



Science誌 2020年3月19日(日本時間:3月20日)公開



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

(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)

荒川政彦(神戸大学)

著者 : M. Arakawa\*, T. Saiki, K. Wada, K. Ogawa, T. Kadono, K. Shirai, H. Sawada, K. Ishibashi, R. Honda, N. Sakatani, Y. Iijima, C. Okamoto, H. Yano, Y. Takagi, M. Hayakawa, P. Michel, M. Jutzi, Y. Shimaki, S. Kimura, Y. Mimasu, T. Toda, H. Imamura, S. Nakazawa, H. Hayakawa, S. Sugita, T. Morota, S. Kameda, E. Tatsumi, Y. Cho, K. Yoshioka, Y. Yokota, M. Matsuoka, M. Yamada, T. Kouyama, C. Honda, Y. Tsuda, S. Watanabe, M. Yoshikawa, S. Tanaka, F. Terui, S. Kikuchi, T. Yamaguchi, N. Ogawa, G. Ono, K. Yoshikawa, T. Takahashi, Y. Takei, A. Fujii, H. Takeuchi, Y. Yamamoto, T. Okada, C. Hirose, S. Hosoda, O. Mori, T. Shimada, S. Soldini, R. Tsukizaki, T. Iwata, M. Ozaki, M. Abe, N. Namiki, K. Kitazato, S. Tachibana, H. Ikeda, N. Hirata, N. Hirata, R. Noguchi, A. Miura

\*責任著者: 神戸大学



# 「はやぶさ2」の衝突実験で、 小さな小惑星でのクレーター形成過程が解明された

## ハイライト：

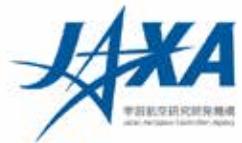
- ◆ リュウグウでは地球上に比べて約7倍大きなクレーターが形成
- ◆ リュウグウの表面地形年代は若い( $10^7$ 年のオーダー)



# 背景と概要



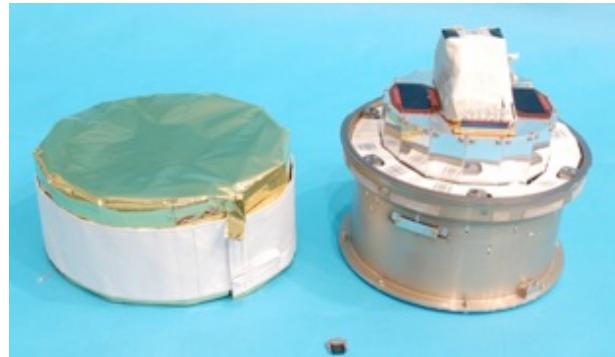
- ・ リュウグウ上の衝突クレーターの成長は、表面強度、もしくは、表面重力のどちらかで制限される。
- ・ リュウグウの表面年代は、クレーターのサイズ頻度分布により推定されるが、クレーター成長の制限メカニズムが表面強度で制限される場合と表面重力で制限される場合とで大きく異なる。のために、リュウグウの小惑星帯滞在期間は、約600万年から約2億年の間と推定されており、1桁以上異なる範囲にわたっていた。
- ・ SCIによる衝突実験で小惑星リュウグウの表面に直径14.5m（リム直径17.6m）の半円状のクレーターが形成された。**地上での実験に較べて約7倍の大きさまで成長した。**
- ・ DCAM3により観測されたエJECTAテンの形状とSCIクレーターの形状から、クレーターは重力により成長を制限されたことがわかった。
- ・ リュウグウの小惑星帯滞在期間は、考えられていた推定範囲の中で最も短い期間（640～1140万年）であることが判明した。
- ・ リュウグウの表面地形の年代は、**10<sup>7</sup>年のオーダーである可能性が高いことが分かった。**



# SCI, DCAM3: 装置概要

## Small Carry-on Impactor

- ・ 銅円盤 (30 cm) と爆薬から構成される
- ・ 銅弾丸 (2 kg, ~ 2 km/s): 中空の球殻形状 (直径13cm)
- ・ 小惑星上に人工クレーターを作る世界初の実験装置

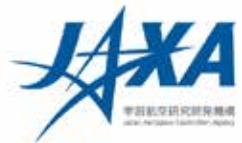


(画像クレジット: JAXA)

## Deployable CAMera 3

- ・ 超小型衛星: 光学系二系統(理学用、モニター用)、受光センサー、デジタル・アナログ通信機、電源
- ・ 性能: 空間分解能 < 1 m/pixel, 撮影速度 1 枚/秒, 74°x74° 視野
- ・ 小惑星リュウグウ表面でのSCI衝突をその場観測する





