

# 衝突によって放出される粉体のパターン：サイズ分布を持つ粒子によって 構成される標的の場合

門野敏彦<sup>1</sup>, 末次竜<sup>1</sup>, 鈴木絢子, 寫生有理<sup>2</sup>, 長谷川直<sup>2</sup>

<sup>1</sup>産業医科大学, <sup>2</sup>宇宙科学研究所

## 1. はじめに

月面における衝突クレーター周辺の明るい模様「光条」(レイ)形成についてが一番大きな問題、「なぜ衝突クレーターから飛び出した物質は一様には降り積もらず非一様に放射状にまき散らされるのか」についての研究は、これまでほとんどなされていない。数少ない例として、超高速衝突によって発生する蒸気が乱流状態になり、それにエジェクタが巻き込まれて模様(非一様な状態)ができるという説(Andrews 1977)、既存のクレーターによって衝撃波や掘削流が乱され、飛び出すエジェクタの分布が非一様になるという説(Shuvalov 2012)、エジェクタカーテン中でのパターン形成(Kadono et al. 2015; 2019; 2020)、衝突地点の地形の影響(Sabuwala et al. 2018)、などがあるが、まだ非一様さの原因の解明には至っていないようである。

われわれはこれまでにエジェクタカーテン中でのパターン形成という観点から、2017年度に同一サイズの粒子からなる標的(ガラスビーズ 50, 100, 300  $\mu\text{m}$ , およびシリカ砂 70  $\mu\text{m}$ ; Kadono et al. 2020)、2018年度に2種類のサイズを混合した標的(ガラスビーズ, 100  $\mu\text{m}$ +1 mm, 100  $\mu\text{m}$ +4mm; Kadono et al. 2019)を使って、エジェクタカーテン中にどのようなパターンが生じるかを調べてきた。今年度、8種類の異なるサイズのガラスビーズを使って疑似べき乗サイズ分布を持つ標的を作成して衝突実験を行い、生じるパターンを調べた。

## 2. 実験

8種類のサイズの異なるガラスビーズをべき乗分布に近似して混合した。混合する割合は表1に50  $\mu\text{m}$ 粒子の総質量で規格化した相対質量として示してある。べき乗分布の傾き $\alpha$ (積算個数  $N(> d) \sim d^{-\alpha}$ ,  $d$ は粒子サイズ)を1.5, 2.0, 2.2, 2.5, 最大粒子サイズDを4, 2, 1, 0.85 mmとした。JAXA 宇宙科学研究所の縦型二段式水素銃を用いて、直径4.8 mmのポリカーボネイト球をプロジェクティルとし、速度およそ2.7 km/sで疑似べき乗分布を持つガラスビーズ混合標的に衝突させた。実験を行った標的の条件は表2である。エジェクタが放出される様子をハイスピードカメラ(SHIMADZU HPV-X)によって撮影した。

表1. ガラスビーズの混合割合.  $\alpha$  の値は標的構成粒子のサイズ分布を積算個数として表した場合の指数. Cum と Diff はそれぞれ, そのサイズより小さい粒子の総質量および各粒子サイズでの総質量で,  $50 \mu\text{m}$  粒子の総質量で規格化されている.

Size $\mu\text{m}$	規格化 サイズ	$\alpha = 1.5$		2		2.2		2.5	
		Cum.	Diff.	Cum.	Diff.	Cum.	Diff.	Cum.	Diff.
50	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100	2	2.83	1.83	2	1	1.74	0.74	1.41	0.41
300	6	14.7	11.9	6	4	4.19	2.45	2.45	1.04
600	12	41.6	26.9	12	6	7.30	3.11	3.46	1.01
850	17	70.1	28.5	17	5	9.65	2.35	4.12	0.66
1000	20	89.4	19.4	20	3	11.0	1.34	4.47	0.35
2000	40	253.0	163.5	40	20	19.1	8.14	6.32	1.85
4000	80	715.5	462.6	80	40	33.3	14.2	8.94	2.62

表2: 標的條件. サイズ分布の傾き  $\alpha$  (横軸) と最大粒子サイズ (mm, 縦軸). サイズ分布の傾きは積算個数分布での値である. ○が付いた条件の標的を用いて衝突実験を行った.

	1.5	2.0	2.2	2.5
4		○	○	○
2				○
1				○
0.85	○	○		○

### 3. 結果

衝突からおよそ 28 ms 後のエジェクタカーテンの様子を図1に示す. それぞれの標的条件は, 左上 (#538): べき乗分布の傾き  $\alpha = 2.0$ , 最大粒子サイズ  $D = 4 \text{ mm}$ , 右上 (#532):  $\alpha = 2.0$ , 最大粒子サイズ  $D = 0.85 \text{ mm}$ , 左下 (#531):  $\alpha = 2.5$ , 最大粒子サイズ  $D = 4 \text{ mm}$ , 右下 (#533):  $\alpha = 2.5$ , 最大粒子サイズ  $D = 0.85 \text{ mm}$ , である.

