

# 微小重力下での高速度衝突クレーター形成実験

木内真人<sup>1</sup>, 岡本尚也<sup>1</sup>, 中村昭子<sup>2</sup>

<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup>神戸大学大学院理学研究科

## High-velocity impact experiments into granular materials under microgravity

Masato Kiuchi<sup>1\*</sup>, Takaya Okamoto<sup>1</sup>, Akiko Nakamura<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>2</sup> Graduate School of Science, Kobe University

### はじめに

小天体表面における重力加速度は微小であり、クレーターの観測から小天体表面の進化の過程や表面の物性を推定するためには、クレーター直径の重力依存性を理解することが重要である。クレーターサイズの重力依存性について調べた先行研究として、低重力下および高重力下で様々な速度域 ( $1 \text{ m s}^{-1} \sim 6.6 \text{ km s}^{-1}$ ) での衝突実験が行われている。これらの実験では、クレーター直径は重力の  $-0.165 \sim -0.19$  乗に比例するという結果が得られている (Gault and Wedekind, 1977; Schmidt and Housen, 1987; Cintala et al. 1989; Kiuchi et al., 2019) が、一方で、Takagi et al. (2007) では、微小重力下と  $1 \text{ G}$  下でクレーター直径が変わらないという結果が得られている。異なる重力下での衝突実験例は限られていることから、上記の先行研究の結果の違いの原因は理解されていない。一方、太陽系天体表面での衝突現象は一般的に数  $\text{km s}^{-1}$  から数  $10 \text{ km s}^{-1}$  の速度範囲にあり、例えば小惑星帯での平均衝突速度は  $5 \text{ km s}^{-1}$  (Bottke et al., 1994) であるが、高速度域での異なる重力下での衝突実験例は少ないという問題点もある。小天体表面を模擬した微小重力実験を行うには、巨大な落下塔や航空機による放物飛行の手法が一般的に用いられるが、これらの手法では秒速数キロメートルでの高速度衝突実験を行うのは難しい。また、一度の実験でかかる費用の点からも、多くの実験データを得ることは難しい。そこで本研究では、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 施設内にある縦型式二段銃の真空チャンバー内に簡易な落下塔を構築することで、低コストかつ容易に低重力下での高速度衝突実験を行える装置の開発を行った。また、開発した装置を用いた衝突実験のテストとして、弾丸発射のタイミングの調整およびクレーター形成過程の観察を行った。

### 実験方法

落下装置にはボールベアリングとレールを用いることで標的容器が鉛直方向に滑らかに落下するよう設計した。高さ  $2 \text{ m}$  の真空チャンバーの天井付近に標的容器を電磁石で固定し、電磁石のスイッチを切ることによって容器を落下させる。容器に固定した加速度計によって標的容器の落下加速度を計測する。直径  $30 \text{ cm}$ 、高さ  $10 \text{ cm}$  のステンレス容器に約  $12 \text{ kg}$  の珪砂 (粒径  $\sim 425 \mu\text{m}$ ) を充填し真空下 ( $\sim 100 \text{ Pa}$ ) で落下させた場合、 $0.06 \sim 0.07 \text{ G}$  の範囲の模擬重力を得た。

続いて、開発した落下装置を用いて高速度での衝突クレーター形成実験を行った。標的容器を落下させる際の電磁石の信号をトリガーに、パルスジェネレーターを介して弾丸を発射させる。弾丸発射装置にパルスジェネレーターからの信号が入力されてから弾丸が射出されるまでの時間をオシロスコープを用いて計測したところ、2 ms であった。標的容器と標的には上記のステンレス容器と硅砂を用い、直径 4.76 mm のポリカーボネイト球弾丸（密度  $1.2 \text{ g cm}^{-3}$ ）を速度  $1.2 \text{ km s}^{-1}$  で約 100 Pa 下で衝突させた。高速度カメラを用いて標的容器の落下の様子を上方向から撮影し、クレーターの形成過程を観察した。低重力下で 3 ショット、1 G 下で 1 ショットの実験を行った。