# SCI, DCAM3: 運用概要

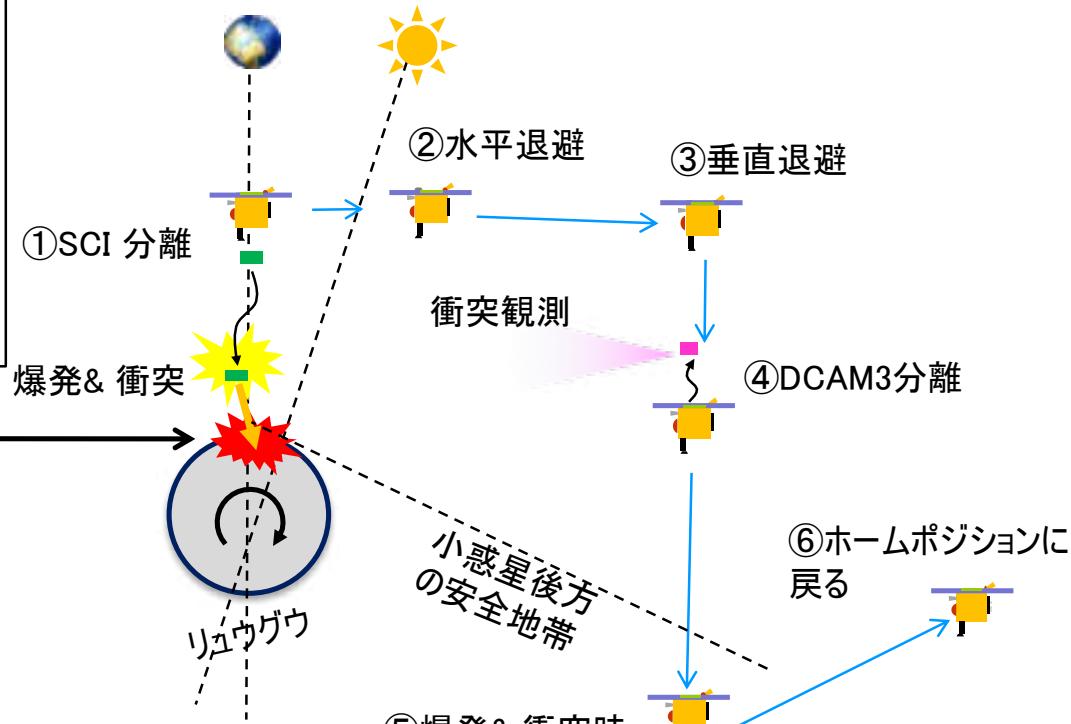
## 衝突装置運用シーケンス

- SCI分離高度は500m
- SCI分離から爆発まで約40分
- ホームポジションに戻るのは約2週間後

人工クレーターの  
近くに着陸

ピンポイント  
タッチダウン

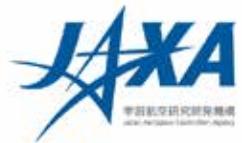
(SCIは、高度250～300mで爆破)



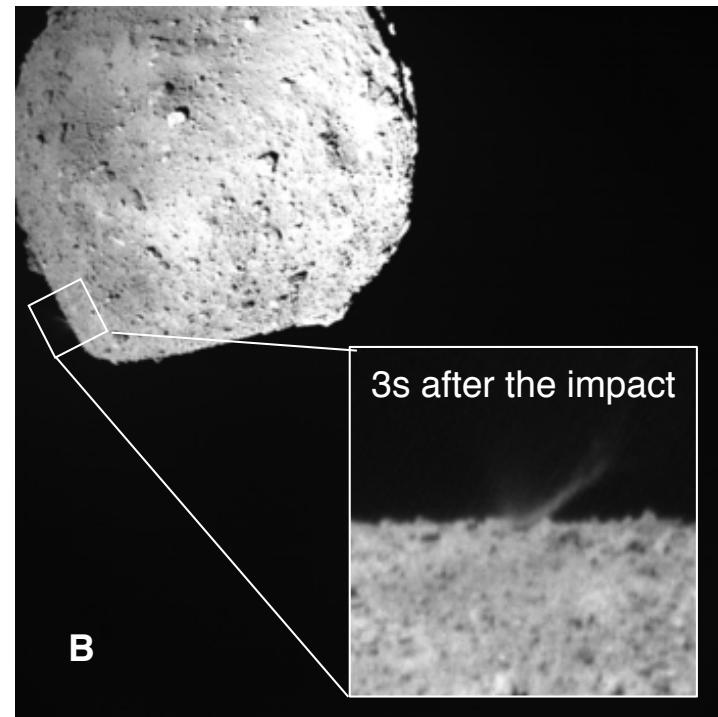
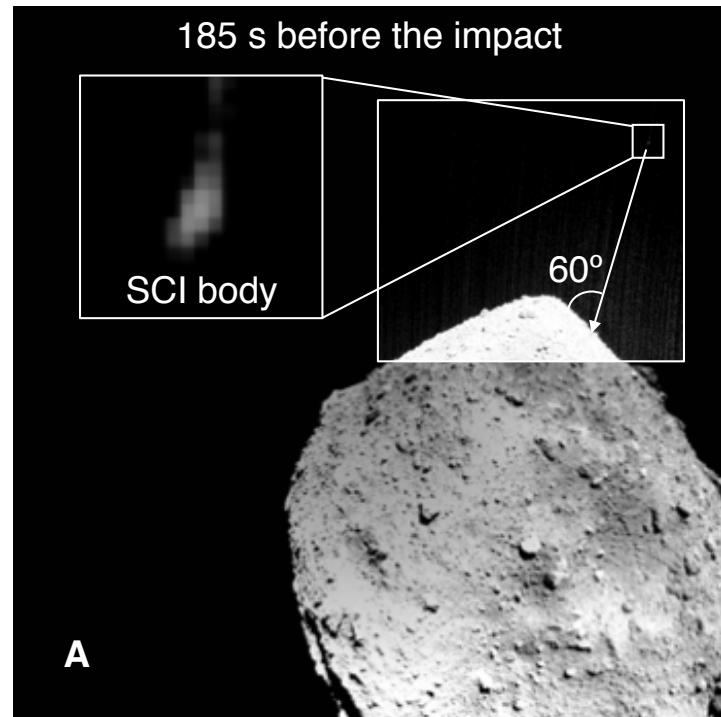
(画像クレジット: JAXA)



# DCAM3による衝突前後の撮影



- 着弾点は、 $7.9^{\circ}$  N,  $301.3^{\circ}$  E。
- SCI弾丸はリュウグウの地表に対して角度 $60^{\circ}$ で斜め衝突した。



