

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01951

研究課題名(和文) コマ型小惑星の形状形成過程と地形緩和過程の解明

研究課題名(英文) Formation and topographic relaxation of spinning top-shaped asteroids

研究代表者

渡邊 誠一郎 (Watanabe, Sei-ichiro)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：50230967

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,300,000円

研究成果の概要(和文)：低重力小天体では、構成粒子間の数Pa以上の凝集力による実効的摩擦力が働けば、高速自転時に地滑りによりコマ型の形状ができることを明らかにした。地滑りは表層部に限定されることを室内実験およびリュウグウでの流動岩塊のサイズ依存性の解析から明らかにした。また、最終形状は重力・遠心力・摩擦力のつりあい精度良く記述できることを実験的に示した。さらに隕石衝突励起震動によって、小クレーターの緩和や表面流動の存在を明らかにした。リュウグウは約1000万年前の高速自転時に地滑りでコマ型形状となった後、YORP効果でスピンドウンした結果、近年は赤道から極方向へ、振動で励起された表面流動が起きていると推定される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的意義は次の点である。(1)高速自転小天体の物理を明らかにするための実験的手法を確立したこと、(2)数値シミュレーション、室内実験、探査データ解析を総合して、太陽系小天体の1つの典型的な形状であるコマ型形状の成因について、蓋然性の高いモデルを提唱したこと、(3)重力・遠心力・摩擦力のつりあいという単純なモデルで瓦礫集積天体の形状が表現できることを明らかにしたこと。

本研究の社会的意義は、国民の高い関心を集めたはやぶさ2による小惑星リュウグウ探査に基づいて、天体形状や岩塊分布といった視覚的にも把握しやすい謎を提示して、高校生でも理解できる説明が可能な結果を得た点にある。

研究成果の概要(英文)：In small celestial bodies with gravity, we have clarified that a spinning top-shaped form can be produced by landslides during high-speed rotation if an effective frictional force operates due to the cohesion of several Pa or more between constituent particles. It was shown from our laboratory experiments and analysis of the size dependence of flow rock masses on Ryugu that landslides are limited to the surface layer. Additionally, it was experimentally demonstrated that the final shape can be accurately described by the balance among gravity, centrifugal force, and friction. Moreover, we revealed the existence of relaxation of small craters and surface flow due to vibrations induced by meteorite collision. We estimate that Ryugu, after becoming a top-shaped form due to landslides during high-speed rotation about 10 million years ago, spun down due to the YORP effect, and in recent years, surface flow excited by vibrations has been occurring from the equator to the polar direction.

研究分野：惑星科学

キーワード：小惑星 微惑星 粉体 回轉變形 惑星探査 高速回転装置 遠心力 コマ型形状

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

小惑星探査機はやぶさ 2 は、2018 年 6 月に C 型小惑星リュウグウに到着し、1 年半にわたる近傍観測を開始した。光学望遠カメラ ONC-T の画像からは、コマ型と呼ばれる——膨らんだ赤道リッジ (赤道半径約 500 m) の両側に円錐面が極側に伸びる——独特の形状を持つことが明らかになった。降下運用時の高解像度画像からは、小惑星表面にはダストはほとんど無く、直径数 cm 以上の角礫・岩塊で被われていることが明らかになった。

コマ型形状を持つ小惑星は地上からのレーダー観測でいくつも見つかったが、それらの自転周期はいずれも短く、リュウグウのような自転周期が長い (7.63 時間) ものは報告されていなかった。小型小惑星の自転角速度は、YORP 効果——小惑星が受ける太陽放射と小惑星が出す熱放射のずれによって生じるトルクの効果——によって数十万年以上の時間スケールで変化する可能性が指摘されていた。自転周期が短くなると、赤道付近で遠心力が重力を上回るようになり、遠心力に誘発された構造変化が生じることが期待された。微惑星においても自転による形状変化は惑星集積過程への影響があるが、その研究は皆無であった。

そこで本研究の核心となる問い (Questions) として、次の 3 つを設定した：

- (Q1) 遠心力に誘導された構造変化によって、コマ型形状は形成されるのか。
- (Q2) 自転周期が長くなっていく場合、コマ型形状天体の地形緩和どのように進むのか。
- (Q3) コマ型形状の形成および緩和過程で天体中の岩塊はどのように振る舞うのか。

このうち(Q1)については、従来、小惑星の衛星成因論において、高速自転する小惑星からの破片放出が数値計算で示されているが、コマ型形状の形成に関しては、少数体の粒子を規則的に配置したモデル計算で、表面粒子の赤道移動によって生ずること可能性が示唆されているのみであった。ただし、この計算は構成粒子の初期配置に依存しており、一般的な結果とは考えにくく、表面崩壊ではなく内部崩壊が生じる可能性も指摘されていた。

(Q2)については、リュウグウ表面にはいくつも大きなクレーターが存在し、それらはコマ型形状形成後に作られたものと考えられる。ところが、これらのクレーターを作った衝突が引き起こしたであろう震動によるコマ型形状の地形緩和は特定されていなかった。地形緩和の進行状況を精密な画像解析によって吟味し、地形緩和の進行を確認することが重要と考えた。

