

令和 6 年 4 月 24 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18654

研究課題名（和文）デジタル画像相関法を用いた衝突破片速度分布の解析と氷接触連星の形成過程への応用

研究課題名（英文）Experimental study on ejection velocity distribution of impact fragments using digital image correlation method: Implications for formation processes of icy contact binaries

研究代表者

保井 みなみ（Yasui, Minami）

神戸大学・理学研究科・講師

研究者番号：30583843

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：接触連星であることが多い彗星核やカイパーベルト天体の形成環境を調べるため、母天体である氷微惑星を模擬した雪標的、氷標的、雪マントル・氷コアの層構造標的を用いた高速度衝突破壊実験を行い、DIC法（デジタル画像相関法）を用いて標的内部の破片速度分布を調べると伴にその衝突破壊強度を明らかにした。DIC解析の結果、雪標的や層構造標的の雪マントルは破片が衝突点から放射状に放出したが、層構造標的の氷コアはそれよりも速く、弾道の下流方向に水平移動することがわかった。衝突破壊強度は雪、層構造、氷標的の順に小さくなり、層構造標的は雪マントルの影響で氷コアの破壊が防御されていることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

氷微惑星が衝突破壊と再集積を繰り返して太陽系外縁天体へと成長したと考えられているが、その再集積条件の決定には全衝突破片の速度分布を調べる必要がある。しかし、従来の高速ビデオカメラを用いた方法では標的表面からの放出破片しか観察できなかった。本研究では、標的内部からの放出破片の速度を計測できる手法を確立した。この手法が今後、理学分野の衝突実験において破片速度分布の解析法の1つとして汎用化されることが期待される。さらに、この手法を用いた実験結果を衝突数値計算に組み込むことで、太陽系外縁領域での氷接触連星の形成条件を推定できるだけでなく、太陽系全体の天体衝突史に新たな知見が得られることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In order to investigate the formation environment of cometary nuclei and Kuiper belt objects, which are often observed to be contact binaries, high-velocity impact experiments using snow, ice, and layered targets made of snow mantle and ice core simulating icy planetesimals were conducted. Then, the fragment velocity distribution ejected from the inside of the targets was investigated using the DIC method (digital image correlation method), and the impact strength of these targets was clarified. As a result of DIC analysis, it was found that the snow targets and the snow mantle of layered targets ejected their fragments radially from the impact point, but the ice core of layered targets moved faster and horizontally in the downstream direction of the trajectory. The impact strength decreased in the order of snow, layered, and ice targets. The ice core of layered target was protected from the collisional disruption by the snow mantle.

研究分野：実験惑星科学

キーワード：カイパーベルト天体 接触連星 氷微惑星 衝突実験 破片速度分布 デジタル画像相関法（DIC法）  
衝突破壊強度 密度分布

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2019年、探査機 New Horizons によって、カイパーベルト天体 Arrokoth が2つの大きな多孔質小氷天体が合体した接触連星であることがわかった。これまで探査されたカイパーベルト天体起源の彗星核も同様の形状であるものが多いことから、太陽系外縁領域は接触連星が形成されやすい環境であると予想される。

カイパーベルト天体は直径数 10~数 100km の氷微惑星同士の衝突破壊と再集積によって形成されたと考えられている。先行研究から、衝突速度が 1m/s 程度の斜め衝突を起こすと、微惑星は変形と合体により接触連星となることがわかっていた[1]。一方、カイパーベルト天体の相対衝突速度は 1km/s 以下であり、その構成物質に近いとされる雪球の衝突破壊強度は小惑星を構成する岩石と比べて1桁以上小さいため、1km/s 以下の衝突速度でも氷微惑星はカタストロフィック破壊を起こす[2]。そのため、氷微惑星同士の衝突では、破壊後の破片速度が比較的遅く、再集積した天体同士で連星系を形成しやすい可能性がある。この仮説を検証するには、氷微惑星模擬物質を用いた衝突破壊実験を行い、衝突後の破片速度分布を調べる必要がある。しかし、従来の高速ビデオカメラを用いた手法は、標的表面から放出する破片しか解析できないため[3ほか]、標的の内部から放出する破片の速度分布を計測できる新たな手法を開発する必要がある。

