

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00719

研究課題名(和文)衝突破壊の超高速X線トモグラフィーによる小惑星族の多様性に関する研究

研究課題名(英文) Study of collisional disruption by using the ultra-high speed X-ray tomography and implication for the diversity of asteroid families

研究代表者

荒川 政彦 (Masahiko, Arakawa)

神戸大学・理学研究科・教授

研究者番号：10222738

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,700,000円

研究成果の概要(和文)：フラッシュX線による撮影画像と高速カメラによる取得画像のデジタル画像相関法による解析により、衝突破壊時の破片の質量-速度分布の計測を行った。衝突実験は、微惑星の様々な熱進化段階を模擬した標的を用いて行った。数値シミュレーションとの比較から、重力支配域の衝突破壊強度 $QD^*$ が、室内実験で得られた中間速度 $v^*$ とエネルギー密度 $Q$ の関係を用いることで半理論的に推定できることが明らかになった。そして、 $QD^*$ は、空隙率や内部構造には敏感であるが引っ張り強度には鈍感であることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、熱進化する微惑星の衝突破壊強度を実験と数値シミュレーションにより明らかにし、小惑星の多様性を解明するための基礎を築いた点にある。

微惑星は熱進化と共に重力支配域の衝突破壊強度が小さくなるので、初期成長時には、その成長が阻害される。一方、一端成長して二層構造になると衝突寿命が長くなり、熱進化を継続できることが分かった。これが分化した小惑星(M型やV型など)の破片と思われる小惑星の比率が、始原的小惑星(S型やC型)よりもかなり小さい理由なのかもしれない。

研究成果の概要(英文)：The mass-velocity distribution of impact fragments at the time of collisional disruption was measured by analyzing the images taken by Flash X-rays and the images acquired by a high-speed camera by the digital image correlation method. Impact experiments were performed using targets that simulate the various stages of thermal evolution of planetesimals. From the comparison with the numerical simulation, it became clear that the impact strength  $QD^*$  in the gravity-dominated regime can be estimated from the semi-theoretical formula by using the relationship between the median velocity  $v^*$  and the energy density  $Q$  obtained in the laboratory experiment. It was found that  $QD^*$  is sensitive to porosity and internal structure, but insensitive to tensile strength.

研究分野：惑星科学、実験惑星物理学

キーワード：衝突破壊強度 小惑星 微惑星 熱進化天体 フラッシュX線 再集積 ラブルパイル天体 デジタル画像相関法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

惑星の起源に関する研究は天文観測の急速な進展により劇的に進んできている。アルマ電波望遠鏡による原始惑星系円盤の観測や宇宙望遠鏡による系外惑星のサーベイなどは、大きな成果を上げている。一方、惑星進化の研究は未だ天文観測では難しく、特に、微惑星から原始惑星への成長過程は、地球のような成長しきった天体の研究からは情報を得ることができないためミッシングリンクと言われてきた。このミッシングリンクを埋めるため、理論・数値シミュレーションや隕石の物質科学的研究が盛んに行われている。そして、これらの研究から微惑星はその成長に伴って熱進化してコアとマントルのような内部構造を持ち、物質分布が多様化したことが指摘されている(熱進化仮説と呼ぶ)。この仮説を検証するために太陽系の探査が望まれてきた。小惑星は、微惑星から原始惑星へと成長しつつある天体の化石と言われており、熱進化仮説の検証には最適である。実際、JAXA「はやぶさ2」やNASA/OSIRIS-RExなどの小惑星探査が現在も行われている。しかしながら、惑星探査だけでは調査できる小惑星数に限界があるため、小惑星の天体観測も盛んである。

小惑星は天文観測による反射スペクトルにより分類が進んでおり、また、その軌道要素の類似性から族という小惑星集団にも分類されている。この小惑星族とは、微惑星同士の衝突破壊により分裂した小天体の集まりと言われており30以上の族が確認されている。一つの族に属する小惑星は、イトカワのように元天体の破片の一部が重力再集積した天体(ラブルパイル天体と呼ぶ)や一つの大破片がそのまま小惑星になった(破片天体と呼ぶ)ものがある(図1)。この族に属する小惑星は、元は一つの微惑星であるため(これを母天体と呼ぶ)、その系統的な観測・探査により、母天体の内部構造や物質分布を再構築できる可能性を持つ。従って、様々な族から再現される母天体の研究から、微惑星から原始惑星に至る天体の内部構造や物質分布の進化を解明することができる。このような理由で、今後の小惑星の研究は、ミッシングリンクを埋めるために必須である小惑星族の探査と天文観測へと向かうと思われる。

現在「はやぶさ2」が探査中のリュウグウは、ラブルパイル天体であり、母天体の様々な初期位置から破片を集めている可能性がある。そのため、この天体の研究で母天体の内部構造や物質分布に関する情報を一部ではあるが読み解くことができる。一方、探査・観測データから、母天体の内部構造や物質分布を再構築するための小惑星族やラブルパイル天体に関する研究は未だ進んでいない。母天体の再構築には、衝突破壊とその破片の再集積に関する研究が必要であり、そのためには、様々な内部構造を持つ母天体を想定しなくてはならない。

