

「はやぶさ2」による小惑星リュウグウの科学探査

名古屋大学大学院環境学研究科の 渡邊 誠一郎 教授は、2012 年より、宇宙航空研究開発機構（JAXA）が開発していた探査機「はやぶさ2」による小惑星リュウグウ（以下、「リュウグウ」という）探査プロジェクトのプロジェクト・サイエンティストとして、研究を統括してきました。また、同研究科の 諸田 智克 講師は、探査機搭載の光学航法カメラ（ONC-T）チームの主力メンバーとして、クレーターなどの画像解析を進めるとともに、試料採取をする着地点の選定のための画像解析において、中核的役割を担ってきました。

「はやぶさ2」は2018年6月にリュウグウに到着し、近傍観測を重ねつつ、ローバーや着陸機を分離・着陸させ、岩が点在する表面の様子を明らかにしました。探査プロジェクトは着地点選定作業を進め、着地可能領域を絞りこみました。2019年2月、目標領域への高精度の着地に成功し、表面試料が採取できた公算が高いと判断しています。さらに、4月には探査機から分離された衝突装置によって、銅球をリュウグウに衝突させ、分離カメラで放出物の撮像に成功し、その画像から人工のクレーターが掘削された可能性が高いと判断しています。

「はやぶさ2」の初期研究成果は、4月19日付米国科学雑誌サイエンスに3編の論文として公開されました。これらの論文で、リュウグウが破片の集積ででき、過去の高速自転で形状形成と表面の均質化が進んだ可能性が高く、その過程は天体強度に依存することを指摘しました。衝突装置の実験から得られる天体強度の情報は、小惑星帯から地球への水・有機物の供給過程を知る上で貴重なものと期待されます。

【ポイント】

- ✓ 探査機「はやぶさ2」の観測によって、リュウグウは赤道リッジ^{注1)}をもつコマ（独楽）型天体であること、岩塊（ボルダー）が表面全域に多く点在すること、赤道付近に大きなクレーターが存在することなどの特徴が明らかになりました。
- ✓ リュウグウは破片が集積してできた天体であることが明らかとなり、過去の高速自転による変形で形成されたと推定されます。数値計算により、天体内部の強度が弱く、一様な場合、内部から変形が進むことを示しました。
- ✓ 岩塊が密に分布する表面に対して、着陸安全性と科学的評価の両面から試料採取のための着地点選定作業を進めました。その結果、赤道リッジ上に第一候補地域を選び、その中の半径3mの領域を目標とし、ピンポイント着地成功に導きました。
- ✓ 衝突装置によって発射された弾丸により、人工クレーターの生成に成功した公算が高く、その直径から、天体内部の強度の推定が可能になります。小惑星帯から地球への物質輸送過程を明らかにする上で、小惑星の強度は鍵として重要です。

【研究背景と内容】

2014年12月に打ち上げられた小惑星探査機「はやぶさ2」は、2018年6月に炭素質小惑星^{注2)}（C型小惑星）リュウグウに到着しました。約1ヶ月間の近傍観測から、リュウグウの姿が明らかになりました。天体質量を体積で割った密度（バルク密度）は $1.19 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ という低さであり、空隙率が60%近いと推定されます。表面に大きな岩塊（ボルダー）が点在することとあわせて、リュウグウがより大きな母天体の破壊で生じた破片が再集積してできた天体（ラブルパイル天体）であることを強く示唆します。自転周期は7.63時間と比較的ゆっくり回転していますが、その形状は高速自転天体に良く見られるコマ型（そろばん玉のような形）でした。赤道断面が円形に近いことなどから、この形状は高速自転による回転不安定で形成されたと推定されます。つまり、リュウグウは、かつて高速自転をしていて、その際に現在の形状が形成され、その後自転周期が長くなり、現在の周期になったと想定されます。

リュウグウのコマ型形状がどのようにして形成されたのかはわかっていません。渡邊らは数値計算によって、内部が一様で強度^{注3)}が弱いと、内部変形が生じることを示しました。遠心力によって赤道面周辺で外向きに変形するのに対し、それを補うように回転軸に沿っては赤道に向かうような変形が生じます（図1）。しかし、内部の強度が強いと破壊が生じず、変形は表面において地滑りの形で起こると考えられます。つまり、天体の強度（分布）によって、変形の様式が変化します。では、リュウグウは強いのでしょうか、脆弱なのでしょうか。表面に点在する岩塊は、内部により大きな天体スケールの岩塊が存在していて強いことを示唆しているようにも思えます。しかし、サンプル採取の際には推進装置の噴射によって岩塊が壊れるような画像も得られており、その強度は、案外、弱いのかもかもしれません。

