

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800235

研究課題名(和文) 微隕石の高速度衝突による小惑星表層物質進化過程の解明

研究課題名(英文) High-velocity impact of micrometeorites: implication for evolution of asteroid regolith

研究代表者

鳶生 有理 (Shimaki, Yuri)

岡山大学・惑星物質研究所・助手

研究者番号：60710548

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：高速度衝突による小惑星レゴリスのクレーター形成並びに物理化学進化過程を調べるため、宇宙科学研究所の横型並びに縦型二段式軽ガス銃を用いた金属及び珪酸塩弾丸の普通隕石を含む珪酸塩鉱物粉体への高速度衝突実験を行った。樹脂を用いてクレーターを固化する真空含浸システムを新規制作した。衝突生成物はクレーター表層下に弾丸直径の2倍の深さまで分布する。メルトはサブミクロンの珪酸塩粒子と粒間を埋める金属球にて構成され、その微量元素濃度は全岩組成に類似することが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We carried out high-velocity impact-experiments of metal and silicate projectile into regolith of silicates including ordinary chondrites by vertical and horizontal two-stage light-gas-gun in the Institute of Space and Astronautical Science to examine crater formation process and physicochemical evolution of regolith on asteroid surface. A new vacuum impregnation system for embedding crater on regolith was developed. Impact products distribute at depth of two times of projectile diameter from surface. Impact melt consists of sub-micron silicates and metal spherules with trace-element abundance similar to bulk composition.

研究分野：数物系科学

キーワード：衝撃変成 クレーター 普通コンドライト 小惑星

### 1. 研究開始当初の背景

隕石中には破碎の程度が異なる様々なコンドリュール破片が混在していることから、隕石は母天体において衝突破碎と岩石化を経験したと考えられる。衝突現象の素過程について、物質の衝撃変成過程、クレーター形成過程、並びに天体衝突による大規模衝突過程はそれぞれ衝撃圧縮実験、室内クレーター形成実験、並びに数値計算によって個別に進められてきた。しかしながら、隕石母天体における衝突による物質進化過程の包括的な描像は得られていない。クレーター内部の衝突変形構造および衝突メルト分布は Melosh (1980) のクレーター形成モデルが支持されているが、その妥当性を室内実験で検証した例は少ない。小惑星表面は頻繁な微小隕石衝突によって破碎、圧密、溶融、固化という物質進化過程を経ており、はやぶさ帰還試料であるイトカワ粒子表面に観察された衝突由来のメルト付着物は衝突による物質進化が現在もなお進行していることを示した。

### 2. 研究の目的

衝撃変成について、カプセルを用いた衝撃回収実験によって変形構造、物性、並びにメルトにおける元素拡散速度のそれぞれについて圧力依存性が調べられている。一方、衝突による標的と弾丸の機械的・化学的混合について、金属弾丸の珪酸塩標的への衝突実験からアルミニウム合金の酸化による酸化アルミニウムの生成と、ステンレス弾丸に含まれる V および Cr が珪酸塩メルトに分配した事例が報告されている [1,2]。しかしながら、小天体がレゴリスに衝突した状況を演繹するために必要な、弾丸と粉体の混合過程についての知見が不十分である。また、小惑星における衝突による物質進化過程をより理解するためには、珪酸塩同士との衝突による機械的・化学的混合過程を明らかにする必要がある。本研究では、衝突によるクレーター形成、衝突生成物の空間分布、並びに弾丸と標的の機械的・化学的混合過程を明らかにすることを目的とした。

[1] C. Hamann, et al. (2015) LPI Contributions 1861:1071.

[2] M. Ebert, et al. (2014) Geochimica et Cosmochimica Acta 133:257.

### 3. 研究の方法

宇宙科学研究所の横型並びに縦型二段式軽ガス銃を用いて、金属並びに珪酸塩弾丸の珪酸塩鉱物粉体への高速度衝突実験を行った。サボを用いて直径 1.6-3.2 mm の弾丸を 1.5-7.0 km/s に加速した。弾丸として、鉄、かんらん石、アルミ、並びにガラスを用いた。標的として、レゴリスを模したかんらん石、輝石、長石、並びにそれらを含む混合物、並びに普通隕石 (L6, LL6) の粉体を用いた。粉体の粒径は 0.3-0.7 mm もしくは 0.2 mm

以下とし、空隙率は 0.4 とした。粉体は三種類の円筒容器に充填した。それぞれの大きさは直径×高さが (1) 100×100mm, (2) 60×60 mm, 並びに (3) 160×60 mm である。粉末以外に 70×70×40 mm のかんらん岩を用意し、空隙率 0 の標的とした。横型銃を用いた水平衝突実験の場合は、標的 (1,2) を回収箱の内部に横向きに配置し、これを真空チャンバー (4-10 Pa) に設置した。衝突の瞬間は高速度ビデオカメラを用いた影写真法を用いて撮影した。縦型銃を用いた垂直衝突の場合は、標的 (3) を真空チャンバー (10 kPa) に設置した。クレーター形状をレーザー変位計で測定した後、硬化樹脂と新規制作した真空含浸システムを用いてクレーターを固化し、衝突点を含む厚片を作成した。これらの試料を電界放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM) と顕微ラマン分光装置を用いて観察し、エネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS)、電子プローブ微小分析器 (EPMA)、並びにレーザーアブレーション結合誘導プラズマ質量分析器 (LA-ICPMS) を用いて主要元素並びに微量元素を定量した。当初の計画では上記に加えて高分解能二次イオン質量分析計を用いて局所リチウム並びに酸素同位体分析を実施する予定だったが、2016年10月に発生した鳥取県中部地震により装置に甚大な被害が生じたため、遂行することが不可能となった。

