

# 氷ダスト天体の衝突進化に関する実験的研究

○ 鳶生有理<sup>1</sup>, 荒川政彦<sup>2</sup>

1. 名古屋大学環境学研究科 2. 神戸大学理学研究科

## 研究背景

原始太陽系星雲での氷天体の成長は氷ダストの衝突付着と氷微惑星の衝突破壊・再集積によって起こったと考えられている。ダストの中心星落下によってmサイズのダストの衝突速度は最大50m/sとなるため、衝突破壊によって成長が阻害されると予想されてきた。分子間力モデルによる数値計算から0.1 $\mu$ mの氷粒子からなる氷ダスト集合体は破壊を免れ正味の付着成長が可能であることが示されたが[1], より現実的には氷粒子の粒径成長や焼結度を考慮する必要がある。一方、氷微惑星は衝突破壊と再集積によって成長するため、その衝突破壊強度 $Q^*$ が重要となる。氷の $Q^*$ は充填率 $f > 0.45$ で充填率の減少とともに増加することがわかっているが[2], 彗星核の充填率を考慮するとより小さい充填率での $Q^*$ を知る必要がある。そこで本研究では焼結した氷ダスト集合体の付着条件と低充填率氷微惑星の $Q^*$ を調べるために、氷ダスト球の等サイズ・等充填率衝突実験とサイズ・充填率の異なる衝突破壊実験を行った。

## 実験方法

実験は北大低温研の大型低温室（室温-10, -15 $^{\circ}$ C）で行った。微細水滴を液体窒素内に噴霧し、初期平均粒径28 $\mu$ mの氷微粒子を作成した。氷ダスト球は適量の氷微粒子を球成形治具に入れ圧縮して作成した。等サイズ・等充填率衝突実験では、氷ダスト球は直径3cm,  $f=0.20-0.56$ （質量2.6-7.2g）, 焼結時間15分-2日間とした。弾丸の加速には自由落下と横置き軽ガス銃を用い、衝突速度 $v_i=0.4-90$ m/s, インパクトパラメータ $b/D < 0.24$ とした。サイズの異なる衝突破壊実験では、標的氷ダスト球は直径6cm,  $f=0.3-0.6$ （質量32.1-62.4g）, 焼結時間1時間-1ヶ月間とした。弾丸は直径10-15mmの $f=0.7$ の氷ダストと氷（質量0.4, 1.1, 1.6g）を用い、弾丸／標的のサイズ差 $L_p/L_t=1/4-1/6$ とした。弾丸の加速は縦型軽ガス銃, バネ銃, 自由落下を用いて $v_i=3-490$ m/sで正面衝突させた。両方の実験において、衝突の様子は最大10,000fpsの高速度ビデオカメラで撮影して反発係数と破片速度分布を調べ、緩衝材を用いて破片を回収し破片質量分布を調べた。

## 結果

等サイズ・等充填率衝突実験の結果、跳ね返り、付着、反発なし、片方だけ破壊、両方とも破壊が観察され、付着が起こる条件は $v_i < 4-10$ m/s,  $f < 0.3-0.4$ であることがわかった（図1）。この破壊速度は分子間力モデルから予想される焼結のない粒径100 $\mu$ mの場合の正味成長衝突速度0.1m/sより大きく、焼結によって破壊され難くなったことがわかった。 $v_i=0.4-4$ m/sの範囲で反発係数 $e$ は充填率の減少とともに減少し、氷のデータを含む以下の経験式を得た： $e=0.9f^{10.5\log f}$ 。衝突点の接触痕の幅は衝突速度の増加と充填率の減少とともに増加することがわかった。また、 $f < 0.3$ では衝突点近傍が $f \sim 0.4$ まで圧密されることがわかった。