実は、衝突装置SCIによる人工クレーター実験（「成果の意義」参照）は、天体強度を測る実験とみなすこともできます。一定の重さの弾丸を一定の速度で衝突させる場合、標的物体の強度が弱くなるにつれて、より大きなクレーターができます。強度が0、つまり、粒同士を互いに引きつけ合う力が働かない砂地では、最も大きなクレーターができます。私たちはSCIが作った人工クレーターの大きさを測ることで、リュウグウの強度を推定し、どのようにしてコマ型

ができたのかを明らかにしたいと考えています。

「はやぶさ 2」の最大の目的はリュウグウの表面試料を地球に持ち帰ることです。そのため、到着直後から試料採取のための着地(タッチダウン)点選定作業を科学評価と安全性評価の両面から進めてきました。科学的評価では、可視光(ONC-T)と近赤外線(NIRS3)による分光観測から、表面反射スペクトル^{注4)}の地域差はかなり小さいことがわかりました。その中で赤道リッジは可視光の波長領域では周囲に対して明るく青く、宇宙線被爆の少ない物質が分布している可能性が指摘されました。安全性評価では、工学的見地から安全性指標を作成し、その値から、約 100 m 四方の 7 つの候補地域を絞り込みました。科学的評価とあわせて、L08 と呼ばれる赤道リッジに位置する地域を第一候補としました(図 2)。

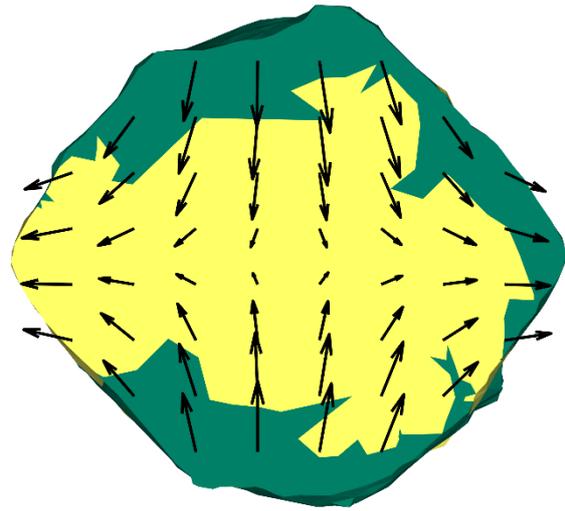


図 1. 自転周期 3.75 時間の際の内部変形の様子の数値計算結果。黄色い部分で破壊が起こり、矢印の方向に変位。Watanabe *et al.* 2019, *Science*.