## 2. 研究の目的

微惑星から原始惑星へと至る太陽系天体のミッシングリンクを繋ぐことは惑星科学の大目標である。この大目標を達成するためには、微惑星の内部進化過程を明らかにすることが必要である。そこで本研究では、惑星探査や天文観測から得られる小惑星族やラブルパイル天体の観測データから、母天体の内部構造や物質分布を再構築することを研究目的とする。そのために必要な室内衝突実験と数値実験を遂行し、小惑星母天体の再構築に必要な衝突破壊と重力再集積に関するモデルの開発を行う。再構築された小惑星族やラブルパイル天体の母天体は、微惑星の内部進化過程を解明する鍵となる。

## 3. 研究の方法

本研究は、研究目的を達成するために3つの項目に分けて研究を遂行し、それぞれが有機的に連携することにより研究課題に取り組む。3項目は、(1) 衝突破片の質量と飛行速度を時間・空間的に連続計測するためのDIC法の開発、(2) 熱進化した微惑星の模擬試料を用いた衝突破壊実験とその時に発生する衝突破片の超高速X線観測及び高速光学撮影に基づくDIC法による解析、(3) 衝突破片の再集積によるラブルパイル天体形成に関する数値シミュレーション、である。これらの結果を踏まえて、(4) ラブルパイル天体の多様性や小惑星族の多様性について検討するために最も重要な物理量である重力支配域の衝突破壊強度について検討を行う。その結果、母天体の内部構造や物質分布が及ぼす衝突破壊強度への影響を議論する。なお、この研究は、研究代表者・分担者の他に研究協力者として、大学院生2名、スイス・ベルン大学のMartin Jutzi博士が参画した。

## 4. 研究成果

- (1) 画像相関法(DIC法: Digital Image Correlation Method)の衝突破壊への応用  
衝突破壊する標的の破片質量-速度分布を調べるために、フラッシュX線を利用した観測法

が開発された (Arakawa et al., 2022)。この方法では標的全体の破片質量-速度分布を推定できるが、標的内部に埋め込んだマーカーの速度分布から、その関係を推定するものであり、個々の破片の質量と速度を求めることはできなかった。そこで一度に撮影するフラッシュ X 線を 2 方向から 4 方向に増設して、それら 4 方向からの撮影画像を用いて破片の 3 次元形状とその放出速度を求めるのが、この研究の当初の目的であった。しかしながら、新型コロナウイルス感染防止の影響で 2020 年度と 2021 年度の 2 年間は、フラッシュ X 線が利用できる宇宙科学研究所での実験が大きく制限されてしまい、十分な実験を行うことができなかった。そこでフラッシュ X 線を利用したトモグラフィーの代替手法として、急遽、神戸大学でも実験可能な、画像相関法による衝突破片の質量-速度分布の計測法の開発を行った。

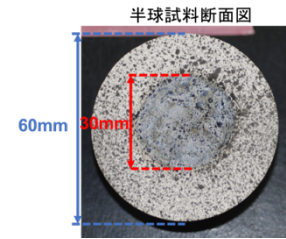


図 1：二層構造標的の断面

この手法はいわゆる Quarter space 法に似た手法で標的内部を可視化する手法である。図 1 のように輪切りにした球標的の断面にランダム模様を塗布し、この断面を高速カメラで観測した画像を利用して解析を行う。撮影した時系列画像データにおいて、画像全体ではなく、「窓」と称する画像の一部分の相関係数が最も高くなるように「窓」を移動し、その移動量から「窓」の初期位置の時間当たりの変位量を推定する。この解析を空間的、時間的に連続して行うことで、断面の変位分布の時間変化を調べることができる。図 2 は、その一例で、二層構造標的の断面の衝突時の変形を解析した結果である。衝突方向とその垂直方向の変位量が別々に示されている。DIC 法では、元の高速撮影画像を見ると破壊の様子と最終的な破片の形状を (2 次元ではあるが) 確認できるので、破片の速度分布を空間的にも時間的にも連続的に求めることができる。

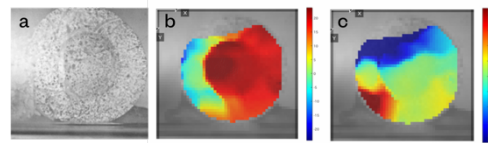


図 2：二層構造標的の DIC 法による解析結果

この解析方法で破片速度の時間変化を求めたのが図 3 である。衝突時からその後 1ms の速度変化を連続的に調べた結果、衝突後 100  $\mu$ s を過ぎると破片速度はほぼ一定となっていることが分かった。1ms 後の高速カメラの画像を見ると、破片となった標的の一部が、周囲との相互作用なしに飛んでいく様子が映っている。他の実験データの解析からも、最終的に破片となる飛び去る標的領域は、100  $\mu$ s を過ぎると速度は一定となることが分かった。従って、当初の手法とは異なるが、今回開発した新しい DIC 法によって、軸対称を仮定すれば 3 次元破片の質量-速度分布を求めることができる。