### 4. 研究成果

(1) 水平衝突実験を行い、鉄弾丸をかんらん石粉体 (空隙率 0.4) 並びにかんらん岩 (空隙率 0) 標的に衝突速度 2-5 km/s で衝突させた。この実験を鉄 かんらん石並びに鉄 かんらん岩と表現する。標的の破壊の程度を定量化するため、破碎体積を見積った。粉体並びに岩塊試料に

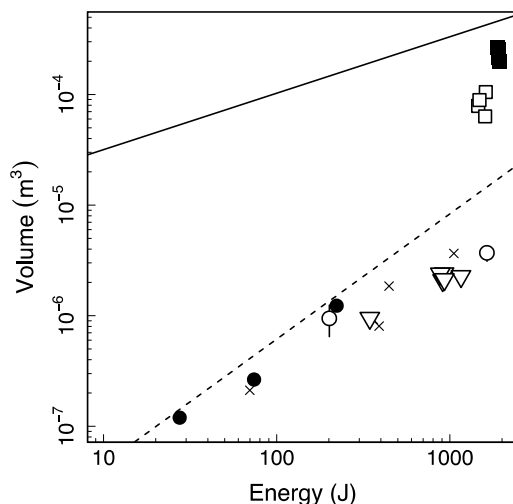


図 1. 破碎体積の空隙率並びに物性依存性。鉄 かんらん石、鉄 かんらん岩、かんらん石 (かんらん石、輝石、長石)、鉄 普通隕石、アルミ 普通隕石、- 鉄 砂 [3]、-- 鉄 玄武岩 [4]。

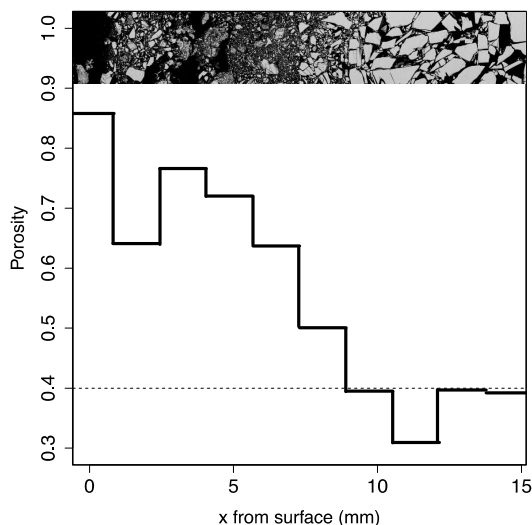


図 2. 空隙率の深さ分布 (かんらん石 長石). 空隙率は表面が最も高く、粒径は深度 6 mm が最も細かい。

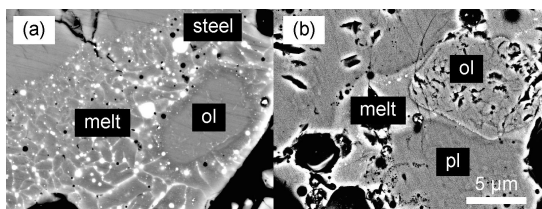


図 3. 衝突生成物の BSE 画像. 出発物質の違いに起因する構造の違いが認められる. (a) 鉄 かんらん石. 生成物は 1 μm 以下のシリケート粒子 (メルト) 並びにその粒間を埋める金属にて構成される. (b) かんらん石 長石. メルトにサブミクロンの粒子が認められる.

ついて、破碎領域体積 (0.3 mm 以下の粒子が存在する領域) 並びにクレーター体積をそれぞれ破碎体積とした。破碎体積は衝突エネルギーの 0.7 乗もしくは 1.1 乗に比例する (図 1)。これは強度支配域の スケーリング則と調和的であった。粉体試料について、空隙率及び破碎生成粒子径の深度依存性を調べた。空隙率は表面が最も高い。サイズ分布のべき -1.6 である空隙率 0.52 の領域に、直径 2 mm の溶融した鉄並びにかんらん石の機械的集合体が観察された。この領域は 0.3 mm 以下の粒子と 2 mm の集合体により特徴付けられる。この構造は破碎と圧密によると考える。この試料に衝突により生成したメルトの存在を確認した。衝突生成物は 1 ミクロン以下のシリケート粒子 (メルト) 並びにその粒間を埋める金属にて構成される (図 3)。衝突生成物に囲まれたかんらん石のリムは Mg に富む。更に出発物質とメルトの化学組成を測定した。メルトの化学組成は、出発物質の混合曲線より Cr と Mn に富む。

