.

キーワード：小惑星リュウグウ、衝突実験、小型衝突装置、分離カメラ、ラブルパイル天体

Keywords: Asteroid Ryugu, Impact Experiment, Small carry-on impactor, Deployable camera3, Rubble pile body

サイズ分布をもつガラスビーズ層へのクレーター形成実験：小惑星 Ryuguのクレーター形成過程の解明

Impact cratering experiments on glass beads with bead size frequency distribution: Implications for cratering process on asteroid Ryugu

*保井 みなみ¹、荒川 政彦¹、長谷川 直²、山本 裕也¹、杉村 瞭¹

*Minami Yasui¹, Masahiko Arakawa¹, Sunao Hasegawa², Yuya Yamamoto¹, Ryo Sugimura¹

1. 神戸大学大学院理学研究科、2. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

1. Graduate School of Science, Kobe University, 2. ISAS, JAXA

探査機はやぶさ2によって、小惑星Ryugu上には直径100mオーダーの巨大衝突クレーターは観察されているが、数m以下の衝突クレーターが非常に少ないことがわかっている。この原因の1つに、小さなクレーターが形成されない表面環境をRyuguが持っているということが挙げられる。Ryuguの表面は、ほぼ全ての領域において、岩石物質の衝突破壊実験で得られる衝突破片に似たベキ乗のサイズ頻度分布を持つ岩塊で覆われている[1]。このような表層に衝突が起こった場合、衝突体である小天体がそれよりも大きなサイズの岩塊に衝突すると、その岩塊が破壊され、クレーターが形成されにくくなることが考えられる。弾丸より大きなサイズの標的粒子を用いた先行研究はいくつかあり、弾丸と標的粒子のサイズ比が大きくなるほど、クレーターサイズが小さくなることが報告されている[e.g., 2]。しかし、Ryuguを始めとした小惑星上の岩塊サイズ頻度分布を持つ標的を用いたクレーター実験の例はない。そこで本研究では、サイズ頻度分布をもつ粒子層に対するクレーター形成実験を行い、粒子層のサイズ頻度分布とクレーターサイズの関係性を調べ、クレーター形成効率が低下する条件を明らかにした。

実験は、神戸大学に設置された縦型一段式軽ガス銃と、宇宙科学研究所に設置された縦型二段式軽ガス銃を用いた。標的には直径0.1, 1, 3, 10 mmのガラスビーズを用いて、2種類の単一ビーズ層（0.1 mmと3 mm）と2種類の混合ビーズ層（0.1-10 mmの4種混合と1-10 mmの3種混合）を用意した。宇宙科学研究所で行った実験は4種混合のみを用いた。混合ビーズ層の各ビーズの質量は等量である。神戸大学では直径2 mmまたは3 mmの鉄球を弾丸とし、衝突速度は53~181 m/sとした。宇宙科学研究所では直径1 mmのアルミ球を弾丸とし、衝突速度は1.2~4.4 km/sとした。衝突の様子は高速カメラで撮影し、弾丸の跳ね返りやビーズが飛散する様子を観察した。

衝突の様子を調べたところ、単一ビーズ層では弾丸が標的ビーズより大きい場合（0.1 mm）は、円錐形に放射状のエジェクタカーテンが確認された。弾丸が標的ビーズより小さい場合（3mm）は、無傷のビーズがより低速で噴出する様子が確認された。混合ビーズ層では、4種混合の場合は0.1 mmビーズが他のビーズの隙間を通して、霧状に噴出する様子が確認された。また、両混合層ともにほとんどの場合において、弾丸が跳ね返る様子が確認された。さらに、10 mmビーズに弾丸が衝突した場合、エジェクタの量が極端に少なくなることがわかった。形成されたクレーターを観察したところ、単一ビーズ層は逆円錐形のクレーターが形成され、非常に浅いことがわかった。一方、混合ビーズ層はリムがはっきりと確認できず、クレーター内部には10 mmビーズが多数埋もれているのが確認できた。

このクレーターサイズをノギスで計測し、クレータースケール則に適用した。クレータースケール則は規格化クレーター半径 $\pi_R (=R(\rho/m)^{1/3})$ で R はクレーター半径、 ρ は標的密度、 m は弾丸質量）と規格化重力 $\pi_2 (=ga/U^2$ で g は重力加速度、 a は弾丸半径、 U は衝突速度) を用いて、 $\pi_R = a \cdot \pi_2^{-b}$ と表される。実験の結果、単一0.1 mmビーズ層が最も規格化半径が大きくなり、単一3 mmビーズ層と混合ビーズ層（10 mmビーズに衝突しない場合）が0.1 mmビーズ層に比べて約0.9倍になることがわかった。さらに、混合ビーズ層で弾丸が10 mmビーズに衝突した場合は、約0.7倍になることがわかった。