(Q3)については、コマ型形状形成時の粒子のサイズ分別、深度による分別が起こるのか、大きな岩塊と小さい礫との密度差の有無、衝突励起震動の強度などがどのように影響するのかを解明していく必要があった。

しかし、これらの問いに関係する実験室での高速回転実験は、ほとんど行われていなかった。

2. 研究の目的

上記の 3 つの問い(Q1)–(Q3)のそれぞれに対して、本研究の目的 (Objectives) を掲げる：

- (O1) 構成粒子間の凝集力と摩擦力の違いが、高速自転時の自己重力天体の構造変化と形成される最終形状にどのような影響を与えるのかを明らかにする。
- (O2) 天体内部の衝撃波減衰率の違いによって、隕石衝突で励起される震動によって、コマ型形状と異なるサイズのクレーターがどのように緩和していくのかを明らかにする。
- (O3) 遠心力に励起される天体構造変化、および衝突励起振動によって、サイズの違う構成粒子が相対的にどのように動くかを明らかにする。

ラブルパイル (瓦礫集積) 小天体内部において、構成粒子間に働く凝集力や摩擦力は、流体のような自由な変形を強く抑制する。自転周期が短くなり、天体内に伸張力やずれ応力が生ずるとき、構成粒子間の凝集力は変形を抑制するが、破壊によって塑性変形が生ずる。砂礫層の回転に対する振る舞いに関する地上実験はなく、その解析を可能とする実験系の構築が必要である。

内部の方が表層に比べて凝集力が大きい場合、破壊は表面付近で生じ、赤道へ向かう地滑りが起こる一方、天体の凝縮力が一様であれば、破壊は内部から生じ、赤道面に平行な内部変位によって赤道部分が膨らみ、両極において天体中心方向への落ち込みが生ずると想定される。リュウグウの観測結果から、こうした変形モードの違いを調べるとともに、室内実験で表面流動層の厚さ等を決めることが (O1) の眼目である。また、全体形状と様々なクレーターの緩和過程を比較することで、空隙率の高い天体での地形進化過程を推定しようという点が (O2) のユニークな点である。さらに岩塊に着目し、こうした変形モードや緩和過程の違いが岩塊の分布やサイズ分別にどのような影響を与えるかを見るという (O3) も、本研究が示す新しい着眼点である。

これらは、はやぶさ 2 の近傍観測の初期に初めて明らかになったコマ型小惑星の詳細な表面状況に基づいて着想されたものであり、従来の研究には欠けていたラブルパイル天体の形状や自転状態と凝縮力や流動過程、岩塊分布等との関係を結びつけたものとなっている。

3. 研究の方法

探査データ解析からのアプローチとしては、小惑星リュウグウの表面流動の有無と形態、移動方向、時間スケールを制約するために、はやぶさ2搭載の光学航法カメラ(ONC-T)データを用いて、リュウグウ表面の地形/スペクトル解析を行った。全球と局所詳細の観測データを用いて、リュウグウ表面における岩塊の同定とその長軸方向の解析と、岩塊が保存される寿命の推定のため、岩塊表面上の微小クレーター計測を行った。また、リュウグウ表面の地形進化過程を理解するために、クレーターの同定と統計評価、他の小惑星のものとの比較などを行った。さらに、表面流動の痕跡を探索するため、表面反射スペクトル勾配をマッピングして、地形との対応関係を調査した。本科研費で購入した計算機とペンタブレットは、これらの解析に活用した。

室内実験からのアプローチとしては、回転中心に頂点を持つ砂山を置き、徐々に回転速度を上げながら、重力・遠心力・摩擦を受けて砂山が変形していく様子を観察できる実験系を開発した。実験系の全体像は図1に示した。上部に砂山状の粉粒体サンプルを入れた透明セルと砂山形状撮影用カメラと小型PCが搭載され、下部に設置されたモーターによりサンプルとカメラの回転が駆動・制御される。回転させる砂山サンプルは図2に示すように、擬二次元のセル(10 cm×10 cm×1 cm)に粒径約1 mmの粉体材料(ガラスビーズ、山砂、田砂、カットワイヤー、アルミナ球、魚餌、付着性を持つ高空隙粒子など)を漏斗で注ぎ込んで作成した。このとき、砂山は回転軸(セル中央)にピークが位置するように調整され、砂山の角度は安息角となった。

安息角を持つ砂山サンプルを入れたセルを回転実験系にマウントして、回転速度を段階的に増加させながら撮影を行い、砂山の変形が徐々に(準静的に)進行するよう実験条件を調整した。実験で用いた最大回転数は620回転/分で、このとき、セルの両側壁の位置では、回転の遠心力が重力のおよそ20倍に達した。砂山の変形は2,592×1,944ピクセルの画像データとして取得されるが、カメラユニットで用いたレンズは画像歪みが画像データ解析に影響を与えないように、取得データの補正等の十分な校正を行った。実験系の動作確認と校正のために、まず、水を用いた回転実験を行い、回転中の液面の形状が理論で予想される回転放物面と良く一致することを確かめた。