## 結果と議論

標的容器に設置した加速度計のデータを図 1 に示す。図 1 より、容器の落下開始（電磁石をオフにしたとき）から低重力状態が安定するまでに、0.4 s 程度かかっていることがわかる。低重力状態が安定してから容器が落下し終わるまでの時間は、約 0.3 s であり、また、弾丸が衝突した際の衝撃を示す波形も観察できる。

クレーター直径の成長過程を図 2 に示す。高速度カメラの画像からリム直径を計測し、これをクレーター直径とした。1 G 下の結果（Shot 4）よりも低重力下（Shot 1, Shot 3）の結果の方がクレーター形成時間は長く、クレーター直径も大きくなっていることがわかる。クレーター直径の成長は、1 G 下では容器が落下するまでに終わっていると考えられるが、低重力下では成長が終わっているかどうかは判断できない。1 G 下でのクレーター形成時間（クレーター直径の成長が止まった時間）は、図 2 より 0.05 ~ 0.07 s 程度と推定でき、これはクレーター成長過程を調べた先行研究（Yamamoto et al., 2017）の結果と整合的である。一方、低重力下でのクレーター形成時間は 0.2 s 以上と推定できる。ここで、次元解析によるクレーター形成時間

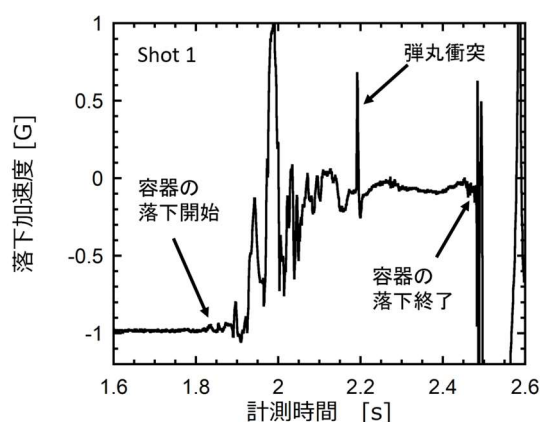


図 1：標的容器にはたらく落下加速度クレーター形成中に標的にかかる模擬重力は  $0.07 \pm 0.04 \text{ G}$  (Shot 1)。鉛直上向きを正とする。

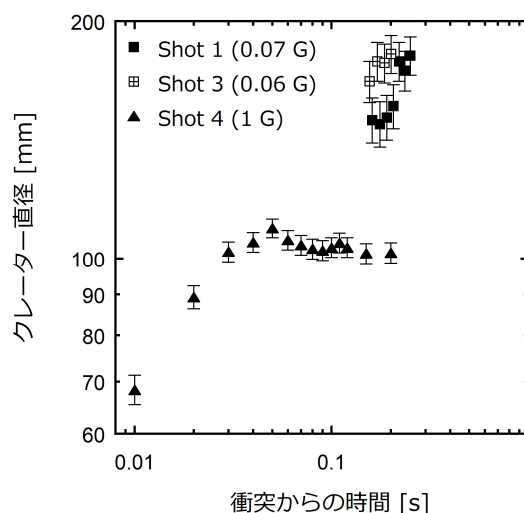


図 2：クレーター直径の成長過程  
Shot 2 ではクレーター直径が測定できなかったため、図示していない。

$T$  は、最終クレーター直径  $D$  と重力加速度  $g$  を用いて、以下のように表される (Melosh, 1989).

$$T \sim \sqrt{D/g} \quad (1)$$

1 G 下での最終クレーター直径  $D (= 102 \text{ mm})$  を(1)式に代入すると  $T \sim 0.1 \text{ s}$  が得られ、この値は実験結果 (0.05 ~ 0.07 s) から大きく離れてはいない。一方、低重力下では成長途中の可能性はあるが、最終クレーター直径の下限值として  $D (= 180 \text{ mm})$  を(1)式に代入すると、 $T \sim 0.5 \text{ s}$  が得られる。これは容器が落下し終わるまでの時間 (0.3 s) よりも大きい値であることから、今回の実験ではクレーターの成長は終わっていない可能性を示す。

