



©Arakawa et al., 2020

小惑星探査機「はやぶさ2」観測成果論文の Science 誌掲載について

名古屋大学大学院環境学研究科の 渡邊 誠一郎 教授が参画する研究チームが、小惑星探査機「はやぶさ2」による小惑星 Ryugu（リュウグウ）の探査活動に基づく研究成果をまとめた論文が、アメリカの科学雑誌 Science（サイエンス）電子版 に2020年3月19日（日本時間3月20日）に掲載されましたので、お知らせします。論文の内容は次のとおりです。

小惑星リュウグウでの人工クレーター形成実験から分かったこと

原題：An artificial impact on the asteroid 162173 Ryugu formed a crater in the gravity-dominated regime

1. 概要

2019年4月5日、「はやぶさ2」は小型搭載型衝突装置（SCI）を用いて小惑星リュウグウに人工クレーターを生成することに成功しました。「はやぶさ2」から分離されたカメラ（DCAM3）は、衝突後から約8分間にわたり衝突領域を撮影することに成功し、エジェクタカーテンが発達する様子やリュウグウの地表にエジェクタがたまっていく様子を捉えました。エジェクタカーテンは非対称で不均質でしたが、これは表面上の特徴と関係していることも分かりました。また、人工クレーターが生成した領域を観測した結果、人工クレーターは半円形をしており、直径は約14.5mでした。これは、地球上で形成される場合の約7倍の大きさになります。また、人工クレーターにはリム（クレーターを囲う縁の高くなった部分）があり、その中央部にはピット（くぼみ）ができていました。このように、小さな小惑星でのクレーター形成過程を初めて詳細に解明することができました。

さらに、リュウグウが小惑星帯に滞在していた期間についても新たな知見を得ることができました。これまでに行われたクレーターのサイズ頻度分布を用いた推定では、見積もり方によって年代が約600万年から約2億年とかなり幅がありました。本研究の結果を考慮する

と、リュウグウの小惑星帯滞在期間は 640~1140 万年となります。すると、リュウグウ表面の年代は 10^7 年のオーダーであるということができ、これまで想定されていた範囲で最も若い年代であるということになります。

2. 本文

小惑星の表面は大なり小なり宇宙風化の影響を受けており、そのままでは“フレッシュな”物質を調査することはできません。しかし、人工クレーターを造れば、宇宙風化を受けていない小惑星の地下物質を観測できます。また、実際の天体にクレーターをつくることで、地上の実験室で導かれたクレーターのスケーリング則をテストし、微小重力下でのクレーター形成過程の数値実験と比較する研究にも貴重なデータを提供することになります。このような目的のために、リュウグウに人工クレーターを作る実験を行いました。

小惑星近傍運用中の 2019 年 4 月 5 日、「はやぶさ 2」は小型搭載型衝突装置 (SCI: Small Carry-on Impactor) を分離し、リュウグウ地表に人工クレーターを作る運用を行い成功しました。「はやぶさ 2」に搭載されていた SCI は 2kg の銅製のプロジェクティルを 2km/s で衝突させるように設計されています。また、プロジェクティルが小惑星に衝突することによって噴出物 (エジェクタ) が放出されますが、その様子を撮影する装置が分離カメラ (DCAM3) です。



図 1 : DCAM3 によって撮影されたエジェクタカーテン。この画像は、衝突から 192 秒後の様子である。右の画像は、左の画像を拡大したもの。©Arakawa et al., 2020

図 1 は DCAM3 が捉えたエジェクタカーテンです。実際には、連続的に撮影が行われており、エジェクタカーテンの変化の様子がわかりました。衝突により発生したエジェクタカーテンは、最初、北方に成長しました。最初の 200 秒間、クレーターは成長し、その後エジェクタの堆積が起きているように見えます。また、SCI によって引き起こされた掘削とエジェクタの堆積は、衝突から 500 秒間以上は継続していました。一方、南側にはエジェクタの放出は観測されませんでした。南側にある大きな岩 (図 2 オカモト岩 : SB) によってクレーターの成長が阻害されたためと考えられます。