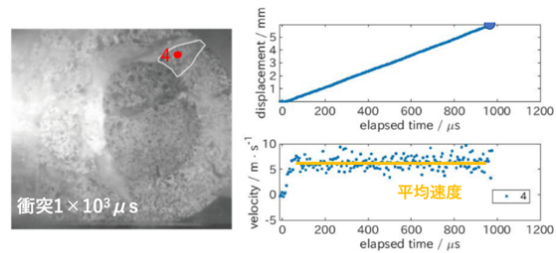


図 3：DIC 法による破片速度の時間変化の解析結果

(2) 熱進化した微惑星の模擬標的を用いた衝突破壊実験

熱進化した微惑星を模擬するために 2 種類の内部構造を持つ標的を準備した。一つは、有機物と珪酸塩が均質に混合した延性標的であり、シリコンオイルとベントナイト粉末を混合して作成した。なお、シリコンオイルには 10Pas と 60Pas の 2 種類の粘性率のものを用い、それぞれの混合物を混合物 10 及び混合物 60 と呼ぶ。これらの標的は、有機物を含む微惑星を模擬している。なお、これらの標的と比較してシリコンオイルの効果を確認するために、シリコンオイルを入れずに作成した多孔質粘土標的も準備した。一方、もう一つの模擬標的は、混合 10 試料をコアとし、その表層をマントル (石英砂と多孔質石膏の混合物) で覆った二層構造標的である。マントルである石英砂と石膏の混合質量比は 2:1 であり、その引っ張り強度は 770kPa であった。また、この二層構造標的との比較のために、石英砂と多孔質石膏の混合物から成る均質標的も作成した。なお、ここまでの標的試料はすべて球形でその直径は 60mm であり、フラッシュ X 線撮影用の標的にはマーカーとして直径 3mm の鉄球を 12 個、赤道面に規則的に配置している

(Arakawa et al., 2022 参照)。コアを持つ場合、そのコア直径は 30mm である。混合物 10 と 60 の延性標的は、フラッシュ X 線観測のみを行った。一方、二層構造標的と砂・多孔質石膏均質標的は、フラッシュ X 線観測と Quarter space 観測の両方を行った。フラッシュ X 線観測は宇宙科学研究所の超高速衝突実験施設で実施し、DIC 法のための高速カメラによる撮影は神戸大学で実施した。衝突速度は 1.5km/s~6km/s であり、直径 4.7mm もしくは直径 7mm のポリカ弾丸を標的に衝突させて衝突破壊実験を行った。な

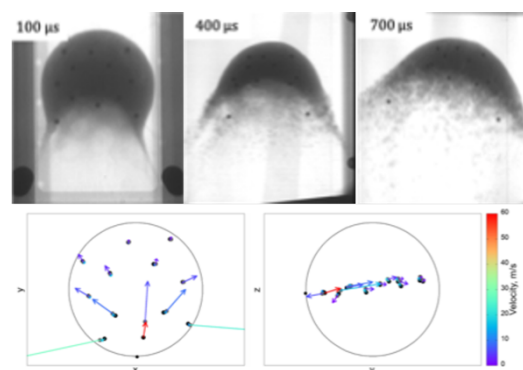


図 4：混合 10 標的のフラッシュ X 線画像と解析結果

お、フラッシュ X 線はイメージングプレートで撮影した。

### ① 延性標的の結果

混合物 10 の衝突破壊をフラッシュ X 線で撮影した結果を図 4 に示す。これは衝突速度 4km/s での実験結果であり、上段はフラッシュ X 線による撮影画像であり、下段はマーカーの移動を解析した結果得られた速度ベクトルである。なお、下段左は、マーカーを設置した赤道面上の速度ベクトルで、右は赤道面を横から見た時の速度ベクトルである。マーカーの速度ベクトル分布から、衝突後の標的は衝突軸（衝突点と標的中心を結ぶ線）に対してほぼ軸対称に物質移動が起きていることが分かる。また、衝突点近傍では速度が一番大きく、衝突点から遠ざかると速度は急速に遅くなるのがわかる。フラッシュ X 線の画像を見ると標的内部にはっきりしたクラックや破片の形成は確認されなかったが、 $700\mu\text{s}$  になると標的が延びてちぎれたような破片が確認された。この様に延性標的では、衝突後は流体のような変形を示し、引っぱり破壊によるクラックは標的全域には成長しないことが分かった。

