

# 小天体模擬標的に対する衝突実験：圧密領域の密度推定

山崎 祐太郎<sup>1</sup>, 中村 昭子<sup>1</sup>, 長谷川 直<sup>2</sup>, 鈴木 絢子<sup>2</sup>

<sup>1</sup>神戸大学, <sup>2</sup>宇宙科学研究所

## 1. 背景

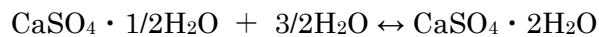
炭素質コンドライトは太陽系初期に形成された凝集物質である。その形成過程や経験した過程を調べることは太陽系の歴史を紐解くことに繋がる。炭素質コンドライトは可視赤外線反射スペクトルの類似性から C 型小惑星が母天体だと考えられている。しかし、炭素質コンドライトと C 型小惑星の間には密度や空隙率に違いがある。C 型小惑星は平均密度 1.4 g/cm<sup>3</sup>、平均空隙率約 40%、炭素質コンドライト(CM)の密度が 2.3 g/cm<sup>3</sup>、空隙率約 23% (Consolmagno et al., 2008) とその値は炭素質コンドライトの方が大きくなっている。これの要因として、天体の自己重力によるものや衝突圧密によるものなどが考えられる。天体の自己重力によるものというのは天体深部の密度が大きく、そこからでた隕石は天体のバルク密度と比較すると大きくなるということである。一方で、衝突圧密によるものというのは衝突によって圧密を受け密度が大きくなったということである。本研究では空隙率約 58% の石膏標的に対して衝突実験を行い、衝突表面下の密度変化を求める。

## 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 (1.5~6.5 Pa) で行った。弾丸には球形のガラス(直径 3.2 mm)、ナイロン(3.2 mm、7 mm)と SUS(1.6 mm)を使用し、石膏標的に対して衝突速度 1.5~5.5 km/s の範囲で衝突させた。衝突過程を高速度カメラで撮影し、フラッシュ X 線で衝突表面下を撮影した。

## 3. 標的試料

標的には二水石膏 (以下、石膏) を用いる。化学式は以下の通りである。



石膏標的は化学的な性質としては小惑星と異なるが、物理的な性質として空隙を模している。標的は、直径約 74、150 mm、高さ約 70、90 mm、密度約 0.98 g/cm<sup>3</sup>、空隙率約 58%、圧縮強度 7.93±0.41 MPa、引張強度約 2.18±0.12 MPa、縦波速度 2390±30 m/s、横波速度 1450±50 m/s である。

## 4. 解析方法

圧密領域の密度 $\rho'_t$ を以下のようにして求めた。

- I. クレーター形状のプロファイルをとる。(200  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ )
- II. X線透過画像から圧密幅を求め、クレーター形状周りにその圧密幅があるとする。
- III. プロファイルから pit 体積、圧密領域体積を計算する。
- IV. 圧密領域の質量を計算する。
- V. 得られた圧密領域の質量と体積から密度 $\rho'_t$ を求める。

以下では、II~Vについて説明する。

## II. 圧密幅

図1のように、X線透過画像から水平方向と鉛直方向の圧密幅を求めた。

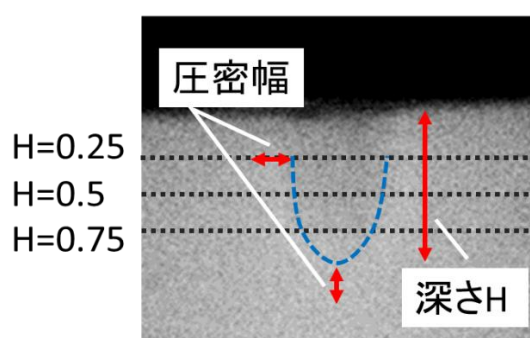


図1：クレーターのX線透過画像

図1の黒い部分が何も無い部分で、白い部分が石膏である。画像中心の薄い白い部分がクレーター、青の点線部分はクレーターの pit 表面で、その周りに白く濃い圧密領域が存在し、さらにその周りの白い部分が石膏である。水平方向の圧密幅はクレーター深さの0.25、0.5、0.75倍の位置の水平幅の平均値を用いた