人工的にクレーターを造ることに成功したかどうかを確認するため、SCI 衝突運用から約3週間後、「はやぶさ2」は、人工クレーター探索運用を行いました。このとき「はやぶさ2」はリュウグウの上空 1.7km まで地表に近づき、18cm/pixel の空間分解能で撮像観測を行いました。

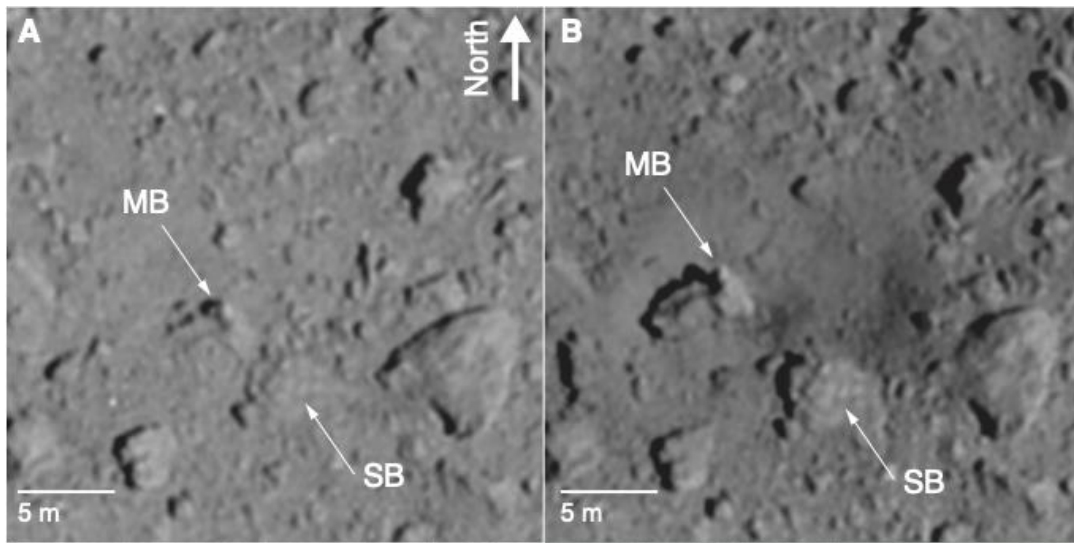


図 2 : プロジェクトイル衝突前 (A) と衝突後 (B) の画像。©Arakawa et al.,2020

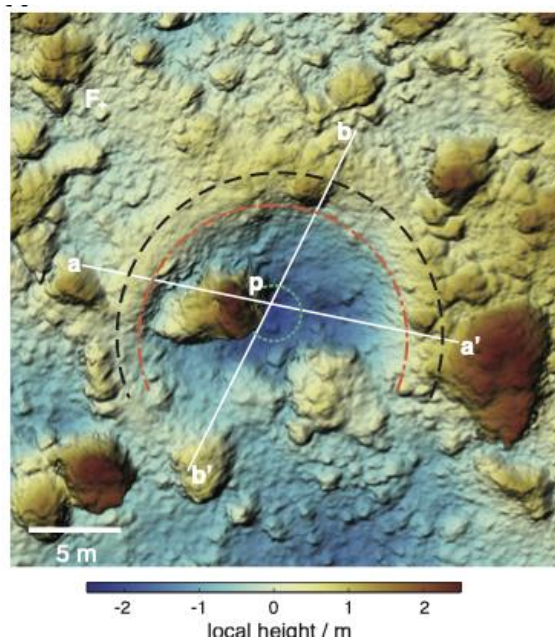


図 3 : SCI クレーター(おむすびころりんクレーター)の数値標高地図 (DEM : Digital Elevation Map) 。色で地形の高さを示している。©Arakawa et al.,2020