また、氷微惑星は直径が大きいほど静水圧で内部が圧密し、密度分布をもつ。つまり、直径が大きいほど内部の空隙率が小さく、外層に向かうにつれて空隙率が高くなる。このことから、氷微惑星模擬物質はその微惑星サイズに応じた密度分布を模擬する必要がある。従って、氷微惑星の衝突破壊条件を決める衝突破壊強度に対して、内部密度分布の影響を調べる必要がある。しかし、密度分布を考慮した層構造氷標的を用いた衝突破壊実験の例はない。

### 2. 研究の目的

1を踏まえて本研究課題では、以下の3つの目的をおき、衝突破壊実験を行った。

- 1) 破片速度分布の新たな計測方法の確立：衝突後 1ms 以内に標的の内部から放出される破片の速度分布を求めるため、工学分野で用いられているデジタル画像相関法 (DIC 法) を適用する。この解析手法を確立するため、予備実験として室温で実験可能な砂石膏と粘土層の層構造標的を用いて衝突破壊実験を行い、破片速度分布を計測する。
- 2) DIC 法を氷微惑星模擬物質に適用：1)で確立した手法を、氷微惑星模擬物質である雪球、及び氷・雪層構造球に適用し、低温室内で衝突破壊実験を行う。そして、DIC 法を用いて破片速度分布を計測し、その内部構造の違いを明らかにする。
- 3) 氷微惑星模擬物質の衝突破壊強度の決定：氷微惑星の圧密進化過程を模擬した氷球、雪球、層構造球を用いて衝突破壊実験を行い、衝突破壊強度を求める。そして、その内部構造の違いを明らかにする。

### 3. 研究の方法

2で述べた各目的における研究手法を、以下に述べる。

- 1) DIC法(Digital Image Correlation: デジタル画像相関法)は、物体表面の模様の変化を解析し、二次元変位を調べる方法である。この手法を用いるため、半球標的を用意し、断面をガラス板と接着させ、弾丸を接着面付近に衝突させた。標的は、中心(コア)に直径 30mm の粘土半球(ベントナイト粉末とシリコンオイルの混合物。混合質量比 3:1)、外側(マントル)に粒径 100 $\mu$ m の石英砂と石膏の混合層(厚み 15mm, 混合質量比 2:1, 引張強度は 770kPa)を覆ったものを作成した。そして、標的断面にインクでランダムパターンを塗布した(図1)。また、比較のため、砂石膏物質(マントル物質)のみの均質半球を用意した。衝突実験は神戸大学の横型二段式軽ガス銃を用いた。弾丸はポリカーボネート球(直径 4.7mm)、衝突速度は約 2km/s とした。標的の破壊の様子は、高速ビデオカメラを標的の断面に対して正面方向に設置して撮影し、観測した。

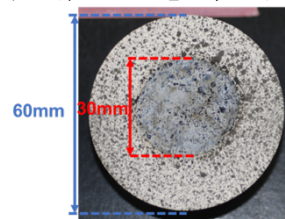


図1 砂石膏マントル・粘土コア層構造標的。表面の黒い点がランダムパターン。

DIC 法の妥当性を確認するため、同じ標的・衝突条件で、宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス銃を用いて衝突破壊実験を行い、フラッシュ X 線による層構造内部の粒子速度を計測した[手法は 4 と同じ]。標的は全球とし、内部に破片速度追跡のためのマーカー(直径 3mm の鉄球)を弾道に平行な平面上に 12 個配置した。衝突直後に 4 方向から異なる時間でフラッシュ X 線を標的に照射して標的の内部を観察し、三次元的に鉄球の飛行速度を求めた。

- 2) 標的は、雪半球、雪マントル・氷コア層構造半球の 2 種類を用意した。雪球は、液体窒素内に噴霧した直径 100 $\mu$ m 以下の氷粒子を球型の治具に詰め、上から球型のピストンで圧密して作成した。層構造球も同様に作成したが、圧密する前に氷半球(沸騰させた水をゴム製の球型に入れ、ゴム型上部に湯の入った袋を置き、-25 $^{\circ}$ C の冷凍庫内で一方向から凍結。この方法を用いることで、内部の残存空気をできるだけ無くすることが可能。凍結後、半分を切斷)を中心に埋めて圧密した。雪球は直径 60mm、層構造球は氷コアが直径 50mm、雪マントルの厚みを 25mm とした。

