

重複クレーターの形状について

○横山康喜¹、木内真人¹、中村昭子¹、鈴木絢子²、長谷川直²

¹神戸大学大学院理学研究科、²宇宙科学研究所

1 はじめに

天体表面は天体同士の衝突によってその形状を変える。衝突によって形成されるクレーターを観測することで、プロジェクトイルやターゲットに関する様々な手がかりを得ることができる。衝突後に残った情報から衝突時の情報を得るための一つの手段として、実験室スケールで様々な衝突実験が長年行われてきた。今までに行われた衝突実験はそのほとんどが単一クレーターを形成するものであった。しかし、実際の天体で見られるクレーターは一つ一つのクレーターが独立して存在するものだけではなく、図1に示すように、二つ以上のクレーターが重なっているものも多く見られる。これらの天体は内部に空隙を持つことが知られている。

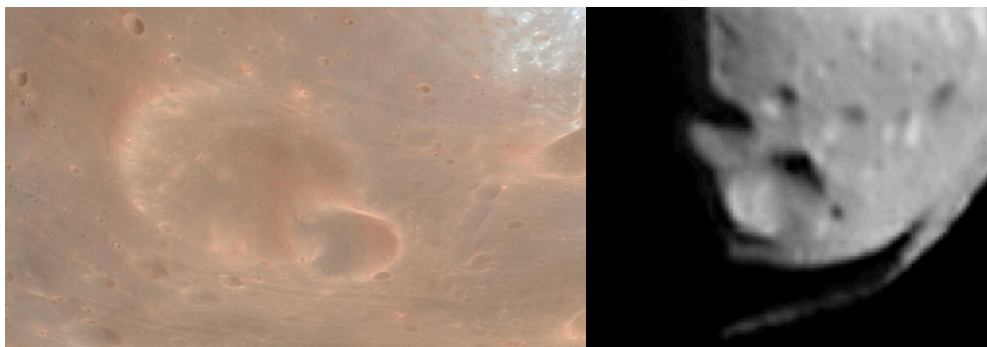


図1. Phobos(左:Mars Express)、Mathilde(右:NEAR)の表面画像

高空隙率標的に対する衝突実験として Flynn et al. (2015) では軽石標的を用いた実験を行っており、Mathildeにある巨大な重複クレーターはMathildeが高い空隙率を持つために存在する可能性を示した。

本研究では、実際の天体でよく見られるにもかかわらず、今まであまり実験が行われていなかった重複クレーターについて、室内実験でメインベルト中の高空隙率天体を模擬した石膏ターゲットに対して高速度衝突実験を行う。実験で得られた重複クレーター形状について、空隙率による影響を調べる。

なお今回の実験結果の比較として Yasui et al. (2012) の単一クレーターの結果を用いた。

2 実験手法

2.1 実験試料

空隙を持つ小天体を模擬するために標的には石膏を用い、空隙率 37 %(A)と 58 %(B)の円柱形状の試料を用意した。表 1 に、試料の空隙率、大きさ、質量をまとめる。 A,B 種それぞれ 4 つずつの標的に対しての衝突実験を行った。

表 1 標的

	空隙率(%)	高さ(cm)	直径(cm)	質量(g)
A	37.2 ± 1.9	4.01 ± 0.49	11.9074 ± 0.0036	674 ± 23
B	58.03 ± 0.35	5.202 ± 0.074	11.950 ± 0.016	568 ± 12

2.2 実験方法

宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いて、衝突速度は 5.376 ± 0.056 km/s で実験を行った。一つのターゲットに対して二回の衝突実験を行うことで重複クレーターを作成する。弾丸にはナイロン球(直径 3.2 mm、質量 0.019 g)を用いる。チャンバー内の真空度は 3 Pa 以下に減圧して垂直衝突実験を行った。2 台のハイスピードカメラを用いて横と上から衝突の様子を確認し、衝突速度とエジェクタの放出角度を観測した。カメラの撮像間隔は 2 μ s で露出は 0.2 μ s とした。エジェクタ質量を衝突前後のターゲットの質量差として、その測定のためにチャンバー内のエジェクタの回収を行った。

2.3 解析方法

宇宙科学研究所のレーザープロファイラーと、神戸大学のレーザー変位計を用いてクレーターの深さ・スポール直径・ピット直径を測定した。ハイスピードカメラ画像は GIMP を用いて解析した。