図 2 は、SCI 衝突運用の前後で撮影した同じ領域の画像を比較したものです。地面が掘り起こされ、半円形の人エクレーターができていることがわかります。図 3 に、高さの計測値とクレーターの領域を示します。赤い一点鎖線で描かれた人工クレーターの直径は約 14.5m、また黒い破線で描かれた人工クレーターを囲むリムの直径は約 17.6m です。このクレーターサイズは、地球上で形成される場合の約 7 倍の大きさになります。はやぶさ2 プロジェクトチ

ームはこの人工クレーターを SCI クレーター（おむすびころりんクレーター）と名付けています。

画像を見ると、少なくとも数十 cm ある多くの岩塊が移動しており、大きさ 5m 程度の大きな岩（イイジマ岩:MB）が掘り起こされ、約 3m 北西に動いていました。このイイジマ岩の東端に直径約 3m のピット（くぼみ地形、図 3 の緑の点線）も発見しました。クレーターの深さは 1.7m、リム頂上からピット底までの深さは約 2.7m と推定されます。

SCI はイイジマ岩（MB）とオカモト岩（SB）の間に衝突したと推測されます。イイジマ岩は北西に移動していますが、オカモト岩は不動でした。南側に位置するオカモト岩によってクレーターの成長が阻害されたため、クレーターの形状が半円形になったと思われます。

DCAM3 が撮影したクレーター形成時のエジェクタ分布から、掘削された物質の堆積物は北側に多く分布すると予想されました。堆積物の反射率は表面の物質よりも低く、画像には暗く写っています。光学航法望遠カメラ ONC-T で取得した画像データの反射率変化の分布と DCAM3 で撮影したエジェクタ分布から予想された堆積物の分布は、ほぼ一致しました。この堆積物があると推測された地点には、2019 年 7 月 11 日に二回目のタッチダウンを行い、試料採取に成功しました。この二回目のタッチダウンで取得した試料には地下物質が含まれていると考えられ、一回目のタッチダウンで取得した表面物質と比較することで、宇宙風化の影響などもさらに詳しく知ることができると期待されます。

クレーターサイズの頻度分布を調べることにより、天体表面の年代を推定する手法がありますが、小さな物体が高速で衝突した際のクレーターサイズを予測するモデルは幾つか提案されており、どのモデルを使ったかで推定年代が一桁も変わってしまいます。リュウグウ表面については、微小重力下にあるため、表面の強度がかなり小さくても生成される衝突クレーターのサイズは強度を持たない表面に比べると小さくなります。そのため、リュウグウの表面強度を知ることがリュウグウ表面年代を知る上で重要になるわけです。

今回の SCI 衝突実験の結果からは、リュウグウの表面はほとんど強度を持たないことがわかりました。すなわち SCI クレーターは微小重力下で強度を持たない砂上に形成されるクレーターとして模擬できることがわかりました。この結果に基づき、リュウグウの小惑星帯滞在期間を見積もると、640~1140 万年と推定されます。これまでの研究では、この滞在期間は約 600 万年から約 2 億年と見積もられていましたので、考えられていた推定範囲の中で最も短い期間になります。このことから、リュウグウ表面の年代は 10^7 年のオーダーであると言えます。小惑星の表面活動やその形成（衝突破壊や再集積）がこれまで考えられているより頻繁に起きている可能性があることがわかりました。今回の結果は、リュウグウのようなラブルパイル天体に適用されるクレーター年代の再検討を促すものです。

【論文情報】

<論文情報>

掲載誌：Science, 19 March, 2020

論文タイトル："An artificial impact on the asteroid 162173 Ryugu formed a crater in the gravity-dominated regime",

和訳：小惑星リュウグウ上への衝突実験で重力により成長を制限されたクレーターが形成された

著者 : M. Arakawa-1*, T. Saiki-2, K. Wada-3, K. Ogawa-1,4, T. Kadono-5, K. Shirai-1,2, H. Sawada-2, K. Ishibashi-3, R. Honda-6, N. Sakatani-2, Y. Iijima-2†, C. Okamoto-1†, H. Yano-2, Y. Takagi-7,

