

小惑星探査機「はやぶさ2」 観測成果論文のScience誌掲載に伴う解説

JAXA はやぶさ2プロジェクト



本日の内容

2018年6月に、小惑星探査機「はやぶさ2」は地球接近炭素質小惑星リュウグウに到着し、リモートセンシング観測や重力計測を行った。

その初期成果をまとめた3編の論文がこの度Science誌に掲載されることが決まった。

これらの論文は2019年3月20日(日本時間)にScience誌のウェブサイトの「First Release」に掲載された。



目次

1. 「はやぶさ2」が到着した炭素質小惑星
162173リュウグウ—コマ型ラブルパイル
 2. 「はやぶさ2」の近赤外分光観測による
小惑星リュウグウの表面組成
 3. リュウグウの表面地形、多色画像、
熱物性から探る母天体の進化
- ・参考資料



1. 「はやぶさ2」が到着した炭素質小惑星 162173リュウグウ—コマ型ラブルパイル

渡邊誠一郎*, 平林正稔, 平田成, 平田直之, 野口里奈, 鳶生有理, 池田人, 巽瑛理, 吉川真, 菊地翔太, 藪田ひかる, 中村智樹, 橘省吾, 石原吉明, 諸田智克, 北里宏平, 坂谷尚哉, 松本晃治, 和た浩二, 千秋博紀, 本田親寿, 道上達広, 竹内央, 神山徹, 本田理恵, 亀田真吾, 布施哲治, 宮本英昭, 小松吾郎, 杉田精司, 岡田達明, 竝木則行, 荒川政彦, 石黒正晃, 安部正真, R. Gaskell, E. Palmer, O. S. Barnouin, P. Michel, A. S. French, J. W. McMahon, D. J. Scheeres, P. A. Abell, 山本幸生, 田中智, 白井慶, 松岡萌, 山田学, 横田康弘, 鈴木秀彦, 吉岡和夫, 長勇一郎, 田中小百合, 西川直輝, 杉山貴亮, 菊地紘, 逸見良道, 山口智宏, 尾川順子, 大野剛, 三樹裕也, 吉川健人, 高橋忠輝, 武井悠人, 藤井淳, 廣瀬史子, 岩田隆浩, 早川雅彦, 細田聡史, 森治, 澤田弘崇, 嶋田貴信, S. Soldini, 矢野創, 月崎竜童, 尾崎正伸, 飯島祐一, 小川和律, 藤本正樹, T.-M. Ho, A. Moussi, R. Jaumann, J.-P. Bibring, C. Krause, 照井冬人, 佐伯孝尚, 中澤暁, 津田雄一

* 責任著者: 名古屋大学, JAXA宇宙科学研究所



背景と概要

- 本論文では、観測から作成された形状モデル、および質量や密度などの物理データから、リュウグウの形状と構造を論じた
- 主要な結果
 - リュウグウは高空隙率のラブルパイル天体*であることが強く示唆される。
 - そのコマ(独楽)型の形状は、かつての高速自転により形成された可能性が高い。
 - 赤道リッジ上にサンプリングのための着地候補領域を見いだした

*天体サイズよりも小さい破片が集まってできた天体



リュウグウの概観

- 逆行回転(自転軸が黄道の南極を向く), 自転周期: 7.63262 ± 0.00002 h
- コマ(独楽)型
- 赤道リッジ
- 全面に多くの岩塊
- 巨礫: オトヒメ
- 歪のない
クレーター
- 赤道 → 中緯度
がけ崩れ

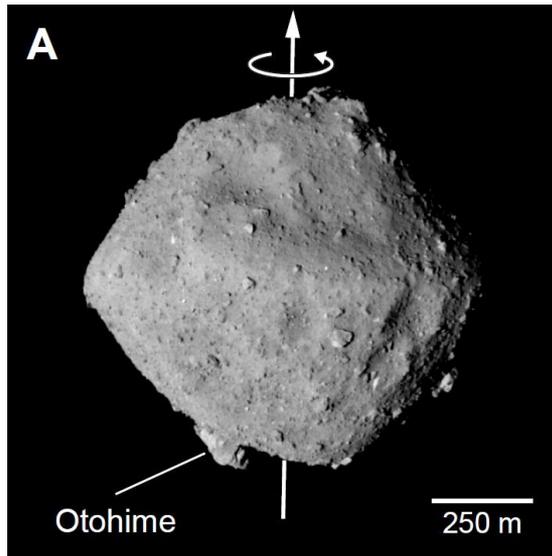


Fig. 1A

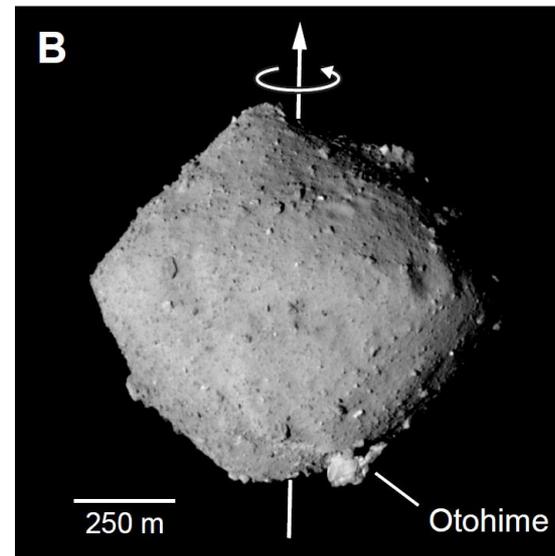
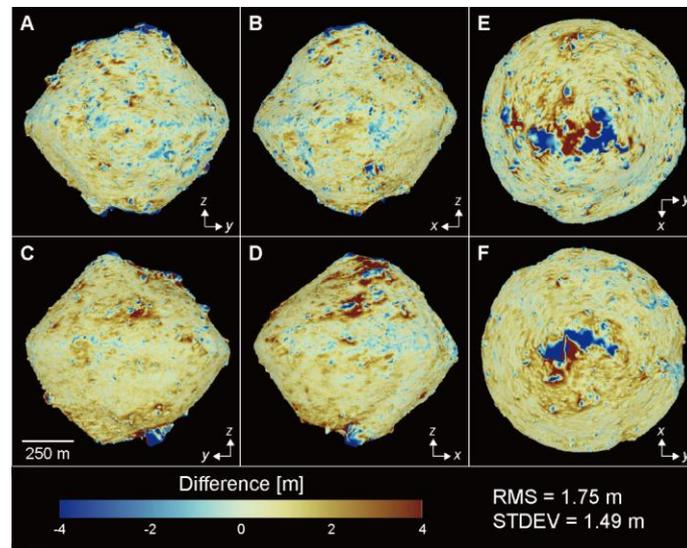
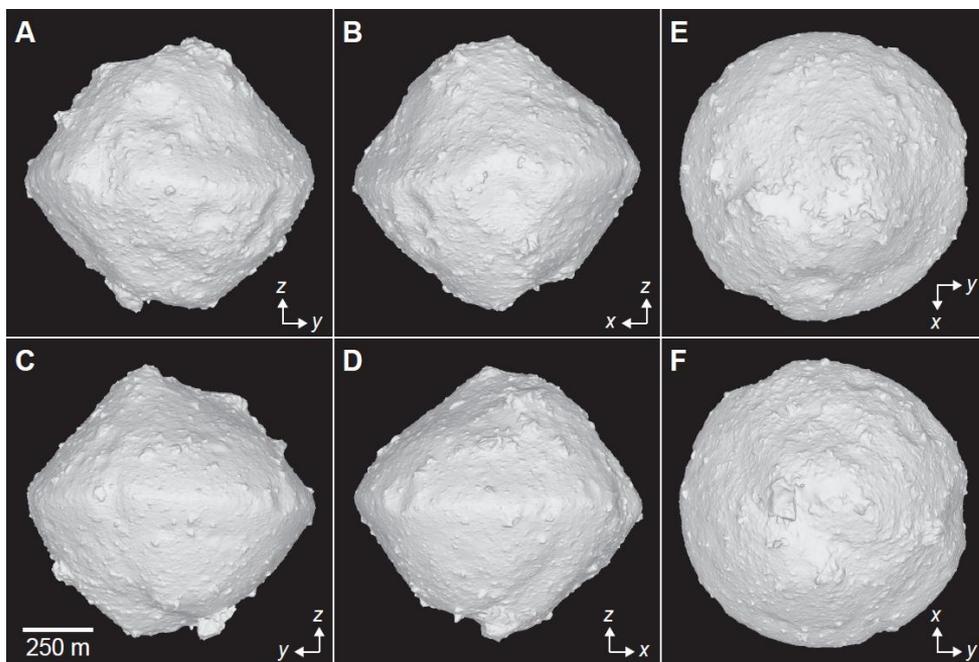


Fig. 1B



リュウグウの形状モデル

- ONC画像, LIDARが測定データ⇒ **形状モデル**
- 2種類作成: SfMモデル(会津大学), SPCモデル(神戸大学)



← Fig.2: SfM形状モデル

↑ Fig. S2: SPCとSfMの違い



リュウグウはラブルパイル天体である

- リュウグウのバルク密度(質量/体積): $1.19 \pm 0.02 \text{ g cm}^{-3}$
- 氷? いいえ, 平衡温度が高すぎ, 氷は中心部でも昇華してしまう.
- 粒子密度が炭素質コンドライト隕石と同じなら, 空隙率が50%以上である. (ラブルパイル天体のイトカワの空隙率は $44 \pm 4\%$)
- 高空隙率は瓦礫が集まってできた構造を持つことを示す.
- さらにオトヒメ(長径約160 m)など巨礫が多数存在する.
 - 巨礫の存在密度(空間密度)は, イトカワでの密度の2倍以上
 - これらはリュウグウのクレーターから放出されたたとすると大きすぎる.
- これらの巨礫は母天体の衝突破壊で生成された破片が再集積した際に持ち込まれたことを強く示唆する.



