

# 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

寫生有理, 国広卓也, 中村栄三 (岡山大学惑星物質研究所)

## 1 はじめに

小惑星の衝突履歴は普通コンドライトに観察される変形構造や他天体由来岩片として記録されている (1; 2). カプセルを用いた衝撃回収実験により, 変形構造, 物性, 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た. 一方, 衝突による標的と弾丸の混合について, 金属弾丸の  $\text{SiO}_2$  標的への衝突実験から Al 合金の酸化による  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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 (3; 4). しかし, 小天体がレゴリスへ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, 衝突による弾丸と標的の機械的・化学的混合過程を明らかにするため, 金属並びに珪酸塩弾丸を用いて, 普通コンドライト模擬試料への高速度衝突実験を実施した.

## 2 方法

実験は横型銃 (§1, §2) と縦型銃 (§3) を用いて実施した (Table 1).

実験 §1, §2 は弾丸として鉄球 (直径 1.6 mm 並びに 3.2 mm) 並びにかんらん石円柱 (直径×高さ 3.2×2.3 mm) を用いた. 弾丸は 2, 3, 5, 7 km/s に加速した. 標的はレゴリスを模した粉体で, かんらん石, 輝石, 長石, 並びにそれらを含む混合物とした. 粉体の粒径は 0.3–0.7 mm 並びに < 0.3 mm とした. 粉体は円筒容器に充填した. 円筒容器は二種類を用いた. それぞれの大きさは直径×高さ 100×100 mm 並びに 60×40 mm とした. 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. 標的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. 衝突の瞬間を高速度ビデオカメラを用いた影写真法にて撮影した.

実験 §3 は弾丸として鉄球, アルミ球, 並びにガラス球 (直径 2.0 mm) を用いた. 弾丸は 5.5 km/s に加速した. 標的はレゴリスを模した粉体で, L6 (Dar al Gani 440), LL6 (Kilabo), 長石, 珪砂, 並びにかんらん石を用いた. 粉体の粒径は 0.3–0.7 mm 並びに < 0.3 mm とした. L6, LL6, 並びに長石は直径×高さ 160×60 mm の円筒容器の中心に直径×高さ 36×60 mm で充填し, 周囲を珪砂もしくはかんらん石で充填した. 標的を真空チャンバー (10 kPa) に設置した. 衝突の瞬間を高速度ビデオカメラを用いて撮影した.

実験直後に, 標的を硬化樹脂で固化し, 衝突点を含む厚片を作成した (Figure 1). 実験生成物を Table 1 に示す. これらの試料を電界放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM) 並びに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) と電子プローブ微小分析器 (EPMA) により定量した.

## 3 結果

### 3.1 §1 鉄弾丸

鉄の弾丸を, かんらん石粉体 (空隙率 40%) とかんらん岩 (空隙率 0%) に衝突させた. これらの実験生成物を  $\text{steel} \xrightarrow{5k} \text{ol}$  や  $\text{steel} \xrightarrow{5k} \text{ol}_{\text{slab}}$  と表現する.

まず破砕体積を見積った.  $\text{steel} \rightarrow \text{ol}$  について, 破砕領域体積 (0.3 mm 以下の粒子が存在する領域) を破砕体積とした.  $\text{steel} \rightarrow \text{ol}_{\text{slab}}$  について, クレーター体積を破砕体積と

した。破砕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 (Figure 2)。次に steel<sup>5k</sup>→ol について、衝突生成物の主要元素を定量した。破砕領域に、熔融した鉄及びかんらん石の機械的集合体 (直径 2 mm) 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。この構造は破砕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 (Figure 3a)。衝突生成物は 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。衝突生成物に囲まれたかんらん石のリムは Mg に富む (Figure 3b)。さら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 (Figure 4a)。

### 3.2 §2 珪酸塩弾丸

かんらん石の弾丸を、粉体 (かんらん石, 輝石, 斜長石, 並びにかんらん石-輝石-長石の混合物) に衝突させた。

まず破砕体積を見積った。破砕領域体積 (0.3 mm 以下の粒子が存在する領域) を破砕体積とした。破砕体積は衝突エネルギーの 0.8 乗に比例する (Figure 2)。次に、融点の低い斜長石を標的とした ol<sup>5k</sup>→pl について、空隙率及び破砕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い。サイズ分布は 10–100 μm 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。Mg マップから (Figure 3c)、かんらん石と衝突生成物を判別した。衝突生成物は、5 μm 程度のシリケートメルトを含む。メルトの化学組成は、出発物質の混合曲線より Ti が薄い (Figure 4b)。