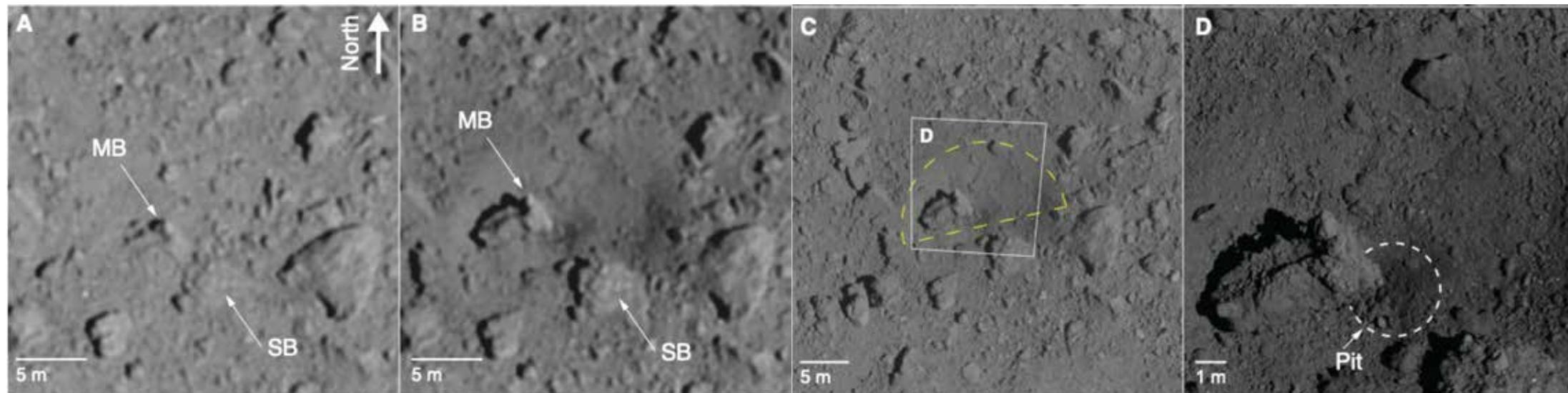
Arakawa et al., 2020



# SCI(おむすびころりん)クレーター



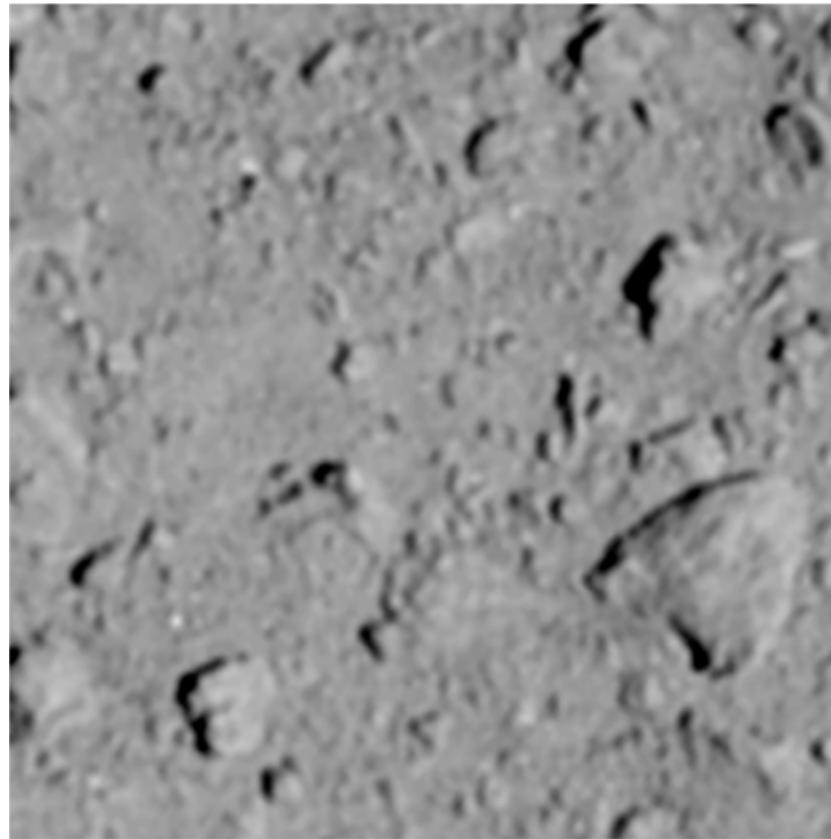
- MB(イイジマ岩 5m)とSB(オカモト岩)の間に着弾した。
- MBは3m北西に移動した。オカモト岩は不動。
- クレーターは半円形。南側への成長はオカモト岩により阻害された。
- イイジマ岩の東端に直径約3mのピットを発見。



Arakawa et al., 2020



# SCI衝突前後の比較

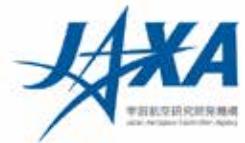


SCI衝突前(2019年3月22日)の撮影と、SCI衝突後(2019年4月25日)の撮影の比較(動画)