3 結果

3.1 スポール直径・ピット直径・深さについて

スポール直径とピット直径を図 2 に示す。一回目の衝突と二回目の衝突を比べて、その大きさに違いは見られなかったが、空隙率の上昇に伴いスポール直径は小さくなった。そのため、図 3 に示すように、空隙率の上昇に伴いスポールピット比は小さくなった。

図4にピット深さを示す。一回目と二回目の違い、空隙率による影響共に見られなかった。また先行研究の Okamoto et al. (2017) で得られた経験式と比較すると、図5に示すように全体的に今回の方が大きい値は取るが概ね式に則っていると言える。図5中の ρ_p 、 ρ_t はプロジェクティルとターゲットの密度で、 db 、 dp はピット直径とプロジェクティル直径を示す。

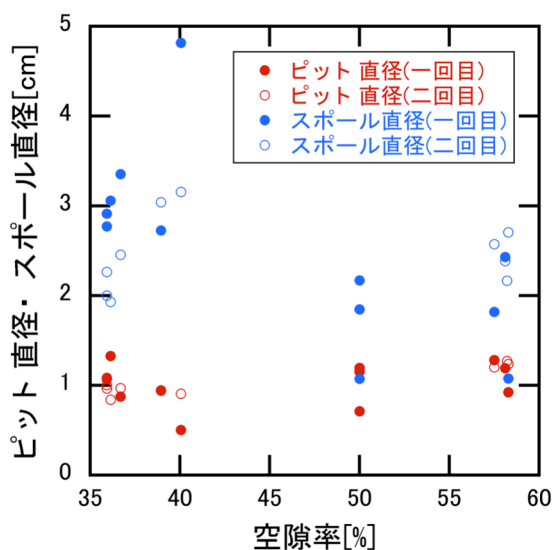


図2 スポール直径とピット直径

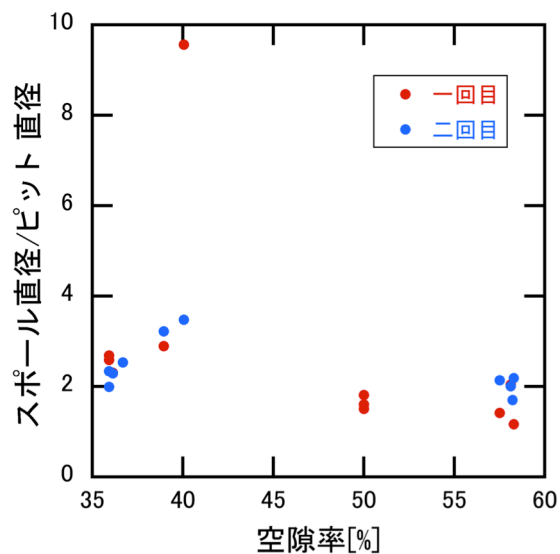


図3 スポールピット直径比

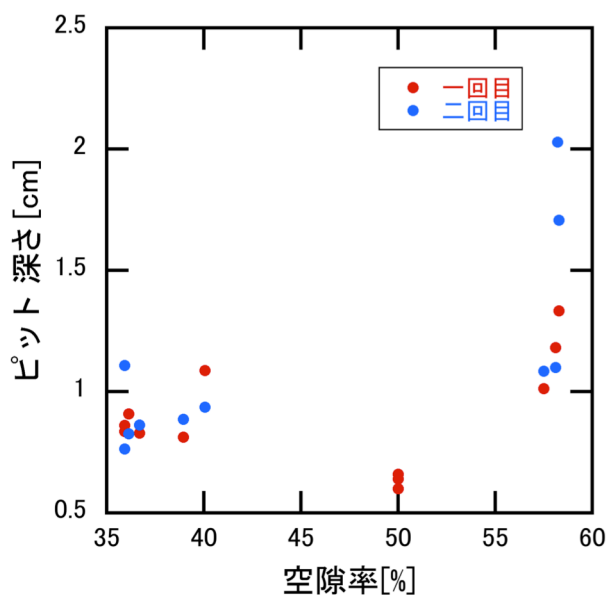


図4 ピット深さ

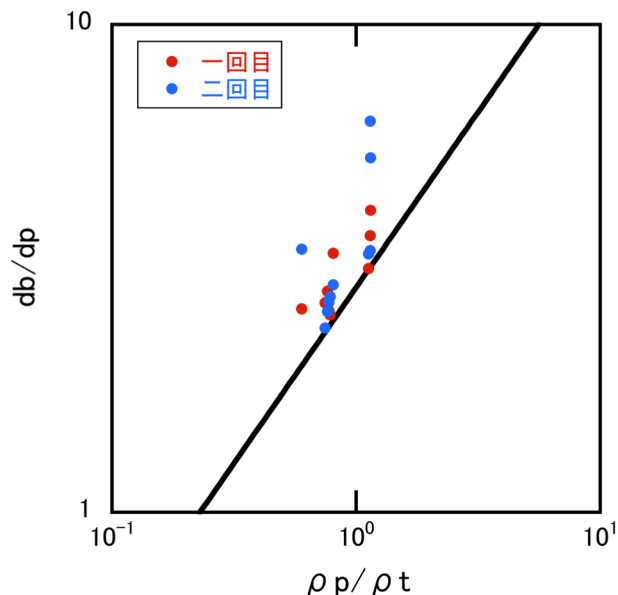


図5 先行研究との比較

3.2 クレーター境界部の深さについて