衝突実験は神戸大学の横型二段式軽ガス銃を用いた。弾丸はポリカーボネート球(直径 4.7mm), 衝突速度は 2km/s である。アクリル板で半球標的を挟み, 標的断面との接着面付近に弾丸を衝突させた(図 2)。ランダムパターンは雪の部分には黒砂を表面に埋め込み, 氷の部分には白のインクを塗布した後に黒砂を塗した。標的は低温室内に設置されたチャンバーに設置した。高速ビデオカメラの撮影条件は 1)と同じである。

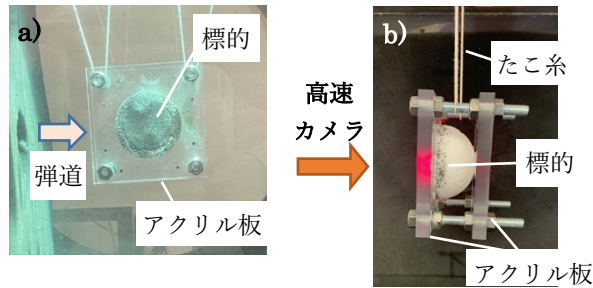


図 2 雪半球標的の設置の様子。a)が高速カメラ設置方向から, b)が弾道の下流方向から見た様子。

- 3) 標的は 2)と同じ試料に加え, 均質な氷球を用意した。作成方法は, 2)の氷半球と同じである。2)とは異なり, 標的は全て全球である。標的のサイズは, 雪球は 60mm, 氷球は 60, 75, 80mm, 層構造球は 60, 100mm (コア直径はそれぞれ 30, 50mm)とした。なお, 氷標的は, 直径 60mm の氷球と同じ質量になるようにサイズを調整した直方体の市販氷も用意した。衝突速度は 0.9~5.1km/s, 弾丸は直径 2, 4.7mm のポリカーボネート球と直径 2mm のアルミニウム球を用いた。高速ビデオカメラは標的の真横と真上からの 2 箇所から撮影した。

#### 4. 研究成果

以下では, 3 で述べた 1)~3)に従って, 得られた研究成果を述べる。

- 1) 図 3 は, DIC 法を用いて解析した砂石膏半球と層構造半球の標的内部から飛び出す破片の変位を示した図である。砂石膏半球内部では衝突軸(弾道, x 方向)に対して放射状に応力が伝播し, 破片が飛翔しているのがわかった。一方, 層構造半球はコアとマンツルの境界に変位の差が見られ, 中心のコアが高速で弾道の下流方向に移動することがわかった。この特徴は, フラッシュ X 線画像を用いて解析した破片速度分布と概ね一致した。

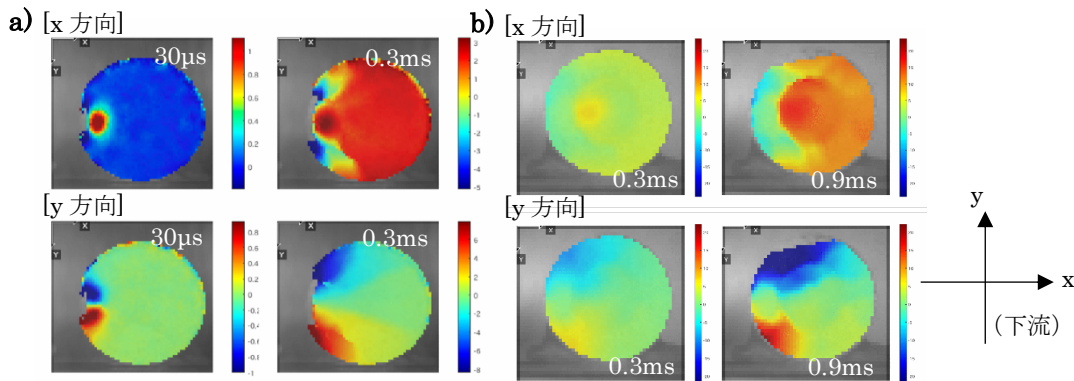


図 3 砂石膏半球(a)と層構造半球 (b) の DIC 解析結果。上が x 方向, 下が y 方向に対する変位を示し, 時間は衝突後の経過時間である。x 方向が弾道方向で下流方向が正。y 方向が弾道に垂直な方向で, 上方向が正。色は変位の大きさを示し, 単位はピクセル。赤がプラス, 青がマイナスである。