図1: 回転実験装置



図2: サンプルの準備過程

その後、粉体材料を用いた回転実験を系統的に行い、砂山の変形を調べた(図3上段)。取得した画像データから画像解析により砂山の輪郭形状を抽出した。その砂山地形の変化を説明するために、重力・遠心力・摩擦力の局所的な釣り合いで砂山形状が決定されるというシンプルなモデルを構築し、そのモデルで実験結果が良く再現されることを明らかにした。

また、砂山の変形時に、砂山のどの部分が流動・変形しているかを詳細に調べるために、色つきガラスビーズを用いて砂山を構成した場合の変形の様子も調べた(図3下段)。その結果、砂山の表面部のみが流動化し変形に寄与していることが明らかになった。

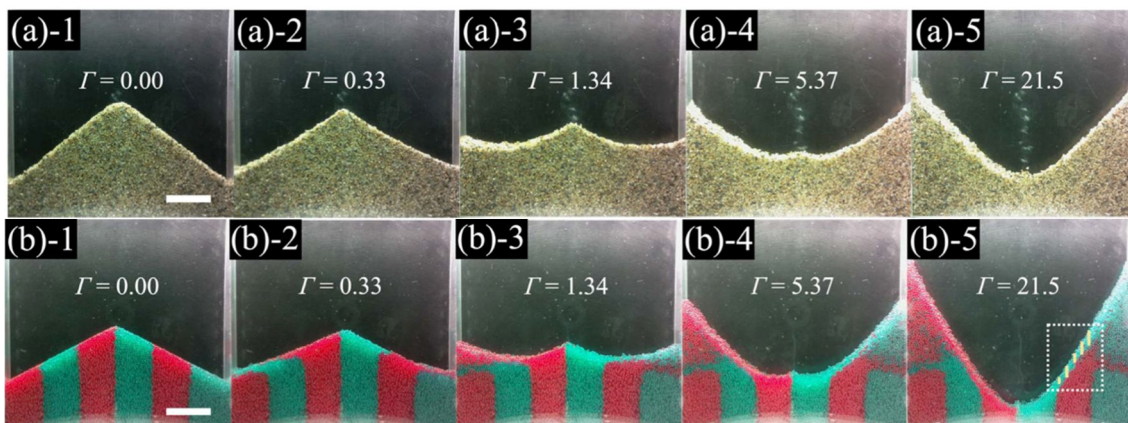


図3: 遠心力/重力比の変化に応じた砂山(砂・色ビーズ)の変形(Irie et al. 2021b)

数値解析からのアプローチは、自己重力と粉体摩擦則を組み入れた平滑化粒子法(SPH法)を用いて、高速自転する球状瓦礫天体の変形を計算した。比較のため、有限要素法の予備的な計算も行ったが、COVID-19の影響で海外での共同研究ができず、十分な比較研究には至らなかった。

4. 研究成果

(1) 探査画像解析

リュウグウ表面の画像解析から得られたメートルサイズの微小クレーターの数密度は、衝突天体のサイズ頻度分布を使い、直径 100m 超のクレーター数密度から外挿される数密度に対して低いことがわかった [Sugita et al. 2019, Morota et al. 2020, Cho et al. 2021]。これはリュウグウ表面の流動により、微小クレーターが継続的に消去されていることを示唆しており、その消去の時間スケールは 10 m サイズのクレーターで 1000 年~10 万年と見積もられた [Takaki et al. 2022]。

2 回のリュウグウ試料採取運用時に得られた高解像度画像データを用いて、2000 個以上のメートルサイズの岩塊についてその表面の微小クレーターを探索して、直径数~数十 cm の微小クレーター 22 個を発見した。さらに地球の火球や月面の衝突発光の観測から推定されている微小天体衝突確率データをもとに、岩塊上の微小クレーターの形成頻度モデルを構築し、実際に探索された微小クレーターのデータと比較することで、リュウグウにおけるメートルサイズ岩塊の平均的寿命が 1~100 万年と見積った (図 4)。この寿命は、100 m サイズのクレーターから推定されたリュウグウ表面年代 (約 800 万年) よりも有意に若いことから、リュウグウ表面の岩塊のサイズ頻度分布は天体形成以降に時間変化してきた可能性を示している。

地層の重なり順序の解析により、リュウグウ表面の新鮮物質は相対的に青い (短波長ほど反射率が高くなる) 傾向があることを見出した [Morota et al. 2020]。さらにリュウグウ全球において青色領域を抽出して、地形的特徴との関係を調べ、表面流動によって露出した新鮮領域の同定を試みた。青色領域は主に赤道から中緯度領域にあるメートルサイズ以上の岩塊の高緯度側平地に存在することを発見した。また、岩塊の直径と青色領域の面積には正の相関がみられた。一方、岩塊の配向調査から、直径 4m 以上の岩塊は流動していないことがわかった。これらを総合すると、岩塊に伴う青色領域は、赤道側からの表面流動を岩塊が遮っていることで、岩塊の下流側で浸食が進み、地下の新鮮物質が露出したものであると推定した。この成果は現在、投稿準備中である。