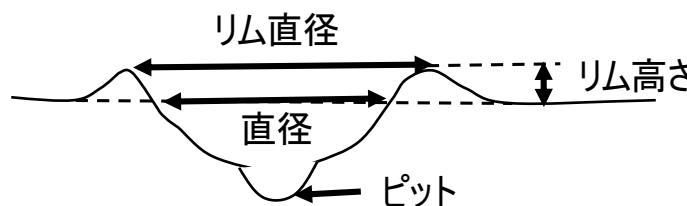
Arakawa et al., 2020



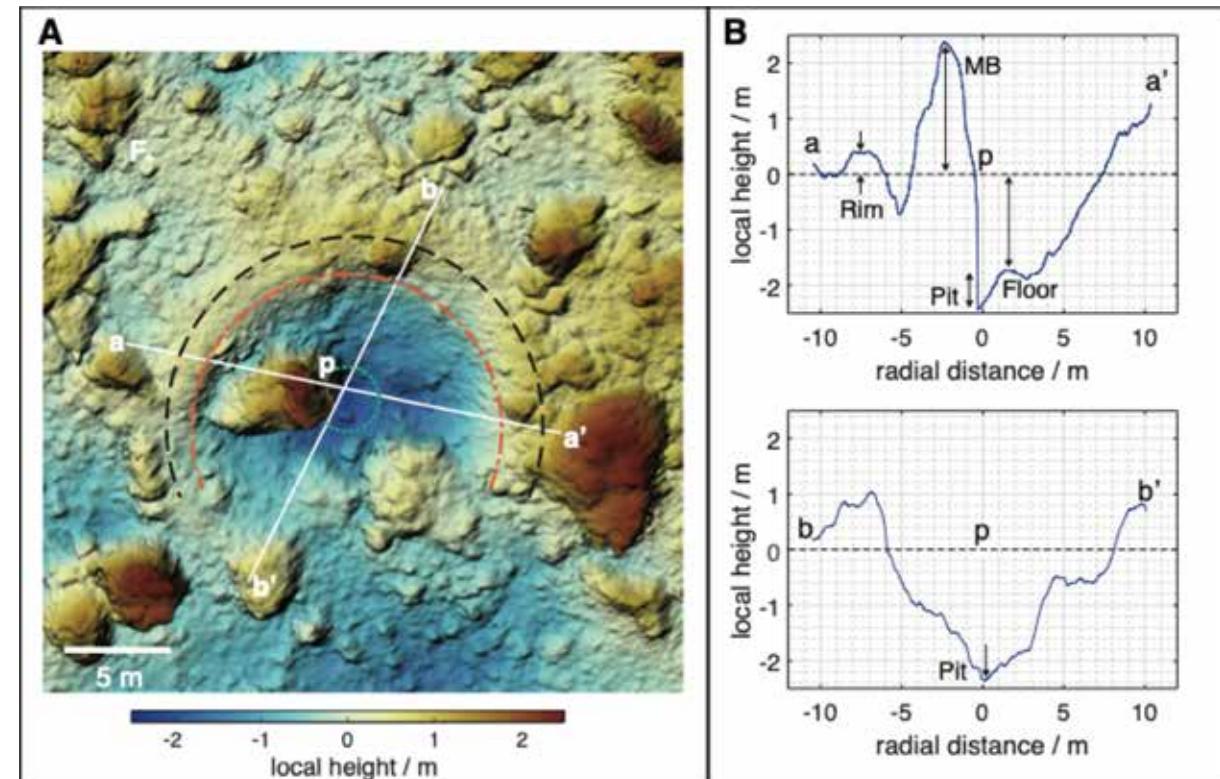
# SCIクレーターの形態



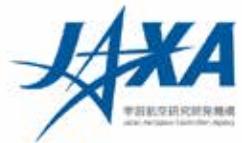
- 直径:  $14.5 \pm 0.8\text{m}$ 
  - 高さ0mでのクレーター径
- リム直径:  $17.6 \pm 0.7\text{m}$ 
  - リム頂上間の距離
- ピット直径約3m、深さ60cm
  - 下部に140 - 670 Paの層
- リム高さ: 40cm
  - エジェクタ堆積物から成る
- クレーター底の深さ
  - 高さ0mからの深さ: 1.7m
- リム頂上からピット底までの深さ
  - 2.7m



