

岩塊衝突後のクレーター形成：リュウグウへの応用

巽瑛理（東大）、杉田精司（東大）、長勇一郎（東大） 長谷川直（JAXA）

1. はじめに

2018年6月に小惑星探査機はやぶさ2がC型小惑星リュウグウに到着し、観測を開始した。ONCの観測により、リュウグウがイトカワの倍程度の岩塊密度を持つことが明らかになった（Sugita et al., 2019）。リュウグウやイトカワといったラブルパイル天体上では岩塊に衝突したのちにクレーターを形成することが頻繁に起こっていると考えられる。Tatsumi and Sugita (2018)で衝突エネルギーが小さいときにはクレーター形成効率が低下するアーマリング効果が見られたことが報告されている。クレーター形成効率を把握することはクレーター密度から見積もられる表面年代を制約するために非常に重要である。また、リュウグウを構成すると考えられている炭素質隕石様の物質は引張強度が石質隕石に比べて小さいことが知られているにも関わらず、リュウグウの岩塊サイズが大きく、衝突に対して強い強度をもつことが示唆される。本研究では多孔質な岩塊衝突後のクレーター形成メカニズムを解明することを目的とし、さらに実際の小惑星表面に適用することによって小惑星の機械的性質を読み解くことを目標とする。

2. 実験手法

ISAS 所有の縦型2段式軽ガス銃を用いたクレーター形成実験を行った。岩塊衝突後のクレーター形成を模擬するために砂地に岩塊（~3cm）を半分埋没したターゲットを用いた（図1）。岩塊にポリカ弾丸が衝突するようにターゲットを配置し、形成されたクレーター直径および深さを計測した。昨年までの実験で玄武岩岩塊を用いた実験を行ってきたが、本年度は炭素質コンドライトの多孔質性と低密度を模擬した石炭をターゲット岩塊とした。玄武岩と石炭の機械的性質を表1に示す。Davis and Ryan(1990)より、圧縮強度が衝突破壊強度に比例することが知られていることから、石炭の衝突破壊強度は玄武岩の1/10程度と予想される。

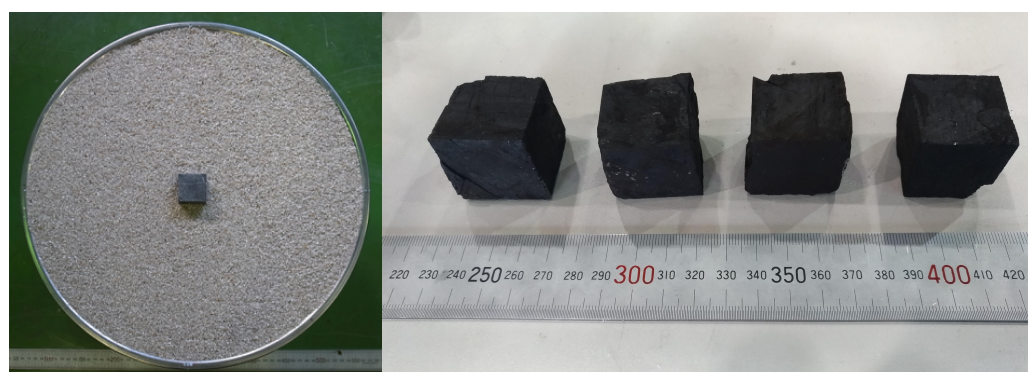


図1 (a) ターゲット（砂+ブロック）、(b) 石炭ブロック（3cm）

表1 石炭と玄武岩の機械的性質

	Coal	Basalt ⁽³⁾
Young's modules E (Gpa)	2.2-4.3 ⁽¹⁾	78 +/- 19
Poisson's ratio ν	0.2-0.3 ⁽¹⁾	0.25 +/- 0.05
Compressive strength (Mpa)	10-35 ⁽¹⁾	266 +/- 98
Tensile strength (Mpa)	0.5-1 ⁽²⁾	14.5 +/- 3.3

(1 Medhurst and Brown (1998), (2 Pomeroy (1956), (3 Schultz (1995)

3. 実験結果

3.1 クレーター形態

クレーター直径と深さを計測した結果を表2にまとめる。クレーター直径は砂にできるクレーター直径と大きく変わらない。一方で、クレーター深さ直径の関係は砂と異なる。特に、低エネルギーで形成されたクレーターは深さが非常に浅くなる。圧縮強度が石炭と玄武岩で桁で異なるにも関わらず、深さ直径の関係は同等であることがわかった。このことから、衝突エネルギーが玄武岩と異なるメカニズムで分散されていることが示唆される。