次に、クレーターサイズを規格化クレーター半径  $\pi_R$  と規格化重力  $\pi_2$  を用いて整理した (図 3)。  $\pi_R = R \times (\rho/m)^{1/3}$ 、  $\pi_2 = ga/v^2$  と表され、ここで  $R$  はクレーター半径、  $\rho$  は標的密度、  $m$  は弾丸質量、  $g$  は重力加速度、  $a$  は弾丸半径、  $v$  は衝突速度である。比較として、1 G 下での砂標的に対する高速度衝突で得られたスケーリング則 (Housen and Holsapple, 2011) を図 3 中の直線に示す。ここで、Housen and Holsapple (2011) の結果は、リム直径に換算して示している。本実験の 1 G 下での結果は先行研究の結果をやや下回るが、低重力下での結果はよく合っていることがわかる。ただし、本実験での低重力下でのクレーターサイズは下限値であることに注意が必要であり、容器の落下時間が長ければ、クレーターサイズはさらに成長していた可能性がある。

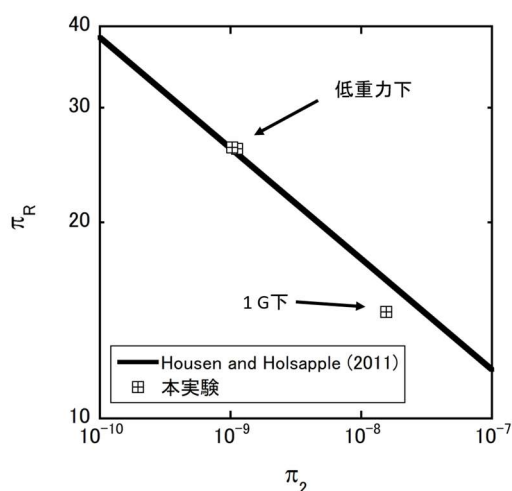


図 3 :  $\pi_R$  と  $\pi_2$  の関係

### まとめと今後の課題

本研究では、高速度域での低重力衝突実験を行える装置の開発を行った。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 施設内にある縦型式二段銃の真空チャンバー内に簡易な落下塔を構築し、0.06 ~ 0.07 G の範囲の模擬重力を実現した。また、開発した装置を用いて低重力下での高速度衝突実験のテストを行い、弾丸発射のタイミングの調整およびクレーターの形成過程の観察を行った。クレーターの観察結果と次元解析によるクレーター形成時間との比較から、標的容器の落下するまでにクレーター形成が終わっていない可能性が示された。一方、低重力下での結果を最終クレーター直径の下限值とすると、先行研究で得られたスケーリング則と一致することがわかった。

今後の課題として、クレーター形成時間に対して低重力継続時間を長くすることが挙げられる。そのためには、弾丸サイズを小さくすることでより小さいサイズのクレーターを形成する、また、容器の落下時間をより長く確保できるよう装置を改良することなど

どが考えられる。

### 参考文献

- Gault, D. E. and J. A. Wedekind (1977). Experimental hypervelocity impact into quartz sand – II, Effects of gravitational acceleration. In *Impact and Explosion Cratering*, Pergamon Press, New York, 1231-1244.
- Schmidt, R. M. and K. R. Housen (1987). Some recent advances in the scaling of impact and explosion cratering. *Int. J. Impact Eng.* 5, 543-560.
- Cintala, M. J., Horz, F., & See, T. H. (1989). Impact cratering in low-gravity environments: Results of reconnaissance experimentation on the NASA KC-135A reduced-gravity aircraft. *Proceedings of the 19th Lunar and Planetary Science Conference*, 627–639.
- Kiuchi, M., Nakamura, A. M., Wada, K. (2019). Experimental Study on Gravitational and Atmospheric Effects on Crater Size Formed by Low - Velocity Impacts Into Granular Media. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124, 5, 1379-1392.
- Bottke, W. F. et al. (1994). Velocity distributions among colliding asteroids. *Icarus* 107, 255-268.
- 高木靖彦 (2012). *日本マイクログラビティ応用学会誌* 29, 163-168.
- Yamamoto, S. et al. (2017). Impact velocity dependence of transient cratering growth. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 122, 1077–1089.
- Melosh, H. J. (1989). *Impact cratering: A geologic process*. New York: Oxford University Press.
- Housen, K. R., & Holsapple, K. A. (2011). Ejecta from impact craters. *Icarus*, 211(1), 856–875.