DEM: Digital Elevation Map

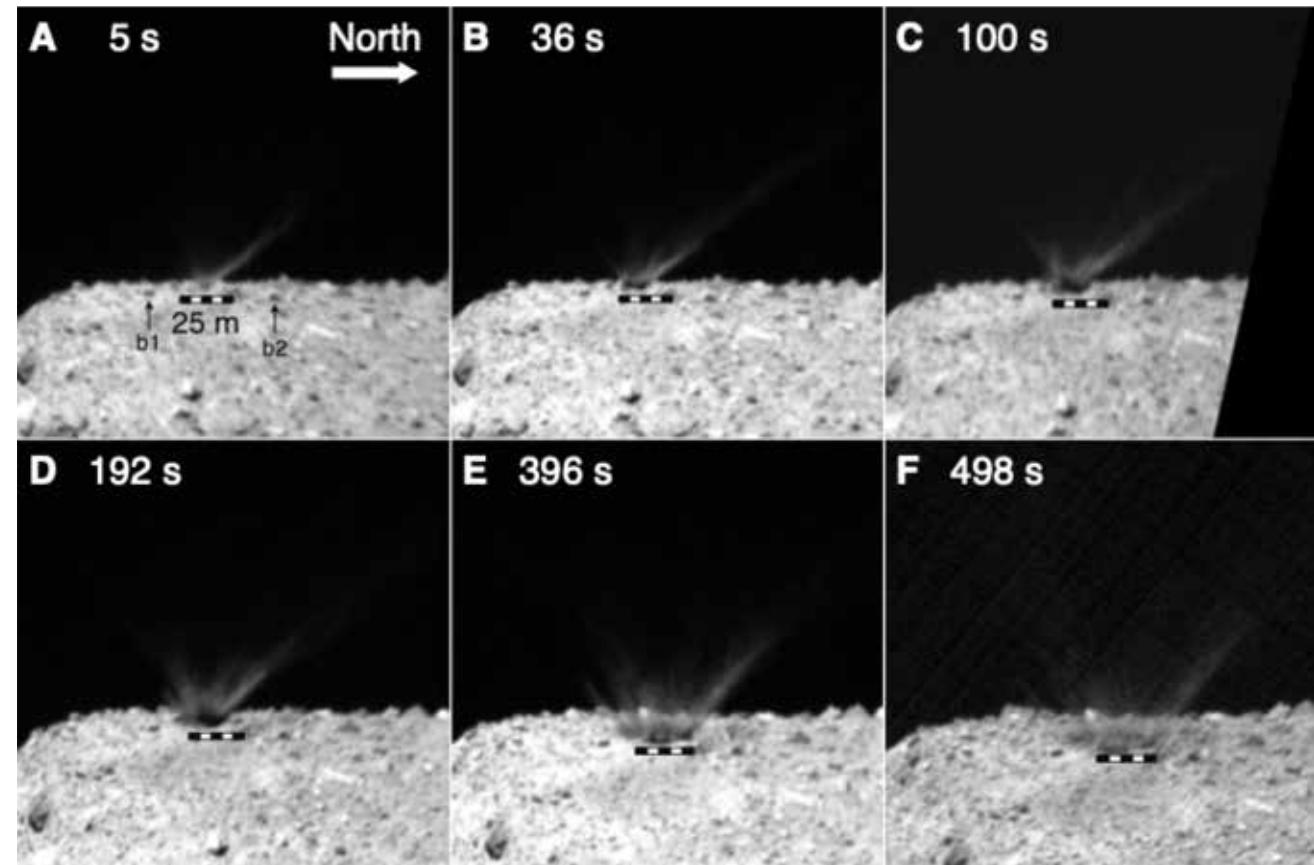


Arakawa et al., 2020



# エジェクタカーテン

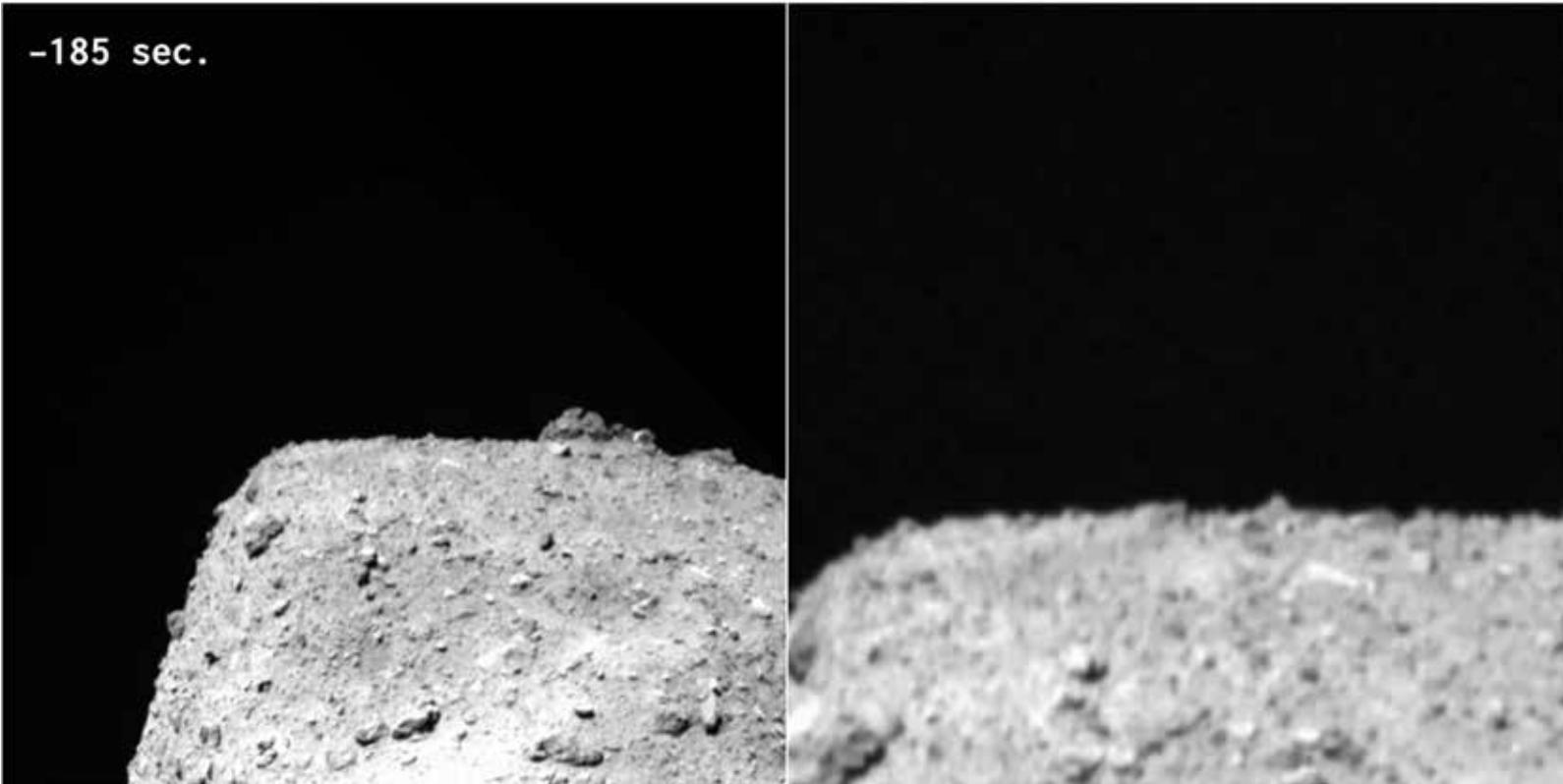
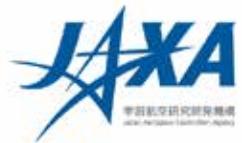
- 衝突により発生したエジェクタは、最初、北方向に成長する。
- クレーター形成の掘削と堆積過程は500秒間はずっと続いている。
- エジェクタカーテンの**地表面からの分離**は観測されない。
- 最初200秒間はクレーターは成長しているように見える。その後、エジェクタの堆積が起きている。



Arakawa et al., 2020



# エジェクターテン(動画)



エジェクターテンの成長と堆積の様子。SCI衝突前185秒、衝突後3 s, 5 s, 36 s, 100 s, 192 s, 396 s, 489 sの画像を用いて作成した。