## III. pit 体積、圧密領域体積 $V_{\text{compact}}$

pit 体積を図2に示すように円錐台の重ね合わせだと考え、深さ方向に足し合わせる。pit 直径に圧密幅を足した円錐台の和から pit 体積を引いたものを圧密領域の体積とする。

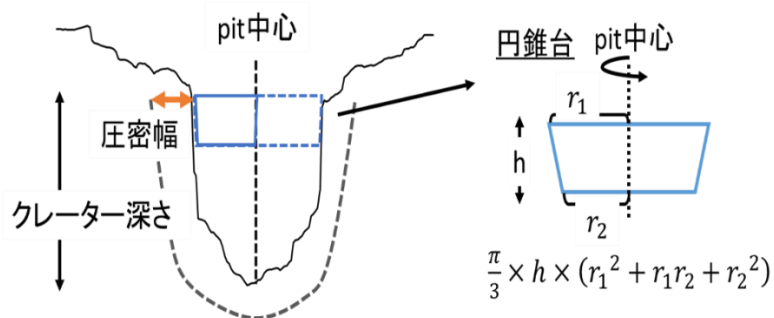


図2：クレーター形状と pit 体積、圧密領域のイメージ

#### IV. 圧密領域質量 $m_{\text{compact}}$

圧密領域質量  $m_{\text{compact}}$  は圧密体積分にもとからある質量とクレーター体積のうちエジェクタとして飛んでいかずに圧縮されて標的に残った体積の質量との和だと考え、

$$m_{\text{compact}} = (V_{\text{compact}} + V_{\text{residual}}) \times \rho_t \quad (1)$$

ここで、残った体積  $V_{\text{residual}}$  は、クレーター体積を  $V_{\text{crater}}$  と質量変化分の体積  $V_{\text{ejecta}}$  との差だとすると、

$$V_{\text{residual}} \equiv V_{\text{crater}} - V_{\text{ejecta}} > 0 \quad (2)$$

#### V. 圧密領域密度

求めた圧密体積  $V_{\text{compact}}$  と圧密質量  $m_{\text{compact}}$  から圧密領域密度  $\rho'_t$  を求めた：

$$\rho'_t = m_{\text{compact}}/V_{\text{compact}} \quad (3)$$

求めた密度を空隙率  $\varphi$  に変えると、

$$\varphi = (1 - \rho')/2.32 \times 100 (\%) \quad (4)$$

## 5. 結果

### 5.1. 圧密幅

図 3、4 に示すように、圧密幅は圧力によらず、弾丸直径の 0.4~1.4 倍の範囲になった。鉛直方向に対する先行研究の結果は弾丸直径の約 1~1.4 倍 (Buhl et al., 2014)、約 0.3~1.2 倍 (Yasui et al., 2012) と近い範囲になった。