表面傾斜解析

Fig.3A: 表面傾斜分布 →

*表面傾斜: 表面下向き法線と重力(引力+遠心力)の成す角

- 密度・形状を固定して、自転周期のみ変えた
- 現在の自転周期(7.6時間)では、赤道の両側で急傾斜だが中緯度では傾斜が小さい
- 自転周期が3.5時間となると表面傾斜は平均31度で、その分散が極小となる。

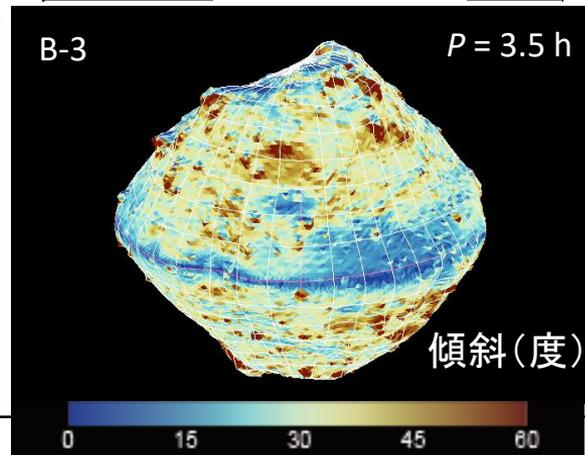
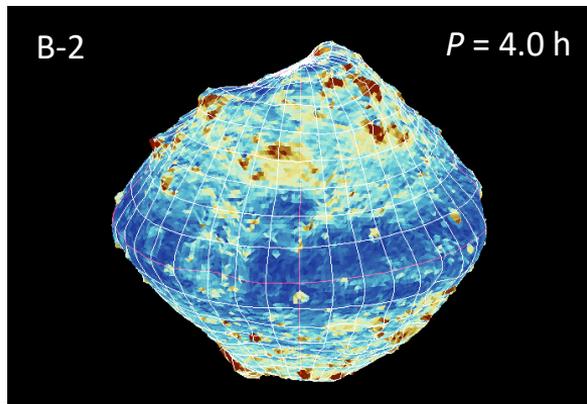
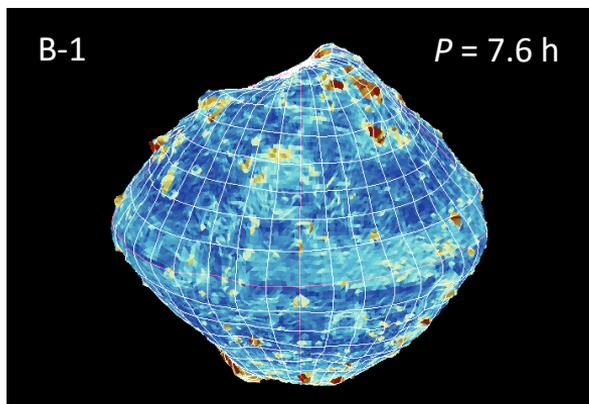
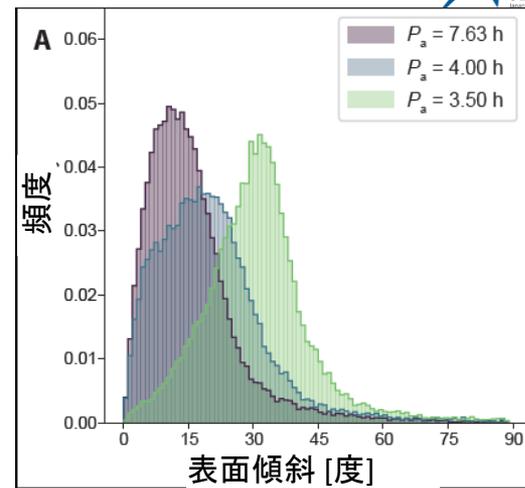


Fig. 3B: 表面傾斜マップ(自転周期:7.6時間, 4.0時間, 3.5時間)



コマ型は過去の高速自転で形成された

- リュウグウ以外の知られているコマ型小惑星はほとんど高速自転天体.
- リュウグウの赤道断面は円に近く、中低緯度の軸対称性が高い.
- 現在のリュウグウの自転周期では、遠心力は引力の1/5に過ぎず、回転による変形は生じない.
- **過去に自転周期が短かった可能性が高い**
 - 母天体破片の再集積時に既に高速自転をしていた
 - 形成後、YORP効果*によってスピニアップした

*太陽加熱を受けた小天体の自転が変化する現象

- 数値計算から、**内部が一様で強度が弱いと内部で構造崩壊(黄色)が生ずることがわかった(右図)**:崩壊領域(黄色)が内部に広がり、赤道面では外向きの変形が生じる.
- もし内部の強度が大きいと、表面で中緯度→赤道の地滑りが生じる可能性がある.

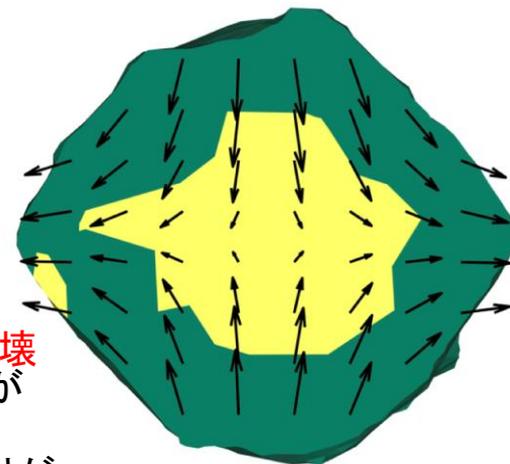


Fig. 3C: 内部変形
自転周期: 3.5時間

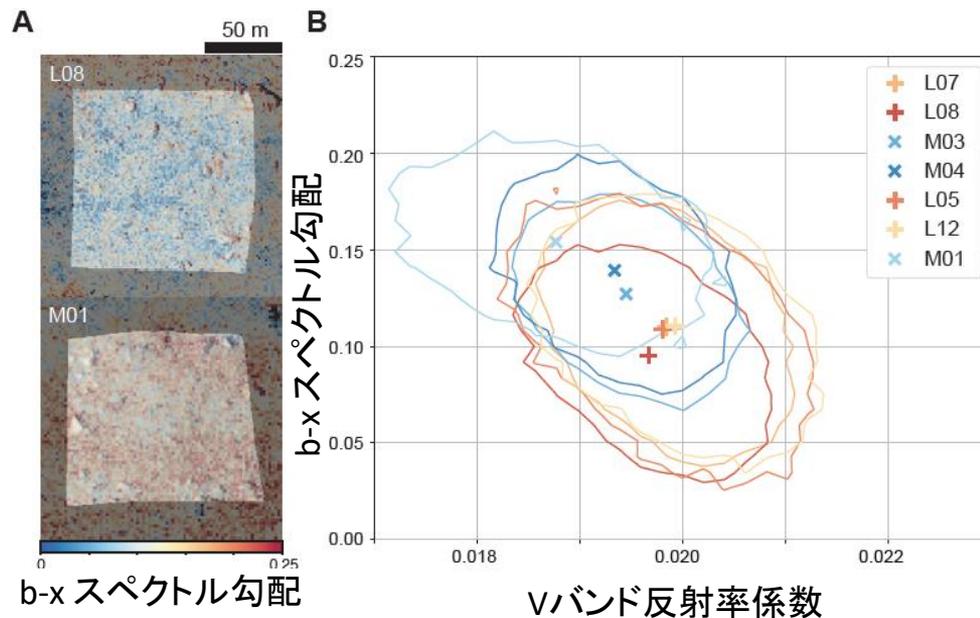


赤道リッジに試料採取の候補領域を選定

赤道リッジは新鮮な物質が露出している可能性が高く、コマ型形成を探る上で重要。赤道リッジ上のL08領域を試料採取の候補点として選んだ。

- 赤道リッジ(L)は青く明るい(反射率が高い)。
- 中緯度(M)は赤く暗い(反射率が高い)。
- 宇宙風化で赤く暗くなるなら、赤道リッジは新鮮。

Fig. 4: (A) L08(赤道付近)とM01(中緯度)の表面の“色”(スペクトル勾配)。(B) 着地候補点の反射率(横軸)とスペクトル勾配(縦軸)





将来展望

- 赤道リッジの物質の新鮮さは、宇宙風化がどう進むのかと関連しており、さらなる地質学的解析と帰還試料による検証が必要である。
- この検証ができれば、高速自転小天体の変形モードを識別可能となる。変形モードの特定は小惑星内部の強度の推定につながる。
- 4月に予定されている衝突装置SCIによる人工クレーター生成実験は、リュウグウ表層の強度を知る上でも重要なものとなると期待される。
- 米国のOSIRIS-RExが探査している炭素質小惑星ベヌーとの詳細な比較をすることで、共通性と個別性をある程度弁別できると期待される。
- 炭素質小惑星の強度は、それらの地球への供給量と供給形態(隕石なのか、より細かな惑星間塵なのか)を解明する上で鍵となる物理量である。



Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu — a spinning-top-shaped rubble pile

Published online in *Science* on 19 March 2019

S. Watanabe^{1,2*}, M. Hirabayashi³, N. Hirata⁴, N. Hirata⁵, R. Noguchi², Y. Shimaki², H. Ikeda⁶, E. Tatsumi⁷, M. Yoshikawa^{2,8}, S. Kikuchi², H. Yabuta⁹, T. Nakamura¹⁰, S. Tachibana^{7,2}, Y. Ishihara^{2†}, T. Morota¹, K. Kitazato⁴, N. Sakatani², K. Matsumoto^{11,8}, K. Wada¹², H. Senshu¹², C. Honda⁴, T. Michikami¹³, H. Takeuchi^{2,8}, T. Kouyama¹⁴, R. Honda¹⁵, S. Kameda¹⁶, T. Fuse¹⁷, H. Miyamoto⁷, G. Komatsu^{18,12}, S. Sugita⁷, T. Okada^{2,7}, N. Namiki^{11,8}, M. Arakawa⁵, M. Ishiguro¹⁹, M. Abe^{2,8}, R. Gaskell²⁰, E. Palmer²⁰, O. S. Barnouin²¹, P. Michel²², A. S. French²³, J. W. McMahon²³, D. J. Scheeres²³, P. A. Abell²⁴, Y. Yamamoto^{2,8}, S. Tanaka^{2,8}, K. Shirai², M. Matsuoka², M. Yamada¹², Y. Yokota^{2,15}, H. Suzuki²⁵, K. Yoshioka⁷, Y. Cho⁷, S. Tanaka⁵, N. Nishikawa⁵, T. Sugiyama⁴, H. Kikuchi⁷, R. Hemmi⁷, T. Yamaguchi^{2††}, N. Ogawa², G. Ono⁶, Y. Mimasu², K. Yoshikawa⁶, T. Takahashi², Y. Takei², A. Fujii², C. Hirose⁶, T. Iwata^{2,8}, M. Hayakawa², S. Hosoda², O. Mori², H. Sawada², T. Shimada², S. Soldini², H. Yano^{2,8}, R. Tsukizaki², M. Ozaki^{2,8}, Y. Iijima^{2‡}, K. Ogawa⁵, M. Fujimoto², T.–M. Ho²⁶, A. Moussi²⁷, R. Jaumann²⁸, J.–P. Bibring²⁹, C. Krause³⁰, F. Terui², T. Saiki², S. Nakazawa², Y. Tsuda^{2,8}



