

岩塊衝突によるイジェクタ軌跡の変化

巽瑛理、杉田精司（東大）、Olivier S. Barnouin (APL/JHU)、長谷川直（JAXA）

【はじめに】

現在、はやぶさ2やOSIRIS—RExといったミッションが太陽系の始原物質のサンプルリターンを目的として小惑星へ向けて航行中である。サンプルの持つ意味を読み解くためにはリモセンデータによる小惑星の詳細なマッピングやタッチダウン地点の地質学的な意味付けを行うことが非常に重要である。クレーターは太陽系の普遍的な衝突現象を反映しており、探査画像から得られる重要な地形情報の一つである。はやぶさのイトカワの探査によりラブルパイル天体表層の詳細な画像が得られた（Saito et al., 2006）。ひとつ大きく特徴的であったのが、表面が大きな岩塊（1–10m）で覆われているということである。イトカワのクレーターには形状が歪で、浅いクレーターが多く存在することが知られている（Hirata et al., 2009）。本研究ではこのように岩塊が豊富に存在するラブルパイル天体にどのようにクレーターが形成されるかということ明らかにし、はやぶさ2やOSIRIS—RExといった探査でのクレーター年代学への応用、及び、はやぶさ2に搭載されている衝突装置SCI（Small Carry-on Impactor）への応用を目的としている。本研究ではクレーター形成実験を行いクレーター直径、深さ、イジェクタ速度分布などから、クレーター形成の特徴を明らかにする。

【クレーター形成実験】

Tatsumi and Sugita (2018)で粒子径が大きいターゲットでのクレーター形成が議論され、これまでの π スケーリングを拡張した新たなクレータースケーリング則（衝突条件とクレーターサイズの関係）が提起された。先行研究では、クレーター形成実験の観察から、弾丸のサイズがターゲットよりも小さくても、運動エネルギーがターゲット粒子破壊エネルギーよりも十分に大きい場合には、衝突破壊後の掘削は重力スケーリング的になるということが示唆された。これを明らかにするため、ターゲットとしてシリカ砂（粒子径0.6-1.2mm）の中心にバサルト石（ $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3 \sim 50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ ）を配置したものに石の破壊エネルギーと同等もしくは大きな運動エネルギーで弾丸を衝突させ、クレーターの形状（直径、深さ）を計測した。実験条件と結果を表1に示す。クレーター直径は石の有無によって大きな違いが見られないのに対して、クレーター深さは石の有無により大きく異なる特徴を示す（図2）。具体的には、衝突エネルギーの小さな領域ではクレーターは浅く（ $D/H \sim 0.1$ ）、衝突エネルギーが大きくなると先行研究の通り砂

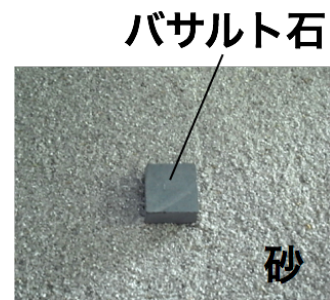


図1 ターゲット（シリカ砂＋バサルト石）俯瞰図。

にできるクレーターと同様の深さのクレーター ($D/H \sim 0.2$) が形成することがわかった。バサルト石の破壊エネルギーで衝突エネルギーを規格化することにより、石のサイズに依らず、同様の傾向が見られた (図3)。この結果から、 $\xi \sim 10-20$ 程度でクレーターの深さ直径比の遷移が起こっていることが示唆される。

