

石膏標的に形成されたクレーター表面下の観察

○山崎祐太郎¹, 中村昭子¹, 長谷川直², 鈴木絢子²

1 神戸大学大学院理学研究科, 2 宇宙科学研究所/JAXA

1. はじめに

現在の太陽系は、衝突現象を繰り返して微惑星から惑星へと成長し、進化した天体や破壊された天体で構成されていると考えられている。また、天体表層には衝突クレーターが存在しており、その成因や天体表層進化や物性を理解するために研究されてきている。

小天体は空隙をもつことが知られており、さまざまな空隙率をもった標的に対して衝突クレーター実験が行われている。しかし、クレーターの直径と衝突条件の関数についてはよく調べられているが、衝突表面下の物理特性についてはあまり研究されていない。空隙をもった天体が衝突を受けた場合、衝突表面下は圧密されていると考えられる。先行研究として、Buhl et al. (2014)では砂岩（空隙率 $23 \pm 1\%$ ）に対する衝突実験で衝突表面下に破砕領域や圧密領域を確認している。また、Yasui et al. (2012)では、X線透過画像で圧密領域を確認し、圧密部分の幅を測定している。

空隙をもった標的の衝突表面下を調べることは衝突クレーター形成過程と天体表層の物性をさらに理解することや衝突現象に対して空隙率の影響を考慮した関係式、例えば発生圧力とクレーター体積の関係を求めるために重要なことである。

本研究では、天体表面に形成されるクレーター表面下の密度変化を理解するために、石膏標的（空隙率 $57.9 \pm 0.2\%$ ）に対して衝突実験を行った。クレーター表面下の圧密された体積を求め、X線画像から圧密された部分の密度を求めた。

2. 実験方法

衝突実験は宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いて、減圧下（ $1.5 \sim 6.5$ Pa）で行った。弾丸には球形のガラス、ナイロン（直径 3.2 mm）と SUS（直径 1.6 mm）を使用し、石膏標的（空隙率 $57.9 \pm 0.2\%$ ）に対して衝突速度 $1.5 \sim 5.5$ km/s の範囲で衝突させた。クレーター表面下を観察するためにフラッシュ X 線画像を撮影した。

3. 解析方法

3.1. 圧密体積

圧密体積 V_{compact} はクレーター体積 V_{crater} と標的質量変化体積 V_{ejecta} の差から求めた。

$$V_{\text{compact}} = V_{\text{crater}} - V_{\text{ejecta}} \quad (1)$$

V_{crater} はクレーターに充填したガラスビーズ質量 $m_{\text{g.b.}}$ をガラスビーズのバルク密度 $\rho_{\text{g.b.}} = 1500$ kg/m³ で割った体積である。

$$V_{\text{crater}} = m_{\text{g.b.}} / \rho_{\text{g.b.}} \quad (2)$$

V_{ejecta} は標的質量変化 m_{ejecta} を標的密度 ρ_t で割って求めたエジェクタ体積である。

$$V_{\text{ejecta}} = m_{\text{ejecta}} / \rho_t \quad (3)$$

図1はクレーターの断面を示しており、圧密部分は黒い実線と点線で囲まれた斜線が入った部分である。図2はクレーターにガラスビーズを充填させたときのイメージを示している。

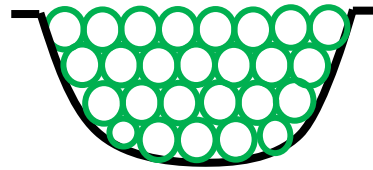
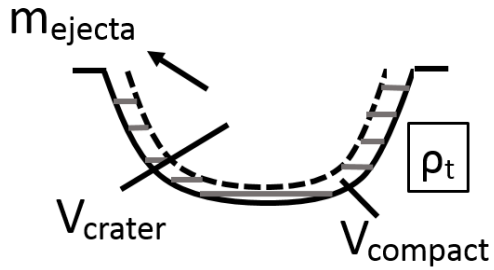


