



Sample collection from asteroid 162173 Ryugu by Hayabusa2: implications for surface evolution

(はやぶさ2による小惑星リュウグウからの試料採取:リュウグウの表面進化への示唆)

諸田 智克 (東京大学) ほか, Science 2020.

著者: T. Morota*, S. Sugita, Y. Cho, M. Kanamaru, E. Tatsumi, N. Sakatani, R. Honda, N. Hirata, H. Kikuchi, M. Yamada, Y. Yokota, S. Kameda, M. Matsuoka, H. Sawada, C. Honda, T. Kouyama, K. Ogawa, H. Suzuki, K. Yoshioka, M. Hayakawa, N. Hirata, M. Hirabayashi, H. Miyamoto, T. Michikami, T. Hiroi, R. Hemmi, O. S. Barnouin, C. M. Ernst, K. Kitazato, T. Nakamura, L. Riu, H. Senshu, H. Kobayashi, S. Sasaki, G. Komatsu, N. Tanabe, Y. Fujii, T. Irie, M. Suemitsu, N. Takaki, C. Sugimoto, K. Yumoto, M. Ishida, H. Kato, K. Moroi, D. Domingue, P. Michel, C. Pilorget, T. Iwata, M. Abe, M. Ohtake, Y. Nakauchi, K. Tsumura, H. Yabuta, Y. Ishihara, R. Noguchi, K. Matsumoto, A. Miura, N. Namiki, S. Tachibana, M. Arakawa, H. Ikeda, K. Wada, T. Mizuno, C. Hirose, S. Hosoda, O. Mori, T. Shimada, S. Soldini, R. Tsukizaki, H. Yano, M. Ozaki, H. Takeuchi, Y. Yamamoto, T. Okada, Y. Shimaki, K. Shirai, Y. Ijima, H. Noda, S. Kikuchi, T. Yamaguchi, N. Ogawa, G. Ono, Y. Mimasu, K. Yoshikawa, T. Takahashi, Y. Takei, A. Fujii, S. Nakazawa, F. Terui, S. Tanaka, M. Yoshikawa, T. Saiki, S. Watanabe, and Y. Tsuda

*責任著者:東京大学



本論文のハイライト



- 第1回タッチダウンで1mサイズの岩と大量の赤黒い微粒子が巻き上げられた。
- 赤黒い微粒子は、太陽の加熱または風 化作用によってリュウグウ表面が変質 してつくられた。
- 表面の変質は、過去に短期間に起こった。→リュウグウは一時的に太陽に接近する軌道にいた。
- 変質した/していない物質、両方の採 取に成功したと期待される。



(画像クレジット: 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)







- これまでの「はやぶさ2」による観測からは、小惑星リュウグウの表面は岩に覆 われており、月面のような微粒子の存在は確認されていなかった。
- 「はやぶさ2」は2019年2月22日(日本時間)に世界初となるC型(炭素質)小惑星 への着陸に成功した。
- 着陸と同時に試料採取のための弾丸発射と探査機上昇のためのスラスタ噴射によって、岩石だけでなく、岩石表面やその隙間に隠れていた大量の赤黒い微粒子が舞い上がった。
- 赤黒い物質はリュウグウ全球的に存在しており、それらは過去のある短期間に 太陽による加熱または風化作用により、リュウグウ表面物質が変質してつくら れた。→リュウグウは一時的に太陽に接近する軌道にいたことを示す。
- 着陸地点は赤黒物質だけでなく変質する以前の青白い物質も存在していること から、変成をうけた/うけていない両方の物質が採取されたと期待される。



ONC:装置概要



Optical Navigation Camera

<u>目的</u>:探査機誘導と科学計測のために恒星と探 査小惑星を撮像する。

	ONC-T	ONC-W1 ONC-W2
検出器	二次元 Si-CCD	(1024 x 1024 ピクセル)
視野方向	直下(望遠)	直下(広角) 側方(広角)
視野角	6.35° × 6.35°	65.24° × 65.24°
焦点距離	100m ~ ∞	1m~∞
空間 分解能	1m/pix @高度10km 1cm/pix @高度100m	10m/pix @高度10km 1mm/pix @高度1m
観測波長	多色 (390、480、 550、700、860、 950、589.5nm、 Wide)	単色 (485nm~ 655nm)







視野

W1 視野

高知大学

N/S

JAXA



第1回タッチダウン地点 (L08-E1)



2018/07 2:29:36 (画像クレ ·ジット: JAXA)