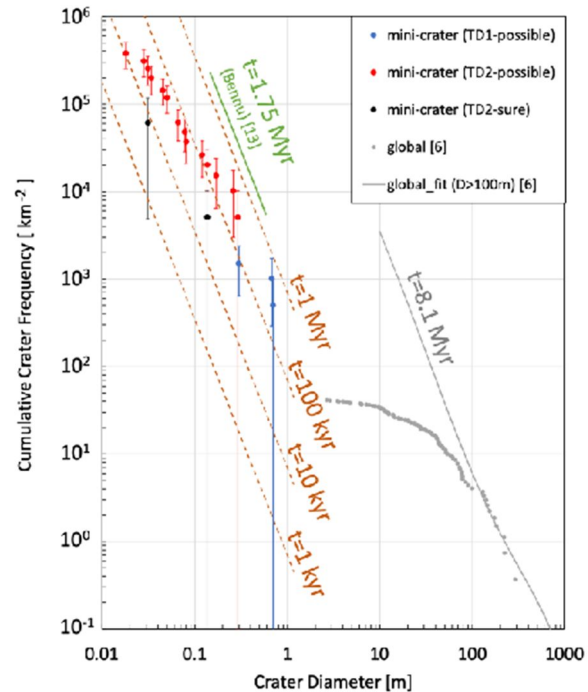


図 4 リュウグウ岩塊表面の微小クレーターのサイズ頻度分布 (Takaki et al. 2021, Lunar & Planetary Science Conference 2021, abstract #2044)

(2) 高速度回転実験

砂礫層の摩擦特性の評価のため、様々な粉体粒子で構成された砂山の形状が、回転を加えることにより徐々に変形していく様子を撮影・計測できる実験装置を開発することに成功した [Irie et al. 2021a, 研究方法参照]。この実験で得られた画像を系統的に解析することで抽出された砂山表面プロファイルの遷移は、重力・遠心力・摩擦力のつりあいに基づくシンプルな解析的モデルで、精度良く説明できることを明らかにした [Irie et al. 2021b]。これは、従来、定量的な評価の難しかった粉体摩擦角の重力 (体積力) 依存性を明確に示すことに成功したものである。また、砂山の変形を実現している砂粒の移動は斜面表層部の薄い層 (数粒子分程度の厚さ) に限られることを可視化できたことは、擬二次元セルを採用したことで得られた重要な成果と言える。

遠心力が全くなく重力のみの影響を受ける砂山と、一旦高速回転を経験した後、ふたたび回転を減速させ遠心力の影響を受けなくなった砂山のそれぞれで、変形を特徴づける摩擦係数を求めたところ、回転の履歴によって摩擦係数の値がわずかに変化することを見いだした [Irie et al. 2022]。砂山形状を特徴づける粉体摩擦の複雑な遠心力依存性やその履歴依存挙動の原因として、砂山層の充填率の変化が大きな役割を果たしている可能性があるかと推定し、詳細に検討を進めたものの、現在の実験計測精度では十分な信頼性をもって粉体摩擦の充填率依存性を示すことができなかった。今後、更なる計測の精度向上が必要であろう。砂山変形の履歴依存性については、リュウグウなどの小型小惑星が自転速度を長期的に変化させていることもあり、小惑星地形の理解のためにも今後詳しい研究を進めていく必要のある事項と考えている。

また、回転による遠心力ではなく、粉体層表面への固体物質の直接接触による表面地形の変化に関する基礎実験についても実施し、表面地形凹凸の出現や消滅に関する条件などを明らかにした (Hata et al. 2022)。このような表面での接触による応力 (面力) 印加と遠心力 (体積力) 印加による粉体層変形を比較することも、多様性に富む小惑星表面地形の形成過程を解明する上では必要不可欠となると考えられる。

実験研究において得られた成果を整理すると、(1)砂山粉体層の高速回転実験装置の開発とそれを使用した実効的付着強度測定法の開発、(2)砂山粉体層の回転変形を説明する粉体摩擦モデルの開発と粉体摩擦特性挙動の解明、(3)それらの回転速度変化履歴に対する依存性、(4)粉体層表面への固体接触による変形に関する基礎実験研究となり、それぞれ別々の論文として国際誌に掲載された [Irie et al. 2021a, 2021b, 2022; Hata et al. 2022]。

ただし、実験は一定の方向と強さを持つ地上重力下で行われており、実際の小惑星表面での重力の状態とは異なっている。また、実験は大気圧条件下で行われており、周囲大気の影響についても実験と実際の小惑星の間で大きく異なる。また、回転による砂山粉体層の変形が回転速度の履歴依存性を持つことも本研究の中で明らかにされている。これらの点についても、より詳細に検討を進めることが今後の課題となる。

(3) 数値解析

はやぶさ 2 探査で得られたリュウグウ形状モデルをさまざまな自転速度で回転させると、自転周期 3.5 時間（現在の周期は 7.63 時間）のとき、天体表面は概ね実効的重力方向に対して 35° の傾きをなし、表面各点での傾斜角の分散が最小となることを明らかにした。この角度は砂礫の安息角に近いことから、この結果はコマ型形状は過去の高速自転時の遠心力によって形成されたことを強く示唆するものである。さらに、粉体層の降伏条件を組み込んだ有限要素法 (FEM) による予備的なシミュレーションによって、内部の凝集力が数 Pa 未満であれば、周期 3.5 時間の自転によって、天体中心を取り巻く広い内部領域で降伏破壊による変形が生ずることを示した。以上の結果はサイエンス誌に掲載された論文の重要部分となった [Watanabe et al. 2019]。