### 3.3 §3 普通コンドライトへの衝突

アルミ, 鉄, 並びにガラスの弾丸を粉体 (L6, LL6, 並びに長石) に衝突させた。

まず破砕体積として、クレーター体積を見積った。レーザー変位計を用いてクレーターの直径並びに深さを測定した。直径と高さから、クレーター形状を円錐と仮定して体積を求めた (Figure 2)。steel→sand について、クレーター体積は π スケーリング則 (5) で期待される体積の 0.5 倍だった。これはクレーター直径が容器直径の 0.7–0.9 倍だったため、掘削流が制限された結果と考える。次に、断面を観察した。steel→LL6 において、クレーター内壁に熔融した鉄及び珪酸塩の機械的集合体 (直径 1 mm) が観察された。本実験は 2017 年 2 月に実施したため、電子顕微鏡による観察並びに主要元素定量まで至っていない。


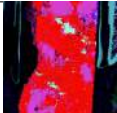
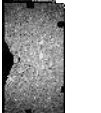
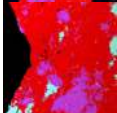
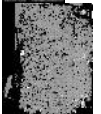
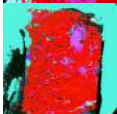





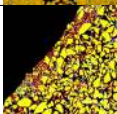



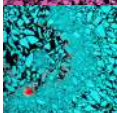

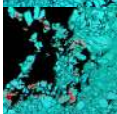

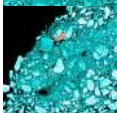

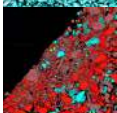


## 4 まとめ

衝突による弾丸と標的の機械的・化学的混合過程を明らかにするため、金属並びに珪酸塩弾丸を用いて、普通コンドライト模擬試料への高速度衝突実験を実施した。steel→ol について、破砕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。メルトはエジェクタと破砕領域の集合体に観察された。メルトは出発物質より Cr と Mn に富む。ol→pl について、破砕体積は衝突エネルギーの 0.8 乗に比例する。メルトは出発物質の混合曲線より Ti が薄い。steel→LL6 について、破砕体積は π スケーリング則で期待される体積の 0.5 倍だった。今後は、ビーム径 25 μm のレーザーアブレーション結合誘導プラズマ質量分析計を用いて、熔融組織の微量元素について系統的な 30 元素定量を行なう。

## References

- [1] D. Stöffler, et al. (1991) *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55(12):3845.

Table 1: 実験生成物の解析状況

実験	session	弾丸 → 標的	BSE/optical map	X-ray map
§1	s01	steel <sup>2k</sup> → ol <sub>slab</sub>		
	s02	steel <sup>3k</sup> → ol <sub>slab</sub>		
	s03	steel <sup>5k</sup> → ol <sub>slab</sub>		
	s04	steel <sup>2k</sup> → ol		
	s05	steel <sup>5k</sup> → ol		
§2	s14	ol <sup>5k</sup> → ol		
	s15	ol <sup>5k</sup> → opx		
	s16	ol <sup>3k</sup> → pl		
	s17	ol <sup>5k</sup> → pl		
	s18	ol <sup>7k</sup> → pl		
	s19	ol <sup>5k</sup> → (ol, opx, pl)		
§3	s20	Al <sup>5k</sup> → L6	—	—
	s21	Al <sup>5k</sup> → LL6	—	—
	s22	Al <sup>5k</sup> → pl		—
	s23	gl <sup>5k</sup> → L6	—	—
	s24	steel <sup>5k</sup> → L6	—	—
	s25	steel <sup>5k</sup> → L6 <sub>fine</sub>	—	—
	s26	steel <sup>5k</sup> → LL6		—
	s27	steel <sup>5k</sup> → LL6 <sub>fine</sub>	—	—