次に, フラッシュ X 線で解析した層構造球の破片速度(鉄球)と, DIC 法で解析した層構造半球の破片速度を比較した(図 4)。衝突点付近 (point number が 3 以下) は破片の飛翔速度が大きく異なるが, 衝突点から遠ざかるにつれて 2 つの手法でほぼ同じ破片速度を示した。衝突点付近で鉄球速度が大きくなっているのは, 鉄球が砂石膏破片を伴うこと無く, 独自に飛び出している可能性がある。このことから, DIC 法は衝突点付近を除き, 破片速度分布を解析する手法として使用できることが確認された。

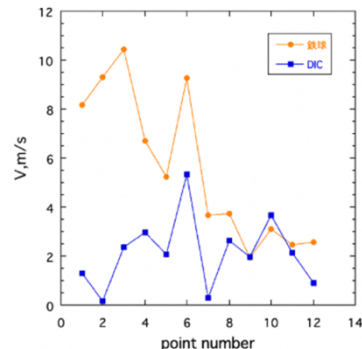


図 4 層構造標的のフラッシュ X 線(鉄球)と DIC 解析の比較。point number は衝突点からの位置を示し, number が小さいほど衝突点に近いことを意味する。

- 2) 図 5 は高速ビデオカメラで観察した雪標的と層構造標的の全球及び半球の破壊の様子である。雪標的の場合, 細かい破片が弾道に対して対称的に広がって放射状に破壊していることがわかる。一方, 層構造標的の場合, 弾道に対して垂直方向に雪マンツル破片が飛翔し, 標的内部で円柱状に破壊している。これは中心の氷コアに押し出されることが原因であると考えられる。つまり, コアの存在がマンツルの飛翔方向に影響を及ぼすことが観察された。



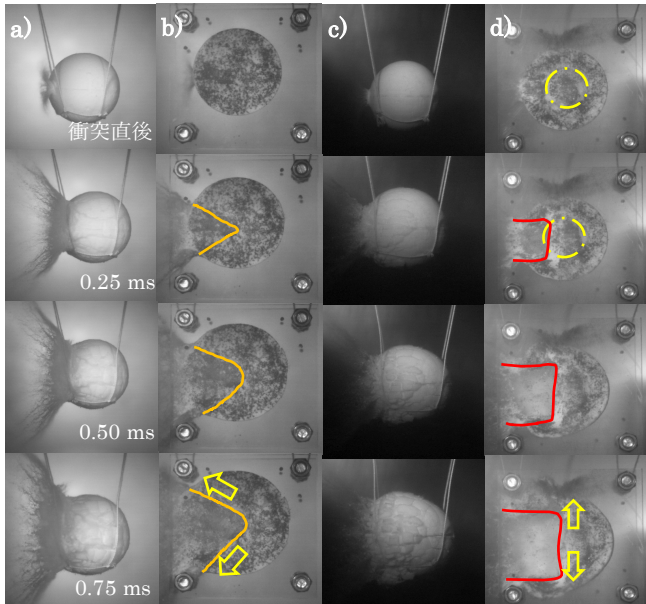


図 5 雪標的(a, b)と層構造標的(c, d)の高速ビデオカメラで撮影した、衝突後 0.25ms 毎のスナップショット. a)と c)は全球, b)と d)は半球である. オレンジ(b)と赤(d)の線は破壊している部分を示し, 破片が矢印の方向に放出している. 黄色の点破線(d)は氷コアを示す.