Affiliations:

- 1 Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan.
- 2 Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), JAXA, Sagamihara 252-5210, Japan.
- 3 Auburn University, Auburn, AL 36849, USA.
- 4 University of Aizu, Aizu-Wakamatsu 965-8580, Japan.
- 5 Kobe University, Kobe 657-8501, Japan.
- 6 Research and Development Directorate, JAXA, Sagamihara 252-5210, Japan.
- 7 University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan.
- 8 SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), Hayama 240-0193, Japan.
- 9 Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 739-8526, Japan.
- 10 Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan.
- 11 National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka 181-8588, Japan.
- 12 Chiba Institute of Technology, Narashino 275-0016, Japan.
- 13 Kindai University, Higashi-Hiroshima 739-2116, Japan.
- 14 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tokyo 135-0064 Japan.
- 15 Kochi University, Kochi 780-8520, Japan.
- 16 Rikkyo University, Tokyo 171-8501, Japan.
- 17 National Institute of Information and Communications Technology, Kashima 314-8501, Japan.

18 Università d'Annunzio, 65127 Pescara, Italy.

19 Seoul National University, Seoul 08826, Korea.

20 Planetary Science Institute, Tucson, AZ 85710, USA.

21 Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Laurel, MD 20723, USA.

22 Université Côte d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur, Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Laboratoire Lagrange, 06304 Nice, France.

23 University of Colorado, Boulder, CO 80309, USA.

24 NASA Johnson Space Center, Houston, TX 77058, USA.

25 Meiji University, Kawasaki 214-8571, Japan.

26 DLR (German Aerospace Center), Institute of Space Systems, 28359 Bremen, Germany.

27 CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), 31401 Toulouse, France.

28 DLR, Institute of Planetary Research, 12489 Berlin-Adlershof, Germany.

29 Institute d'Astrophysique Spatiale, 91405 Orsay, France.

30 DLR, Microgravity User Support Center, 51147 Cologne, Germany.

*Corresponding author: E-mail: seicoro@eps.nagoya-u.ac.jp

†Current affiliation: National Institute for Environmental Studies, Tsukuba 305-8506, Japan.

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

‡Deceased.



2. 「はやぶさ2」の近赤外分光観測による 小惑星リュウグウの表面組成

タイトル:

The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2
near-infrared spectroscopy

著者:

北里宏平¹★、Ralph Milliken²、岩田隆浩^{3,4}、安部正真^{3,4}、大竹真紀子^{3,4}、他61名

★責任著者、¹会津大学、²ブラウン大学、³宇宙航空研究開発機構、
⁴総合研究大学院大学、他24機関

(詳細はP24～27に記載)



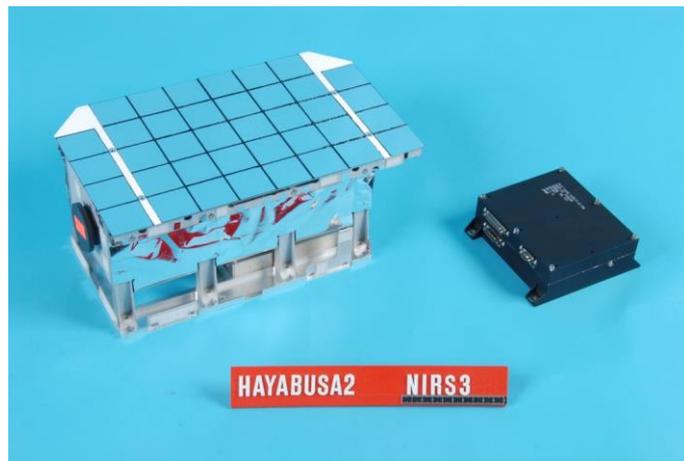
論文の要点

近赤外分光計(NIRS3)の観測から以下のことを明らかにした:

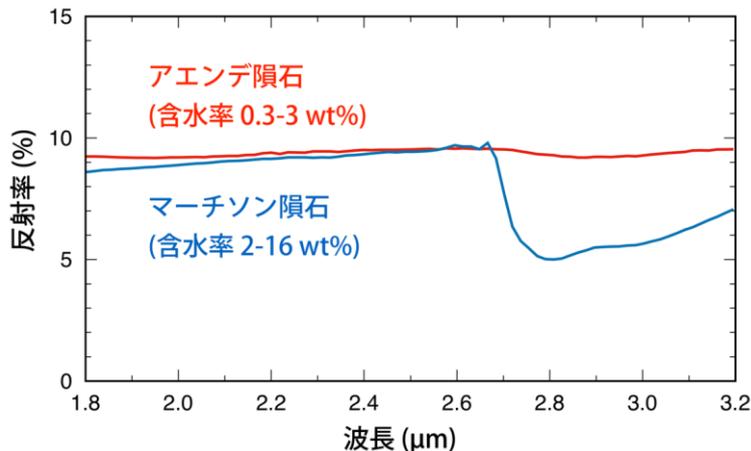
- リュウグウの表面には含水鉱物の形で水が存在する。
- リュウグウは、加熱や衝撃を受けた炭素質隕石に似たスペクトル特徴を持つ。
- リュウグウの表面組成は均質であり、それは母天体で起きた水質変成作用(水と岩石の化学反応)の特徴を反映している。

NIRS3: 装置概要

- 小惑星表面の組成や水の存在を調べる観測装置。
- 水酸基や水分子の顕著な赤外吸収が現れる $3\mu\text{m}$ 波長帯の反射スペクトルを取得する。



NIRS3外観写真(クレジット: JAXA)

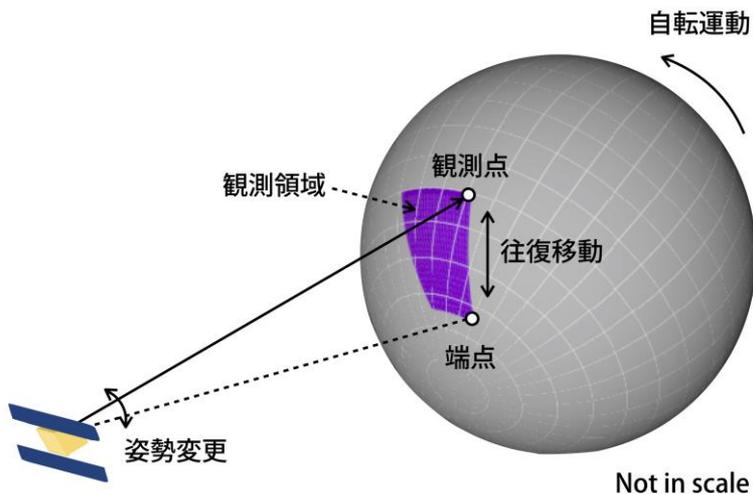


実験室で測定した炭素質隕石の反射スペクトル
クレジット: 東北大/JAXA

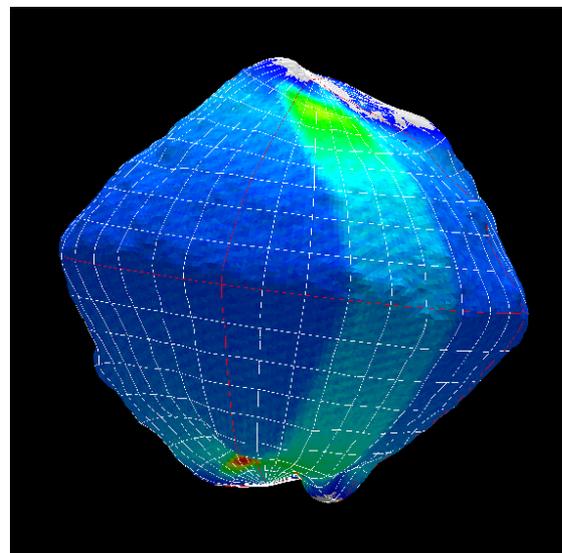


観測実績

着陸地点選定会議(2018.8.17)時点で全表面の90%以上を観測。
(取得したスペクトルは69,000点以上)



スキャン観測のイメージ



7/11 Box-A観測のリウグウ表面における
場所毎の観測頻度. 灰色は未観測領域
クレジット:会津大/JAXA



リュウグウの近赤外反射スペクトル

リュウグウのスペクトル特徴:

- (1) 極端に低い反射率(約2%)
- (2) 緩やかな正のスペクトル勾配
- (3) 2.72 μm の微弱な吸収

(3)は水酸基に起因する吸収(OH吸収)であり、リュウグウ表面に含水鉱物が存在する直接的な証拠。

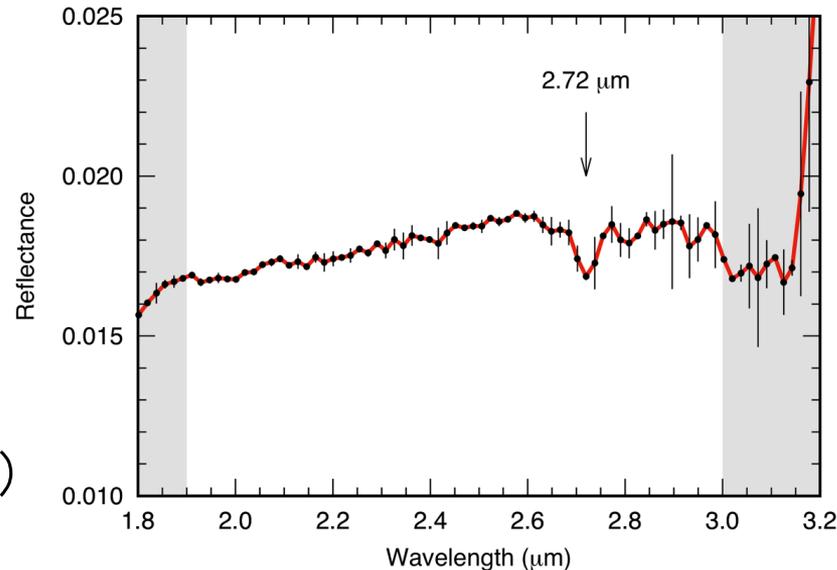


Fig. 1B

NIRS3の観測から得られたリュウグウの近赤外反射スペクトル。灰色の領域はグラフの誤差よりもデータの不定性が大きい波長域。



水の発見に至った経緯

- 2018.06.21: NIRS3で初めてリュウグウを捉えることに成功。
しかし、明らかな水の吸収は見られないことが判明。
微弱な吸収の可能性は残ったが、検出器の感度誤差との切り分けが容易ではなかった。
- 2018.08.02: データ解析を担当するメンバーの間で否定的な意見が多かったため、記者説明会で「水の吸収は検出されていない」旨の説明を行った。
- 2018.08.25: チームメンバーからの提案を受けて、検出器感度を再評価するための追加のデータを取得。
- 2018.08.28: 追加のデータを用いた解析の結果、感度誤差を低減することに成功し、 $2.72\mu\text{m}$ の吸収が本物であるという確証が得られた。
(月のデータとの比較からもそのことを支持する結果が得られた。)
- 2018.10.27: 論文投稿