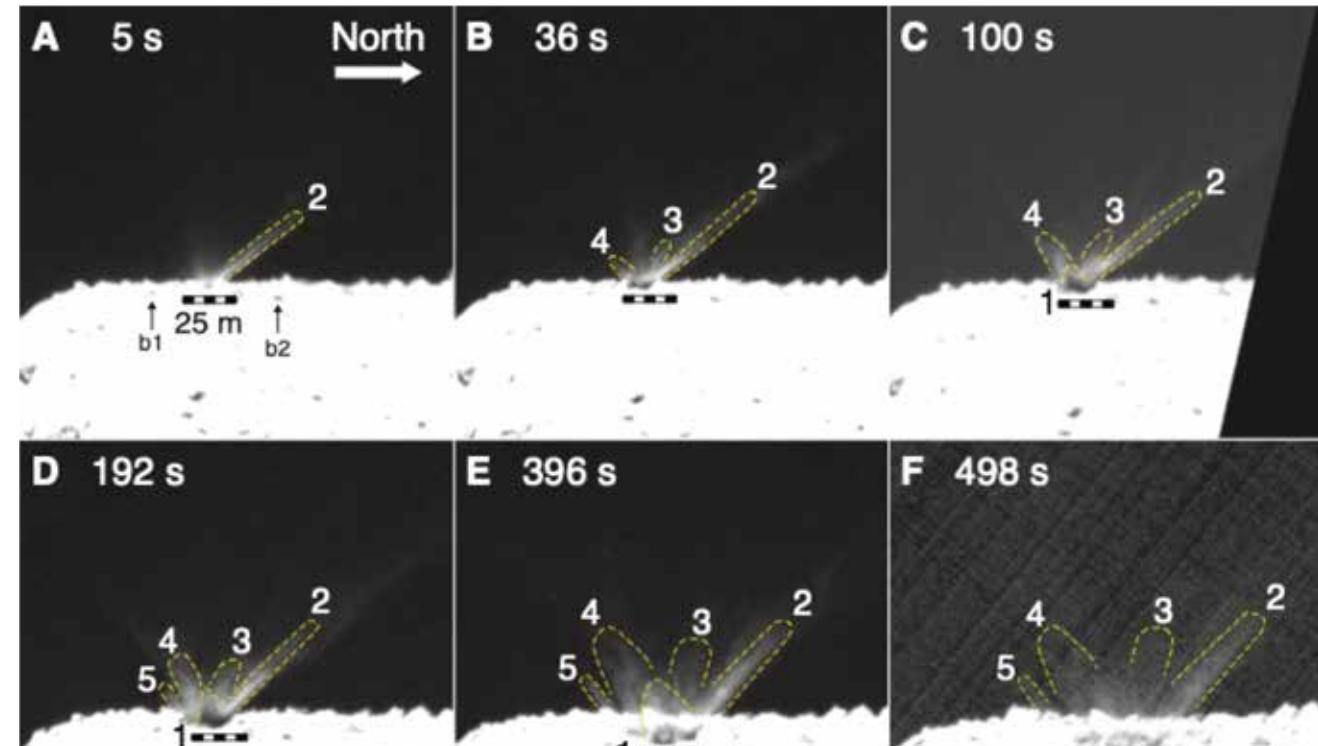
左ビデオで衝突点近傍を拡大した映像。

Arakawa et al., 2020



# エジェクタカーテン

- 南側にはエジェクタの放出は観測されない。
  - オカモト岩によりクレーターの成長が阻害された。
- エジェクタは数個のレイに分かれて成長する。
  - イイジマ岩などの大きな岩塊によりエジェクタが分離した。

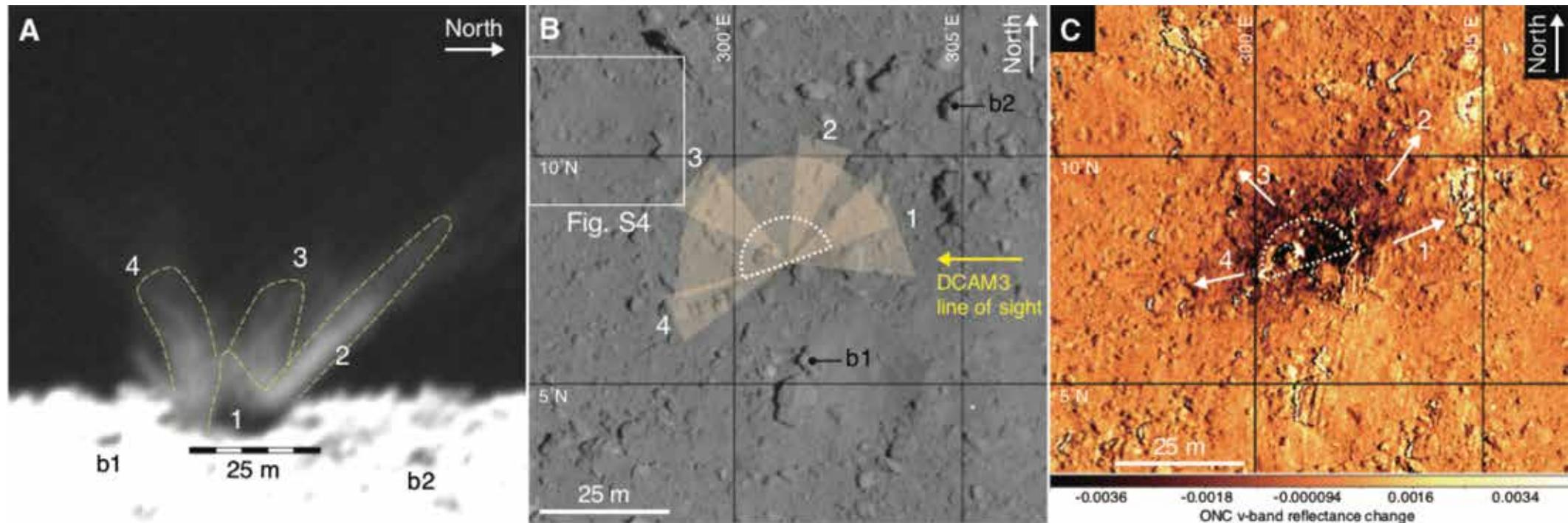


Arakawa et al., 2020

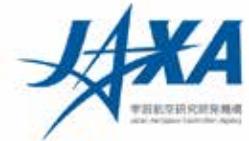


# エジエクタ堆積物

- ・ エジエクタ分布から推定される堆積物の分布は、ONC-Tの反射率変化の分布とほぼ一致する。
- ・ 堆積物はクレーターの北側を中心に分布する。反射率が表面の物質よりも低いので暗く見える。

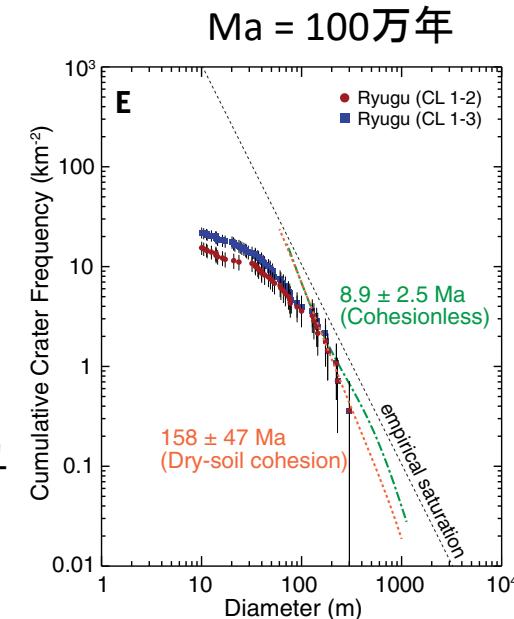


Arakawa et al., 2020



# まとめと波及効果

- SCIクレーターは、微小重力下( $10^{-5}G$ )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。
  - クレーターが地球上の約7倍の大きさまで成長した。
  - 堆積リムが存在した。
  - エJECTAカーテンは地表面から分離せずに成長した。
- リュウグウの表面年代を、より絞り込むことができた。
  - Sugita et al. (2019)によると、リュウグウが小惑星帯で過ごした期間については約600万年から約2億年という広い幅で推定されていた。不確定性が多いのは、リュウグウ表面の強度が不明なため。
  - SCIクレーターより、リュウグウ表面はほとんど強度を持たないことがわかった。これは上記の時間幅のうち短い方を支持する結果である。
  - リュウグウが小惑星帯に存在していた期間が短いということは、リュウグウの表面年代や進化を調べる上で重要な手がかりとなる。(次ページ参照)
- 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応されるクレーター年代の再検討を促す。
- TD2の試料採取地点(うちでのこづち)にはエJECTAが堆積したと思われる。