今回の実験では、単一0.1 mmビーズ層のスケール則 ($a=0.58, b=0.21$) を用いて、他の標的のスケール則を説明する改良型スケール則を構築することができた。今回、弾丸が跳ね返る様子が確認されたことから、弾丸が3 mmビーズまたは10 mmビーズに衝突して運動量が輸送され、3 mmビーズまたは10 mmビーズがより

低速で標的に潜り込み、クレーター孔を形成するという仮定を用いて、弾丸の反発係数と運動量保存則を用いたクレーター則を構築した。その結果、3 mmビーズ、10 mmビーズのどちらのビーズに衝突したと仮定した場合でも、反発係数が0.5-1の範囲に本研究の結果が分布することがわかった。

[1] 坂谷他, 第2回水惑星学全体会議, 神戸大学, 2018年12月. [2] Tatsumi & Sugita, Icarus 300, 227-248, 2018.

キーワード：クレーター形成過程、小惑星、岩塊、サイズ頻度分布、クレータースケール則

Keywords: cratering mechanism, asteroids, boulders, size frequency distribution, crater scaling law

Enhancement of impact heating in strength-supported media

*黒澤 耕介¹、玄田 英典²、脇田 茂²、Thomas Davison³、兵頭 龍樹²、中村 智樹⁴

*Kosuke Kurosawa¹, Hidenori Genda², Shigeru Wakita², Thomas M Davison³, Ryuki Hyodo², Tomoki Nakamura⁴

1. 千葉工業大学 惑星探査研究センター、2. 東京工業大学 地球生命研究所、3. Department of Earth Science & Engineering, Imperial College London、4. 東北大学 地球惑星物質科学科・地学専攻

1. Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2. Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 3. Department of Earth Science & Engineering, Imperial College London, 4. Department of Earth Science, Tohoku University

Hypervelocity mutual collisions between small bodies, which include the asteroid Ryugu, occur throughout the history of the solar system. A strong compression and thermal pulse caused by an impact can produce various unique features, such as a change in spectral properties, mosaicism, planar deformation features, high-pressure minerals, atomic diffusion, volatile loss, shock veins, impact melt, and so on. We can obtain these features in samples returned from Ryugu, collected by the Hayabusa2 spacecraft. When we have a reliable model connecting the degree of shock metamorphism with the impactor/target conditions, we can reveal the impact history of Ryugu more correctly.

Frequently, the table from Stöffler et al. (1991, 2018) is used to deduce the shock stage of meteorites using observed shock features, which are subsequently used to infer impact velocities on target bodies. Recently, Kurosawa and Genda (2018) reported that the degree of heating in low-velocity impacts (<10 km/s) is expected to be much higher than previously expected. This is caused by the irreversible heating during plastic deformation against material strength. Low-velocity impacts do not produce large-scale impact melting, but trigger a comminution of both impactor and target materials. Although the materials experiencing compression do not have a tensile strength, they still have a compressive one. Thus, the required impact velocities for producing the unique features produced mainly by the rise in temperature is greatly lowered as shown by Kurosawa and Genda (2018). Another work also confirmed the importance of plastic deformation during impacts to a target embedding hydrous minerals (Wakita and Genda 2019). The experienced temperature at a given shock stage defined by Stöffler's table would be revised to somewhat higher temperatures, which would mean that impact histories derived from shock features using the previous table would need to be revised. For example, the target bodies are likely to experience many fewer high-speed energetic impacts than previously expected.

We are planning to revise the Stöffler's table by using the state-of-the-art numerical shock physics code, iSALE, which includes both recent equation-of-state (EOS) models and various constitutive models. The Hayabusa2 spacecraft is planning to return to Earth with Ryugu samples in 2020. The revised table would largely help to reproduce the impact history of Ryugu.