表1 実験条件と結果のまとめ

ターゲット	バサルト石質量 (g)	衝突速度 (km/s)	クレーター直径 (mm)	クレーター深さ (mm)
シリカ砂		6.5	222.5±2.5	46.9±0.1
シリカ砂		6.3	220±2.5	44.95±0.15
シリカ砂		3.0	162.5±2.5	38.4±0.7
シリカ砂		6.0	210±2.5	51±0.7
シリカ砂	-	4.6	187.5±2.5	36.5±0.5
シリカ砂	-	2.1	147.5±2.5	35±1
シリカ砂	-	5	207.5±2.5	45±1
シリカ砂	-	1.4	125±5	25.4±0.5
シリカ砂	-	6.4	225±5	50.1±1.1
シリカ砂+バサルト石 (30mm)	77.1	6.4	247.5±2.5	45±1
シリカ砂+バサルト石 (30mm)	75.5	6.4	247.5±2.5	47±0.2
シリカ砂+バサルト石 (30mm)	69.6	2.9	180±2.5	20.45±2
シリカ砂+バサルト石 (30mm)	71.1	6.1	245±2.5	45.5±0.3
シリカ砂+バサルト石 (30mm)	89.1	3.4	185±5	21.6±1
シリカ砂+バサルト石 (30mm)	71.9	6.2	245±15	24.7±0.2
シリカ砂+バサルト石 (30mm)	69.5	3.2	165±5	15.05±2.6
シリカ砂+バサルト石 (30mm)	66.3	6.3	242.5±2.5	47±1
シリカ砂+バサルト石 (30mm)	74.2	5.6	232.5±2.5	38.5±0.5
シリカ砂+バサルト石 (30mm)	70.2	2.2	135±5	16.5±3.5
シリカ砂+バサルト石 (30mm)	83.7	4.0	195±5	24.5±3.5
シリカ砂+バサルト石 (50mm)	360.1	5.3	212.5±2.5	22.5±2.5
シリカ砂+バサルト石 (50mm)	330.7	6.5	225±25	29.9±1.2
シリカ砂+バサルト石 (20mm)	18.7	6.4	230±5	44.8±2
シリカ砂+バサルト石 (20mm)	19.9	1.4	105±5	13.75±3.8

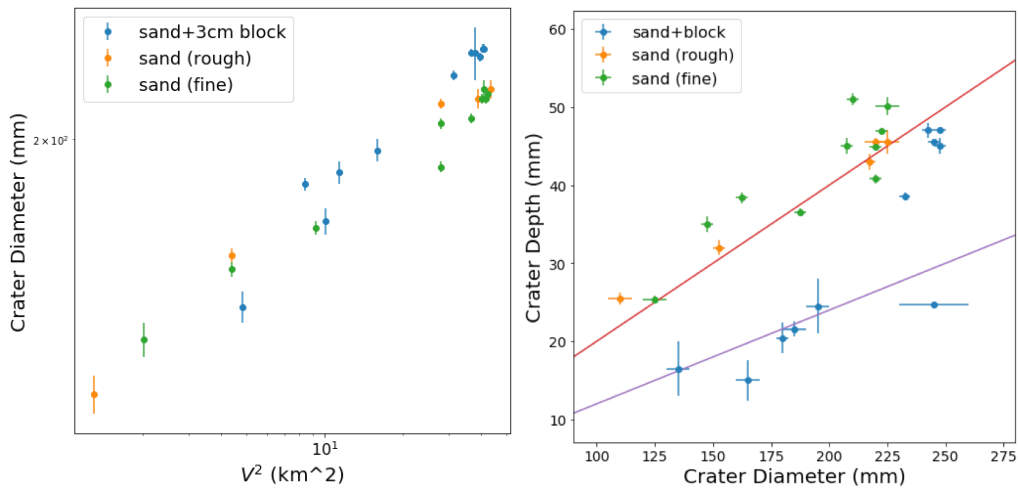


図2 (左図) 衝突エネルギーとクレーター直径の関係。ブロックの有無による大きな違いは見られない。(右図) クレーター直径と深さの関係。ブロックがある場合には低衝突エネルギーで浅いクレーターが形成され、衝突エネルギーが大きくなると砂ターゲットに近くなる。