続いて、臨界角を超えると崩れる粉体摩擦則を組み入れた SPH 法の数値計算コードを使って、粉体で構成された球状天体の自転速度を徐々に増加させ、天体の変形がどのように進行するかを、臨界角と自転加速度を変えながら系統的に調べた [Sugiura et al. 2021]。天体内部での凝集力の効果は、大きな実効的臨界角を与えることで模擬した。その結果、自転加速度がある程度大きければ、実効的臨界角が 60° 以下では臨界角速度に達するかなり前から、天体内部で準静的な変形が生じ、天体は回転楕円体となるが、実効的臨界角が 70° 以上では、変形は臨界角速度に近くになるまで起こらず、やがて急に天体表面で地滑りが多発して、コマ型形状が生成されることがわかった。また、地滑りで赤道付近に移動した物質は上空に放出され、赤道面に沿ったリングを形成することが示された。このようなリングはやがて衛星に進化すると考えられ、コマ型形状天体の多くが衛星を伴っていることと整合する。Watanabe et al. (2019)での FEM による計算結果と総合すると、自転を加速させていった場合、天体内部の凝集力が弱いと内部変形が卓越して楕円体へ進化するが、凝集力が数 Pa 以上であればコマ型への変形が可能となると考えられる。一方で、自転加速度を小さくすると、発生する表面地滑りが非軸対称となり、軸対称なコマ型形状にはならないとの結果を得た。この点は、今後更なる解析が必要と考えている。

このように過去の高速自転によってリュウグウのコマ型が形成されたことはデータ解析と数値解析の双方から強く示唆されたため、リュウグウの自転進化について、形状モデルを使った解析を行った。小天体の自転状態（軸方向と角速度）は主に熱放射の非対称性によって生じることが、先行研究から知られており、YORP 効果と呼ばれている。YORP 効果は天体の形状に敏感に依存するため、リュウグウの複数の形状モデルを使って、軌道面法線に対する自転軸の向き（自転軸傾斜角）と自転角速度の変化を算出した [Kanamaru et al. 2021]。その結果、すべての形状モデルにおいて、自転軸傾斜角は 180° に向かい（現在は 172° ）、自転は減速していることがわかった。このことは、リュウグウがかつて高速自転していたことを示しており、コマ型形状が高速自転時の地滑りで生じたとする Watanabe et al. (2019)や Sugiura et al. (2021)の結果と整合するものである。過去にリュウグウが 3.5 時間の周期で自転していたとすると、現在の 7.63 時間の自転周期になるまでに要する時間は、ずっと現在の軌道にあったとして数百万年程度であることも示された。この時間は、天体の日心距離の 2 乗に比例するため、リュウグウが現在の軌道より外側の内側小惑星帯から来たという証拠とあわせれば、3 倍程度まで長くなり得る。これは、はやぶさ 2 による人工クレーター生成実験で確立されたスケールリング則を使ったクレーター年代学から推定されるリュウグウの表面年代である 890 ± 250 万年前が、高速自転による地滑りで表面にあったクレーターが一旦消された（リセット）後に経過した年代に対応すると考えて矛盾しない。