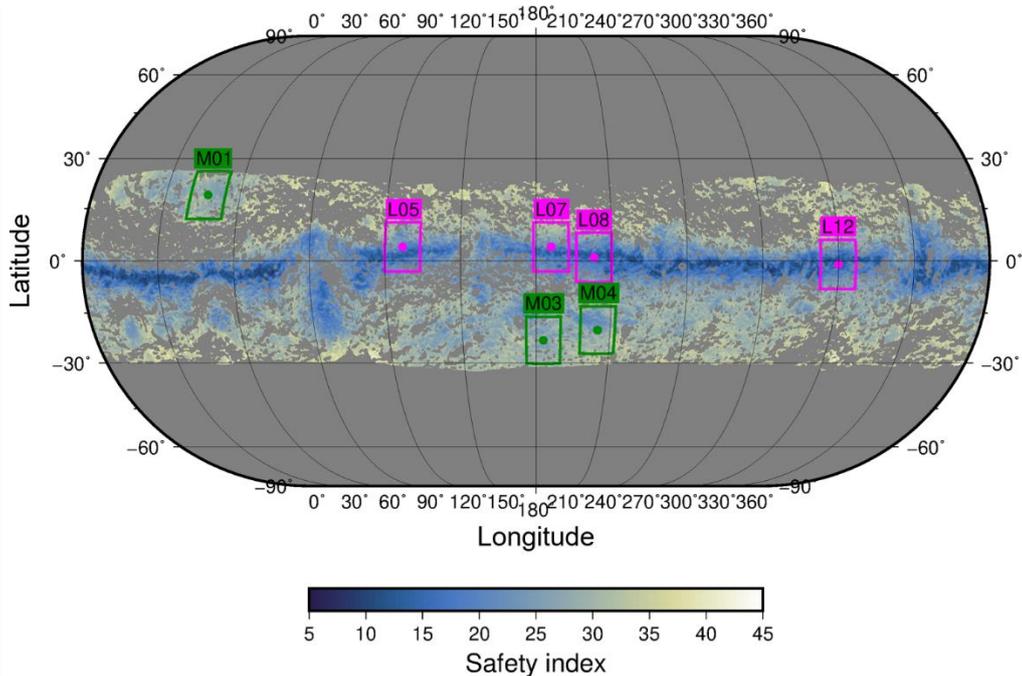


図 2. リュウグウ表面の安全性指標 (小さいほど安全なことを示す) の分布と 7 つの着地候補地域。灰色の部分は着地が不能な領域を示す。着地候補地域の記号で、L で始まる地域は赤道帯のもの、M で始まるのは中緯度のもの。Watanabe *et al.* 2019, *Science*.

その後は、着地のリハーサル運用の機会を活用して撮影された高解像度の ONC-T 画像から、L08 地域の中で、探査機の着地に問題を引き起こすような背の高い岩塊が存在しない領域を探しました。そして、比較的岩塊の少ない領域を狙って、精密着陸を誘導する起点となる

ターゲットマーカ（TM）を落としました。しかし、TM は当初計画した位置より、十数 m ずれ、結果的に図 3 に示された位置に落下しました。このため、諸田講師が中心となって、TM 周辺の岩塊の高さを影の長さなどを元に割り出す解析を行いました。その結果、L08-E1 と名付けられた半径 3 m の円形領域が選ばれました（図 3）。決め手は、その領域の中心にあった「三途岩」と称される岩の高さが、「はやぶさ 2」の推進装置がぶつからない 65 cm 以下の高さしかないと解析されたことでした。