図 5 に混合 10 標的のフラッシュ X 線画像を Arakawa et al. (2022) の手法で解析して得た質量-速度分布の結果を示す。この図では、縦軸はある速度よりも遅い速度で飛翔する標的の質量を表し、質量は初期質量で規格化している。速度は重心系での速度となっている。衝突速度が大きくなると規格化積算質量が 0.5 になる時の速度が次第に大きくなるのが分かる。この積算質量が 0.5 の時の速度を中間速度 ( $v^*$ ) として定義し、破片速度分布の代表的な速度とする。この  $v^*$  は、これまでの我々の研究から引っぱり強度には依存しないが、空隙率には強く依存することが分かっている。混合 10 標的の空隙率は 20% 程度とあまり大きくないので、空隙の効果は小さいと考えられる。

図 6 にエネルギー密度 ( $Q$ ) と  $v^*$  の関係を示す。この図から標的の種類毎に  $v^* = \varepsilon Q^{\gamma}$  の関係があることが分かる。この図で混合 60 標的の結果と混合 10 標的の結果を比較すると、系統的に混合 60 標的の方が  $v^*$  が小さいことがわかる。これは延性標的において粘性率が大きくなると  $v^*$  が小さくなる、すなわち破片速度が系統的に小さくなることを意味する。一方、延性標的の混合 10 標的の結果は、以前行った凍結粘土の結果とほぼ一致した。凍結粘土は 1MPa 以上の引っぱり強度を持ち、ほぼ引っぱり強度を持たない混合 10 標的とは著しく強度が異なる。一方、凍結粘土標的の空隙率は 10% 以下と混合 10 標的と同様に空隙率は低い。この比較から、破片の速度分布には引っぱり強度はあまり重要ではないことが分かる。一方、比較のために行った多孔質粘土の  $v^*$  はかなり遅いことが分かる。この多孔質粘土の空隙率は約 50% であり、空隙の影響で速度が影響を受けて遅くなったと考えられる。

### ② 二層構造標的の結果

図 7 にフラッシュ X 線で撮影した二層構造標的の画像を示す。なお、比較のために砂・石膏均質標的の撮影画像も上段に示している。均質標的では、衝突後 0.4ms までに太いクラックが衝突点から標的全体を貫いて成長しているのが確認できるが、二層構造標的では 0.2ms でもクラックの成長は顕著ではなく、さらにその成長はマントル部分に限られている。3ms 後には両方とも全体が破壊されて、破片化しているが二層構造標的では、コアが弾丸の衝突方向に潰れているのが確認された。一方、マントル部分の破壊は均質標的と大きな差は見られなかった。このコアの圧縮変形は図 2、図 3 の Quarter space の断面観察でも確認されており、DIC 法による解析がフラッシュ X 線観察と整合しているという証拠の一つとなっている。

図 8 に均質標的と二層構造標的において、フラッシュ X 線画像の解析により得られたマーカーの重心系での速度分布を示す。上段が二層構造標的の下段が均質標的である。左欄のエネルギー密度が小さい方の結果を見ると 2 つの標的の差がはっきりと分かる。二層構造標的では衝突