(4) 総合

低重力小天体では、構成粒子間の数 Pa 以上の凝集力による実効的摩擦力が働けば、高速自転時に地滑りによりコマ型の形状ができることを明らかにした。地滑りは表層部に限定されることを室内実験およびリュウグウでの流動岩塊のサイズ依存性の解析から明らかにした。また、最終形状は重力・遠心力・摩擦力のつりあい精度良く記述できることを実験的に示した。さらに隕石衝突励起震動によって、小クレーターの緩和や表面流動の存在を明らかにした。リュウグウは約 1000 万年前の高速自転時に地滑りでコマ型形状となった後、YORP 効果でスピンドウンした結果、近年は赤道から極方向へ、振動で励起された表面流動が起きていると推定される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 23件/うち国際共著 18件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Watanabe S., Hirabayashi M., Hirata N., Hirata Na., Noguchi R., Shimaki Y., Ikeda H., Tatsumi E., Yoshikawa M., Kikuchi S., Yabuta H., Nakamura T., Tachibana S., Ishihara Y., Morota T., Kitazato K., Sakatani N., Matsumoto K., Wada K., Senshu H., ... , Tsuda Y.	4. 巻 364
2. 論文標題 Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu---A spinning top-shaped rubble pile	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 268 ~ 272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aav8032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sugita S., Honda R., Morota T., Kameda S., Sawada H., Tatsumi E., Yamada M., Honda C., Yokota Y., Kouyama T., Sakatani N., Ogawa K., Suzuki H., Okada T., Namiki N., Tanaka S., Iijima Y., Yoshioka K., Hayakawa M., Cho Y., ... , Watanabe S., Tsuda Y.	4. 巻 364
2. 論文標題 The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaw0422	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Jaumann R., Schmitz N., Ho T.-M., Schreder S. E., Otto K. A., Stephan K., Elgner S., Krohn K., Preusker F., Scholten F., Biele J., Ulamec S., Krause C., Sugita S., Matz K.-D., Roatsch T., Parekh R., Mottola S., Grott M., Michel P., Trauthan F., ... , Watanabe S., ... , Kouyama T.	4. 巻 365
2. 論文標題 Images from the surface of asteroid Ryugu show rocks similar to carbonaceous chondrite meteorites	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 817 ~ 820
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaw8627	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Michikami T., Honda C., Miyamoto H., Hirabayashi M., Hagermann A., Irie T., Nomura K., Ernst C. M., Kawamura M., Sugimoto K., Tatsumi E., Morota T., Hirata N., Noguchi T., Cho Y., Kameda S., Kouyama T., Yokota Y., Noguchi R., Hayakawa M., ..., Watanabe S., ..., Sugita S.	4. 巻 331
2. 論文標題 Boulder size and shape distributions on asteroid Ryugu	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 179 ~ 191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2019.05.019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hirata N., Morota T., Cho Y., Kanamaru M., Watanabe S., Sugita S., Hirata N., Yamamoto Y., Noguchi R., Shimaki Y., Tatsumi E., Yoshioka K., Sawada H., Yokota Y., Sakatani N., Hayakawa M., Matsuoka M., Honda R., Kameda S., Yamada M., ..., Iijima Y.	4. 巻 338
2. 論文標題 The spatial distribution of impact craters on Ryugu	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 113527 ~ 113527
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2019.113527	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Okada T., Fukuhara T., Tanaka S., Taguchi M., Arai T., Senshu H., Sakatani N., Shimaki Y., Demura H., Ogawa Y., Suko K., Sekiguchi T., Kouyama T., Takita J., Matsunaga T., Imamura T., Wada T., Hasegawa S., Helbert J., Muller T. G., ..., Watanabe S., Tsuda Y.	4. 巻 579
2. 論文標題 Highly porous nature of a primitive asteroid revealed by thermal imaging	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 518 ~ 522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-020-2102-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Morota T., Sugita S., Cho Y., Kanamaru M., Tatsumi E., Sakatani N., Honda R., Hirata N., Kikuchi H., Yamada M., Yokota Y., Kameda S., Matsuoka M., Sawada H., Honda C., Kouyama T., Ogawa K., Suzuki H., Yoshioka K., Hayakawa M., ..., Watanabe S., Tsuda Y.	4. 巻 368
2. 論文標題 Sample collection from asteroid (162173) Ryugu by Hayabusa2: Implications for surface evolution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 654 ~ 659
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaz6306	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hirabayashi M., Nakano R., Tatsumi E., Walsh K. J., Barnouin O. S., Michel P., Hartzell C. M., Britt D. T., Sugita S., Watanabe S., Bottke W. F., Scheeres D. J., Ballouz R.-L., Cho Y., Morota T., Howell E. S., Lauretta D. S.	4. 巻 352
2. 論文標題 Spin-driven evolution of asteroids' top-shapes at fast and slow spins seen from (101955) Benu and (162173) Ryugu	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 113946 ~ 113946
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2020.113946	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tatsumi E., Sugimoto C., Riu L., Sugita S., Nakamura T., Hiroi T., Morota T., Popescu M., Michikami T., Kitazato K., Matsuoka M., Kameda S., Honda R., Yamada M., Sakatani N., Kouyama T., Yokota Y., Honda C., Suzuki H., Cho Y., ... , Watanabe S., Yoshikawa M.	4. 巻 5
2. 論文標題 Collisional history of Ryugu's parent body from bright surface boulders	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 39 ~ 45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-020-1179-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kikuchi S., Watanabe S., Saiki T., Yabuta H., Sugita S., Morota T., Hirata N., Hirata N., Michikami T., Honda C., Yokota Y., Honda R., Sakatani N., Okada T., Shimaki Y., Matsumoto K., Noguchi R., Takei Y., Terui F., Ogawa N., ..., Tsuda Y.	4. 巻 216