図1:クレーター断面のイメージ図。斜線の入った部分が圧密体積。

図2:ガラスビーズを充填させたクレーターのイメージ図。

3.2. X線透過画像

X線透過画像を用いて、クレーター表面下の最も圧密された部分の密度を算出した。図3はX線透過画像を示している。黒い部分が何も無く、白い部分が石膏である。クレーターが薄く白く見えており、その周囲を縁取るように濃く白い圧密部分が存在している。

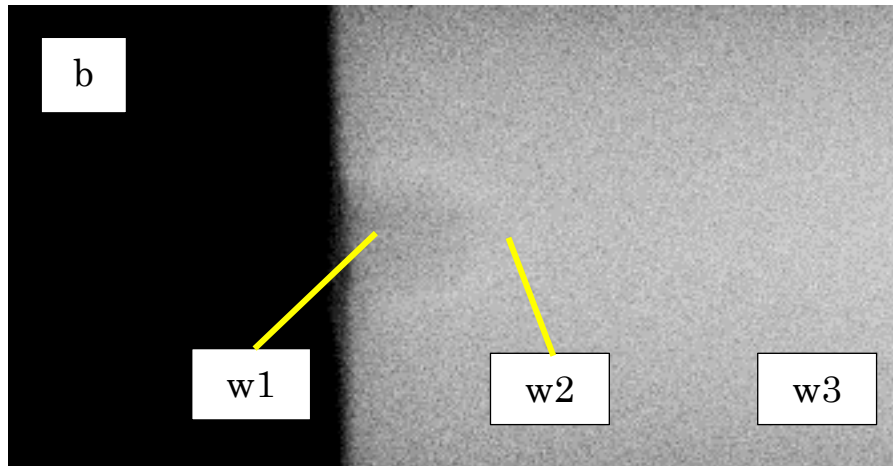


図3: クレーターX線透過画像。画像は見やすいように修正した。b:何も無い部分(黒い), w1:クレーター部分(薄く白い), w2:圧密部分(濃く白い), w3:元の石膏部分(白い)

密度の算出には以下の式を用いた。

$$I_1 = I_0 e^{-\kappa \rho L} \quad (4)$$

$$I_2 = I_0 e^{-\kappa\{\rho' L' + \rho(L-L')\}} \quad (5)$$

ただし、

I_0 : X線強度、 I_1 : 標的直径 L [m] を透過したあとの X線強度、 I_2 : 圧密された部分を含む標的直径を透過したあとの X線強度、 κ : 吸収定数、 ρ : 標的密度 [kg/cm³]、 ρ' : 圧密部分密度 [kg/cm³]、 L : X線が試料を透過した距離[m]、 L' : X線が透過した圧密部分の距離 [m]である。

4. 結果

4.1. 圧密体積

全ての実験で $V_{compact}$ の値は正となり、衝突表面下が圧密されていることが確認できた。図 4 は発生圧力に対する圧密体積と弾丸体積の比を示した図である。ガラス弾丸と SUS 弾丸を用いた場合、どちらも圧力に対して以下のような関係があることが分かった。ガラス弾丸の場合は、

$$\frac{V_{compact}}{V_{projectile}} = 1.255 \pm 0.030 \times P^{1.65 \pm 0.12} \quad (6)$$

SUS 弾丸の場合は、

$$\frac{V_{compact}}{V_{projectile}} = 1.887 \pm 0.060 \times P^{1.46 \pm 0.10} \quad (7)$$