3.2 岩塊破片質量分布

クレーター形成とともに生成した岩塊破片の質量分布を計測した。玄武岩ブロックと石炭ブロックの破片質量の比較を図3に、衝突速度の違う場合の破片質量の比較を図4に示す。石炭ブロックでは玄武岩ブロックと比べて小さな破片が大量に生成した。小さな破片への破壊エネルギーおよび小さな破片の運動エネルギーにより衝突エネルギーが分散されている可能性がある。また、石炭ブロックがターゲットの場合にはクレーター表面への細かい粒子の付着により表面が黒くなる現象が見られた（図5）。

表2 実験結果（色付けしたものが本年度得られたデータ）

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	-	5.0	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
シリカ砂+石炭 (30mm)	37.7	2.7	165±5	15.6±1
シリカ砂+石炭 (30mm)	35.1	2.9	175±5	24.0±5
シリカ砂+石炭 (30mm)	38.4	6.8	250±5	48.2±2.1
シリカ砂+石炭 (30mm)	32.6	6.1	235±5	38.6±1.9

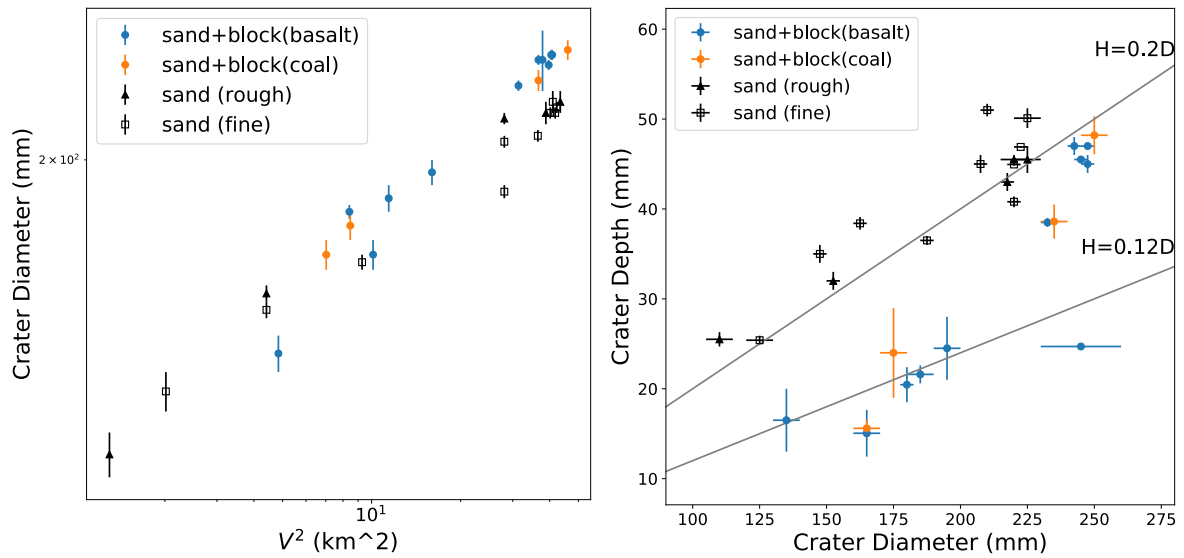


図2 (左) 弾丸エネルギーとクレーター直径。(右) クレーター直径とクレーター深さ。

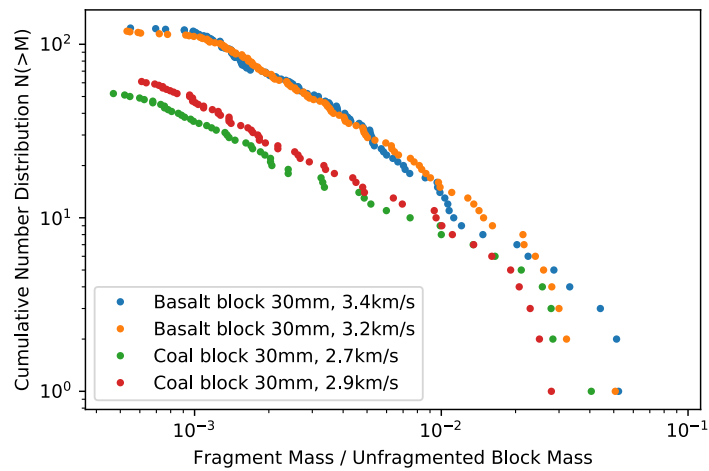


図3 岩塊破片質量分布（破壊前のブロック質量で規格化している）。玄武岩ブロックと石炭ブロックを比較した。石炭ブロックは大部分が小さく回収されていないことがわかる。