2. 論文標題 Hayabusa2 Landing Site Selection: Surface Topography of Ryugu and Touchdown Safety	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Space Science Reviews	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11214-020-00737-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Noguchi R., Hirata N., Hirata N., Shimaki Y., Nishikawa N., Tanaka S., Sugiyama T., Morota T., Sugita S., Cho Y., Honda R., Kameda S., Tatsumi E., Yoshioka K., Sawada H., Yokota Y., Sakatani N., Hayakawa M., Matsuoka M., Yamada M., ..., Watanabe S.	4. 巻 354
2. 論文標題 Crater depth-to-diameter ratios on asteroid 162173 Ryugu	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114016 ~ 114016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2020.114016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kitazato K., Milliken R. E., Iwata T., Abe M., Ohtake M., Matsuura S., Takagi Y., Nakamura T., Hiroi T., Matsuoka M., Riu L., Nakauchi Y., Tsumura K., Arai T., Senshu H., Hirata N., Barucci M. A., Brunetto R., Pilorget C., Poulet F., ... , Morota T., ... , Watanabe S., Tsuda Y.	4. 巻 5
2. 論文標題 Thermally altered subsurface material of asteroid (162173) Ryugu	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 246 ~ 250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-020-01271-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Irie Terunori, Yamaguchi Ryusei, Watanabe Sei-ichiro, Katsuragi Hiroaki	4. 巻 32
2. 論文標題 Measurement of surface deformation and cohesion of a granular pile under the effect of centrifugal force	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 125301 ~ 125301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6501/ac1b25	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Irie Terunori, Yamaguchi Ryusei, Watanabe Sei-ichiro, Katsuragi Hiroaki	4. 巻 104
2. 論文標題 Deformation of a rotated granular pile governed by body-force-dependent friction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.104.064902	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hata Shunto, Katsura Makoto, Katsuragi Hiroaki	4. 巻 45
2. 論文標題 History-dependent growth and reduction of the ripples formed on a swept granular track	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The European Physical Journal E	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epje/s10189-022-00165-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Irie Terunori, Yamaguchi Ryusei, Watanabe Sei-ichiro, Katsuragi Hiroaki	4. 巻 33
2. 論文標題 History-dependent deformation of a rotated granular pile governed by granular friction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 103629 ~ 103629
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.appt.2022.103629	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takaki N., Cho Y., Morota T., Tatsumi E., Honda R., Kameda S., Yokota Y., Sakatani N., Kouyama T., Hayakawa M., Matsuoka M., Yamada M., Honda C., Suzuki H., Yoshioka K., Ogawa K., Sawada H., Michel P., Sugita S.	4. 巻 377
2. 論文標題 Resurfacing processes constrained by crater distribution on Ryugu	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114911 ~ 114911
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2022.114911	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Cho Y., Morota T., Kanamaru M., Takaki N., Yumoto K., Ernst C. M., Hirabayashi M., Barnouin O. S., Tatsumi E., Otto K. A., Schmitz N., Wagner R. J., Jaumann R., Miyamoto H., Kikuchi H., Hemmi R., Honda R., Kameda S., Yokota Y., Kouyama T., ... , Sugita S.	4. 巻 126
2. 論文標題 Geologic History and Crater Morphology of Asteroid (162173) Ryugu	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JE006572	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ogawa K., Sakatani N., Kadono T., Arakawa M., Honda R., Wada K., Shirai K., Shimaki Y., Ishibashi K., Yokota Y., Saiki T., Imamura H., Tsuda Y., Nakazawa S., Takagi Y., Hayakawa M., Yano H., Okamoto C., Iijima Y., Morota T., Kameda S., ... , Sugita S.	4. 巻 74
2. 論文標題 Particle size distributions inside and around the artificial crater produced by the Hayabusa2 impact experiment on Ryugu	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-022-01713-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sugiura Keisuke, Kobayashi Hiroshi, Watanabe Sei-ichiro, Genda Hidenori, Hyodo Ryuki, Inutsuka Shu-ichiro	4. 巻 365
2. 論文標題 SPH simulations for shape deformation of rubble-pile asteroids through spinup: The challenge for making top-shaped asteroids Ryugu and Bennu	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114505 ~ 114505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2021.114505	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanamaru M., Sasaki S., Morota T., Cho Y., Tatsumi E., Hirabayashi M., Hirata N., Senshu H., Shimaki Y., Sakatani N., Tanaka S., Okada T., Usui T., Sugita S., Watanabe S.	4. 巻 126
2. 論文標題 YORP Effect on Asteroid 162173 Ryugu: Implications for the Dynamical History	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JE006863	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tachibana S., Sawada H., Okazaki R., Takano Y., Sakamoto K., Miura Y. N., Okamoto C., Yano H., Yamanouchi S., Michel P., Zhang Y., Schwartz S., Thuillet F., Yurimoto H., Nakamura T., Noguchi T., Yabuta H., Naraoka H., Tsuchiyama A., Imae N., ... , Watanabe S., Tsuda Y.	4. 巻 375