影の長さから推定した岩の高さ地図





第1回タッチダウン運用概要







第1回タッチダウンの様子





2/21 22:29:17 高度 3.2m



- タッチダウンと同時に弾丸と スラスタによって、岩石と大量 の微粒子が巻き上がった。 W1の視界が暗く変化。 飛ばされた岩石の多くは白く
- 変化。→ もともと黒い微粒子 は岩石の表面や内部の隙間 に付着していた。(参考5)
- 舞い上がった微粒子はタッチ ダウン地点を中心に、約10m の範囲に広がり、表面に堆積。
- ▶ 舞い上がった微粒子の総質 量は12 kg以上。

(c)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 図中の日時は協定世界時 (UTC)



タッチダウン前後の色の変化



- タッチダウン前 (2018/10/2)タッチダウン後 (2019/4/4)図中の日時は協定世界時 (UTC)
 - タッチダウンの後に微粒子が 周囲直径10mの範囲に堆積。
 - > タッチダウン地点周辺は以前 に比べて赤黒く変化。
 - > 微粒子は赤黒い物質。

図はMorota et al. (2020)掲載図から 一部 改変したもの



- ▶ 下にある(古い)クレーターは赤く、上にある(若い)クレーターは青い傾向。
- ▶ 赤クレーター:表面の赤化の前に作られたクレーター。
- ▶ 青クレーター:表面の赤化の後に作られたクレーター。
- ▶ 赤青分布に緯度依存性(参考1) → 表面赤化は太陽による加熱または風化作用が原因。
- ▶ 赤クレーターと青クレーターに二極化。(参考2) → 表面赤化は短期間に起こった。(参考3)





まとめ



 ・炭素質小惑星が小惑星帯から地球近傍軌道に供給される際の軌道進化と それに伴う表層地質進化に関する新たなシナリオを提示。

リュウグウは30~800万年前の間のある時期に現在よりも太陽に接近す る軌道にいて、太陽加熱または風化作用による変成を経験。

 着陸地点は赤黒物質だけでなく、変成をうけていない青白い物質も表面に 存在していることから、変成をうけた/うけていない両方の物質が採取され たと期待される。(参考4)

→ 持ち帰られるリュウグウ試料の物質科学分析から、炭素質物質が地球軌道に供給される過程で起こる太陽加熱・風化作用の解明が期待される。







T. Morota^{1,2*}, S. Sugita^{1,3}, Y. Cho¹, M. Kanamaru^{4†}, E. Tatsumi^{1,5,6}, N. Sakatani^{7†}, R. Honda⁸, N. Hirata⁹, H. Kikuchi⁷, M. Yamada³, Y. Yokota^{7,8}, S. Kameda¹⁰, M. Matsuoka⁷, H. Sawada⁷, C. Honda¹¹, T. Kouyama¹², K. Ogawa^{9,13}, H. Suzuki¹⁴, K. Yoshioka¹, M. Hayakawa⁷, N. Hirata¹¹, M. Hirabayashi¹⁵, H. Miyamoto^{1,21}, T. Michikami¹⁶, T. Hiroi¹⁷, R. Hemmi¹, O. S. Barnouin¹⁸, C. M. Ernst¹⁸, K. Kitazato¹¹, T. Nakamura¹⁹, L. Riu⁷, H. Senshu³, H. Kobayashi², S. Sasaki⁴, G. Komatsu²⁰, N. Tanabe¹, Y. Fujij⁸, T. Irie², M. Suemitsu², N. Takaki¹, C. Sugimoto¹, K. Yumoto¹, M. Ishida¹⁰, H. Kato¹⁰, K. Moroi¹⁰, D. Domingue²¹, P. Michel²², C. Pilorget²³, T. Iwata^{7,24}, M. Abe^{7,24}, M. Ohtake^{7,11}, Y. Nakauchi⁷, K. Tsumura^{25,18}, H. Yabuta²⁶, Y. Ishihara²⁷, R. Noguchi⁷, K. Matsumoto^{24,28}, A. Miura⁷, N. Namiki^{24,28}, S. Tachibana¹, M. Arakawa⁹, H. Ikeda²⁹, K. Wada³, T. Mizuno^{7,24}, C. Hirose²⁹, S. Hosoda⁷, O. Mori⁷, T. Shimada⁷, S. Soldini^{7,30}, R. Tsukizaki⁷, H. Yano^{7,24}, M. Ozaki^{7,24}, H. Takeuchi^{7,24}, Y. Yamamoto^{7,24}, T. Okada^{7,1}, Y. Shimaki⁷, K. Shirai⁷, Y. Iijima⁷ §, H. Noda^{24,28}, S. Kikuchi⁷, T. Yamaguchi^{7#}, N. Ogawa⁷, G. Ono²⁸, Y. Mimasu⁷, K. Yoshikawa²⁹, T. Takahashi^{7\$}, Y. Takei^{7,29}, A. Fujii⁷, S. Nakazawa⁷, F. Terui⁷, S. Tanaka^{7,24}, M. Yoshikawa^{7,24}, T. Saiki⁷, S. Watanabe^{2,7}, and Y. Tsuda^{7,24}.