隕石との比較

リュウグウとスペクトル特徴が一致する隕石は、500°C程度の加熱か10GPa以下の衝撃を受けた炭素質隕石に限られる。

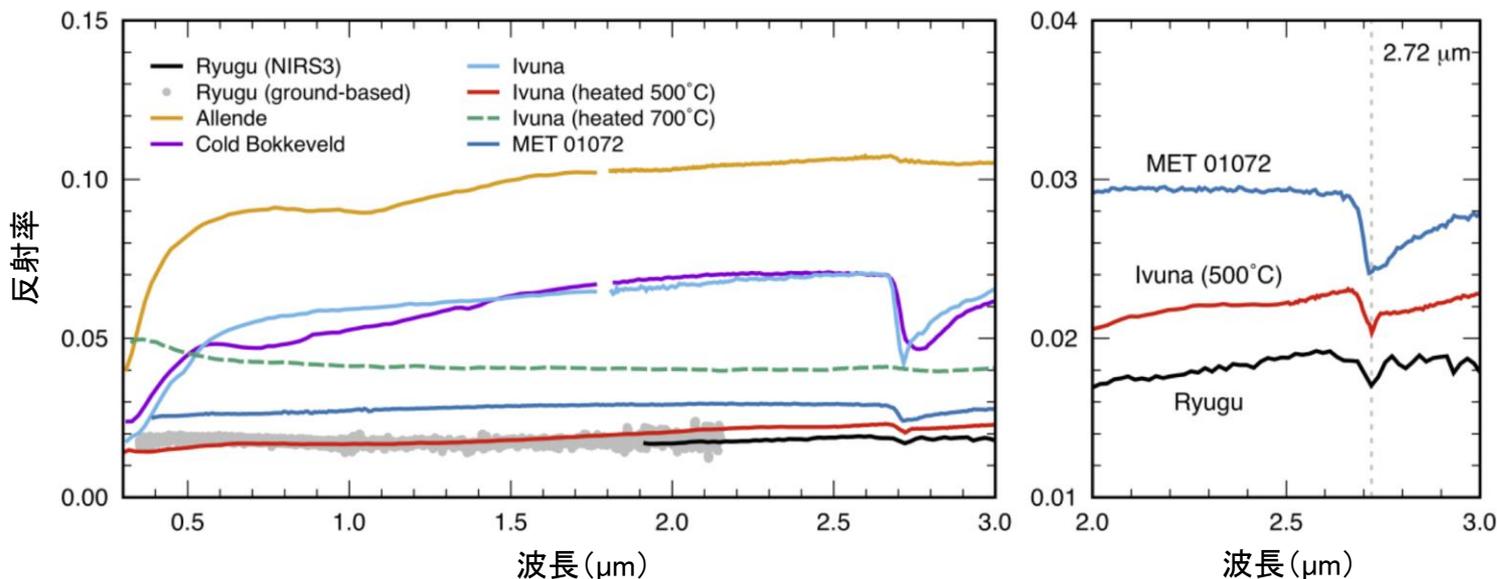


Fig. 3A-B

リュウグウと炭素質隕石の反射スペクトルの比較。右図は左図をNIRS3の波長範囲で拡大したもの。

表面組成の均質性

OH吸収の吸収強度: OHの量比

OH吸収の中心波長: Mg/Feの量比

吸収強度・中心波長の有意な地域差は見られないことから、リュウグウの表面組成は均質と考えられる。

リュウグウがラブルパイル天体であることを考えると、母天体の内部物質も均質な組成であったと推測される。

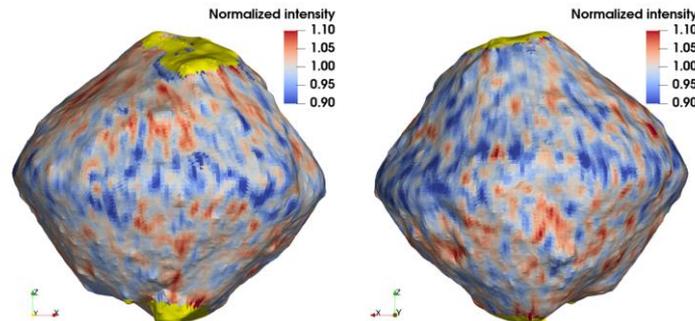


Fig. 2E-F: OH吸収の吸収強度

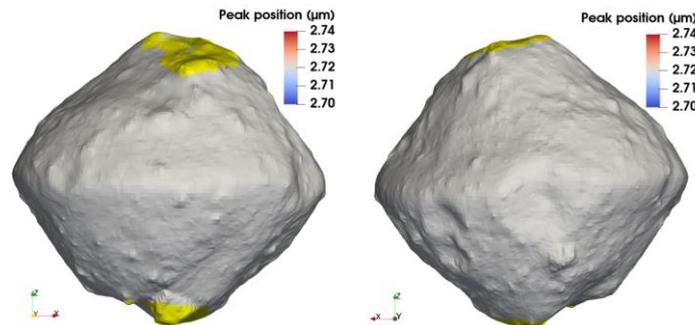


Fig. S7A-B: OH吸収の中心波長



今後の展望

- リュウグウの加熱や衝撃の原因については以下が考えられる：
 - (1) 母天体内部での放射性加熱
 - (2) 母天体が衝突破壊された際の衝撃加熱
 - (3) リュウグウが太陽に接近した際の太陽光加熱
- もしリュウグウが隕石カタログにない物質だとすると、母天体上での水質変成作用が効果的に働かなかったという可能性も残る。
- これらの答えは、「はやぶさ2」が地球に持ち帰る試料の分析によって明らかになると期待される。



【参考】著者一覧

K. Kitazato^{1*}, R. E. Milliken², T. Iwata^{3,4}, M. Abe^{3,4}, M. Ohtake^{3,4}, S. Matsuura⁵, T. Arai⁶,
Y. Nakauchi³, T. Nakamura⁷, M. Matsuoka³, H. Senshu⁸, N. Hirata¹, T. Hiroi², C. Pilorget⁹,
R. Brunetto⁹, F. Poulet⁹, L. Riu³, J.-P. Bibring⁹, D. Takir¹⁰, D. L. Domingue¹¹, F. Vilas¹¹,
M. A. Barucci¹², D. Perna^{13,12}, E. Palomba¹⁴, A. Galiano¹⁴, K. Tsumura^{7,15}, T. Osawa¹⁶,
M. Komatsu⁴, A. Nakato³, T. Arai⁸, N. Takato^{17,4}, T. Matsunaga¹⁸, Y. Takagi¹⁹,
K. Matsumoto^{17,4}, T. Kouyama²⁰, Y. Yokota^{3,21}, E. Tatsumi²², N. Sakatani³, Y. Yamamoto^{3,4},
T. Okada^{3,22}, S. Sugita²², R. Honda²¹, T. Morota²³, S. Kameda²⁴, H. Sawada³, C. Honda¹,
M. Yamada⁸, H. Suzuki²⁵, K. Yoshioka²², M. Hayakawa³, K. Ogawa²⁶, Y. Cho²², K. Shirai³,
Y. Shimaki³, N. Hirata²⁶, A. Yamaguchi^{27,4}, N. Ogawa³, F. Terui³, T. Yamaguchi²⁸, Y. Takei³,
T. Saiki³, S. Nakazawa³, S. Tanaka^{3,4}, M. Yoshikawa^{3,4}, S. Watanabe^{23,3}, Y. Tsuda^{3,4}



【参考】所属機関一覧(1/3)



¹The University of Aizu, Fukushima, Japan.

²Brown University, Providence, RI, USA.

³Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Sagami, Japan.

⁴The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Kanagawa, Japan.

⁵Kwansei Gakuin University, Hyogo, Japan.

⁶Ashikaga University, Tochigi, Japan.

⁷Tohoku University, Sendai, Japan.

⁸Chiba Institute of Technology, Chiba, Japan.

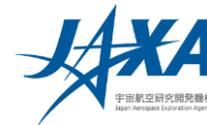
⁹Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Sud, Orsay, France.

¹⁰Jacobs, Astromaterials Research and Exploration Science, NASA Johnson Space Center, Houston, TX, USA.

¹¹Planetary Science Institute, Tucson, AZ, USA.



【参考】所属機関一覧(2/3)



¹²Laboratoire d' Etudes Spatiales et d' Instrumentation en Astrophysique (LESIA),
Observatoire de Paris, Meudon, France.

¹³Osservatorio Astronomico di Roma, Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF), Monte Porzio
Catone, Italy.

¹⁴Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali, INAF, Roma, Italy.

¹⁵Tokyo City University, Tokyo, Japan.

¹⁶Japan Atomic Energy Agency, Ibaraki, Japan.

¹⁷National Astronomical Observatory of Japan, Tokyo, Japan.

¹⁸National Institute for Environmental Studies, Ibaraki, Japan.

¹⁹Aichi Toho University, Nagoya, Japan.

²⁰National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tokyo, Japan.

²¹Kochi University, Kochi, Japan.

²²The University of Tokyo, Tokyo, Japan.



【参考】所属機関一覧(3/3)



²³Nagoya University, Nagoya, Japan.

²⁴Rikkyo University, Tokyo, Japan.