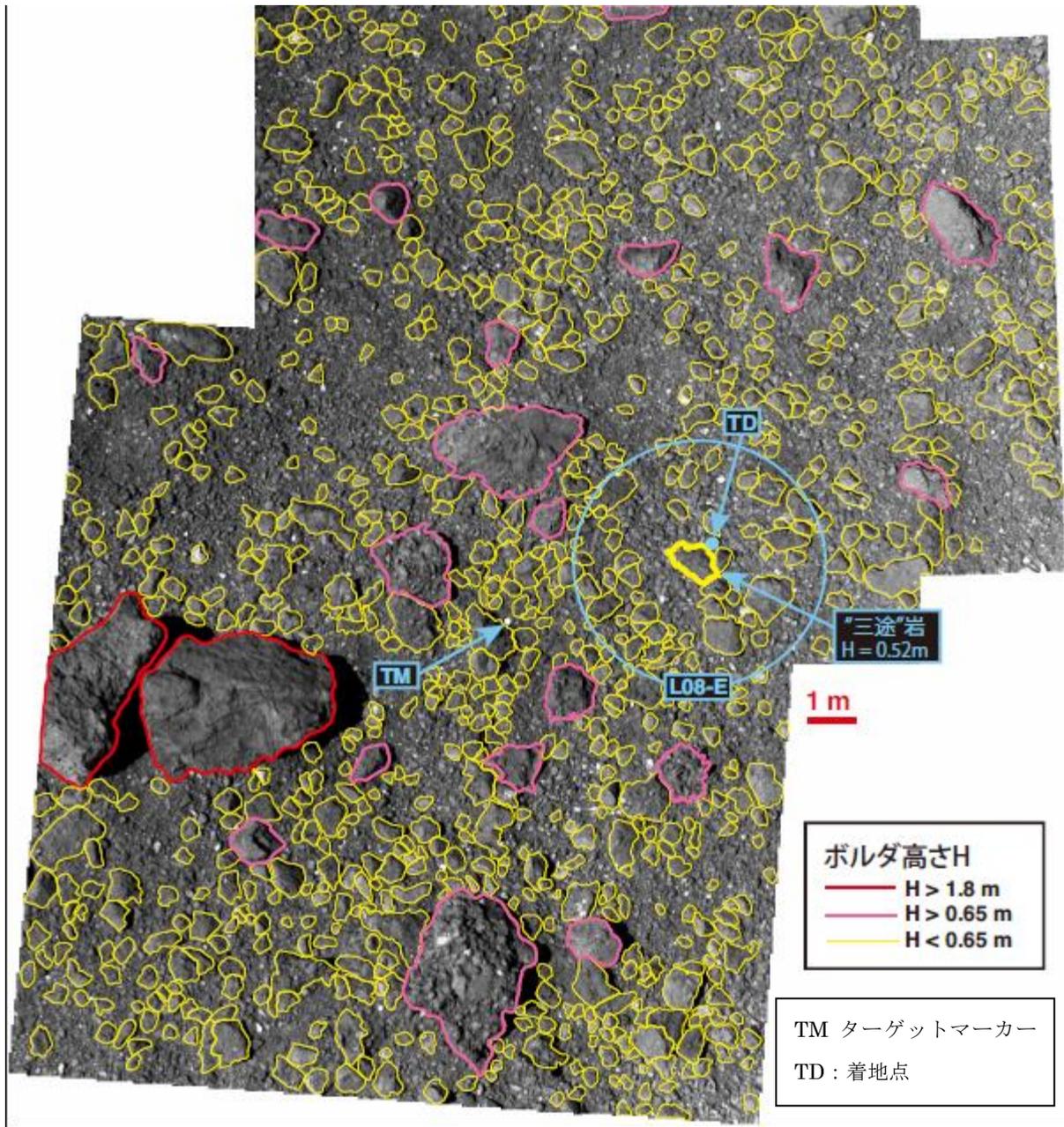


図 3. 1 回目の着地領域 L08-E1 付近の岩塊（ボルダー）の危険度の評価。高解像度画像（画像クレジット：JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研）に太陽電池パドル（赤）、推進装置（赤紫）に接触する危険がある岩と危険性が低い岩（黄）を表示。

その後、2019 年 2 月 22 日 7 時 29 分（日本時間）、はやぶさ 2 は、L08-E1 への着地に成功し、試料採取に必要な全てのコマンド（遠隔操作の指示）が実行されたことが確認されました。試料を集める筒状のサンプラーホーンを撮影した小型カメラには、接地

の直後に大量の砂礫が舞い上がる様子が捉えられ、十分な量の表面試料が得られたと期待しています。

【成果の意義】

リュウグウの赤道リッジ周辺には大きなクレーターがいくつもあります。これらは、かつて、小天体がリュウグウに衝突して形成されたものです。同じ大きさ・速度の物体が衝突しても、標的小惑星の強度によってできるクレーターのサイズが違います。もし、リュウグウの強度が弱いとすると小さい天体でも大きなクレーターをつくることのできるため、赤道リッジの大きなクレーターは比較的小さな天体の衝突で説明できてしまいます。太陽系空間での衝突は小さな天体になるほどより頻繁になるので、リュウグウの強度が弱いとその年齢は若いはずです。つまり、リュウグウの強度を知れば、その年齢も見積もることも可能になります。

リュウグウの強度を知る上で重要なのが、4月5日に行われた衝突装置(SCI)による宇宙衝突実験です。質量 2 kg の中空半球状の銅板を秒速 2 km で衝突させ、人工のクレーターを作成することを目指しました。実験は成功し、探査機が無事避難している間に衝突装置が作動し、弾丸がリュウグウの目標地点に精確に衝突しました。これは分離カメラ DCAM3 が、円錐状に吹き上がる破片のカーテンの撮影に成功したことで確認されました。4月24日から25日にかけては低高度からのSCIクレーター探索を行う予定です。こうした観測結果から、リュウグウの強度を明らかにし、その衝突史に光を当てたいと考えています。

炭素質小惑星の強度を知ることは、地球への水や有機物の供給過程を解明する上でも鍵になると考えられています。衝突で、どのように破碎されるか、地球大気圏でどのように壊れるかは、小惑星の強度に依存します。今後の「はやぶさ 2」の観測結果の解析と帰還試料の分析から、更なる理解の進展が期待されます。

【用語説明】

- 1) 赤道リッジ: コマ型小惑星の赤道に沿って一周する高地帯(リッジ)のこと。リュウグウは赤道リッジが顕著で、赤道断面は円に近いが、同じコマ型小惑星でも米国の探査機 OSIRIS-REx が訪れている小惑星 Bennu はあまりくっきりしたリッジを持っておらず、赤道断面も四角形に近いことが判明している。
- 2) 炭素質小惑星(C型小惑星): 表面反射率が小さく(つまり暗く)、波長依存性の少ないスペクトルを持つ小惑星。この特徴は隕石の炭素質コンドライトに似るため、炭素を数%程度含み、含水鉱物を含む可能性のある天体と考えられている。これに対し、無水の鉱物で構成された小惑星はS型小惑星と呼ばれている。
- 3) 強度: 物体を元に戻らないほど変形させる(あるいは壊す)のに必要な単位面積当たりの力のこと。流体や乾燥した砂の集合体は自由に変形するので強度は0。これに対し、岩石・岩盤は強度が強く、力を加えても容易に変形しない。砂も湿らせると粒子間に引き合う力(凝縮力)が生じ、強度が生まれる。小惑星は、仮に強度が0でも自己重力によって形状を保つことができる。リュウグウが重力だけで形を保っているのか、ある程度の凝縮力を持つのかは、その進化を考える上で重要。
- 4) 表面反射スペクトル: 入射する太陽光に対して小惑星表面で反射された光の割合を光の波長毎に求めたもの。

