

# 放出物カーテン内でのパターン形成

## -クラスター分析による粒子クラスターの追跡と解析モデルの作成-

中澤風音<sup>1</sup>, 奥住聡<sup>1</sup>, 黒澤耕介<sup>2</sup>, 長谷川直<sup>3</sup>

1 東京工業大学, 2 千葉工業大学, 3 宇宙科学研究所

**背景**：惑星科学において衝突現象は普遍的である。このうちクレーター形成を伴う衝突では、衝突によって放出された物質がクレーター外縁に放出物カーテンと呼ばれる逆円錐状の構造を形成する。この放出物カーテンには不均質な網状の粒子パターンが見られる(e.g. Fig. 1)。このような不均質は、若いクレーター周辺で観測されるクレーターレイの形成に関係している可能性があり(e.g. Kadono et al. 2015; Minton et al. 2019)、不均質が物質放出のどのタイミングで・どのようにして形成されるのかを解明することは、クレーター周辺環境の理解において重要である。本研究では縦型二段式軽ガス銃を用いた室内実験と N 体計算コード REBOUND(Rein & Liu 2012)を用いた数値計算の双方から放出物カーテン内での粒子パターン形成タイミング・形成メカニズムを検証した。そしてパターン形成を定量的に追跡するための解析モデルを作成した。

**手法・モデル**：室内実験では、宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いて形成初期の放出物カーテンの撮影実験を実施した。粒径 50  $\mu\text{m}$  のジルコンビーズを標的として、4.8 mm ポリカーボネイト弾丸を 5 pa に減圧された真空チャンバー内で 6.4 km/s で衝突させ、形成する放出物カーテンを高速度ビデオカメラによって 1  $\mu\text{s}/\text{frame}$  で 128  $\mu\text{s}$  撮影した。数値計算では非弾性衝突と系の水平方向への膨張を取り入れた多粒子シミュレーションにより、粒子パターンの再現を行った。形成したパターンをクラスター分析によって粒子の塊(クラスター)にグルーピングし、クラスターの速度・サイズを追跡することでパターンの進化を定量的に追跡した。解析モデルでも数値計算と同様にクラスターに着目した。完全非弾性衝突によるクラスター成長が、二次元平面内での衝突時間から計算されるタイムスケールで起きると仮定し、さらに系の膨張に伴う進化の停止効果を加えたモデルによってパターン進化の記述を試みた。

**結果**：室内実験により、パターンはカーテン形成から~10 - 100  $\mu\text{s}$  というごく短時間で形成されることを明らかにした(Fig. 1)。この時間はカーテン径(~10  $\mu\text{m}$ )をカーテン端の膨張速度(~100-1000 m/s)で割って得られるカーテン膨張のタイムスケールに対応していると結論づけた。数値計算ではクラスターの定量的な追跡から、パターン形成が多くの非弾性衝突を伴うクラスター形成の段階と、系の膨張に伴う幾何学的なパターン進化の 2 段階で起きることを明らかにした(Fig. 2)。成長段階が変化する時刻は室内実験で導入したカーテン

膨張のタイムスケールに一致することを示した。解析モデルは数値計算結果で得られる最終的なクラスター速度・サイズを再現した(Fig. 2)。解析モデルから導かれるパターン形成のタイムスケールもカーテン膨張のタイムスケールに一致した。

室内実験・数値計算・解析モデルから我々は、カーテンのパターンは非弾性衝突と系の膨張による幾何学的効果で形成され、非弾性衝突によるパターン形成はカーテン膨張のタイムスケールで起きると結論づけた。

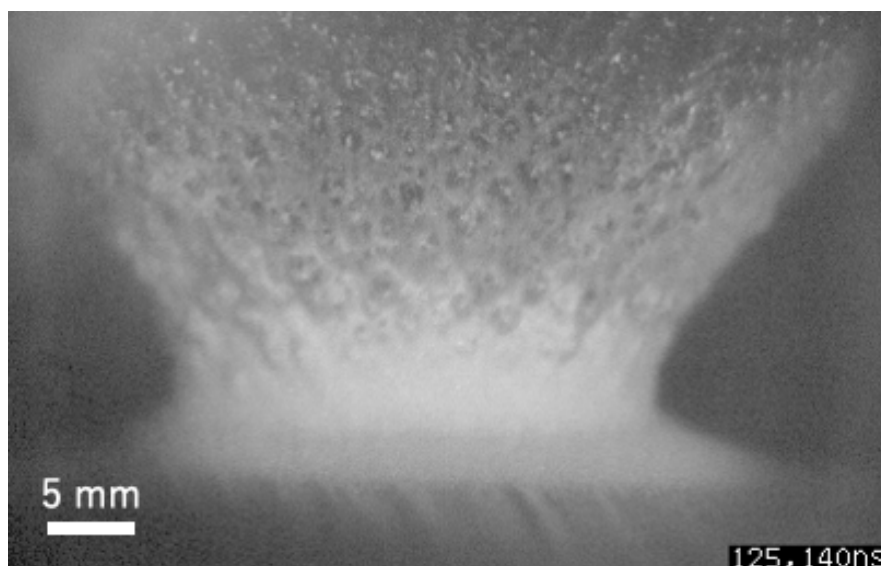


Fig.1 本研究で撮影された放出物カーテンの一例。数  $10 \mu\text{s}$  で網状のパターンが形成する。

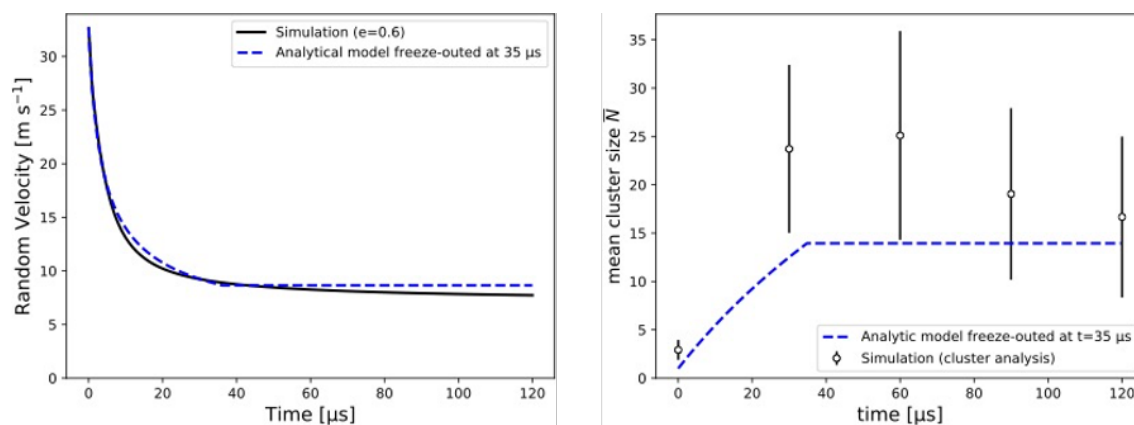


Fig.2 パターンを構成するクラスターの速度進化(左)及びサイズ進化(右)。黒線及び誤差付き円は数値計算で得られた値、青線は解析モデルを表す。約  $30 \mu\text{s}$  までには多くの非弾性衝突に伴うパターンの急激な進化が起き、その後幾何学的膨張によって衝突が減少することでパターンは緩やかな進化へと遷移する。