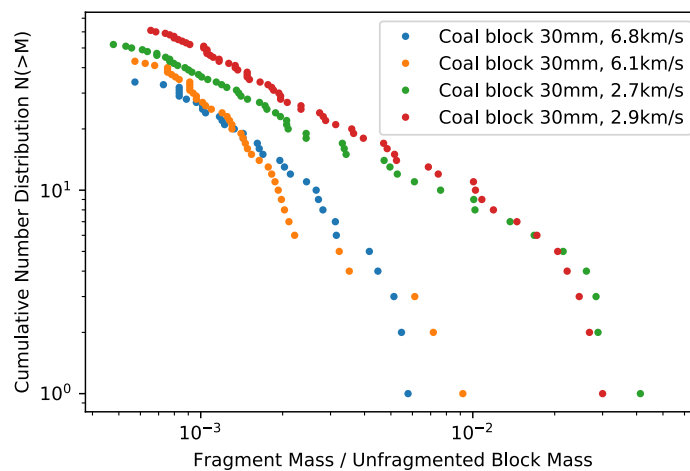


図3 岩塊破片質量分布（破壊前のブロック質量で規格化している）。衝突速度が~6km/sと~3km/sを比較した。速度が大きい時にはより急な質量分布になっていることがわかる。

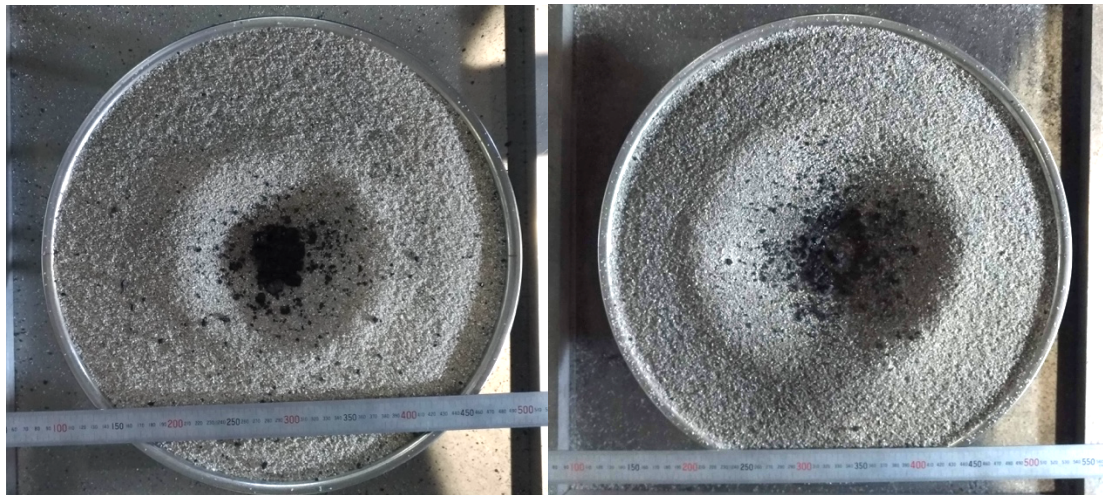


図5 衝突速度 2.9km/s の時にできたクレーター（左）と衝突速度 6.1km/s の時にできたクレーター（右）

4. 議論とリュウグウへの応用

4.1 岩塊衝突後のクレーター形成

弾丸運動エネルギーが岩塊破壊エネルギーよりも大きい場合には、岩塊衝突によるクレーター直径の減衰は Tatsumi and Sugita(2018)同様観察されたが、10%程度の変化に過ぎない。一方で、クレーター深さ直径比は2倍程度変化することがわかった。石炭は圧縮強度が玄武岩の1/10程度で脆いにも関わらず、玄武岩と同様な傾向を見せた。また、石炭は非常に細かく破碎されるため、岩塊破片の運動エネルギーによって弾丸の運動エネルギーが発散されている可能性がある。

4.2 リュウグウへの応用

リュウグウではクレーターが大きいほどクレーターの深さ直径比が大きいことが観測された(Cho et al, 2018)。この傾向はイトカワでも観測されている。この観測事実はクレーター形成時に本実験結果から予想される岩塊衝突により浅いクレーターができたという解釈と整合的である。また、多孔質で低密度に見える素材であってもアーマリングによるクレーター深さの変化が見られるという実験結果からもリュウグウでもアーマリングの効果により深さ直径比の変化が見えると考えられる。特に、Small Carry-on Impactorでも岩塊に衝突した場合にはアーマリングによる浅いクレーターが形成される可能性がある。

参考文献

Sugita, S., et al. "The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes." *Science* (2019): eaaw0422.

Tatsumi, Eri, and Seiji Sugita. "Cratering efficiency on coarse-grain targets: Implications for the dynamical evolution of asteroid 25143 Itokawa." *Icarus* 300 (2018): 227-248.

Davis, Donald R., and Eileen V. Ryan. "On collisional disruption: Experimental results and scaling laws." *Icarus* 83.1 (1990): 156-182.

Cho, Y., et al. "Distribution and morphology of craters on asteroid Ryugu." *AGU Fall Meeting Abstracts*. 2018.