²⁵Meiji University, Tokyo, Japan.

²⁶Kobe University, Kobe, Japan.

²⁷National Institute of Polar Research, Tokyo, Japan.

²⁸Mitsubishi Electric Corporation, Kanagawa, Japan.



3. リュウグウの表面地形、多色画像、 熱物性から探る母天体の進化

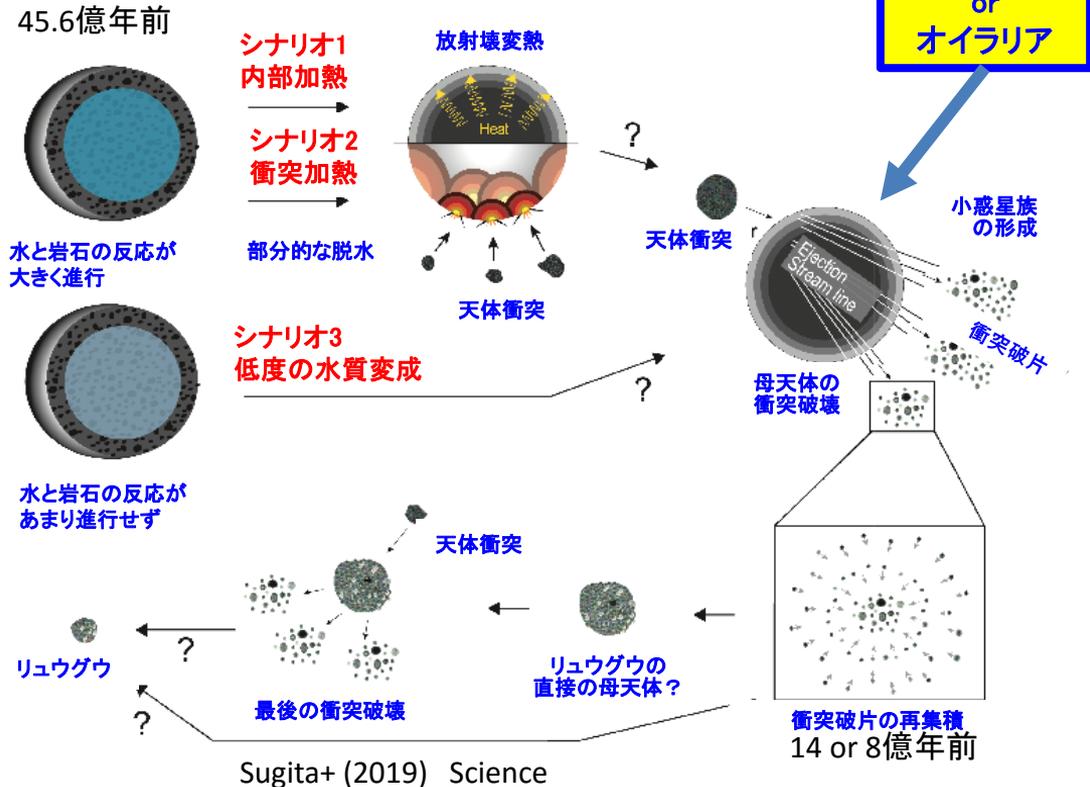
説明者: 杉田精司 (東京大学)

著者: S. Sugita, R. Honda, T. Morota, S. Kameda, H. Sawada, E. Tatsumi, M. Yamada, C. Honda, Y. Yokota, T. Kouyama, N. Sakatani, K. Ogawa, H. Suzuki, T. Okada, N. Namiki, S. Tanaka, Y. Iijima, K. Yoshioka, M. Hayakawa, Y. Cho, M. Matsuoka, N. Hirata, N. Hirata, H. Miyamoto, D. Domingue, M. Hirabayashi, T. Nakamura, T. Hiroi, T. Michikami, P. Michel, R. Ballouz, O. S. Barnouin, C. M. Ernst, S. E. Schröder, H. Kikuchi, R. Hemmi, G. Komatsu, T. Fukuhara, M. Taguchi, T. Arai, H. Senshu, H. Demura, Y. Ogawa, Y. Shimaki, T. Sekiguchi, T. G. Müller, A. Hagermann, T. Mizuno, H. Noda, K. Matsumoto, R. Yamada, Y. Ishihara, H. Ikeda, H. Araki, K. Yamamoto, S. Abe, F. Yoshida, A. Higuchi, S. Sasaki, S. Oshigami, S. Tsuruta, K. Asari, S. Tazawa, M. Shizugami, J. Kimura, T. Otsubo, H. Yabuta, S. Hasegawa, M. Ishiguro, S. Tachibana, E. Palmer, R. Gaskell, L. Le Corre, R. Jaumann, K. Otto, N. Schmitz, P. A. Abell, M. A. Barucci, M. E. Zolensky, F. Vilas, F. Thuillet, C. Sugimoto, N. Takaki, Y. Suzuki, H. Kamiyoshihara, M. Okada, K. Nagata, M. Fujimoto, M. Yoshikawa, Y. Yamamoto, K. Shirai, R. Noguchi, N. Ogawa, F. Terui, S. Kikuchi, T. Yamaguchi, Y. Ohki, Y. Takao, H. Takeuchi, G. Ono, Y. Mimasu, K. Yoshikawa, T. Takahashi, Y. Takei, A. Fujii, C. Hirose, S. Nakazawa, S. Hosoda, O. Mori, T. Shimada, S. Soldini, T. Iwata, M. Abe, H. Yano, R. Tsukizaki, M. Ozaki, K. Nishiyama, T. Saiki, S. Watanabe, Y. Tsuda.



論文の要点

- 母天体からリュウグウへの進化の全体像を提唱。
 - リュウグウは小惑星ポラナないしオイリアの衝突破壊で生まれた可能性が高い。
 - リュウグウは、形成時に獲得した水分を加熱脱水で部分的に失った母天体から産まれた可能性が高い。
 - リュウグウの岩塊は衝突角礫岩である可能性が高い。



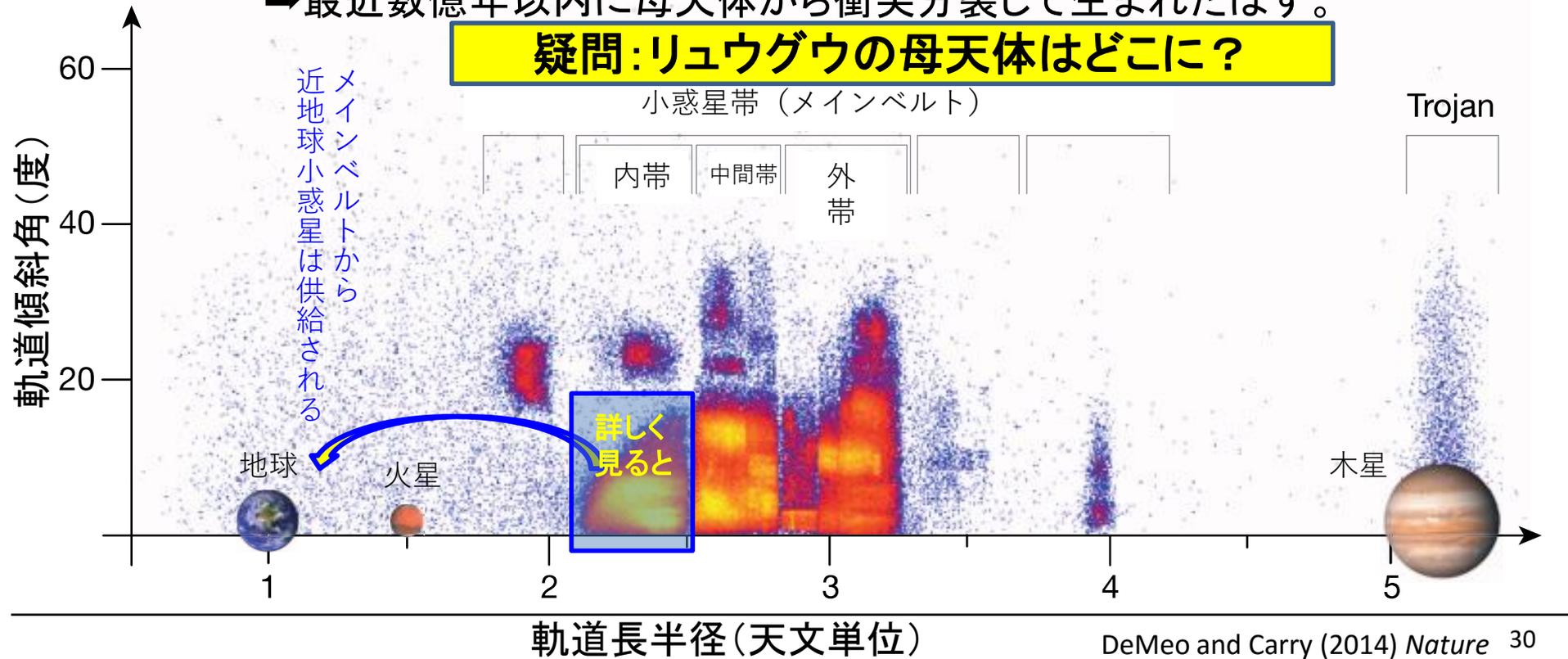
- 小惑星帯から地球が受け取ってきた水や炭素の量は、母天体内での加熱脱水反応の軽重で決まっているのかもしれない。

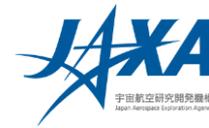


小惑星帯の構造とリュウグウの起源

- リュウグウの故郷は小惑星帯の内帯(確率90%以上)
- リュウグウは45億年を生き残るには小さすぎる。
 ➔最近数億年以内に母天体から衝突分裂して生まれたはず。

疑問:リュウグウの母天体はどこに?