【論文情報】

① 雑誌名 : Science

論文タイトル : Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu—A spinning top-shaped rubble pile

著者 : S. Watanabe, M. Hirabayashi, N. Hirata, N. Hirata, R. Noguchi, Y. Shimaki, H. Ikeda, E. Tatsumi, M. Yoshikawa, S. Kikuchi, H. Yabuta, T. Nakamura, S. Tachibana, Y. Ishihara, T. Morota, K. Kitazato, N. Sakatani, K. Matsumoto, K. Wada, H. Senshu, C. Honda, T. Michikami, H. Takeuchi, T. Kouyama, R. Honda, S. Kameda, T. Fuse, H. Miyamoto, G. Komatsu, S. Sugita, T. Okada, N. Namiki, M. Arakawa, M. Ishiguro, M. Abe, R. Gaskell, E. Palmer, O. S. Barnouin, P. Michel, A. S. French, J. W. McMahon, D. J. Scheeres, P. A. Abell, Y. Yamamoto, S. Tanaka, K. Shirai, M. Matsuoka, M. Yamada, Y. Yokota, H. Suzuki, K. Yoshioka, Y. Cho, S. Tanaka, N. Nishikawa, T. Sugiyama, H. Kikuchi, R. Hemmi, T. Yamaguchi, N. Ogawa, G. Ono, Y. Mimasu, K. Yoshikawa, T. Takahashi, Y. Takei, A. Fujii, C. Hirose, T. Iwata, M. Hayakawa, S. Hosoda, O. Mori, H. Sawada, T. Shimada, S. Soldini, H. Yano, R. Tsukizaki, M. Ozaki, Y. Iijima, K. Ogawa, M. Fujimoto, T.-M. Ho, A. Moussi, R. Jaumann, J.-P. Bibring, C. Krause, F. Terui, T. Saiki, S. Nakazawa, Y. Tsuda,

DOI: [10.1126/science.aav8032](https://doi.org/10.1126/science.aav8032)

② 雑誌名 : Science

論文タイトル : The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes

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 (deceased), 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.-L. 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. Oki, 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

DOI: [10.1126/science.aaw0422](https://doi.org/10.1126/science.aaw0422)

③ 雑誌名 : Science

論文タイトル : The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 near-infrared spectroscopy

著者 : K. Kitazato, R. E. Milliken, T. Iwata, M. Abe, M. Ohtake, S. Matsuura, T. Arai, Y. Nakauchi, T. Nakamura, M. Matsuoka, H. Senshu, N. Hirata, T. Hiroi, C. Pilorget, R. Brunetto, F. Poulet, L. Riu, J.-P. Bibring, D. Takir, D. L. Domingue, F. Vilas, M. A. Barucci, D. Perna, E. Palomba, A. Galiano, K. Tsumura, T. Osawa, M. Komatsu, A. Nakato, T. Arai, N. Takato, T. Matsunaga, Y. Takagi, K. Matsumoto, T. Kouyama, Y. Yokota, E. Tatsumi, N. Sakatani, Y. Yamamoto, T. Okada, S. Sugita, R. Honda, T. Morota, S. Kameda, H. Sawada, C. Honda, M. Yamada, H. Suzuki, K. Yoshioka, M. Hayakawa, K. Ogawa, Y. Cho, K. Shirai, Y. Shimaki, N. Hirata, A. Yamaguchi, N. Ogawa, F. Terui, T. Yamaguchi, Y. Takei, T. Saiki, S. Nakazawa, S. Tanaka, M. Yoshikawa, S. Watanabe, Y. Tsuda

DOI: [10.1126/science.aav7432](https://doi.org/10.1126/science.aav7432)

以上、3編の論文は3月19日にサイエンス誌オンライン版に掲載され、サイエンス4月19日号(Vol 364, Iss 6437)に印刷されました。