

鉄球と砂を用いたクレーターの特徴解析～衝突パラメータの逆推定に向けた実験研究～

高槻高等学校 課題研究 物理5班：

荒川 昭、鬼頭 滉介、濱田 翔大、水口 颯人、山西 響花（高2）【高槻高等学校】

要 旨

本研究は、クレーター形状から衝突条件を推定することを目標とする。乾燥砂上への鉄球落下実験により、低速衝突クレーターの解析を行った。クレーター径 D と衝突エネルギー $E = mgh$ の間に $D \propto E^\alpha$ のべき乗則が、球が埋没しなかった時に限り成立することを確認した。さらに、放出された粒子が放物運動をすることにより再度堆積したと考え、 θ 方向に飛散した砂の量 $G(\theta)$ 、砂の落下地点 $l(\theta)$ を用いて、堆積高さ分布 $z(l)$ が $z(l) \propto \frac{G(\theta)d\theta}{dl}$ で表されるモデルを構築した。また実験により、リム高さが落下高さに依存しないことが確認された。

1. 目的と背景

クレーターは物体衝突の痕跡であり、その形状は衝突の仕方によってさまざまであることがわかる。そこでクレーター形成の過程を調べることで逆に、クレーターを形成した隕石の特徴を特定することを目的とする。

2. 実験概要

鉄球を様々な高さから粒径 (840~2000 μm) のそろった土の上に落とす。落下によってできたクレーターの直径を測定し、鉄球が埋まったかどうかを記録する。また、観測されたクレーターの形成過程を調べるためにハイスピードカメラを用いて、撮影した映像を解析する。特に飛散した粒子の動きに着目した。

3. 結果

図1が示すように、 $D \propto E^\alpha$ のべき乗則が成立した。ここで、 α の値が $\alpha \sim 0.2214 \pm 0.0155$ であった。また、粒子集団は一定の傾きを保って同一直線上を飛散した。同一の鉄球を用いたときにリム高さが落下高さにほぼ依存しない ($h \sim 4.35 \pm 0.29$ mm) が確認された。

4. 考察

鉄球が砂面に衝突した後の砂の飛散について考える。まず、ある時刻 t において砂が同一直線上 (図2直線上) に位置しているため、その時の砂の集団の形状が以下の方程式に従っていると仮定する。

$$z = ar + b(t), \quad b(t) = b_1 t + b_0 - \frac{1}{2}gt^2$$

ここで z は高さ、 r は落下地点からの距離である。ここで、 θ 方向に飛散した砂の落下地点 $l(\theta)$ は

$$l(\theta) = r_0 + \left(\frac{b_1}{\sin\theta - a \cos\theta} \right)^2 \frac{\sin 2\theta}{g}$$

とかける。また、 θ 方向に飛散した砂の量はその粒子の持つエネルギーの逆数に比例すると仮定すると

$$G(\theta) \propto \sin^2(\theta - \beta) \quad \left(\sin\beta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + 1}}, \cos\beta = \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}} \right)$$

とかける。 $l(\theta) \sim l(\theta + \Delta\theta)$ 間に堆積した砂の高さを求めると

$$z(l) = G(\theta) \frac{d\theta}{dl} \propto \frac{G(\theta)^3}{k(2G(\theta) \cos 2\theta - G'(\theta) \sin 2\theta)}, \quad \left(k = \frac{b_1^2}{g(a^2 + 1)} \right)$$

と表せる。これを、 $\alpha = \frac{\pi}{3}$ として図示すると、図3のような形になるとわかる。衝突による凹み部分の関数化を行い、考察で示した関数とたし合わせることで、最終的にクレーターの形の関数化を行う。

5. 展望

衝突による凹み部分の関数化について考察し、より正確な衝突条件の推定を目指す。

また、球の直径を変化させながらリム高さを測定することにより、リム高さの球の直径に対する依存性を調べる。

参考文献

- [1] LIVE SCIENCE
<https://www.livescience.com> (2026年1月14日閲覧)
- [2] Low-speed impact craters in loose granular media (J.S.Uehara, M.A.Ambroso, R.P.Ojha, and, D.J.Durian)
<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.90.194301> (2026年1月14日閲覧)

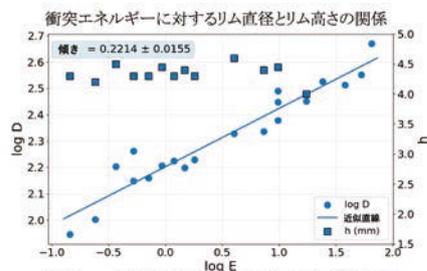


図1. べき乗則の成立を示すグラフ

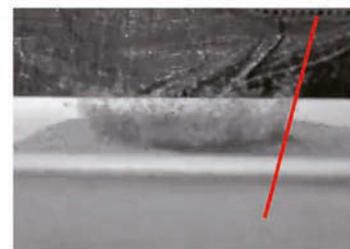
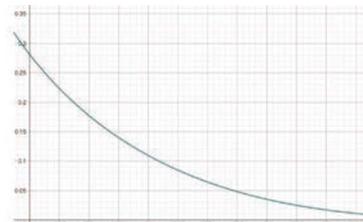


図2. 粒子の飛散挙動 (ハイスピードカメラ画像)

図3. 砂の堆積高さの分布 $\alpha = \frac{\pi}{3}$ の時のモデル