図 6a~d は雪半球及び層構造半球の DIC 解析結果を示している. 雪半球の場合, 衝突点直下が変位が大きく, 時間と共に変位の大きな領域が標的の内部に進行した. これは, 弾丸が標的に深く潜り込んでいくことを意味している. また, 衝突面付近の大きなマイナスの変位 (x 方向) から, 細かい破片が弾道の上流方向及び衝突点に対して対称に放出しているのがわかった. 一方, 層構造半球の場合, 雪半球と同じく衝突点直下の変位が大きい領域は, 弾丸の潜り込みを意味する. しかし, 弾丸はコア・マントル境界付近で停止していた. また, 衝突から 0.5ms 後にコアが均一な色を示している (x 方向) ことから, 弾道の下流方向にコア全体がマントルより速く移動していることがわかった.

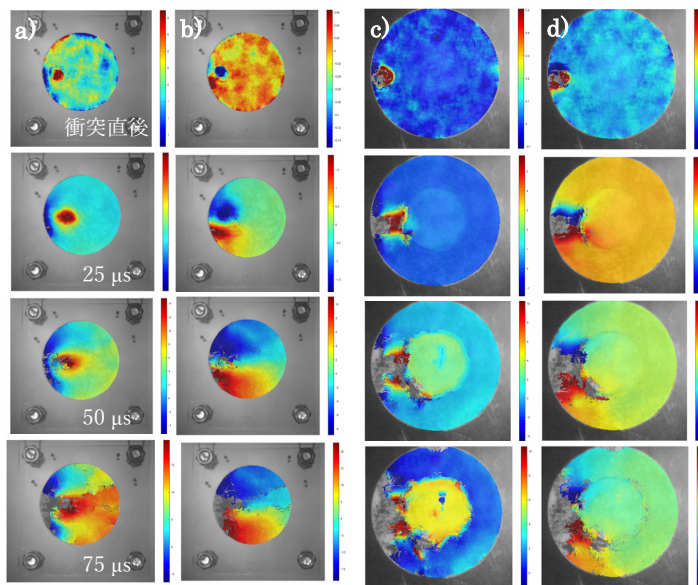
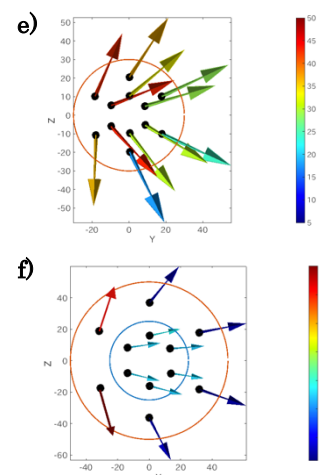


図 6 雪半球(a, b)と層構造半球(c, d)の DIC 解析結果. 時間は 25μs 毎である. a)と c)は x 方向, b)と d)は y 方向で, 定義は図 3 と同じである. e)雪半球と f)層構造半球は a)~d)を用いて速度ベクトルに変換した図. 色は速度を示し, 単位は m/s. 衝突後 75μs の結果である.



この DIC 解析画像を使って任意の点での速度ベクトルを示したのが, 図 6e, f である. 雪半球は衝突点直下が最も速度が大きく, 衝突点の反対点に近いほど速度が小さくなり, 速度ベクトルは衝突点を中心に放射状に広がっていた. 一方, 層構造半球は, 雪半球と同じく衝突点直下の変位が大きい領域は, 弾丸の潜り込みを意味する. しかし, 弾丸はコア・マントル境界付近で停止していた. また, 氷コアは下流方向にマントルよりも大きい速度で進行した. このように, 氷標的でも DIC 解析を用いて任意の点における速度ベクトルとその大きさを調べることが可能となった. 層構造半球の DIC 解析について, 当初は直径 60mm の標的を用いていたが, 氷コアのランダムパターンの識別が難しく, 標的作成の更なる工夫が必要であるとわかった. 最終年度にて試行錯誤を重ねた結果, 直径 100mm と標的を大きくし, 氷コアの表面を白色で塗布した後ランダムパターンを配置することで, DIC 解析が可能であることがわかった. 本研究課題での研究助成期間は終了するが, 今後はこの解析結果を基に標的内部の速度分布を求め, 衝突速度, コアサイズ依存性を調べる予定である.

