

# 天体表面ブロック層破壊による弾丸減速効果とクレーター則

巽瑛理（東大新領域）、杉田精司（東大理）

## Abstract

クレーター年代は、天体の進化過程を読み解く上で非常に重要な観測量である。小惑星上にもクレーターと推測される地形が発見されており、クレーター年代の推定が可能である。しかし、クレーター年代はクレーターのスケール則に大きい影響を受けるため、適切なスケール則を用いないと妥当なクレーター年代は得られない。強度スケール則を仮定して、イトカワのクレーター年代を 75Myr-1Gyr と推定した研究事例 [1] があるが、イトカワのような表面が岩塊に覆われているような標的において、クレーター径が物質強度に依存する保証は実は存在しない。重力スケール則に合う可能性も残されている。どちらのスケール則が正しいかで、イトカワの表面年代推定値は何桁も異なってしまうので、この不確定性は非常に大きな問題である。そこで本研究では、イトカワのように岩塊によっておおわれた標的においてどのようなクレーター則が成り立つか実験的な手法を用いて検討した。実験結果は、表面が岩塊質で内部がレゴリスであるような標的では、弾丸が表面の岩塊を破壊しエネルギーを散逸することによって減速する（アーミング効果）ため、クレーターサイズも重力則に比べて最大で 40% 程度小さくなることを示していた。アーミング効果を考慮したスケール則を用いてイトカワのクレーター年代を再検討すると、10Myr 以下という宇宙線照射年代に近い非常に若い値が得られた。

## 1 はじめに

近年のはやぶさ (Muses-C) の探査によりイトカワ表面の高精細な画像が得られ、その表面で多様なタイムスケールで衝突破壊や粉体流動などの物理現象が起こっていることが明らかになりつつある。それらの物理現象のタイムスケールは探査画像や持ち帰ってきたサンプルから、多岐にわたる手法によって推定されている：宇宙線照射年代 < 8Myr [2][3]、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代 ~1.3Gyr [4]、クレーター年代 ~75Myr - 1Gyr [1]。本研究では特に、イトカワのクレーター年代に着目した。イトカワ表面には複数の円形の窪地が存在する [5]。イトカワ上に発見された円形の窪地は衝突によって形成されたと考えられているが、ラブルパイル天体であると考えられているイトカワは表面性状がこれまで観測されてきた天体と大きく異なり多くの岩塊が表面に存在しており、その窪地の形状も他天体のクレーターと異なる特徴をいくつか持っている。ひとつは、10m 以下の小さなクレーターが非常に少ないということ、もうひとつは、リムが岩塊で構成されているのに対して窪地の底面に比較的粒径が小さいレゴリスが見られることである。

ラブルパイル天体は母天体が破壊した破片群が重力相互作用により再集結してできたもので、構成粒子はそれぞれ強度を持つが、一つの天体としてみたときには微小な重力で纏まりを持つため、小さな固着力しか持たないと考えられている。このような天体表層に対してどのようなクレーターが形成されるか（重力支配か材料強度支配か）といったことに対して、統一的な見解は得られていない。Güttler et al. (2012) [6] では、標的構成粒子直径/プロジェクタイトル直径比を変えた実験から、標的粒子直径がプロジェクタイトル直径より大きくなると直ちに重力スケール則からずれ、材料強度スケール則に近づくとしている。一方、Holsapple and Housen (2014) [7] では、試行数は少ないが、標的構成粒子がプロジェクタイトルよりも 10 倍以上大きい場合でも衝突エネルギーが十分に大きければクレー

ター直径は重力スケール則で予測されるサイズと同じになると報告されている。Michel et al. (2009) ではイトカワのクレーター年代を推定する際に、材料強度スケール則を用いているが、重力スケール則を用いるとクレーター年代は桁で短くなることから、ラブルパイル小惑星上でのクレーターサイズを律則するモデルを明らかにすることはイトカワの年代推定に非常に重要である。上で挙げた、小さなクレーターが少ない理由の一つとして、表面のブロックを破壊することによってエネルギーを散逸するアーミング効果が考えられる。先行研究から、アーミング効果の大小は標的構成粒子直径/プロジェクタイトル直径比だけでなく衝突エネルギーにも依存することが示唆される。本研究では、これらの先行研究を踏まえ、表面が岩塊で覆われているような標的においてアーミング効果を考慮したスケール則を実験的手法により検討した。

## 2 実験方法と結果

### 2.1 クレーター直径

クレーター形成実験は、当研究室所有の 1 段式軽ガス銃を用いて行った。ポリカ製のプロジェクタイトル ( $\phi 10\text{mm}$ , 0.76-0.79g) を 70 - 190m/s で衝突させた。この衝突速度は小惑星帯の平均衝突速度 5.3km/s と比べると 1 桁以上遅い。小惑星帯の衝突速度であれば、1cm 程度の隕石が数 10cm - 1m 程度のボールダーをカタストロフィック破壊させることができる [8][9]。今回の実験速度範囲でも、構成粒子の破壊を伴うクレーター形成を観察するため、標的構成粒子には破壊エネルギーの低いガラスビーズ (~200micron) の焼結体を 1cm 程度に砕いたものを疑似ボールダーとして用いた。

ラブルパイル小惑星の内部構造は明らかではないが、観測画像から推定されるレゴリス基層の上にボールダー層があるような標的を設定し、模擬ボールダー層が厚いもの (40mm) と薄いもの (20mm) を用意した。比較のためにガラスビーズのみの標的に対してもクレーター実験を行った。衝突速度を比較してできた

クレーター直径を Fig.1 に示す. ボールダー層が薄いものに注目してみると, クレーター直径は低速度域では, ボールダーを破壊することでエネルギーを散逸し, クレーター直径はボールダー層が厚いものと同程度であるが, ボールダー層を貫通すると直ちに, 重力則で記述されるガラスビーズのクレーター直径に漸近していくことが分かる.