- (2) 水平衝突実験を行い、かんらん石弾丸を粉体標的 (かんらん石、輝石、長石、並びにかんらん石・輝石・長石の混合物) に衝突速度 3-7 km/s で衝突させた。破碎

体積を見積ったところ、破碎体積は衝突エネルギーの 0.8 乗に比例した (図 1)。融点の低い長石を標的としたかんらん石 長石衝突について、空隙率及び破碎生成粒子径の深度依存性を詳細に調べた。空隙率は表面で最も高く、深度 6 mm で最も細かい (図 2)。サイズ分布は 10-100 ミクロンの粒子分布により見積ったところ、深度 6 mm の粒子が最も細かいことがわかった。Mg マップから、かんらん石と衝突生成物を判別した。衝突生成物は、5 ミクロン程度のシリケートメルトを含む (図 3)。メルトの化学組成は、出発物質の混合曲線より Ti に乏しくなることが明らかになった。

- (3) 垂直衝突実験を行い、鉄、アルミ、並びにガラス弾丸を粉体標的 (L6, LL6、並びに長石) に衝突速度 5 km/s で衝突させた。クレーターの直径並びに深さは弾丸密度の増加とともに増加し、クレーター体積は重力支配域の スケーリング則で期待される体積の 0.6 倍以下だった (図 1)。クレーター直径と容器直径が同程度だったため、掘削流が容器壁面によって制限された結果と考える。破碎粒子は主としてクレーター中心の幅 6-8 mm、深さ 3-4 mm の領域に分布するほか、クレーター表面に分布し、メルトは放出破片並びにクレーター表面に観察されることがわかった。鉄 LL6 において、メルトは主としてかんらん石と輝石の混合物から構成され、微細な金属球を含む。メルトの主要元素定量からメルトを構成する珪酸塩鉱物の体積割合は全岩と同程度であることがわかった。微量元素定量の結果、メルトは全岩組成に近くアルカリ元素に乏しい傾向にあることが明らかとなった。今後、メルトの主要元素並びに微量元素の空間分布解析を行い、メルト生成量並びにメルト組成の衝撃圧力依存性を調べていく予定である。

- [3] K. Holsapple (1993) Annual Review of Earth and Planetary Sciences 21:333.  
[4] D. E. Gault (1973) The Moon 6(1-2):32.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 8 件)

**嵐生有理**, 国広卓也, 中村栄三, 衝突による普通コンドライトの物理化学進化に関する研究, 平成 28 年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム, 宇宙科学研究所 (神奈川), 2017 年 2 月 27-28 日。

**Shimaki, Y.**, Kunihiro, T., Suzuki, A. I., Hasegawa, S., Nakamura, E., Shock Metamorphism of Olivine Monolith and Regolith Impacted by Steel, *47<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference XXXVII, #3037*, Lunar and Planetary Institute, The Woodlands, USA, 2016年3月21-25日.

**Shimaki, Y.**, Kunihiro, T., Suzuki, A. I., Hasegawa, S., Nakamura, E., Experimental study on shock metamorphism of silicate regolith, Misasa International Symposium 2016 (Misasa VI), BlancArt Misasa (Tottori), 2016年3月8-11日.

**鷹生有理**, 国広卓也, 長谷川直, 鈴木絢子, 中村栄三, 衝突による普通コンドライトの物理化学進化に関する研究, 平成27年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム, 宇宙科学研究所(神奈川県), 2016年2月23-24日.

E. Nakamura, T. Kunihiro, H. Kitagawa, K. Kobayashi, T. Ota, C. Sakaguchi, **Y. Shimaki**, R. Tanaka, T. Tsujimori, M. Yamanaka, G. E. Bebout, V. I. Grokhovsky, O. N. Koroleva, K. D. Litasov, V. Malkovets, Recycling of an asteroid via a comet inferred from the Chelyabinsk meteorite, *46<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference XXXVI, #1865*, Lunar and Planetary Institute, The Woodlands, USA, 2015年3月16-20日.

**Shimaki, Y.**, Kunihiro, T., Kitagawa, H., Kobayashi, K., Ota, T., Sakaguchi, C., Tanaka, R., Tsujimori, T., Yamanaka, M., Bebout, G. E., Malkovets, V., Nakamura, E., Impact Physics Decoded from the Chelyabinsk Meteorite, Misasa International Symposium 2015 (Misasa V), BlancArt Misasa (Tottori), 2015年3月6-8日.

**Shimaki, Y.**, Kunihiro, T., Suzuki, A., Hasegawa, S., Nakamura, E., Experimental Study on Physicochemical Evolution of Olivine by High-Velocity Impact, Misasa International Symposium 2015 (Misasa V), BlancArt Misasa (Tottori), 2015年3月6-8日.

**鷹生有理**, 国広卓也, 中村栄三, 鈴木絢子, 長谷川直, 衝突による普通コンドライトの物理化学進化に関する研究, 平成26年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム, 宇宙科学研究所(神奈川県), 2015年2月23-24日.

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕  
該当なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鷹生 有理 (Shimaki, Yuri)  
岡山大学惑星物質研究所・助手  
研究者番号: 60710548

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