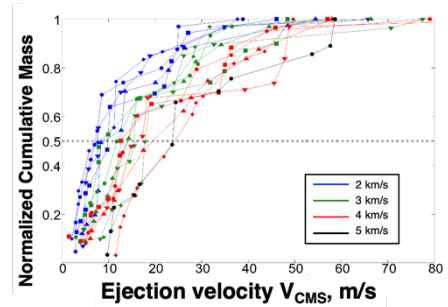


図 5: 混合 10 標的の破片質量-速度分布

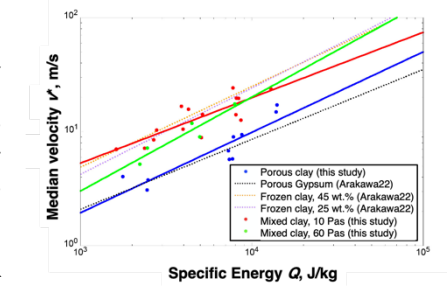


図 6: 混合標的の  $v^*$  と  $Q$  の関係

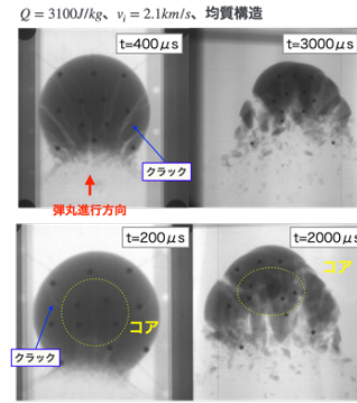


図 7: 均質標的と二層構造標的のフラッシュ X 線画像

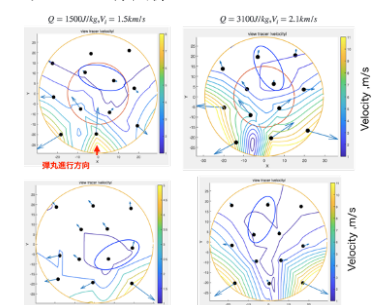


図 8: 均質標的と二層構造標的内の速度ベクトル

点近傍の速度勾配が均質標的よりも大きくなり、マン  
トルが早い速度で放出されている。一方、反対点付近  
のマントルは、コア部分よりも速度が小さくなってい  
る。これは、均質標的では反対点付近よりも中心部分  
の方が、速度が小さくなっているのと対照的である。  
さらにエネルギー密度が大きくなると両者とも全体的  
に速度が大きくなるという特徴ははっきりと分かる。  
図 9 に図 8 を用いて作成した中間速度 ( $v^*$ ) のエネル  
ギー密度依存性を示す。図 6 の結果に二層構造標的と  
均質標的の結果を追記したものである。この図で層構  
造 2:1 が今回の層構造標的の結果であり、均質 2:1 が  
今回の石英砂・石膏均質標的の結果である。二層構造  
標的の結果は、以前我々が行った多孔質石膏標的 (空隙  
率約 50%) と非常に似た結果を持つことが分かった。一  
方、均質標的は系統的に速度が遅くなることも分かった。この観測事実から、二層構造標的  
は、内部の延性コアの空隙率が小さいため、そこでの衝突エネルギーの散逸がかなり免れる  
ことが想像される。その結果、二層構造標的では、均質標的よりも破片速度が大きくなる。

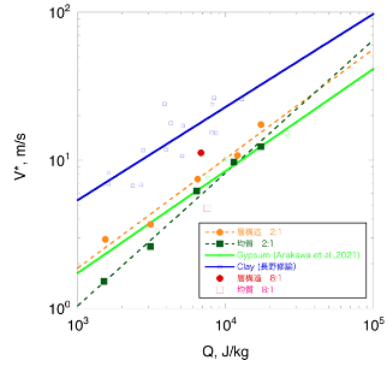


図 9: 均質標的と二層構造標的のフラ  
ッシュ X 線画像

- (3) ラブルパイル天体形成に関する数値シミュレーション  
室内実験の結果得られた破片のサイズ頻度分布と積  
算質量-速度分布を再現できる数値シミュレーショ  
ンを行った。利用したコードは Jutzi (2015) と同じも  
のであり、以前の実験で行った (Arakawa et al.,  
2022) 多孔質石膏の結果を再現できるシミュレーシ  
ョンを実施した。図 10 では  $2.5 \times 10^4 \text{ J/kg}$  のエネル  
ギー密度で行った多孔質石膏への実験結果と同じ条件  
で行った SPH 法による数値計算の結果を比較している。  
室内実験の結果をこのシミュレーションは比較的よく再  
現していることが分かる。そこで、この数値シミュレーションに重力の効果を加えて、衝突  
破壊後の再集積により、再集積天体のサイズが元の天体の  $1/2$  になる時のエネルギー密度  
を見積もることとした。

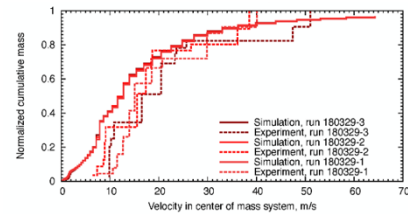


図 10: 積算質量-速度分布, 実験結果と  
数値シミュレーションとの比較

- (4) 重力支配域の衝突破壊強度

この数値シミュレーションから計算した重力支配域の  
衝突破壊強度 ( $Q_b^*$ ) の天体半径 ( $R$ ) 依存性を図 11 に示  
す。同時に室内実験の結果から得られた  $v^*$  と  $Q$  の関係  
と天体の脱出速度の関係から求めた半理論式:  $Q_b^* = [1/  
\epsilon(2GM/R)^{1/2}]^{1/\gamma}$  もプロットしている。緑の点線は、脱  
出速度を元天体そのものの質量 ( $M=M_0$ ) とした時で、青  
の点線は脱出速度を元の天体の  $1/2$  ( $M=1/2M_0$ ) にした時  
の半理論式である。ここで、 $M_0=4/3R^3\rho\pi$  とし、 $\rho$  は平均  
密度とする。これらの比較から重力を考慮した数値シ  
ミュレーションの結果は、元天体の  $1/2$  の質量を持つ天体  
の脱出速度と実験から決められる  $v^*$  を比較することで再現できることが分かった。但し、  
この半理論式が利用可能なのは、天体サイズが 10km を超えた領域である。