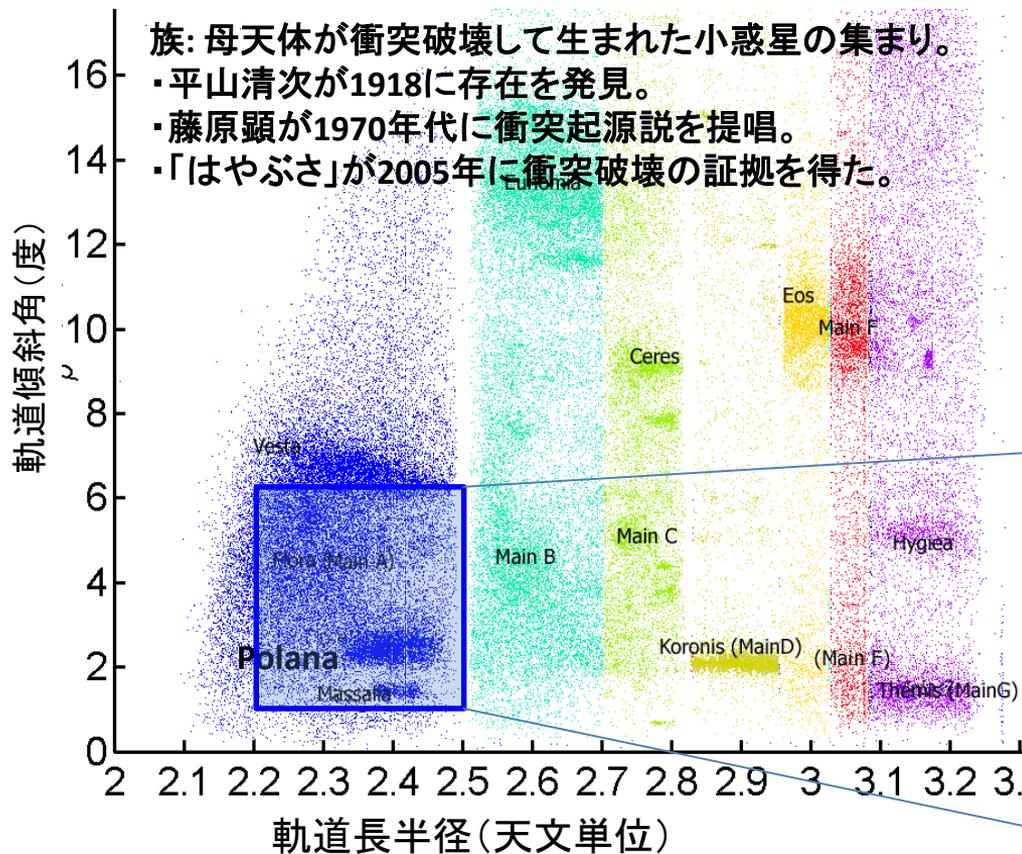




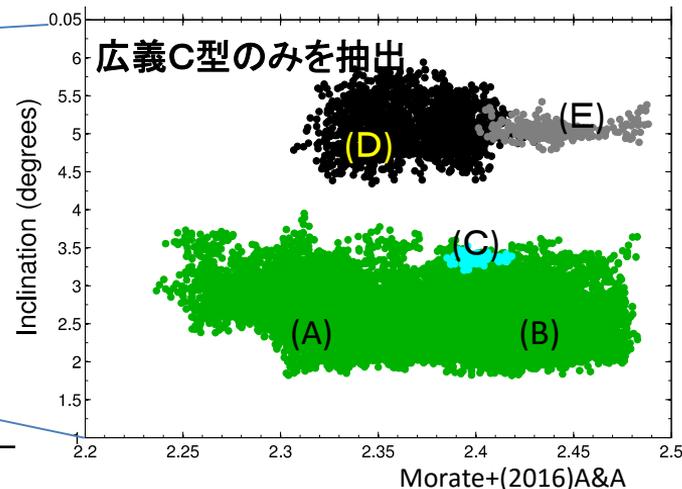
内帯の小惑星族

族: 母天体が衝突破壊して生まれた小惑星の集まり。

- ・平山清次が1918に存在を発見。
- ・藤原顕が1970年代に衝突起源説を提唱。
- ・「はやぶさ」が2005年に衝突破壊の証拠を得た。



- ・ 幾つもの小惑星族がある！
 - ・ だが、内帯の族の大半は広義のS型。
 - ・ リュウグウと同じ広義のC型の族は少ない。⇒ 母天体候補は限られる。
- A) ポラナ族 (B~Cb型)
 B) オイラリア族 (B~Cb型)
 C) クラリッサ族 (B~Cb型) 小規模
 D) エリゴネ族 (Ch型)
 E) スラミティス族 (未定) 小規模



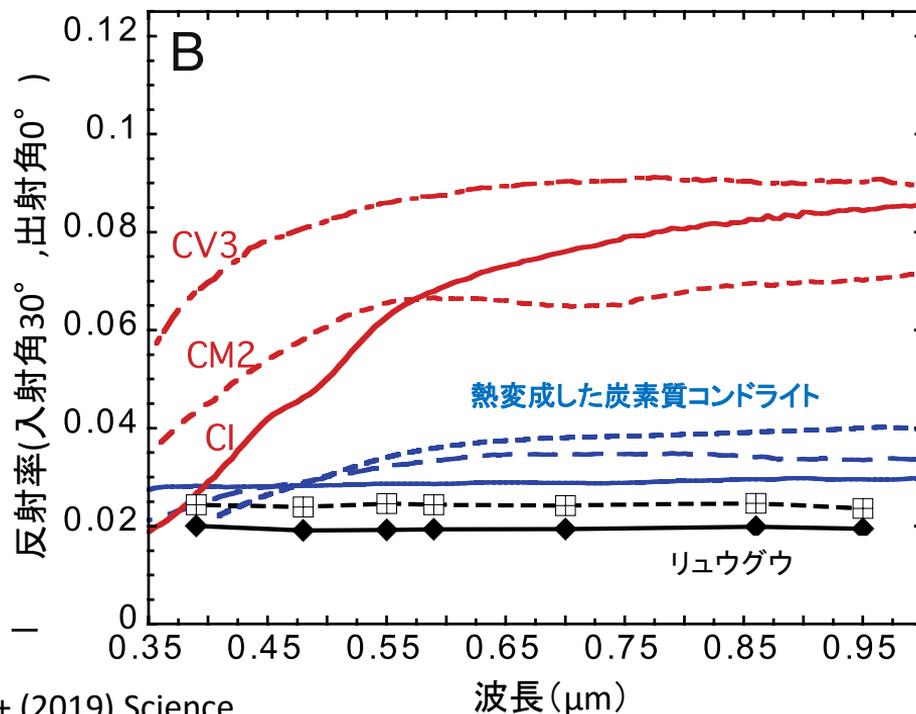
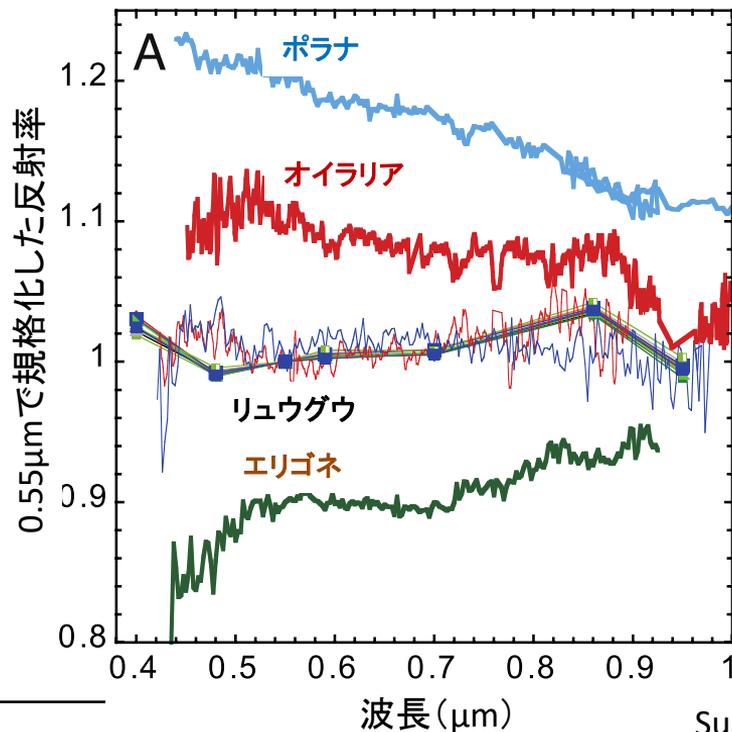