標的は直径 0.3–0.7 mm の粒子により構成され、その空隙率は 40%。ただし gran は空隙率 0%、fine は粒径 < 0.3 mm。

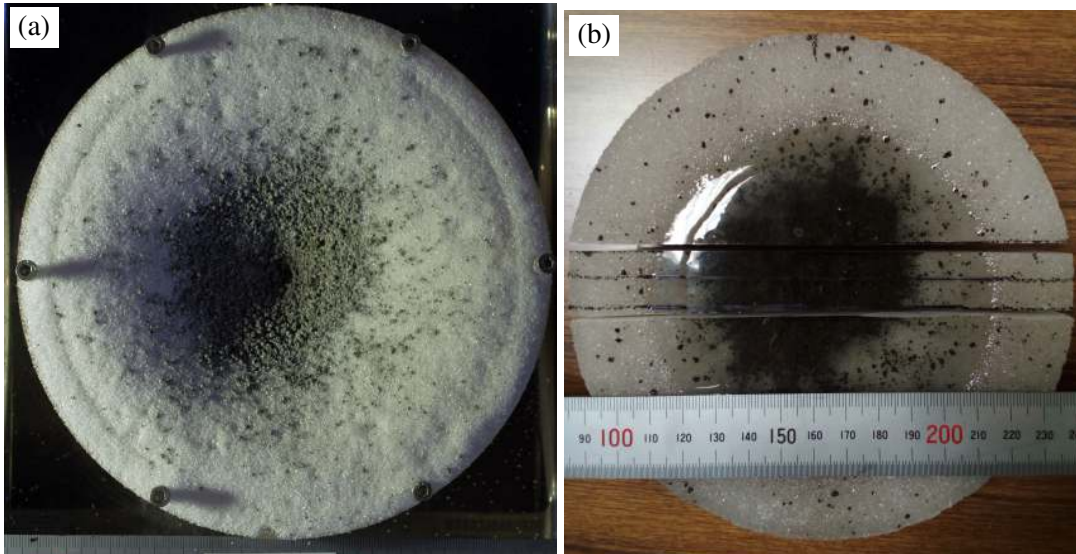


Figure 1: 衝突生成物の例 (steel $\xrightarrow{5k}$ LL6). (a) 固化前並びに (b) 固化・切断後.

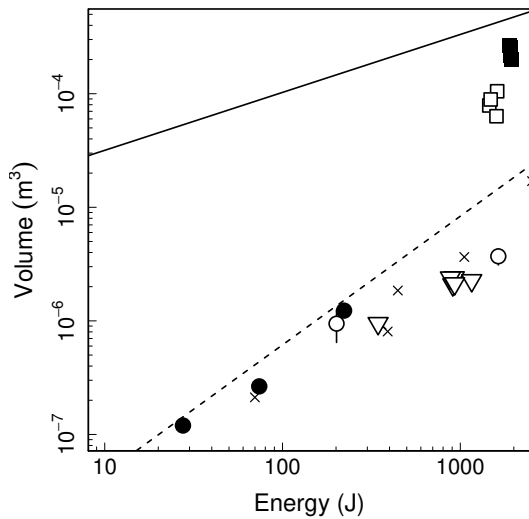


Figure 2: 破碎体積の空隙率依存性を衝突エネルギー ( $E$ ) を変化させて調べた. 破碎体積のエネルギー依存性はそれぞれの衝突について ● steel $\rightarrow$ ol<sub>slab</sub>  $E^{1.1}$ , ○ steel $\rightarrow$ ol  $E^{0.7}$ , ▽ ol $\rightarrow$   $\begin{pmatrix} \text{ol} \\ \text{opx} \\ \text{pl} \\ (\text{ol}, \text{opx}, \text{pl}) \end{pmatrix}$   $E^{0.8}$ , ■ steel $\rightarrow$   $\begin{pmatrix} \text{L6} \\ \text{LL6} \end{pmatrix}$ , □  $\begin{pmatrix} \text{Al} \\ \text{gl} \end{pmatrix}$   $\rightarrow$   $\begin{pmatrix} \text{L6} \\ \text{LL6} \\ \text{pl} \end{pmatrix}$ , × nylon $\rightarrow$ basalt  $E^{1.2}$  (6), … steel $\rightarrow$   $\begin{pmatrix} \text{basalt} \\ \text{granite} \end{pmatrix}$   $E^{1.1}$  (7), 並びに — steel $\rightarrow$ sand  $E^{0.5}$  (5) で近似できる.