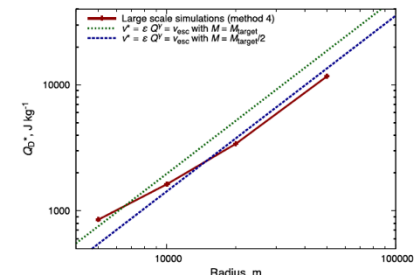


図 11:  $Q_b^*$  の天体半径依存性. 半理論  
式と数値シミュレーションの比較

以上の結果をまとめると、重力支配域の衝突破壊強度は、室内実験の  $v^*$  と  $Q$  の関係を用  
いる事で半理論式から推定できることが明らかになった。そして、 $v^*$  と  $Q$  の関係は、空隙率  
や内部構造には敏感であるが引っ張り強度には鈍感であることが分かった。微惑星が熱進  
化すると空隙率が低くなり、さらに進化すると二層構造天体となる。重力支配域の衝突破壊  
強度は、この空隙率と内部構造の進化に伴って変化する。即ち、まず空隙率の減少と伴に小  
さくなり、次に二層構造への変化により大きくなると推測される。従って、微惑星は熱進化  
と伴に重力支配域の衝突破壊強度が小さくなるので、初期成長時には、その成長が阻害され  
るが、一端成長して二層構造になると衝突寿命が長くなり、熱進化を継続できることが分か  
った。これが分化した小惑星 (M 型や V 型など) の破片と思われる小惑星の比率が始原的小  
惑星 (S 型や C 型) よりも数が少ない理由なのかもしれない。

#### <引用文献>

- ① Arakawa, M. et al., 2022. Dispersion and shattering strength of rocky and frozen planetesimals studied by laboratory experiments and numerical simulations. *Icarus*, 373, 114777.
- ② Jutzi, M., 2015. SPH calculations of asteroid disruptions: The role of pressure dependent failure models. *Planetary and Space Science* 107, 3-9.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Matsue Kazuma, Yasui Minami, Arakawa Masahiko, Hasegawa Sunao	4. 巻 338
2. 論文標題 Measurements of seismic waves induced by high-velocity impacts: Implications for seismic shaking surrounding impact craters on asteroids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 113520 ~ 113520
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2019.113520	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 Yasui Minami, Arakawa Masahiko, Yoshida Yusaku, Matsue Kazuma, Takano Shota	4. 巻 335
2. 論文標題 Effects of oblique impacts on the impact strength of porous gypsum and glass spheres: Implications for the collisional disruption of planetesimals in thermal evolution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 113414 ~ 113414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2019.113414	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 Hasegawa Sunao, Hiroi Takahiro, Ohtsuka Katsuhito, Ishiguro Masateru, Kuroda Daisuke, Ito Takashi, Sasaki Sho	4. 巻 71
2. 論文標題 Q-type asteroids: Possibility of non-fresh weathered surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz088	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 Arakawa M., Saiki T., Wada K., Ogawa K., Kadono T., Shirai K., Sawada H., Ishibashi K., Honda R., Sakatani N., Iijima Y., Okamoto C., Yano H., Takagi Y., Hayakawa M., Michel P., Jutzi M., Shimaki Y., Kimura S., Mimasu Y., Toda T., Imamura H., Nakazawa S., Hayakawa H., Sugita S., Morota T., Kameda S., 他41名	4. 巻 368
2. 論文標題 An artificial impact on the asteroid (162173) Ryugu formed a crater in the gravity-dominated regime	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 67 ~ 71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaz1701	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 Hasegawa Sunao, Marsset Michael, DeMeo Francesca E., Bus Schelte J., Geem Jooyeon, Ishiguro Masateru, Im Myungshin, Kuroda Daisuke, Vernazza Pierre	4. 巻 916
2. 論文標題 Discovery of Two TNO-like Bodies in the Asteroid Belt	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L6 ~ L6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac0f05	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 Yasui Minami, Tazawa Taku, Hashimoto Ryohei, Arakawa Masahiko, Ogawa Kazunori	4. 巻 2
2. 論文標題 Impacts may provide heat for aqueous alteration and organic solid formation on asteroid parent bodies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Earth & Environment	6. 最初と最後の頁 95(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43247-021-00159-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Honda Rie, Arakawa Masahiko, Shimaki Yuri, Shirai Kei, Yokota Yasuhiro, Kadono Toshihiko, Wada Koji, Ogawa Kazunori, Ishibashi Ko, Sakatani Naoya, Nakazawa Satoru, Yasui Minami, Morota Tomokatsu, Kameda Shingo, Tatsumi Eri, Yamada Manabu, Kouyama Toru, Cho Yuichiro, Matsuoka Moe, Suzuki Hidehiko, 他14名	4. 巻 366
2. 論文標題 Resurfacing processes on asteroid (162173) Ryugu caused by an artificial impact of Hayabusa2's Small Carry-on Impactor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114530 ~ 114530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2021.114530	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 Shimaki Yuri, Arakawa Masahiko	4. 巻 369
2. 論文標題 Tensile strength and elastic properties of fine-grained ice aggregates: Implications for crater formation on small icy bodies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114646 ~ 114646
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2021.114646	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 Arakawa Masahiko, Okazaki Masashi, Nakamura Masato, Jutzi Martin, Yasui Minami, Hasegawa Sunao	4. 巻 373
2. 論文標題 Dispersion and shattering strength of rocky and frozen planetesimals studied by laboratory experiments and numerical simulations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114777 ~ 114777
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2021.114777	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 Hasegawa Sunao, Marsset Michael, DeMeo Francesca E., Bus Schelte J., Ishiguro Masateru, Kuroda Daisuke, Binzel Richard P., Hanus Josef, Nakamura Akiko M., Yang Bin, Vernazza Pierre	4. 巻 924
2. 論文標題 The Appearance of a "Fresh" Surface on 596 Scheila as a Consequence of the 2010 Impact Event	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L9 ~ L9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac415a	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33件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 22件)