In the presentation, we will introduce the work done by Kurosawa and Genda (2018) using the iSALE-2D model and will present some preliminary results from the three-dimensional (3D) model. We newly investigated the effects of impact obliquity using iSALE-3D. As a preliminary result, the enhancement of the impact heating in strength-supported media at oblique impacts becomes larger than the case at vertical impacts to the tangent plane. Although it is widely accepted that the degree of heating correlates well with the vertical component of the impact velocity, our preliminary results show that oblique impacts (45-degrees) produce nearly the same amount of heated volume as vertical impacts do. We are also going to discuss the strategy for reproducing Ryugu's impact history.

Acknowledgement: We appreciate the developers of iSALE, including G. Collins, K. Wünnemann, B. Ivanov, J. Melosh, and D. Elbeshausen.

キーワード：衝突、衝突加熱、数値衝突計算、リュウグウの衝突史

Keywords: Hypervelocity impacts, Impact heating, Shock physics code, Ryugu' s impact history

Global Thermal Inertia and Surface Roughness of Asteroid 162173 Ryugu by TIR on Hayabusa2

* 寫生 有理¹、千秋 博紀²、坂谷 尚哉¹、岡田 達明^{1,3}、福原 哲哉⁴、田中 智¹、田口 真⁴、荒井 武彦⁵、出村 裕英⁶、小川 佳子⁶、須古 健太郎⁶、関口 朋彦⁷、神山 徹⁸、滝田 隼⁹、松永 恒雄¹⁰、今村 剛³、和田 武彦¹、長谷川 直¹

* Yuri Shimaki¹, Hiroki Senshu², Naoya Sakatani¹, Tatsuaki Okada^{1,3}, Tetsuya Fukuhara⁴, Satoshi Tanaka¹, Makoto Taguchi⁴, Takehiko Arai⁵, Hirohide Demura⁶, Yoshiko Ogawa⁶, Kentaro Suko⁶, Tomohiko Sekiguchi⁷, Toru Kouyama⁸, Jun Takita⁹, Tsuneo Matsunaga¹⁰, Takeshi Imamura³, Takehiko Wada¹, Sunao Hasegawa¹

1. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、2. 千葉工業大学、3. 東京大学、4. 立教大学、5. 足利大学、6. 会津大学、7. 北海道教育大学、8. 産業技術総合研究所、9. 北海道北見北斗高校、10. 国立環境研究所

1. Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 2. Chiba Institute of Technology, 3. University of Tokyo, 4. Rikkyo University, 5. Ashikaga University, 6. University of Aizu, 7. Hokkaido University of Education, 8. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 9. Hokkaido Kitami Hokuto High School, 10. National Institute for Environmental Studies

Thermal infrared imager TIR onboard the Hayabusa2 spacecraft acquired thermal images of the asteroid 162173 Ryugu for one asteroid rotation during Mid-altitude operation on August 1, 2018, with around 5 m/pixel resolution. The thermal images were converted to brightness temperature maps on a shape model based on the ground tests, then temperature profiles of the surface of Ryugu were obtained. For comparison, thermal calculations by a thermophysical model without roughness using the shape model (TPM1) and by one with roughness using fractal rough surfaces (TPM2) were carried out.

Thermal images by TIR revealed that the surface of Ryugu showed ubiquitously high temperature above 300 K, and its temperature profile showed flat pattern at noon. Thermal calculations by TPM1 did not reproduce observed temperature profiles. By comparing maximum temperatures by TIR with those by TPM1, thermal inertia of Ryugu was estimated to be around 160 in MKS unit and reached maximum at the equatorial ridge. By contrast, thermal calculations by TPM2 successfully created flat temperature profile at noon for various thermal inertia and surface roughness. The temperature profiles were fitted by 4-order function to characterize its pattern. A multi linear regression analysis was carried out to estimate thermal inertia and surface roughness from the fitting coefficients. From the regression equations and fitting coefficients by observed temperature profiles, thermal inertia and surface roughness of Ryugu were estimated. Since the estimation is strongly affected by surface tilt angle of a polygon on a shape model, we carried out tilt angle corrections. Finally, thermal inertia of Ryugu by TPM2 was estimated to be around 330 in MKS unit and showed little variation in latitude, and with moderate homogeneous surface roughness. Thermal inertia of Ryugu determined in this study by two TPMs are consistent with that determined by ground observations. Our results suggest that thermal inertia of Ryugu is consistent with that of boulders, indicating porous nature of the boulders widely distributed on Ryugu.

キーワード : Hayabusa2、Thermal Infrared Imager、Asteroid Ryugu

Keywords: Hayabusa2, Thermal Infrared Imager, Asteroid Ryugu