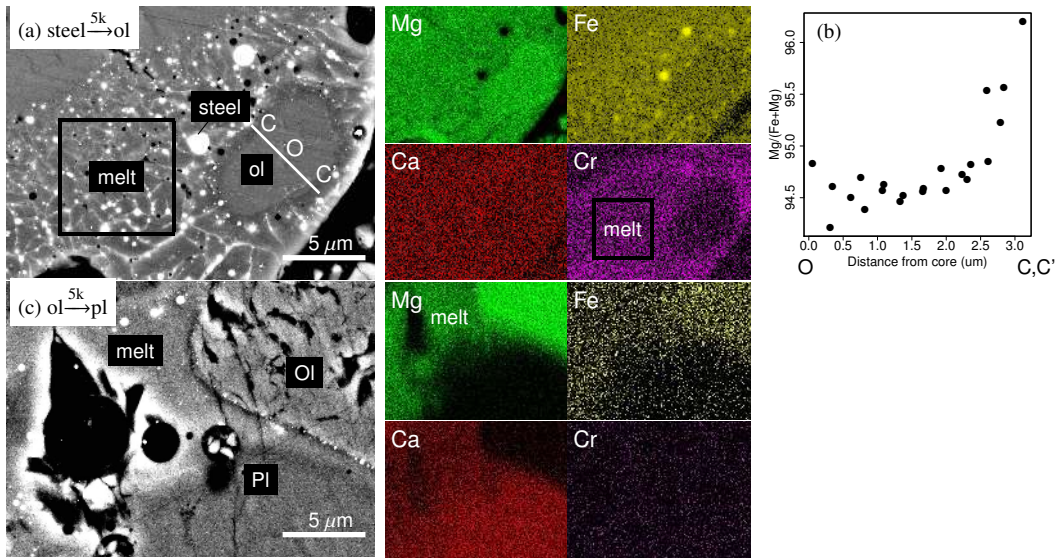


Figure 3: 速度 5 km/s の衝突により生成されたメルトの組織. 材料物質に起因する構造の違いが認められる. (a) Cr マップから, 出発物質 (かんらん石) と衝突生成物を区別することができる. 生成物は  $1\ \mu\text{m}$  以下のシリケート粒子 ( $\equiv$  メルト) 並びにその粒間を生める金属にて構成される. (b) a COC' における  $\text{Mg}/(\text{Fe}+\text{Mg})$  分布. (c) Mg マップから, 出発物質と衝突生成物を区別する. 生成物の中にサブミクロンの粒子を認める.

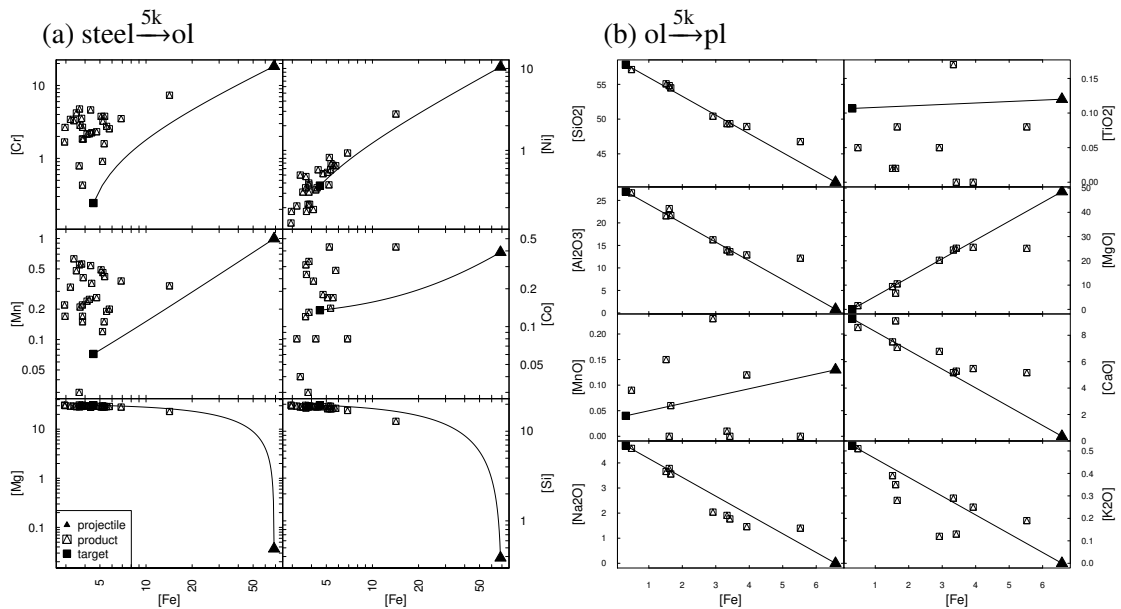


Figure 4: 出発物質及びメルトの化学組成. 元素に依り, 出発物質を端成分とする混合曲線からはずれる. 単位は wt%. (a) メルトは混合曲線より Cr と Mn に富む. (b) Ti は混合曲線より薄い.

- [2] D. Nakashima, et al. (2003) *Earth and Planetary Science Letters* 212(3):321.
- [3] C. Hamann, et al. (2015) *LPI Contributions* 1861:1071.
- [4] M. Ebert, et al. (2014) *Geochimica et Cosmochimica Acta* 133:257.
- [5] K. Holsapple (1993) *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 21:333.
- [6] K. Dohi, et al. (2012) *Icarus* 218(2):751.
- [7] D. E. Gault (1973) *The Moon* 6(1-2):32.