M. Hayakawa-2, P. Michel-8, M. Jutzi-9, Y. Shimaki-2, S. Kimura-10, Y. Mimasu-2, T. Toda-2, H. Imamura-2, S. Nakazawa-2, H. Hayakawa-2, S. Sugita-3,11, T. Morota-11, S. Kameda-12, E. Tatsumi-11,13, Y. Cho-11, K. Yoshioka-14, Y. Yokota-2,6, M. Matsuoka-2, M. Yamada-3, T. Kouyama-15, C. Honda-16, Y. Tsuda-2, S. Watanabe-2,17, M. Yoshikawa-2,18, S. Tanaka-2,18, F. Terui-2, S. Kikuchi-2, T. Yamaguchi-2‡, N. Ogawa-2, G. Ono-19, K. Yoshikawa-19, T. Takahashi-2§, Y. Takei-2,19, A. Fujii-2, H. Takeuchi-2,18, Y. Yamamoto-2,18, T. Okada-2,20, C. Hirose-19, S. Hosoda-2, O. Mori-2, T. Shimada-2, S. Soldini-21, R. Tsukizaki-2, T. Iwata-2,18, M. Ozaki-2,18, M. Abe-2,18, N. Namiki-22,23, K. Kitazato-16, S. Tachibana-11, H. Ikeda-19, N. Hirata-16, N. Hirata-1, R. Noguchi-2, A. Miura-2,18

所属 :

1. Department of Planetology, Kobe University, Kobe 657-8501, Japan.
2. Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagamihara 252-5210, Japan.
3. Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, Narashino 275-0016, Japan.
4. JAXA Space Exploration Center, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagamihara 252-5210, Japan.
5. Department of Basic Sciences, University of Occupational and Environmental Health, Kitakyusyu 807-8555, Japan.
6. Department of Information Science, Kochi University, Kochi 780-8520, Japan.
7. Department of Regional Business, Aichi Toho University, Nagoya 465-8515, Japan.
8. Université Côte d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS, Laboratoire Lagrange, CS34229, 06304 Nice Cedex 4, France.
9. Physics Institute, University of Bern, National Centre of Competence in Research PlanetS, CH-3012 Bern, Switzerland.
10. Department of Electrical Engineering, Tokyo University of Science, Noda 278-8510, Japan.
11. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan.
12. Department of Physics, Rikkyo University, Tokyo 171-8501, Japan.
13. Instituto de Astrofísica de Canarias, University of La Laguna, 38205 Tenerife, Spain.
14. Department of Complexity Science and Engineering, The University of Tokyo, Kashiwa 277-8561, Japan.
15. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tokyo 135-0064, Japan.

16. School of Computer Science and Engineering, The University of Aizu, Aizu-Wakamatsu 965-8580, Japan.
 17. Department of Earth and Environmental Sciences, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan.
 18. Department of Space and Astronautical Science, The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, Hayama 240-0193, Japan.
 19. Research and Development Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagami-hara 252-5210, Japan.
 20. Department of Chemistry, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan.
 21. Department of Mechanical, Materials and Aerospace Engineering, University of Liverpool, Liverpool L3 5TQ, UK.
 22. National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka 181-8588, Japan.
 23. Department of Astronomical Science, The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, Hayama 240-0193, Japan.
- *Corresponding author. Email: masahiko.arakawa@penguin.kobe-u.ac.jp
- †Deceased.
- ‡Present address: Mitsubishi Electric Corporation, Kamakura 247-8520, Japan.
- §Present address: NEC Corporation, 1-10 Nisshin-cho, Fuchu, Tokyo 183-0036, Japan.
- DOI:[10.1126/science.aaz1701](https://doi.org/10.1126/science.aaz1701)