

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)

## 研究の目的

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。

## 【基本実験】

## 方法

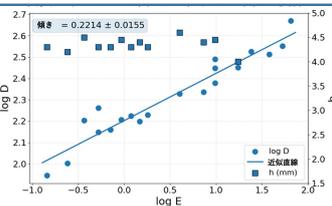
- 様々な高さから鉄球を、乾燥させ粒径をそろえた砂(840~2000 $\mu\text{m}$ )の入ったバットに落とした。(深さ 4.1 cm)
- クレーターの直径、深さや2段階リムの有無を測定した。
- クレーターが形成される様子をハイスピードカメラを用いて録画し、解析した。



## 仮説

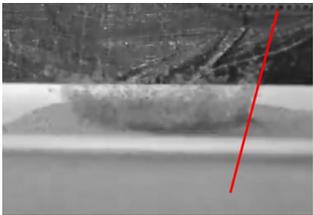
先行研究 [1, 2] において高速の隕石に対して成立する  $D \propto E^\alpha$  ( $\frac{1}{3} \leq \alpha \leq \frac{2}{3}$ ) は低速帯でも成立する。ただし、  
D: リム直径  
E: 落下球の持つ力学的エネルギー

## 結果・結論

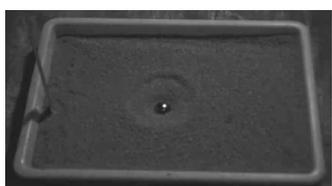


衝突エネルギーに対するリム直径とリム高さの関係

衝突エネルギーに対するリム直径とリム高さの関係に関するグラフは以上のようなものになる。これから、近似直線の傾き  $\alpha$  は  $\alpha = 0.2214 \pm 0.0155$  であるとわかる。また、リム高さは4.2mm前後でほぼ一定(標準偏差: 0.149mm, 変動率3.5%)であることもわかる。これより、 $D \propto E^\alpha$  ( $\frac{1}{3} \leq \alpha \leq \frac{2}{3}$ ) は **低速帯でもほぼ成立する**とわかる。

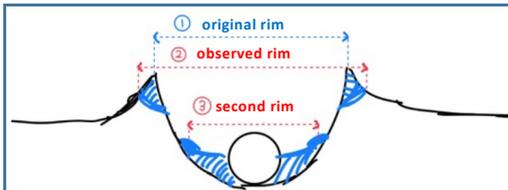


砂の飛散の様子を示すハイスピードカメラ画像は上図のようになる。これより、飛散する砂の集団は傾き  $\alpha$  が時間によらず一定の直線上に位置するとわかる。



上図は形成されたクレーターの様子である。計測したリム直径の内側に、別のリムが形成されていることがわかった。

## 【定義した用語】



- ① original rim: 鉄球の衝突によりできた凹み部分の直径
- ② observed rim: 観測できたリム直径
- ③ second rim: observed rimの内側に形成されたリム直径

## 【考察・検証1】クレーターの形成過程

## 〈仮説〉

鉄球を落下させ、飛散した粒子によってできたものが original rim で、その部分で積もった粒子の一部が崩れ、その砂が積もって second rim が形成された。second rim が形成されるかは、original rim の砂が崩れるかどうか依存し、鉄球が埋没するかどうかは、崩れた砂が鉄球に積もるためであると考えた。

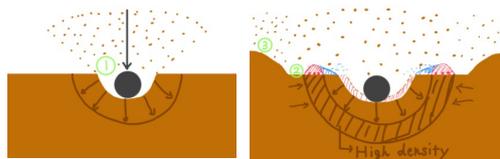
## 〈映像解析結果・結論〉

ハイスピードカメラ映像の解析より、**original rimの崩壊は起こっておらず、original rimが飛散した粒子によって、second rimの形成後に形成されていたことがわかった。**鉄球が埋没した原因は **second rimが崩れ**、崩れた砂が鉄球に積もってしまったためであった。