$D = 4 \text{ mm}$  の場合, サイズ分布の傾きが小さいときには (#538: 左上), 最大粒子の質量割合が圧倒的に大きいため (表1) 最大粒子に特徴的なパターンが見られるが, 傾きが大きく一桁以上サイズが異なる粒子の質量の割合が同程度の時には, #531 (左下) のようなコントラ

ストが強く非一様性の高いパターンが生じるようである。これに対して、構成粒子サイズの範囲が一桁程度であれば ( $D=0.85\text{ mm}$ )、サイズ分布の傾きによらず、#532 (右上) と#533 (右下) のように、そのサイズ範囲に特徴的なパターン (#532 と#533 の場合では  $100\text{ }\mu\text{ m}$  のみの場合と同様なパターン) が現れる。

まとめると、エジェクタカーテン中には、もっとも質量の割合が大きいサイズ範囲に特徴的なパターンが現れるが、一桁以上のサイズ範囲で同程度の質量があるとコントラストの大きな非一様性の高いパターンになるようである。

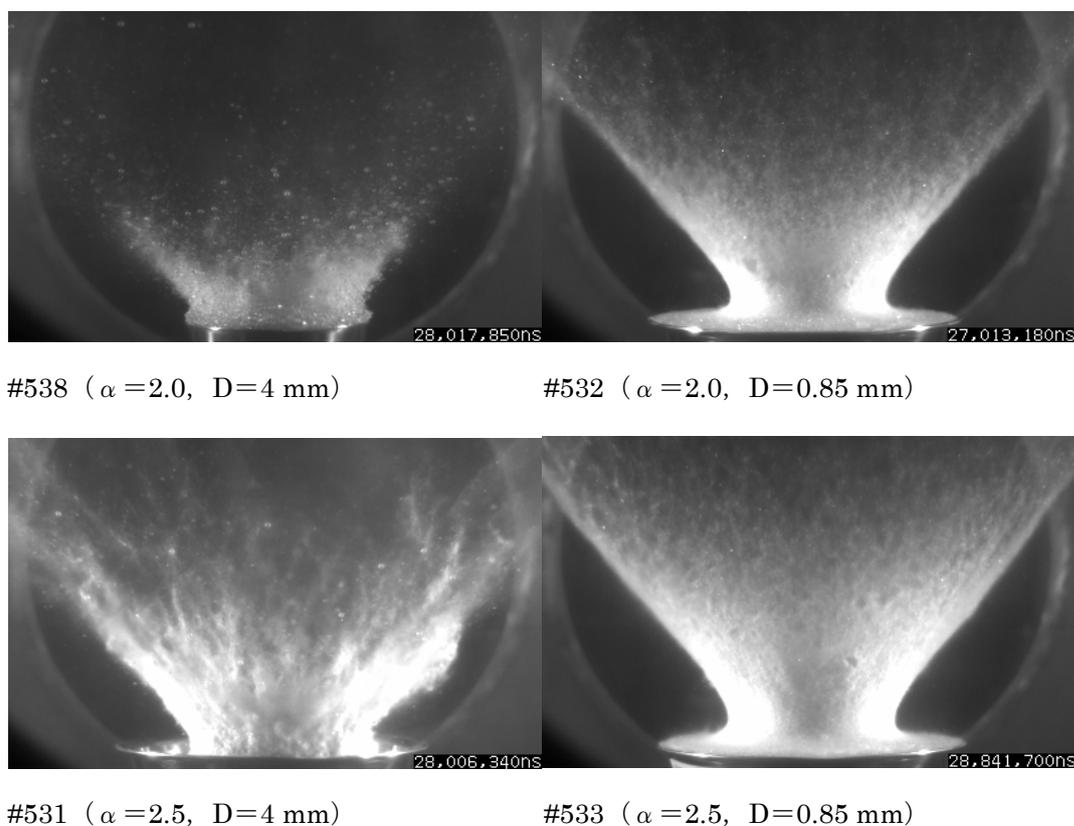


図1 高速カメラで撮影されたエジェクタカーテンの様子。弾丸は上方から垂直に衝突

月のレゴリスは傾き  $\alpha$  が大きいので、最小サイズのパターンが現れるはずである。すなわち、これまでの実験条件 ( $\sim 50\text{--}100\text{ }\mu\text{ m}$ ) での結果が適用できそうである。また、「はやぶさ2」での宇宙衝突実験で観測されたエジェクタカーテンのパターンはコントラストが大きい。これはカーテン中の粒子が一桁以上異なる2種類のサイズを持つ粒子の混合であることを示唆している。

#### 4. まとめと今後

疑似べき乗サイズ分布をもつ粒子で構成される標的を用いた衝突実験を行い、エジェクタカーテンのパターンを調べた。今後は、べき乗分布だけでなく、指数分布など特徴的なサイズを持つような粒子で構成される標的を使った実験。さらにパターンの定量解析、数値計算との比較を行い、パターン形成機構の理解を深めたい。

#### (参考文献)

- R. J. Andrews, *Impact and Explosion Cratering*. Pergamon Press (New York), 1089-1100, Roddy, D. J., Pepin, R. O., and Merrill, R. B. (eds.) (1977).
- T. Kadono, et al., *Icarus*, 250, 215-221, doi: 10.1016/j.icarus.2014.11.030, (2015).
- T. Kadono, et al., *Astrophys. J. Lett.*, 880, L30, <http://doi.org/10.3847/2041-8213/ab303f>, (2019).
- T. Kadono, et al., *Icarus*, 339, 113590, doi: 10.1016/j.icarus.2019.113590, (2020).
- M. Sabuwala et al., *Phys. Rev. Lett.*, 120, 264501, <http://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.264501> (2018).
- V. Shuvalov, *Meteo. Planet. Sci.* 47, 262-267, 10.1111/j.1945-5100.2011.01324.x. (2012).