- 1. The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan.
- 2. Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan.
- 3. Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, Narashino 275-0016, Japan.
- 4. Osaka University, Toyonaka 560-0043, Japan.
- 5. Departamento de Astrofísica, Universidad de La Laguna, 38206 La Laguna, Tenerife, Spain.
- 6. Instituto de Astrofísica de Canarias, 38205 La Laguna, Tenerife, Spain
- 7. Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Sagamihara 252–5210, Japan.
- 8. Kochi University, Kochi 780-8520, Japan.
- 9. Kobe University, Kobe 657-8501, Japan.
- 10. Rikkyo University, Tokyo 171-8501, Japan.
- 11. University of Aizu, Aizu-Wakamatsu 965-8580, Japan.
- 12. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tokyo 135-0064 Japan.
- 13. JAXA Space Exploration Center, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagamihara 252–5210, Japan.
- 14. Meiji University, Kawasaki 214-8571, Japan.
- 15. Auburn University, Auburn, AL 36849, USA.
- 16. Kindai University, Higashi-Hiroshima 739-2116, Japan.
- 17. Brown University, Providence, RI 02912, USA.
- 18. Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Laurel, MD 20723, USA.
- 19. Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan.
- 20. International Research School of Planetary Sciences, Università d'Annunzio, 65127 Pescara, Italy.







- 20. International Research School of Planetary Sciences, Università d'Annunzio, 65127 Pescara, Italy.
- 21. Planetary Science Institute, Tucson, AZ 85719-2395, USA.
- 22. Universite Côte d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur, Centre National de le Recherche Scientifique, Laboratoire Lagrange, 06304 Nice, France.
- 23. Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Sud, Orsay, France.
- 24. SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), Hayama 240-0193, Japan.
- 25. Tokyo City University, Tokyo 158-8557, Japan.
- 26. Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 739-8526, Japan.
- 27. National Institute for Environmental Studies, Tsukuba 305-8506, Japan.
- 28. National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka 181-8588, Japan.
- 29. Research and Development Directorate, JAXA, Sagamihara 252–5210, Japan.
- 30. The University of Liverpool, Liverpool L69 3BX, UK.

*Corresponding author: E-mail: morota@eps.s.u-tokyo.ac.jp

†Affiliation from April 2020: Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Sagamihara 252–5210, Japan.

‡Affiliation from April 2020: Rikkyo University, Tokyo 171-8501, Japan

§ Deceased.

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

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



▶ リュウグウ表面は赤黒物質と青白物質の混合。赤道はやや青白く、中緯度は赤黒く、両極は青白い [Sugita et al. Science 2019]。



参考2:クレーターの色分布と年代推定



- > 赤クレーターと青クレー ターに二極化。中間的な 色のクレーターは少ない。
 > 短期間に赤化。→ 過去に 一時的に太陽に接近した ことを示唆。
- 赤クレーターのサイズ頻 度分布から、リュウグウ形 成から表面赤化までの時 間は約900万年
- 青クレーターのサイズ頻 度分布から、表面赤化の 年代は30~800万年前。

図はMorota et al. (2020)掲載図から 一部 改変したもの





参考4:着陸点付近の色分布





第1回タッチダウン地点付近の反射スペクトルの傾き

- 第1回タッチダウン地点付近は赤物 質、青物質の両方が存在。
- ▶ 太陽による変成をうけた物質、うけて いない物質の両方が採取されたと期 待される。

Morota et al. (2020)

2020/5/8

spacecraft shadow

"Turtle Rock" 0.5 m

参考5:岩の色変化と微粒子拡散の様子



- → 岩石表面に赤黒微粒子が付着していた。
- ▶ 微粒子は表面に沿って放射状に拡散 (画像G、H)。

(D) タッチダウン直前 (2/21 22:28:59) のONC-W1画像。 (E) 画像Dの白点線領域の拡大画像。

- (F)、(G) タッチダウン直後 (2/21 22:29:17 と 22:29:57、それ ぞれタッチダウンから7と47秒後)のONC-W1画像。
- (H) タッチダウンから76秒後 (2/21 22:31:56) のONC-T画像。

Morota et al. (2020)

参考6:ONC-W1に付着した微粒子

2019/3/6-8に実施した降下運用で取得した ONC-W1画像31枚の間で各画素値を平均し て作成した画像。

- ▶ レンズとCCDに微粒子が付着。
- レンズに付着したダストサイズ~
 0.3mm。
- ➤ CCDの付着物はもともとカメラ内部にあっ たダストの可能もある。

Morota et al. (2020)



20