3) 図7は氷、雪、層構造標的の衝突破壊強度を調べたグラフである。横軸のエネルギー密度は弾丸の運動エネルギーを標的の元の質量で規格化した値である。縦軸は衝突後に回収された衝突破片のうち、最大質量を持つ破片の質量（最大破片質量）を衝突前の標的の質量で規格化した値である。層構造標的は、コア、マンツルの各部分での最大破片質量を衝突前の標的全体の質量で規格化している。衝突破壊強度は規格化最大破片質量が0.5となるときのエネルギー密度として定義される。

各標的の規格化最大破片質量を調べたところ、氷標的はその形状に依存しないことがわかった。そして、氷が最も破壊されやすく（＝規格化最大破片質量が最も小さい）、雪が最も破壊されにくい（＝規格化最大破片質量が最も大きい）ことがわかった。層構造標的はその中間に位置し、氷コアの方が雪マンツルよりも破壊されやすいことがわかった。それぞれの衝突破壊強度を調べた結果、氷が12J/kg、雪が520J/kg、層構造の雪マンツルが42J/kg、氷コアが1J/kgとなった。ただし、層構造標的はエネルギー密度の範囲が狭いため、データをさらに増やして、衝突破壊強度を調べる必要がある。

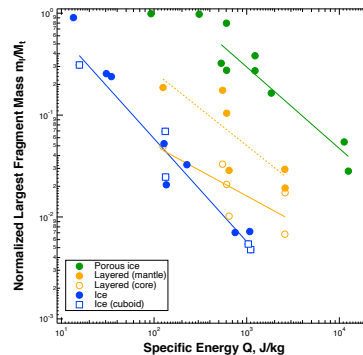


図7 氷（球，直方体），雪，層構造標的のエネルギー密度と規格化最大破片質量の関係。氷は cuboid が形状が直方体の標的を意味する。

雪と氷標的に関して、衝突速度範囲の異なる先行研究[5, 6, 7]と比較した結果、規格化最大破片質量に衝突速度依存性があることがわかった（図8a）。つまり、衝突速度が小さくなるほど、より破壊されやすい傾向にあることがわかった。そのため、エネルギー密度 $Q$ 、衝突速度 $v_i$ 、規格化最大破片質量 $m_i/M_t$ を用いて多変数解析を行った結果、雪と氷標的それぞれの結果がよく一致する経験式（ $m_i/M_t = 10^a \cdot (Qv_i^\gamma)^b$ ）が得られた（図8b）。そして、多変数解析により、べき $\gamma$ は雪が-0.80、氷が-0.95と得られた。また、べき $b$ は標的に依存せず、-0.85となった。

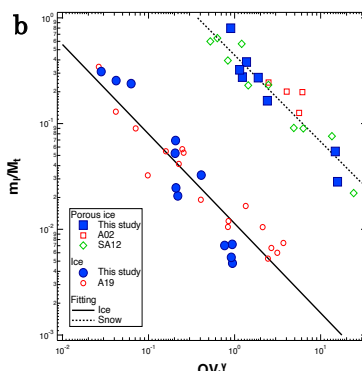
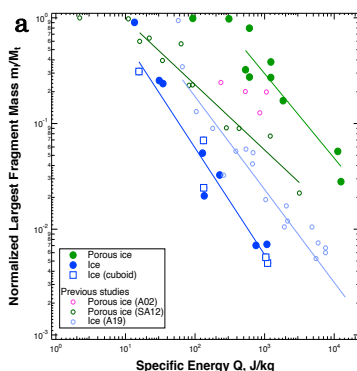
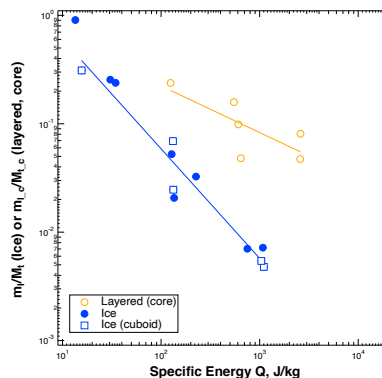


図8 a) 雪及び氷標的のエネルギー密度と規格化最大破片質量の関係を、先行研究と比較した結果。A02[5]及びSA12[6]は雪球で、衝突速度はそれぞれ160 - 650m/s、30-450m/s。A19[7]は氷球で2.3-4.4km/s。b) 多変数解析によって a)の横軸を補正したグラフ。