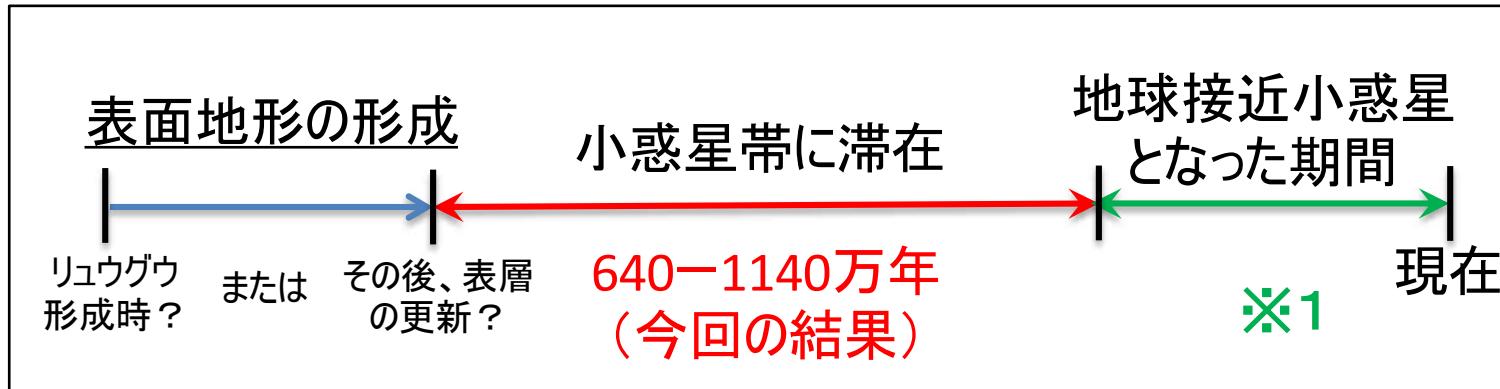


Sugita et al., 2019  
Science 19 Apr 2019:  
Vol. 364, Issue 6437, eaaw0422  
DOI: 10.1126/science.aaw0422



# まとめと波及効果

## リュウグウの表面年代について



- リュウグウの表面年代は、リュウグウの現在の地形が形成してからの経過時間である。
  - 現在の地形が形成したのは、リュウグウが形成した時との説と、その後の進化で全球的に表面が更新されるイベントが起きた時との説と2つある。
  - どちらであるかを知ることは、今後の課題である。
- 現在の地形が形成してから $640–1140$ 万年にわたって小惑星帯に滞在したことが今回の論文の結果から判明した。
- 最期に、木星などの惑星の影響でリュウグウの軌道が変化し、地球接近小惑星となった。
- ※1:近地球小惑星の寿命は、理論計算や天文観測から約1000万年と推定されている。



# まとめと波及効果



## 「リュウグウが小惑星帯に640–1140万年滞在したことがわかった」ことの意義

- ・リュウグウの表面は、従来考えられていた推定範囲の中で最も若い年代（ $10^7$ 年のオーダー）である可能性が高いことが分かった。
- ・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分かった。



# 著者名



M. Arakawa<sup>1\*</sup>, T. Saiki<sup>2</sup>, K. Wada<sup>3</sup>, K. Ogawa<sup>21,1</sup>, T. Kadono<sup>4</sup>, K. Shirai<sup>2,1</sup>, H. Sawada<sup>2</sup>,  
K. Ishibashi<sup>3</sup>, R. Honda<sup>5</sup>, N. Sakatani<sup>2</sup>, Y. Iijima<sup>2 §</sup>, C. Okamoto<sup>1 §</sup>, H. Yano<sup>2</sup>, Y. Takagi<sup>6</sup>,  
M. Hayakawa<sup>2</sup>, P. Michel<sup>7</sup>, M. Jutzi<sup>8</sup>, Y. Shimaki<sup>2</sup>, S. Kimura<sup>9</sup>, Y. Mimasu<sup>2</sup>, T. Toda<sup>2</sup>,  
H. Imamura<sup>2</sup>, S. Nakazawa<sup>2</sup>, H. Hayakawa<sup>2</sup>, S. Sugita<sup>10,3</sup>, T. Morota<sup>10</sup>, S. Kameda<sup>11</sup>,  
E. Tatsumi<sup>20,12,10</sup>, Y. Cho<sup>10</sup>, K. Yoshioka<sup>10</sup>, Y. Yokota<sup>2,5</sup>, M. Matsuoka<sup>2</sup>, M. Yamada<sup>3</sup>,  
T. Kouyama<sup>13</sup>, C. Honda<sup>14</sup>, Y. Tsuda<sup>2</sup>, S. Watanabe<sup>15,2</sup>, M. Yoshikawa<sup>2,19</sup>, S. Tanaka<sup>2,19</sup>,  
F. Terui<sup>2</sup>, S. Kikuchi<sup>2</sup>, T. Yamaguchi<sup>2†</sup>, N. Ogawa<sup>2</sup>, G. Ono<sup>16</sup>, K. Yoshikawa<sup>16</sup>,  
T. Takahashi<sup>2‡</sup>, Y. Takei<sup>16,2</sup>, A. Fujii<sup>2</sup>, H. Takeuchi<sup>2,19</sup>, Y. Yamamoto<sup>2,19</sup>, T. Okada<sup>2,10</sup>,  
C. Hirose<sup>16</sup>, S. Hosoda<sup>2</sup>, O. Mori<sup>2</sup>, T. Shimada<sup>2</sup>, S. Soldini<sup>17</sup>, R. Tsukizaki<sup>2</sup>, T. Iwata<sup>2</sup>,  
M. Ozaki<sup>2,19</sup>, M. Abe<sup>2,19</sup>, N. Namiki<sup>18,19</sup>, K. Kitazato<sup>14</sup>, S. Tachibana<sup>10</sup>, H. Ikeda<sup>16</sup>,  
N. Hirata<sup>14</sup>, N. Hirata<sup>1</sup>, R. Noguchi<sup>2</sup>, A. Miura<sup>2</sup>.