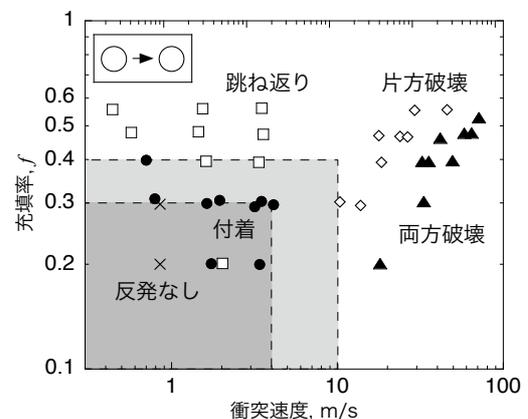


図1 等サイズ・等充填率衝突実験の結果。

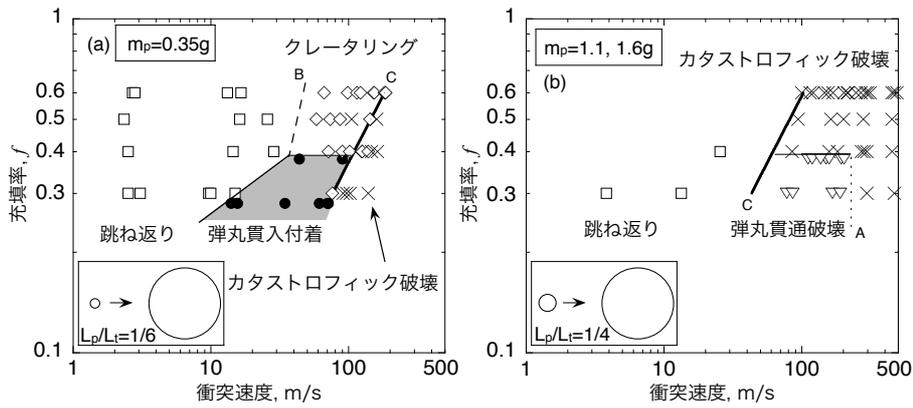


図2 サイズ・充填率の異なる衝突破壊実験の結果。

サイズ・充填率の異なる衝突破壊実験では、弾丸／標的サイズ差と衝突速度，充填率に依存して跳ね返り，クレータリング，弾丸貫入付着，カタストロフィック破壊，弾丸貫通破壊が観察された（図2）。特に， $L_p/L_t=1/6$ の場合， $f<0.4$ ， $v_i=10-90\text{m/s}$ の範囲で弾丸貫入付着が起こることがわかった。破片速度分布は，カタストロフィック破壊では反対半球が一定の最低破片速度となるが，弾丸貫通破壊では衝突反対点が最大破片速度となり，衝突方向に垂直な方向が最低破片速度になることがわかった。破片質量分布に関しては，エネルギー密度の増加と充填率の減少とともに規格化最大破片質量は減少し，標的質量の0.01%以下の破片総質量は増加した。この結果から衝突破壊強度 $Q^*$ を求めた結果， $f=0.3-0.6$ の水ダスト球の $Q^*$ は充填率の減少とともに減少することがわかった。これは $f=0.45-0.9$ の雪の結果[2]と対照的であった。この結果は， $Q^*$ の圧力減衰率，焼結度，弾丸／標的のサイズ差依存性が競合したためだと解釈した。

議論

本実験結果から，等サイズ・等充填率衝突の場合は原始太陽系星雲での最大衝突速度50m/sとなるmサイズを超えて成長できないことがわかった。一方， $L_p/L_t=1/6$ の場合のように，サイズ差と密度差があれば貫入付着による成長の可能性が示唆された。 $f<0.3$ の水ダスト球は破壊寸前の衝突を複数回経験することで，水ダスト球の表面に圧密層が形成され，その後の破壊によって圧密破片が放出されると考えられる。以上を踏まえ，水ダスト天体の衝突成長シナリオを構築した（図3）。 $1\mu\text{m}$ の水ダストは等サイズ衝突による付着成長によって0.1mまで秩序成長するが，その後破壊が起こって圧密破片が形成される。一方，生き残った0.1mの水ダスト玉が圧密破片を捕獲して成長し，サイズの差が大きくなるにつれて暴走成長となって氷微惑星が形成されると考えられる。今後は水ダスト天体の充填率進化の解明と合体成長の数値計算による検証が必要である。

参考文献

[1] Wada et al., 2009. Astrophysical Journal 702, 1490–1501. [2] Arakawa et al., 2002. Icarus 158, 516–531.

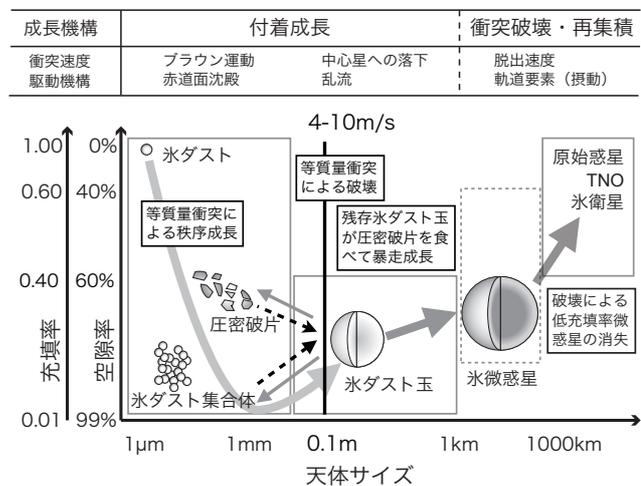


図3 水ダスト天体の衝突成長シナリオ。