結果1: リュウグウの全球平均色



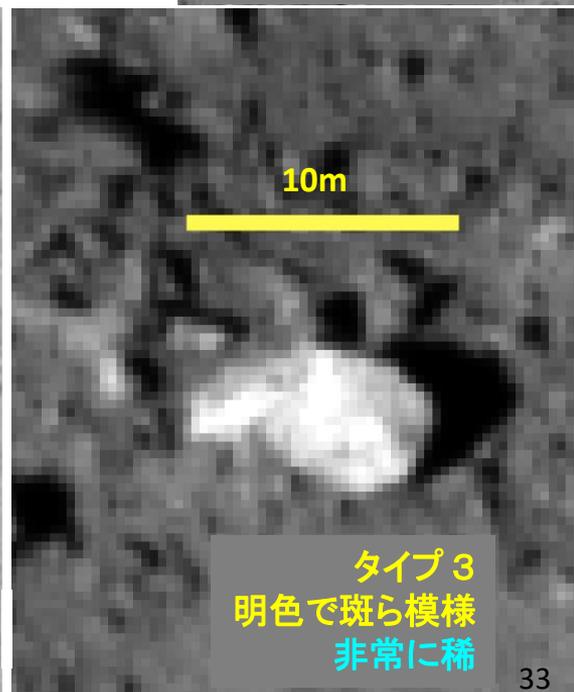
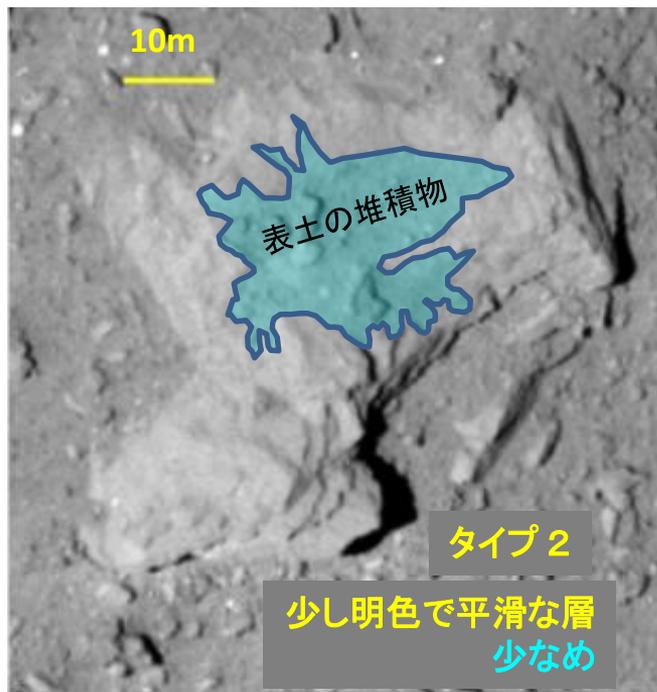
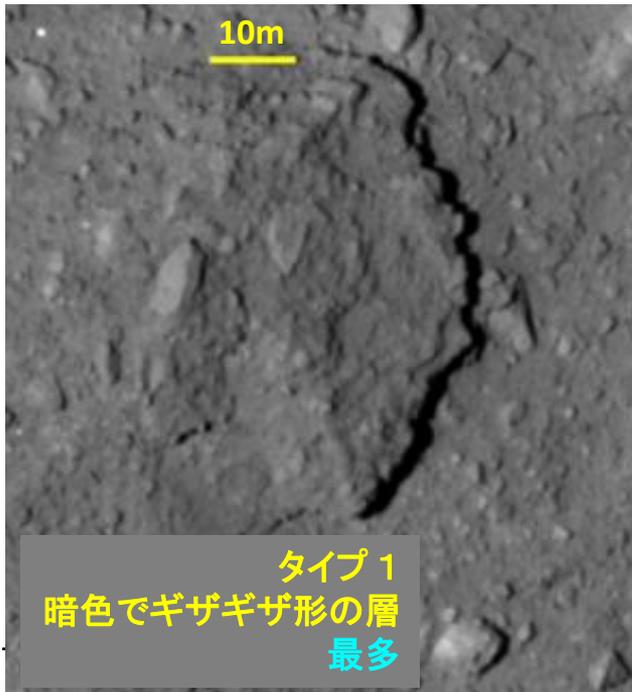
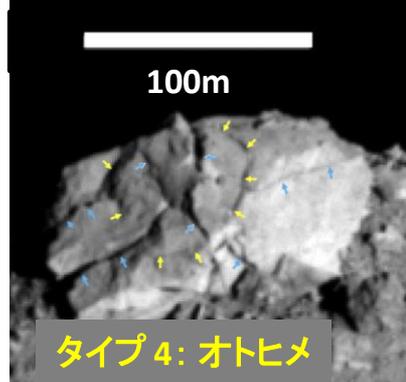
- リュウグウの色(スペクトル)の特徴
 - 明確な $0.7\mu\text{m}$ 吸収を持たない。
 - $0.55\mu\text{m}$ 付近から短波長側の吸収が弱い。
 - 反射率が非常に低い(幾何アルベド=4.5%, 反射率=1.9%)

- リュウグウの色の特徴は、
 - 小惑星ポラナ、オイラリアと一致
 - エリゴネとは不一致。
 - 隕石では、CM, CI, CVなどと不一致
 - 熱変成した炭素質コンドライトと一致。



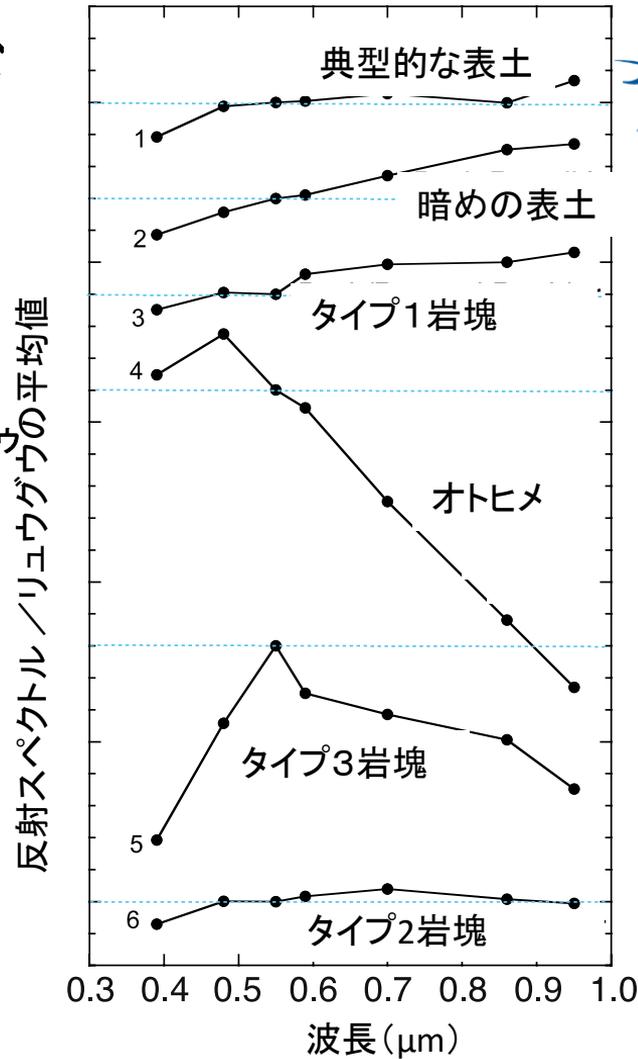
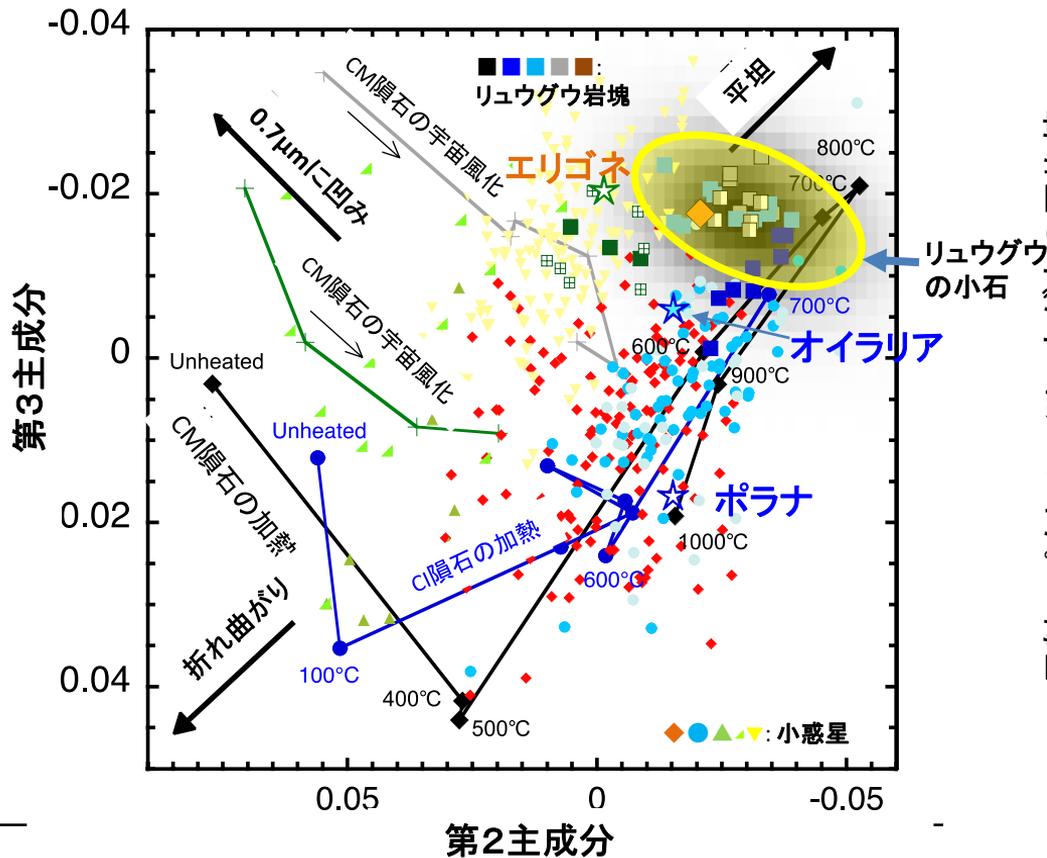