重複クレーターを形成する二つのクレーターが単一で存在した場合を想定するために、それぞれのクレーターの最深点で軸対象に折り返したものが図6の破線で示してある。一方、実際の重複クレーターの境界部で最も浅い点の深さ d' と、その x 座標での破線の深さ $d(a), d(b)$ を比べる。すると $d' > d(a) + d(b)$ が成り立つ。これは空隙率が変化しても変わらず見られる特徴である。

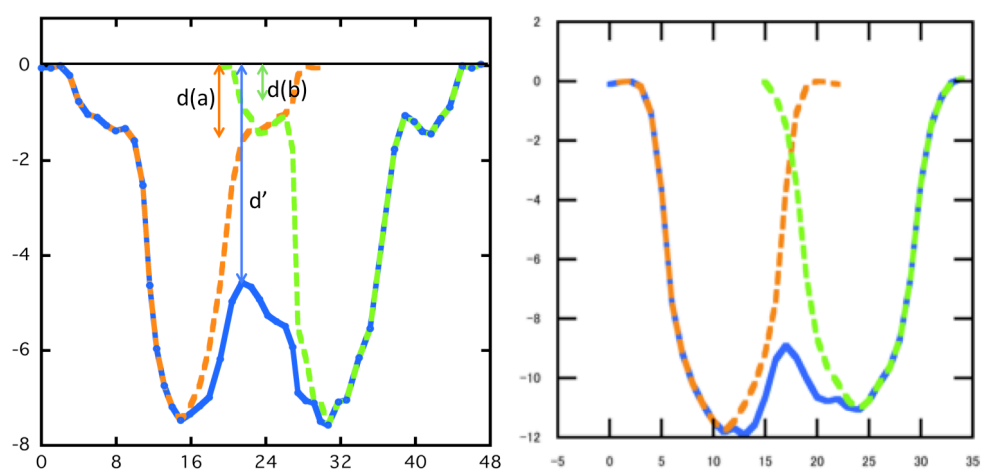


図6 重複クレーター形状(左：空隙率 37 %、右：空隙率 58 %)

3.3 エジェクタの質量について

各衝突前後のターゲットの質量差で求めたエジェクタ質量をそれぞれの実験結果と比較した結果を図7に示す。一回目と二回目で違いはほとんどなかったが、空隙率の上昇とともにエジェクタ質量は減少する傾向にあるかもしれない。

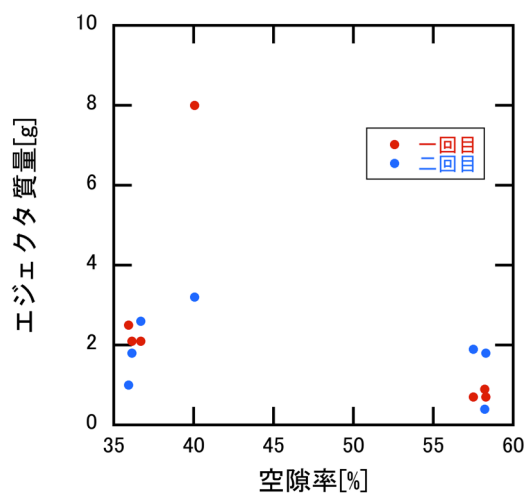


図7 エジェクタ質量の比較

3.4 エジェクタ放出角度について

図8に示したように、空隙率が高い標的のエジェクタカーテンは放出されてから角度を保って成長するが、空隙率の低い標的では根元と先端でそれぞれ角度が異なる。今回は根元の角度を計測に用いた。