## 〈考察〉

以下の過程を通して、クレーターの形状が決定されると考えた。まず、鉄球の落下の瞬間に、落下部の砂の密度が急激に上昇する。(下図①) この密度がある程度まで上がることで、その高密度帯が盛り上がり、second rim が形成される。(下図②) そして、映像解析からもわかるように、observed rimは、衝突時に飛散した砂が、second rimより外側に飛ばされ、それが積もり形成される。(下図③)

次に、リムの高さがほぼ一定であったことについては、**安息角による影響**だと考えた。observed rimは、**飛散した砂の堆積により形成される**もので、砂が積み上がり、堆積した部分と、の角度が安息角に達すれば、それ以上は積もらないと考えた。

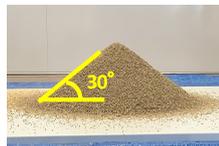


## 〈展望〉

パラメータを変えた実験を行い、この考察が、一般的なクレーターの形成過程として、正しいと言えるかを検証する。

## \*安息角

砂の堆積物が崩れることなく安定して存在できる、水平面に対する最大の傾斜角度。  
今回実験で使った砂(粒径が840~2000 $\mu\text{m}$ )では、安息角は約30度であった



## 【考察・検証2】クレーターの形の関数化

映像解析から、砂の集団は常に一定の傾き  $\alpha$  の同一直線上に位置していることが分かったため、砂の集団の形状が以下の方程式に従うと仮定する。

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

この時、ある角度  $\theta$  方向に出た粒子の落下地点は

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

と書ける。ここで、 $\theta$  方向に出る粒子量を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、

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

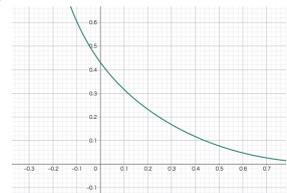
$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{k(2G(\theta) \cos 2\theta - G'(\theta) \sin 2\theta)}{G(\theta)^2}$$

であるから、

$$h_1(r) = G(\theta) \frac{d\theta}{dr} = \frac{G(\theta)^3}{k(2G(\theta) \cos 2\theta - G'(\theta) \sin 2\theta)}$$

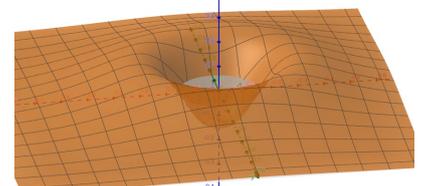
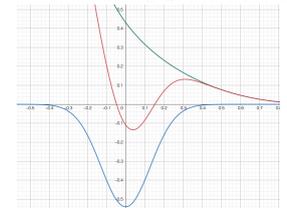
と言える。ここで、 $k = \frac{b_1^2}{g(a^2 + 1)}$  である。

この関数を  $\beta = 1.3$  としたグラフは以下のようになる。



この関数のグラフは、飛散した砂が平らな面に堆積した際の形状を表す。

次に、original rim の凹み部分を含めて考察する。



上のグラフの青線は、original rimの形  $h_2(r)$  を、ガウシアンと見立て、飛散した砂の体積と、凹み部分の体積が一致すると仮定した。この下で、

$$h_2(r) = -0.54e^{-30r^2}$$

とし、グラフ化したものである。

上のグラフの赤線は、 $h_1(r)$  と  $h_2(r)$  を足し合わせたもので下の立体図は、この赤線を三次元化したものである。これが、**クレーターの形状を関数化したもの**となる。

## 〈展望〉

実験と理論モデルとの整合性が確実なモデルを構築する。比例定数や、安息角による second rim の崩壊の考慮や、パラメータを増やした実験によって、より正確なモデルを構築する。

## 参考文献

[1] Keith A. Holsapple & Robert M. Schmidt (1982)

On the Scaling of Crater Dimensions II: Impact Processes

[2] Low-speed impact craters in loose granular media

(J.S.Uehara, M.A.Ambrosio, R.P.Ojha, and, D.J.Durian)