結果2: 岩塊には4タイプある。





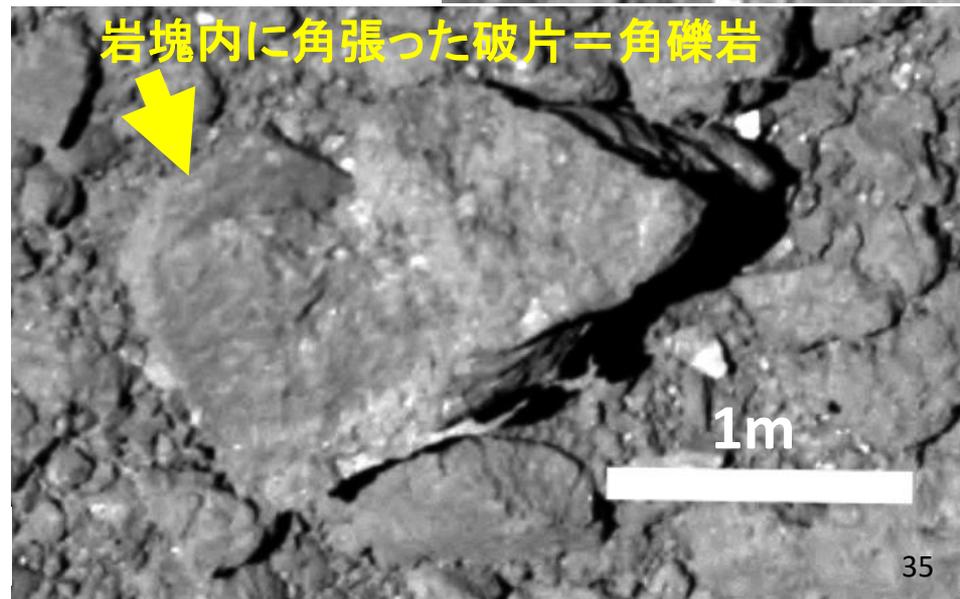
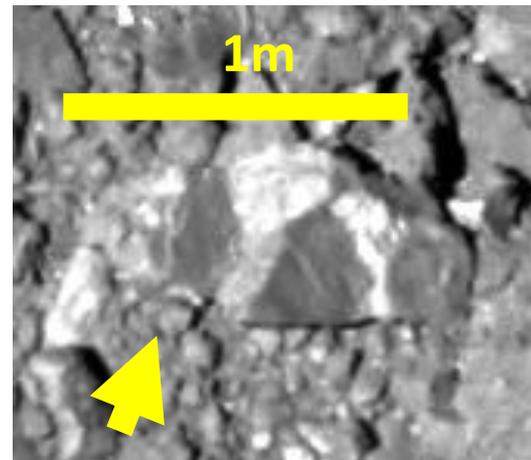
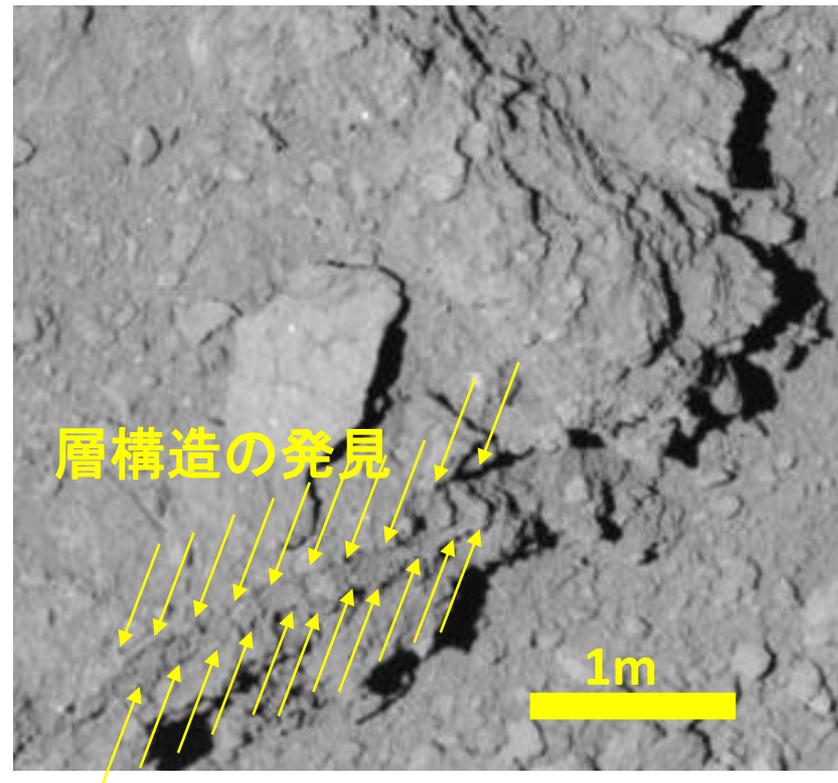
結果3: 色の多様性は炭素質コンドライトの加熱脱水過程と調和的





結果4. 衝突角礫岩と層構造の発見

- 衝突破壊とその後の堆積過程で形成したと推測される。

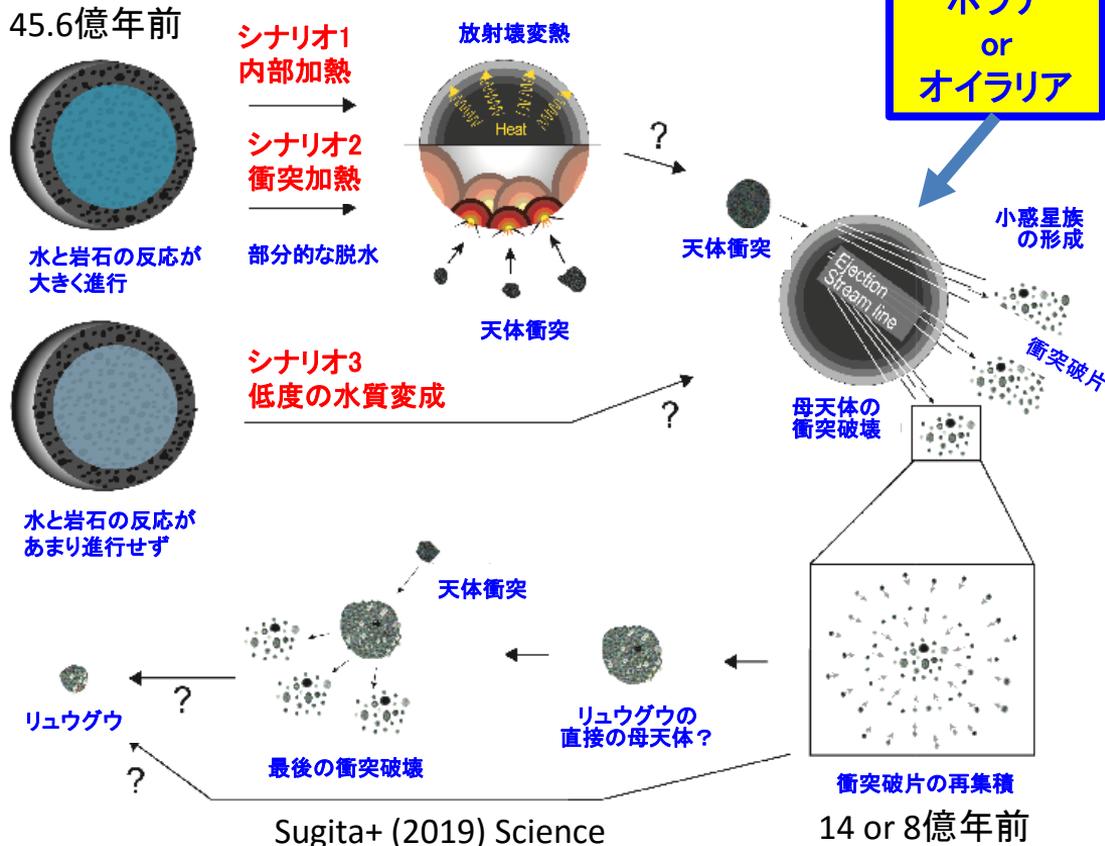




論文の要点

母天体からリュウグウへの進化の全体像を提唱。

- リュウグウは小惑星ポラナないしオイリアの衝突破壊で生まれた可能性が高い。
- リュウグウは、形成時に獲得した水分を加熱脱水で部分的に失った母天体から生まれた可能性が高い。
- リュウグウの岩塊は衝突角礫岩である可能性が高い。



- 小惑星帯から地球が受け取ってきた水や炭素の量は、母天体内での加熱脱水反応の軽重で決まっているのかもしれない。



今後の展望、波及効果



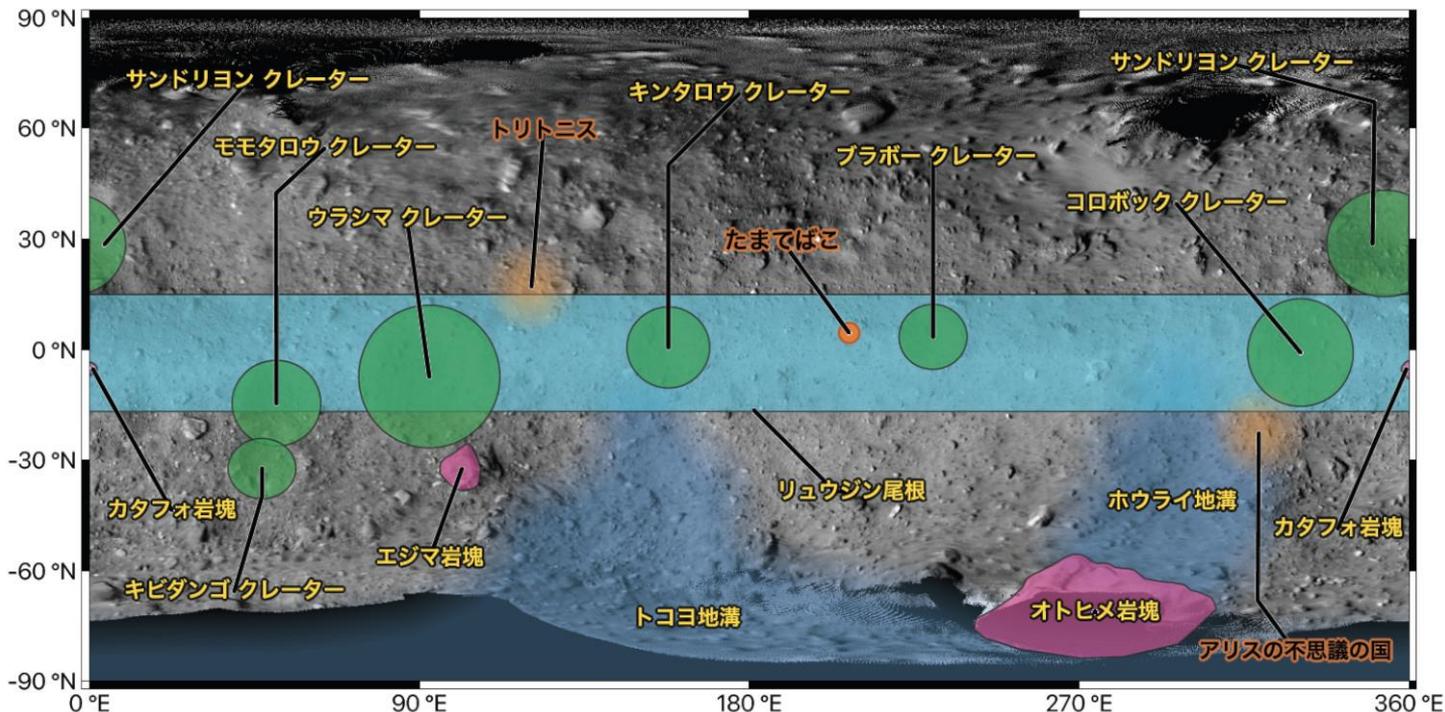
- 回収試料の分析から、衝突年代が判明する可能性がある。
 - ポラナ(14億年前)とオイラリア(8億年前)のどちらが本当の親か分かる。
- ポラナとオイラリアは、C型小惑星(含水鉱物や炭素を含む)の破片を地球に最も多く供給している天体である。
 - ➡小惑星帯から地球が受け取ってきた水や炭素の量は、母天体内での加熱脱水反応の軽重で決まっているのかもしれない。



参考資料



小惑星リュウグウ地名地図(改訂版)



注:トリトニス(MINERVA-II1の着陸地)、アリスの不思議の国(MASCOT着陸地)、たまてぼこ(1回目のタッチダウン地点)はニックネーム(愛称)で、国際天文学連合(IAU)に認められた地名ではない。他の地名はIAUで認められた正式名称である。

(画像のクレジット: JAXA)