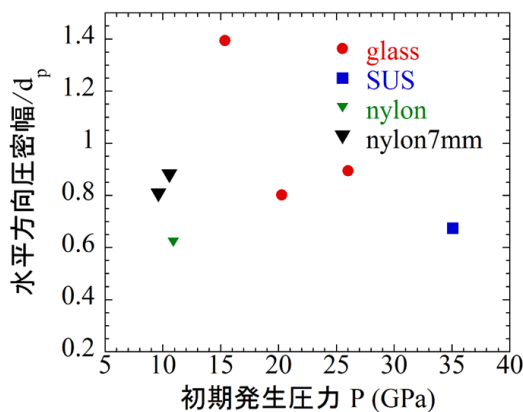


図 3 : 水平方向の圧密幅

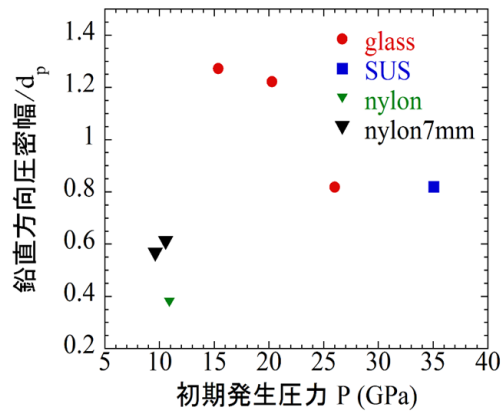


図 4 : 鉛直方向の圧密幅

### 5.2. 圧密領域平均空隙率

図 5 に示すように、圧力とともに空隙率は減少している。レーザープロファイラを用いて求めた値は X 線強度から求めた値と比較すると小さくなっているが、ほとんどのものが誤差の範囲にある。X 線強度の方が小さい値となっているのは、X-ray 強度はクレーター底

の圧密領域をみており、X線が透過した圧密幅が laser で求めた圧密幅よりも大きいことと、圧密幅を透過した X 線強度の平均値を用いていることが要因だと考えられる。

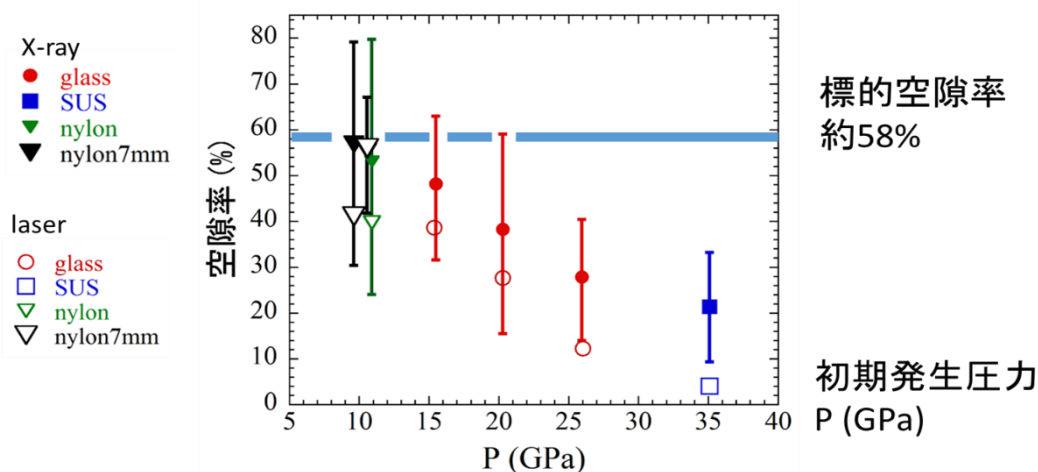


図 5：初期発生圧力と空隙率、X線とレーザープロファイルの値の比較

## 6. まとめ

圧密領域を密度一定、圧密幅一定として求めた空隙率と X 線透過率から推定したクレーター一底の空隙率を比較した。比較した値が大きく外れることはなく、圧力に対する全体の傾向は似ている。隕石の母天体が石膏に近い物質だとすると、今回の実験で隕石に近い空隙率になったのは、ガラス弾丸を 5km/s で衝突させたものである。本研究では空隙率が平均よりも高い標的を使っているが、C 型小惑星の空隙率は約 30~60%(Consolmagno et al., 2008)とあり、実際にはもっと高い値をもつ天体もあるかもしれない。

### 参考文献

- Buhl, E., Poelchau, M., Dresen, G., Kenkmann, T., 2014. Scailing of sub-surface deformation in hypervelocity impact experiments on porous sandstone. *Tectonophysics* 634, 171-181.
- Consolmagno, G.J., Britt, D.T., Macke, R.J., 2008. The significance of meteorite density and porosity. *ScienceDirect Chemie der Erde* 68, 1-29.
- Yasui, M., Arakawa, M., Hasegawa, S., Fujita, Y., Kadono, T., 2012. In situ flash X-ray observation of projectile penetration processes and crater cavity growth in porous gypsum target analogous to low-density asteroids. *Icarus* 221, 646-657.