最後に、層構造標的のコアの破壊の程度を調べた。図9はエネルギー密度と規格化最大破片質量の関係を示しており、層構造標的は氷コアの最大破片質量を衝突前のコアの質量で規格化している。このグラフから、同じエネルギー密度の場合、氷標的よりも層構造標的の氷コアの方が規格化最大破片質量が大きい、つまり破壊されにくいことがわかった。これは、氷コアが雪マンツルに覆われていることで破壊から防御されているということを示している。

図9 氷標的（図7と同じ）と層構造標的のエネルギー密度と規格化最大破片質量の関係。層構造標的はコアの最大破片質量を衝突前のコアの質量で規格化している。

以上の結果から、氷微惑星の熱進化段階において、熱進化が進行中の層構造をもつ氷微惑星は、熱進化を終えた氷微惑星よりも破壊しづらく、コアは速度が大きいがマンツルが速度が小さいためマンツル破片の再集積が起こりやすく、そのために連星系になる可能性が高いことが予想された。



【参考論文】 [1] Jutzi & Asphaug (2015), Science 348, pp.1355. [2] 中村他, JpGU-AGU Meeting 2020, PPS-09-19. [3] Fujiwara & Tsukamoto (1980), Icarus 44, p. 142. [4] Arakawa et al. (2022), Icarus 373, #114777. [5] Arakawa et al. (2002), Icarus 158, 516-532. [6] Shimaki & Arakawa (2012), Icarus 218, 737-750. [7] Arakawa (1999), Icarus 412, 34-45.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 M. Nakamura, M. Yasui, M. Arakawa	4. 巻 413
2. 論文標題 High-velocity oblique impact experiments on ice and snow spheres: Implications for the collisional evolution of icy planetesimals at different thermal evolution stages	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 116010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2024.116010	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 M. Arakawa, M. Okazaki, M. Nakamura, M. Jutzi, M. Yasui, S. Hasegawa	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
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

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Minami Yasui, Masato Nakamura, Shunki Ishii, Masahiko Arakawa
2. 発表標題 Impact experiments on ice spherical targets simulating icy planetesimals at various thermal evolution stages
3. 学会等名 American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shunki Ishii, Minami Yasui, Masahiko Arakawa, Yukari M. Toyoda
2. 発表標題 Experimental study on collisional disruption of differentiated icy planetesimals
3. 学会等名 15th International Conference on the Physics and Chemistry of Ice (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Minami Yasui, Masato Nakamura, Masahiko Arakawa
2. 発表標題 Impact strength of porous icy bodies in high-velocity oblique collision: Implication for catastrophic disruption of Kuiper belt objects in outer solar system
3. 学会等名 15th International Conference on the Physics and Chemistry of Ice (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石井竣基, 江口裕樹, 保井みなみ, 荒川政彦, 豊田優佳里
2. 発表標題 分化した氷微惑星の衝突破壊過程に関する実験的研究
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石田紗那, 保井みなみ, 荒川政彦, 長谷川直, 白井慶, 長野巧
2. 発表標題 コア・マントル構造を持つ含水微惑星の衝突破壊: 標的内部の粒子速度分布と重力支配域における衝突破壊強度の決定
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石田紗耶, 荒川政彦, 保井みなみ, 白井慶, 長谷川直, 長野巧
2. 発表標題 コア・マントル構造を持つ含水小天体の衝突破壊と破片速度分布: 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2022年秋季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahiko Arakawa, Takumi Nagano, Sana Ishida, Minami Yasui, Kei Shirai, Sunao Hasegawa
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 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022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, 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 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, 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 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻 実験惑星科学教育研究分野 ホームページ  
<https://eps1-kobe.sakura.ne.jp/wp/>

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
研究協力者	石井 竣基  (Ishii Shunki)		
研究協力者	中村 誠人  (Nakamura Masato)		
研究協力者	石田 紗那  (Ishida Sana)		

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	豊田 優佳里  (Toyoda Yukari)		
研究協力者	荒川 政彦  (Arakawa Masahiko)		
研究協力者	長谷川 直  (Hasegawa Sunao)		

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