また、図9に示すように、それぞれの実験で得られたエジェクタ角度を空隙率ごとに分けても、その角度に大きな違いは見られなかった。しかし、一回目と二回目のエジェクタ角度をそれぞれ比較すると一回目の方が二回目よりも放出される角度が大きい傾向にあることがわかった。

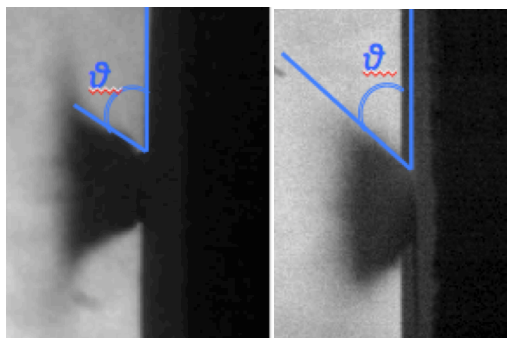


図8 左:空隙率 37 %、右:空隙率 58 %

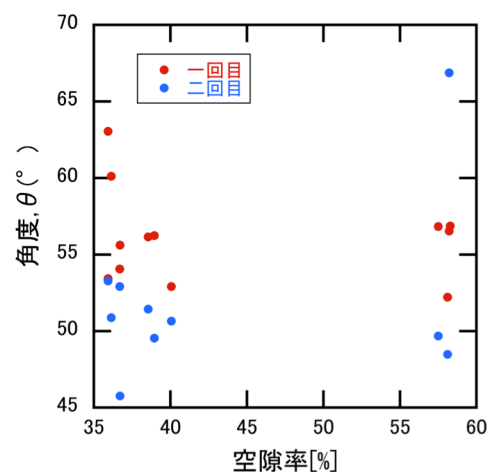


図9 エジェクタ角度の空隙率依存性

4 考察

4.1 スポール直径・ピット直径・深さについて

空隙率の上昇とともにスポールピット比が小さくなるのは、空隙によって衝撃波が弱められて破壊の程度が小さくなったためだと考えられる。

4.2 クレーター境界部の深さについて

クレーター境界部の深さ $d > d(a) + d(b)$ となったのは一回目の衝突によって自由表面が形成されるため境界部分での破壊の程度が大きくなったため、もしくは一度衝突を経験したことで強度が低下したためであると考えられる。

4.3 エジェクタの質量について

空隙率によって質量に違いが見られるのは、空隙率の高い物質ではクレーターの形成が掘削だけでなく、圧密にも依存するため放出される物質の質量が小さくなったと考えられる。

4.4 エジェクタ放出角度について

Flynn et al. (2015) の軽石標的(空隙率 60-85 %)に対する高速度衝突実験で撮影されたエジェクタカーテン形状は、今回の実験の空隙率の高いものと同じで根元から先端までの角度が一定であったため、空隙率に依存してエジェクタカーテン形状が決まるかもしれない。

5 まとめ

重複クレーターが形成されることによって変化したことは、図 6 に示した境界部の深さと、図 6 に示したエジェクタ放出角度の一回目と二回目の違いの二点であった。

空隙率の増加によって変化したことは、図 2 に示したスポール直径の減少、エジェクタ質量の減少、エジェクタカーテンの形状の三点であった。

今後、今回比較として用いた Yasui et al. (2012) の空隙率 50%付近での重複クレーターでの値を求めたい。

参考文献

G. Flynn et al., 2015, Hypervelocity cratering and disruption of porous pumice targets: Implications for crater production, catastrophic disruption, and momentum transfer on porous asteroids, *Icarus*, 107, 64-76.

M. Yasui, et al., 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.

T. Okamoto et al., 2017, Scaling of impact-generated cavity-size for highly porous targets and its application to cometary surfaces, *Icarus*, in press.