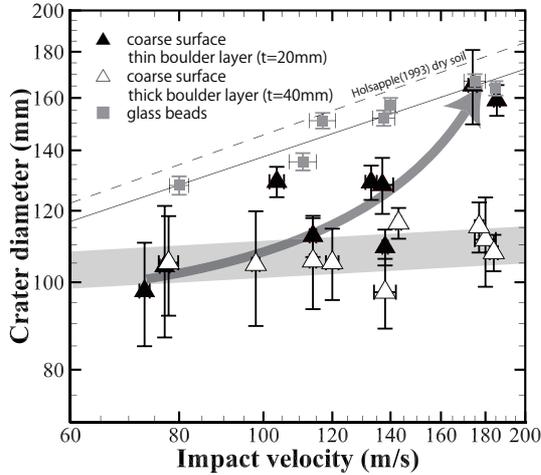


Fig. 1 The size of craters formed on targets composed of coarse grains (comparable to projectile size). The crater sizes on coarse-grain surface with thick boulder layer ( $\Delta$ ) appear to be approximately constant and those with a thin boulder layers ( $\blacktriangle$ ) exhibit a transition from the cratering efficiency close to the results for targets with a thick boulder layer to the gravity scaling ( $\blacksquare$ ) as impact energy increases (gray arrow). This transition occurs when the projectiles penetrate the boulder layers.

## 2.2 弾丸減速率

クレーター直径はプロジェクタイトの標的へのものぐりこみ深さに大きく関係すると考えられたため, プロジェクタイトのボールダー層貫入前と貫通後の速度を計測し, ボールダー層での減速率を計算した. ボールダー層を通過するとき速度の2乗に比例した抵抗を受けるとすると, 深さ  $z$  での弾丸速度は,  $v = v_0 \exp(-z/A)$  と表わせて, 実験結果からフィッティングを行うことによって減速率  $A \sim 1.3D_t$  と求められた ( $D_t$  は標的構成粒子径).

## 3 議論

実験結果からクレーターサイズは材料強度スケールよりも重力スケールに近いことが分かった. しかし, 今回の実験においてクレーターサイズは重力スケールから予測されるサイズよりも最大で40%程度小さくなった. これは表面のボールダーを破壊したことによってエネルギーを散逸し ( $E_{dis}$ ), クレーター掘削に使われる実効的エネルギー  $E_{eff}$  が小さくなったためであると考えられる.  $E_{eff}$  はプロジェクタイトの標的へのものぐりこみの状況に応じて, 次の4つの領域に分けられると考えられた.

- (i) 標的構成粒子の破壊が起こらない場合. ( $v_{eff} \sim v/(1 + m_t/m_p)$ ) [6])
- (ii) 標的構成粒子は破壊されるが, ボールダー層でプロジェクタイトが停止する場合.
- (iii) プロジェクタイトがボールダー層を貫通し, レゴリス層に到達する場合.
- (iv) ボールダー層破壊エネルギーよりも衝突エネルギーが十分に大きい場合. (重力スケールへ漸近. [7])

このように4つの領域に分けると, Güttler et al. (2013) は低エネルギーの極限を, Holsapple and Housen (2014) は高エネルギーの極限についての実験結果をそれぞれ説明していると考えられる.  $E_{eff}$  から実効的な速度  $v_{eff}$  を計算し, クレーターサイズを重力スケールからのずれとして評価することができる.

$$R_c/R_p \propto (gR_p/v_{eff}^2)^{-\alpha/3}$$

この補正されたスケール則をイトカワの窪地に適用し, クレーター年代を推定する. イトカワ上の最大級のクレーターである Arcoona は直径が約150mである [5]. このクレーターの底面はレゴリスが豊富に存在することから, 領域 (iii) に相当するとすると, 150m程度のクレーターが形成する平均時間は約10Myrである. この年代はあくまで平均値であり, 確率的に数倍程度変わり得るが, イトカワの表面年代が10Myr程度であるとすれば, この年代は Michel et al. (2009) で推定された下限値75Myrよりも短く, 宇宙線照射年代の上限値により近づくという結果になった. これまで, イトカワのクレーター年代はイトカワが再集積してからの年代を示すものと考えられてきたが,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代よりも極めて短いことを考慮すると,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代はイトカワの母天体が破壊した年代を示し, その後イトカワは何度かのmスケールでの表面更新を経験した可能性が示唆された.

## 謝辞

本研究を進めるにあたって, 神戸大学荒川先生, 中村先生, 産業医科大学門野先生に有益な議論を戴きましたことに感謝いたします.

## Reference

- [1] P. Michel et al., *Icarus* **200**, pp. 503-513, (2009)
- [2] K. Nagao et al., *Science* **333**, pp. 1128-1131, (2011)
- [3] M.M. Meier et al., *Proceedings of 45th LPSC*, 1247, (2014)
- [4] Park, J. et al., *Proceedings of 77th Annu. Met. Soc. Meet.*, 5190, (2014)
- [5] N. Hirata et al., *Icarus* **200**, pp. 486-502, (2009)
- [6] C. Güttler et al., *Icarus* **220**, pp. 1040-1049, (2012)
- [7] K.A. Holsapple and K.R. Housen, *Proceedings of 45th LPSC*, 2538, (2014)
- [8] F. Hörz et al., *The Moon* **13**, pp. 235-258, (1975)
- [9] K.R. Housen and K.A. Holsapple, *Icarus* **142**, pp.21-33, (1999)