2. 論文標題 Pebbles and sand on asteroid (162173) Ryugu: In situ observation and particles returned to Earth	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1011 ~ 1016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abj8624	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakamura T., Matsumoto M., Amano K., Enokido Y., Zolensky M. E., Mikouchi T., Genda H., Tanaka S., Zolotov M. Y., Kurosawa K., Wakita S., Hyodo R., Nagano H., Nakashima D., Takahashi Y., Fujioka Y., Kikuiru M., Kagawa E., Matsuoka M., Brearley A. J., Tsuchiyama A., ... , Watanabe S., Tsuda Y.	4. 巻 379
2. 論文標題 Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abn8671	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 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. Saiki
2. 発表標題 The shape and origin of the rubble-pile asteroid Ryugu
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊誠一郎, 吉川真, 田中智, 杉田精司, 竝木則行, 岡田達明, 北里宏平, 橘省吾, 荒川政彦, 池田人, 石黒正晃
2. 発表標題 探査機はやぶさ 2 のリュウグウ近傍探査の総括
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤羽 大貴, 渡邊 誠一郎, 諸田 智克, 道上 達広, 平田 成, 平田 直之, 鳶生 有理, 野口 里奈, 本田 理恵, 亀田 真吾, 山田 学, 坂谷 尚哉, 小川 和律, 巽 瑛理, 神山 徹, 横田 康弘, 長 勇一郎, 鈴木 秀彦, 早川 雅彦, ..., 杉田 精司
2. 発表標題 小惑星リュウグウのクレーターと周辺ボルダーの関係に着目した表層の層構造の推定
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 諸田智克, 杉田精司, 長勇一郎, 金丸仁明, 本田理恵, 巽瑛理, 坂谷尚哉, 平田直之, 亀田真吾, 菊地紘, 山田学, 横田康弘, 松岡萌, 本田親寿, 神山徹, 鈴木秀彦, 早川雅彦, 吉岡和夫, 小川和律, ..., 澤田弘崇
2. 発表標題 小惑星 Ryugu の表面の色変化と層序
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sei-ichiro Watanabe
2. 発表標題 An overview of Hayabusa2 mission and asteroid 162173 Ryugu
3. 学会等名 Asteroid Science in the Age of Hayabusa20 and OSIRIS-Rex (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 入江輝紀, 山口隆正, 渡邊誠一郎, 桂木洋光
2. 発表標題 遠心力による砂山の形状変化および流動特性
3. 学会等名 日本惑星科学会 2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 入江輝紀, 山口隆正, 渡邊誠一郎, 桂木洋光
2. 発表標題 回転実験による砂山形状変化のヒステリシスと自転コマ型小惑星の形状安定性
3. 学会等名 混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 諸田智克
2. 発表標題 はやぶさ2のタッチダウンによって明らかとなった小惑星リュウグウの表層の進化
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Morota, S. Sugita, Y. Cho, E. Tatsumi, N. Sakatani, R. Honda, S. Kameda, M. Yamada, Y. Yokota, C. Honda, T. Kouyama, M. Matsuoka, M. Hayakawa, H. Sawada, K. Ogawa, H. Suzuki, K. Yoshioka, M. Kanamaru, M. Hirabayashi, T. Michikami
2. 発表標題 Impact Strength of Ryugu's Boulder Inferred from Meter-Sized Crater Statistics
3. 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Takai, T. Morota, K. Yumoto, R. Honda, S. Kameda, E. Tatsumi, Y. Cho, K. Yoshioka, H. Sawada, Y. Yokota, N. Sakatani, M. Hayakawa, M. Matsuoka, M. Yamada, T. Kouyama, H. Suzuki, C. Honda, K. Ogawa, S. Sugita
2. 発表標題 Statistics of Small Craters Observed on Boulder Surface of Asteroid Ryugu
3. 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 入江輝紀, 山口隆正, 渡邊誠一郎, 桂木洋光
2. 発表標題 粉体ヒープの回転による付着力評価
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桂木洋光, 入江輝紀, 渡邊誠一郎, 山口隆正
2. 発表標題 2次元回転砂山の変形と摩擦角の体積力依存性
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Takai, T. Morota
2. 発表標題 Surface age of Ryugu's boulders based on small crater statistics
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Ebihara, T. Morota
2. 発表標題 Orientations of boulders and relationship with gravitational slope on asteroid Ryugu: implications for surface evolution
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 愛敬雄太, 諸田智克, 杉田精司, 長勇一郎, 平田成, 本田理恵, 巽瑛理, 坂谷尚哉, 亀田真吾, 山田学, 横田康弘, 松岡萌, 本田親寿, 神山徹, 鈴木秀彦, 早川雅彦, 吉岡和夫, 小川和律, 澤田弘崇
2. 発表標題 はやぶさ2 ONC画像から構築したリュウグウ表面ローカル三次元地形モデルの精度評価と微小地形の計測
3. 学会等名 日本惑星科学会2022年秋季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Aikyo, T. Morota, S. Sugita, Y. Cho, N. Hirata, T. Michikami, R. Honda, E. Tatsumi, N. Sakatani, S. Kameda, M. Yamada, Y. Yokota, M. Matsuoka, C. Honda, T. Kouyama, H. Suzuki, M. Hayakawa, K. Yoshioka, K. Ogawa
2. 発表標題 Construction of the local digital elevation models of the asteroid Ryugu by structure-from-motion method
3. 学会等名 54th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡邊誠一郎, 山田理央奈, 諸田智克
2. 発表標題 自転変化に伴うリュウグウの表層進化
3. 学会等名 日本惑星科学会2022年秋季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sei-ichiro Watanabe
2. 発表標題 Scientific discoveries of the Hayabusa2 mission, sample return from asteroid Ryugu
3. 学会等名 31th General Assembly, International Astronomical Union (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sei-ichiro Watanabe
2. 発表標題 Formation and evolution of planetesimals revealed from the Hayabusa2 mission
3. 学会等名 82nd Fujihara Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

2022年度に繰り越したため、2022年度未までの成果を記載した。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	桂木 洋光 (Katsuragi Hiroaki) (30346853)	大阪大学・理学研究科・教授 (14401)	
研究分担者	諸田 智克 (Morota Tomokatsu) (30415898)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授 (12601)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	金丸 仁明 (Kanamaru Masanori)		
研究協力者	杉浦 圭祐 (Sugiura Keisuke)		
研究協力者	赤羽 大貴 (Akahane Daiki)		
研究協力者	入江 輝紀 (Irie Terunori)		
研究協力者	山田 理央奈 (Yamada Riona)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	山口 隆正 (Yamaguchi Ryusei)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関