1. 発表者名 堀川 和洋, 荒川 政彦, 保井 みなみ, 杉村 瞭
2. 発表標題 Experimental study on collision destruction simulating the primitive meteorite parent body
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusaku Yokota, Yuya Yamamoto, Minami Yasui, Masahiko Arakawa, Haruka Sasai
2. 発表標題 Experimental study on impact crater formed on bulge
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Minami Yasui, Masahiko Arakawa, Sunao Hasegawa, Yuya Yamamoto, Ryo Sugimura
2. 発表標題 Impact cratering experiments on glass beads with bead size frequency distribution: Implications for cratering process on asteroid Ryugu
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiko Arakawa et al.
2. 発表標題 Impact experiment on asteroid Ryugu by Small-Carry on impactor of Hayabusa-2 and observation of the impact ejecta by a Deployable CAMERA-3
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 Yuya Yamamoto, Masahiko Arakawa, Minami Yasui, Sunao Hasegawa, Ryo Sugimura
2. 発表標題 Impact experiments on low strength coarse-grained regolith simulating surface materials on asteroid Ryugu
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長野 巧, 荒川 政彦, 保井 みなみ, 中村 誠人, 長友 文哉
2. 発表標題 Observation of catastrophic destruction of two different targets using X Ray photography
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉村 瞭, 荒川 政彦, 保井 みなみ, 石黒 琢也
2. 発表標題 小惑星表面を模擬した砂・石膏標的を用いた高速度クレーター形成実験
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiko Arakawa, The Hayabusa2 SCI/DCAM3 and ONC team
2. 発表標題 First result of Hayabusa2 impact experiment on Ryugu
3. 学会等名 EPSC-DPS Joint Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Minami Yasui, Yuya Yamamoto, Masahiko Arakawa, Sunao Hasegawa, Ryo Sugimura, Yusaku Yokota
2. 発表標題 Impact experiments on granular targets with size frequency distribution similar to asteroid 162173 Ryugu
3. 学会等名 EPSC-DPS Joint Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiko Arakawa, Minami Yasui, Masashi Okazaki, Masato Nakamura, Sunao Hasegawa
2. 発表標題 In-situ observation of catastrophic disruption of asteroid analogues using flash X-ray photography
3. 学会等名 EPSC-DPS Joint Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村 誠人, 荒川 政彦, 保井 みなみ, 長谷川 直
2. 発表標題 フラッシュX線を用いた衝突破壊現象の観測：多孔質標的の破片速度分布に対する空隙の効果
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiko Arakaw et al.
2. 発表標題 Artificial impact crater formed by Hayabusa2 small carry-on impactor on the surface of asteroid Ryugu
3. 学会等名 American Geophysical Union(AGU) Fall Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒川政彦 他
2. 発表標題 はやぶさ2 SCIによる小惑星リュウグウ上での衝突実験
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasui, M., Arakawa, M., Okawa, H., Hasegawa, S.
2. 発表標題 Impact cratering experiments on granular targets simulating surface layer on asteroid 162173 Ryugu: Crater scaling law and impact induced seismic shaking
3. 学会等名 52nd Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 Okawa, H., Arakawa, M., Yasui, M., Hasegawa, S., Yokota, Y., Yamamoto, Y
2 . 発表標題 Three-dimensional tracking of various sized glass beads ejected from impact crater
3 . 学会等名 52nd Lunar and Planetary Science Conference ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Yamamoto, Y., Arakawa, M., Yasui, M., Hasegawa, S., Yokota, Y., Okawa, H., Sugimura, R.
2 . 発表標題 Crater size scaling law and impact-induced seismic shaking on rubble-pile asteroids
3 . 学会等名 52nd Lunar and Planetary Science Conference ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Sasai, H., Yasui, M., Arakawa, M., Shirai, K.
2 . 発表標題 High velocity impact experiments on porous ice aggregates simulating cometary nuclei surface: Measurements of post shock temperature around impact crater
3 . 学会等名 52nd Lunar and Planetary Science Conference ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Yokota, Y., Arakawa, M., Yasui, M., Yamamoto, Y., Okawa, H., Hasegawa, S.
2 . 発表標題 Experimental study on impact craters formed on mountain-like surface topography of asteroids