# 著者所属

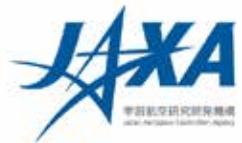
1. Kobe University, Kobe 657-8501, Japan.
2. Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagamihara 252-5210, Japan.
3. Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, Narashino 275-0016, Japan.
4. University of Occupational and Environmental Health, Kitakyusyu 807-8555, Japan.
5. Kochi University, Kochi 780-8520, Japan.
6. Aichi Toho University, Nagoya 465-8515, Japan.
7. The Côte d'Azur Observatory, 06304 Nice Cedex 4, France.
8. Physics Institute, University of Bern, NCCR PlanetS, Gesellschaftsstrasse 6, 3012, Bern, Switzerland.
9. Tokyo University of Science, Noda 278-8510, Japan.
10. The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan.
11. Rikkyo University, Tokyo 171-8501, Japan.
12. University of La Laguna, 38205 San Cristóbal de La Laguna, Spain.
13. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tokyo 135-0064, Japan.
14. The University of Aizu, Aizu-Wakamatsu 965-8580, Japan.
15. Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan.
16. Research and Development Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagamihara 252-5210, Japan.
17. University of Liverpool, Liverpool L3 5TQ, United Kingdom.
18. National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka 181-8588, Japan.
19. SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), Hayama 240-0193, Japan.
20. Instituto de Astrofísica de Canarias, La Laguna, Tenerife, E38205, Spain.
21. JAXA Space Exploration Center, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagamihara 252-5210, Japan.

\*Corresponding author: E-mail: masahiko.arakawa@penguin.kobe-u.ac.jp

†Current affiliation: Mitsubishi Electric Corporation, Kamakura 247-8520, Japan.

‡Current affiliation: NEC Corporation, 1-10 Nisshin-cho, Fuchu, Tokyo 183-0036, Japan.

§Deceased.



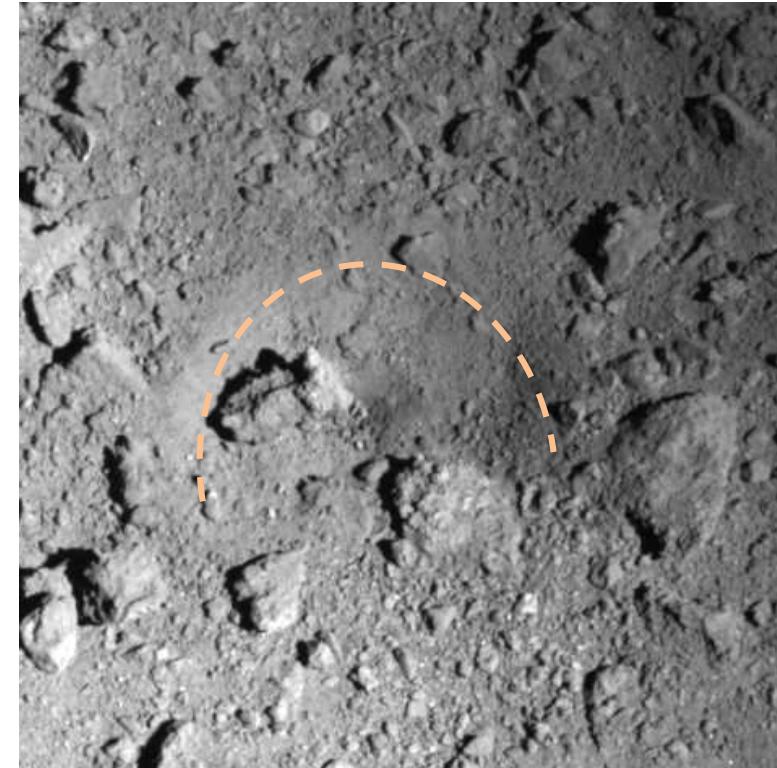
# 参考資料：地上実験との比較

- クレーターが地球上の約7倍の大きさまで成長した。



(画像クレジット: JAXA)

SCIの地上試験により形成された人工クレーター。大きさは約2m。



(画像のクレジット: JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研)



# 参考資料：人工クレーター関連の地名

人工クレーターに関して、以下の名称（愛称）を付けた。

## ■人工クレーター

おむすびころりんクレーター  
(SCIクレーター)

## ■移動岩

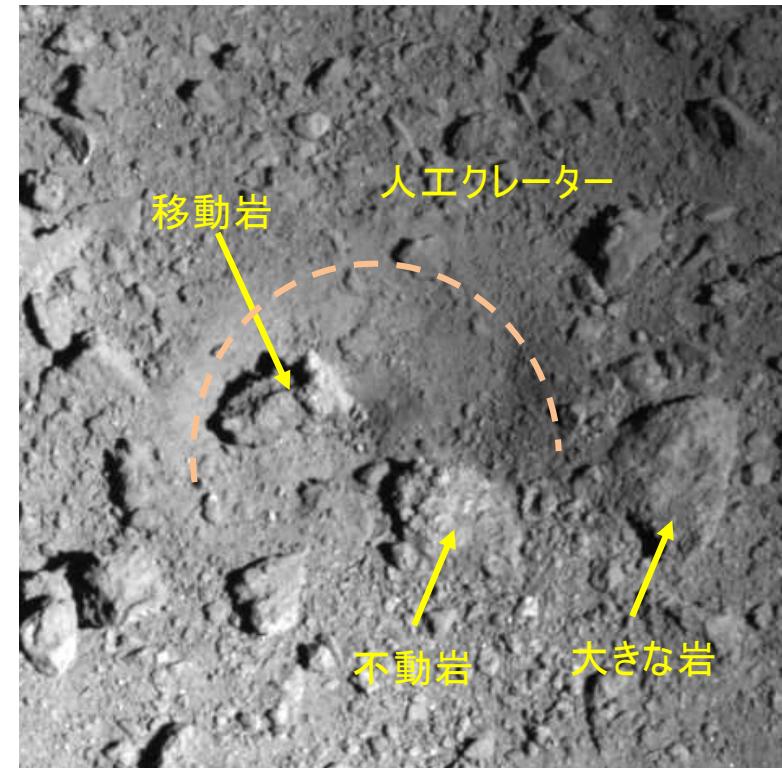
イイジマ岩

## ■不動岩

オカモト岩

## ■大きな岩

おにぎり岩



（画像のクレジット：JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研）