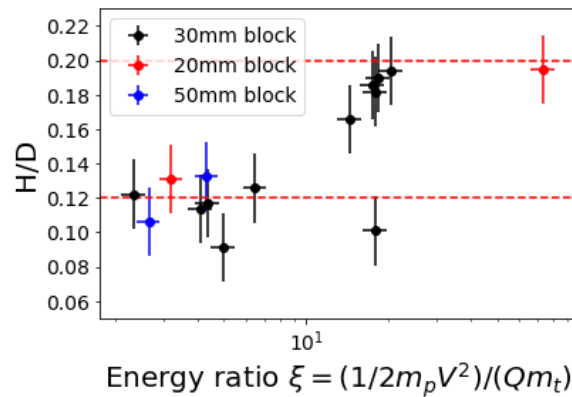


図3 規格化した衝突エネルギーと深さ直径比 (D/H) の関係。

【イジェクタの観察】

クレーター掘削の流線をレーザーシート法 (e.g., Cintala et al., 1999) により観測した。バサルト石の有無によるイジェクタ放出の違いを調べた (図4)。石がある場合には砂だけの場合よりも浅い放出角となった。これが、クレーターが浅くなる原因と考えられる。

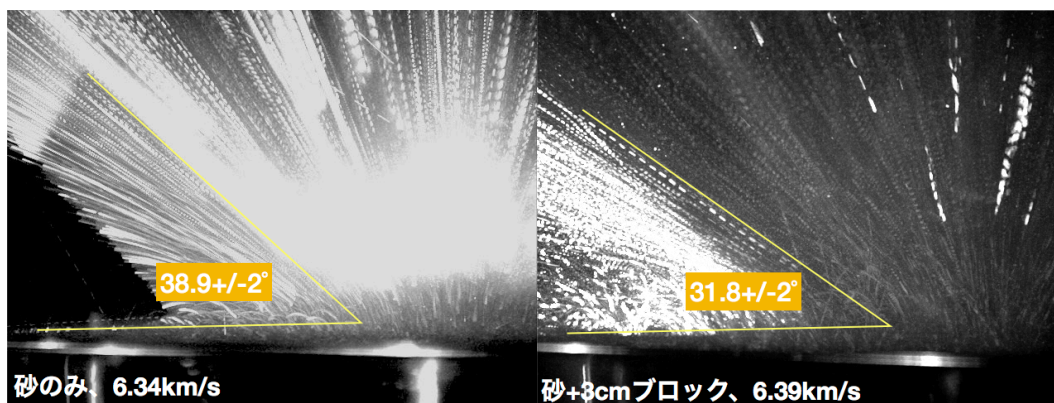


図4 イジェクタカーテンの観察。(左図) 砂のみのターゲット。(右図) バサルト石を中央に配したターゲット。イジェクタ角度が大きく異なることがわかる。

【まとめと今後の課題】

- クレーター直径： $\xi = (1/2m_p V^2)/(Qm_t) > 1$ の場合には、砂ターゲットと同等。
- 深さ直径比：破壊エネルギーと衝突エネルギーの比によって大きく変化する。 $\xi > 20$ のとき、深さ直径比は砂ターゲットと同等。 $\xi < 20$ の時には深さ直径比は砂の半分程度 (~0.1) になる。
- イジェクタ放出角度：岩塊衝突後のイジェクタ放出角は浅くなる。特に、岩塊が全て表面に露出している場合には非常に浅く、生成されるクレーターも浅くなる。

ラブルパイル小惑星の可能性があるリュグウや Bennu でもイトカワと類似した特徴を持つクレーターの発見が期待される。本研究の結果から、表面ボールドーによりクレーター掘削流が変化し、浅い角度でのイジェクタ放出が示唆された。これにより、岩塊のある表面では小さな浅いクレーターが多く存在する可能性が高い。実際に、イトカワ表層には小さな浅いクレーターが多く見られる (Hirata et al., 2009)。また、この遷移点から表面ボールドーの強度を推定できる可能性がある。

今後は、イジェクタ計測を高度化 (イジェクタ速度分布解析) し、掘削流について詳しく調べたいと考えている。さらに、SCI クレーターの予測を行い、ONC・DCAM 観測と比較し、本研究の評価を行いたい。