3 . 学会等名 52nd Lunar and Planetary Science Conference ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 Zhang, Y., Jutzi, M., Michel, P., Raducan, S. D., Arakawa, M.
2. 発表標題 A hybrid SPH-SSDEM framework for end-to-end impact cratering modeling
3. 学会等名 52nd Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Arakawa, M., Honda, R., Yokota, Y., Shimaki, Y., Shirai, K., Kadono, T., Wada, K., Ogawa, K., Ishibashi, K., Sakatani, N., Yasui, M., Morota, T., Kameda, S., Tatsumi, E., Yamada, M., Kouyama, T., Cho, Y., Matsuoka, M., Suzuki, H., Honda, C., Hayakawa, M., Yoshioka, K., Sawada, H., Sugita, S., Hirata, N., Hirata, N.
2. 発表標題 Resurfacing processes on asteroid (162173) Ryugu caused by an artificial impact of Hayabusa2's Small Carry-on Impactor
3. 学会等名 52nd Meeting of the AAS Division for Planetary Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Arakawa M. et al. 他33名
2. 発表標題 Artificial impact crater formed by Small Carry-on Impactor on the asteroid 162173 Ryugu in the gravity-dominated regime
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長野巧, 荒川政彦, 保井みなみ, 堀川和洋
2. 発表標題 フラッシュX線による衝突破片の速度-質量分布の計測: 粘土を用いた延性標的の衝突破壊実験
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年度秋季講演会(会津)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀川和洋, 荒川政彦, 保井みなみ, 杉村瞭
2. 発表標題 低強度標的を用いた衝突破壊実験: 引張強度と衝突破壊強度の関係
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村誠人, 保井みなみ, 荒川政彦
2. 発表標題 氷微惑星の衝突破壊強度に対する斜め衝突の効果
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sasai, H., Yasui, M., Arakawa, M., Shirai, K.
2. 発表標題 Post Shock Heat Induced by High Velocity Impact on Porous Icy Bodies
3. 学会等名 53rd Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Arakawa, M., Nagano, T., Ishida, S., Yasui, M., Shirai, K., Hasegawa, S.
2. 発表標題 Impact Strength of Porous- and Ductile-Rocky Planetesimals in Gravity Dominated Regime
3. 学会等名 53rd Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasui, M., Tazawa, T., Hashimoto, R., Arakawa, M., Ogawa, K.
2. 発表標題 High-Velocity Impact Experiments of Simulated Porous Asteroids and Measurements of Post Impact Temperature around Impact Crater
3. 学会等名 53rd Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jutzi, M., Raducan, S. D., Zhang, Y., Michel, P., Arakawa, M.
2. 発表標題 Constraining Asteroid Ryugu 's Surface Properties from Numerical Simulations of the SCI Impact
3. 学会等名 53rd Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長野巧, 荒川政彦, 保井みなみ, 石田紗那, 長谷川直
2. 発表標題 フラッシュ X 線による衝突破片の速度 質量分布の計測: 粘土を用いた延性標的の衝突破壊実験
3. 学会等名 日本惑星科学会2021年秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石田紗那, 荒川政彦, 保井みなみ, 白井慶, 長谷川直, 長野巧, 堀川和洋
2. 発表標題 層構造含水微惑星の模擬物質への衝突実験: デジタル画像相関法による標的内部の粒子速度分布の計測
3. 学会等名 日本惑星科学会2021年秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村誠人, 保井みなみ, 荒川政彦
2. 発表標題 熱進化した氷微惑星の斜め衝突に関する実験的研究
3. 学会等名 日本惑星科学会2021年秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石田紗那, 荒川政彦, 保井みなみ, 白井慶, 堀川和洋
2. 発表標題 層構造試料を用いた衝突破壊実験: デジタル画像相関法による衝突破片速度分布の計測法の開発
3. 学会等名 JpGU2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Arakawa, K. Wada, K. Ogawa, T. Kadono, K. Shirai, K. Ishibashi, R. Honda, N. Sakatani, Y. Shimaki
2. 発表標題 Artificial impact crater on Ryugu formed in the gravity dominated regime
3. 学会等名 7th IAA Planetary Defense Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室ホームページ: <https://eps1-kobe.sakura.ne.jp/>



## 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	保井 みなみ (Yasui Minami) (30583843)	神戸大学・理学研究科・講師  (14501)	
研究分担者	白井 慶 (Shirai Kei) (90870519)	神戸大学・理学研究科・特命技術員  (14501)	
研究分担者	長谷川 直 (Hasegawa Sunao) (10399553)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・主任研究開発員  (82645)	
研究分担者	小川 和律 (Ogawa Kazunori) (40509824)	神戸大学・理学研究科・技術専門職員  (14501)	

	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	ユッティ マーティン (Jutzi Martin)		
研究協力者	長野 巧 (Nagano Takumi)		
研究協力者	石田 紗那 (Ishida Sana)		

## 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			
スイス	ベルン大学			