となった。

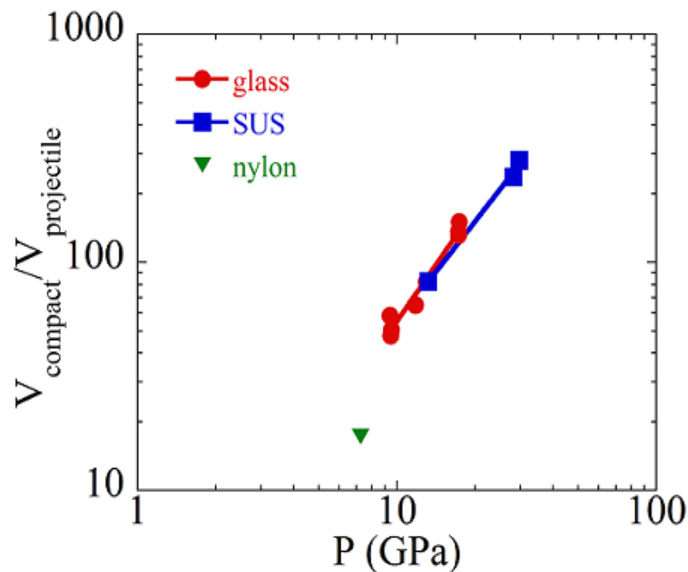


図 4: 圧密体積と弾丸体積の比と圧力との関係。

図 4 をみると発生圧力が高いほど圧密体積と弾丸体積の比も増加していることが分かる。ガラス弾丸も SUS 弾丸も発生圧力が約 10GPa 以上のデータしかないため、発生圧力が 0 に近づくとつれてどのように変化するかを調べるために低圧力での実験が必要となる。ナイロンに関してはデータ点が 1 つしかないため、さらなる実験が必要となる。

4.2. 空隙率

最も圧密された部分の空隙率を求めた。図 5 はその結果を示したもので、 $57.9 \pm 0.2\%$ の線が衝突前の標的の空隙率である。ほとんどの実験で元の空隙率を下回っているが、ガラス弾丸においては空隙率が増加しているものがある。これはクレーター中心部分の圧密された後に破砕された部分を計算したことが考えられる。空隙率と初期発生圧力に関してははっきりとした傾向はみられなかった。

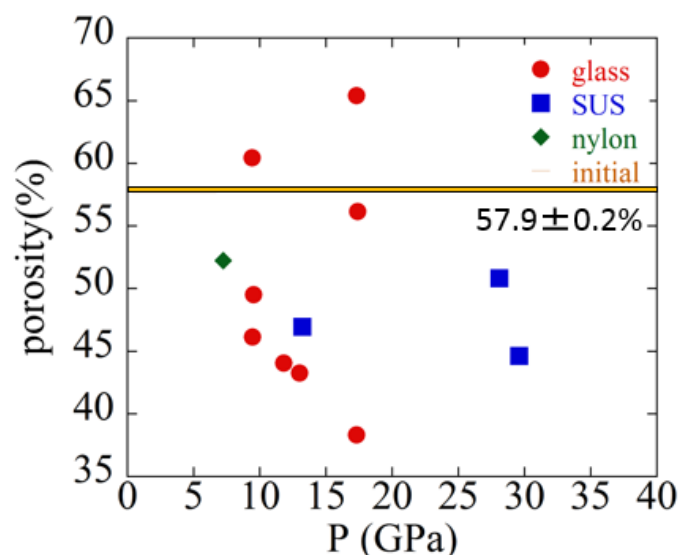


図 5: 最も圧密された部分の空隙率と圧力との関係。
 $57.9 \pm 0.2\%$ の線が衝突前の標的の空隙率。

5. まとめ

本研究では、石膏標的（空隙率 $57.9 \pm 0.2\%$ ）に対して衝突実験を行い、クレーター表面下の圧密された体積をクレーター体積と標的質量変化体積との差から求め、クレーター中心直下の最も圧密された部分の密度を X 線透過画像を用いて求めた。

圧密体積からクレーター表面下が圧密されていることが確認できた。また、クレーターの圧密体積と圧力に関係があることが分かった。X 線透過画像を用いた空隙率の算出では、圧密による空隙率の低下と破砕による上昇が表面下で起きていると考えられる。