

空隙の大きな始原天体が捕獲する 外来ダスト粒子の貫入深さ

○岡本 尚也¹, 中村 昭子¹, 長谷川 直², 黒澤 耕介², 池崎 克俊³, 土山 明⁴

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

³ 大阪大学大学院理学研究科, ⁴ 京都大学大学院理学研究科

はじめに

太陽系始原天体は形成初期には非常に大きな空隙率をもっていたとされている。微惑星ではバルク密度 0.1 kg/m^3 以下、空隙率にして99%を超えると考えられている[1]。この天体が衝突合体を繰り返して空隙率を失いながら、現在の天体へ成長したと思われる。一方、現在の観測によると、彗星では空隙率86%を持つ天体まで存在していることが分かっている[2]。よって太陽系形成初期の間に始原天体は非常に空隙率が高かったと考えられ、空隙率の高い衝突現象が重要となってくる。彗星は太陽系外側の領域で形成したと考えられるが、近年の研究から太陽近傍で生成された物質を含むことが分かってきている。分光観測によると長周期彗星や木星族彗星に結晶質のシリケート(>1000 Kで生成)が存在することが示唆されている[3]。また、NASAのスターダスト計画でWild2彗星のコマから回収したダスト粒子を分析したところ、高温生成物であるChondrule-like, CAI-likeのダスト粒子が見ついている[4,5]。これらよりある天体がその成長領域とは異なる領域で生成されたものを何らかのプロセスにより獲得したことが考えられる。そのような外来ダストを獲得した時期は大きく2つ考えられる。一つはダストが微惑星の構成要素として集まった場合である。すなわち、ダストが星雲ガス内で合体・衝突を繰り返して成長し、天体の直接の材料物質となった場合である。もう一つは、始原的な小天体が形成された後、その天体がダストを掃き集めた場合である。すなわちガス円盤が晴れ上がりデブリ円盤内を運行する始原天体がダストを掃き集める場合である。そこで本研究では後者に着目し、高い空隙率を持つ始原天体に外来ダストが衝突したとき、天体表面からどの程度潜り込むことができるのかを明らかにするため、高空隙率焼結体への高速度衝突実験を行った。

実験方法

ターゲットには空隙率の異なる3種類の焼結体を用意した。空隙率94%と空隙率87%のターゲットは粒径 $55\mu\text{m}$ のソーダライムホウケイ酸を組成とした中空ガラスビーズを焼結させて作った。一方、空隙率80%のターゲットは粒径 $5\mu\text{m}$ の低アルカリガラスを組成としたガラスビーズを焼結させて作った。弾丸にはチタン、アルミニウム、SUSから成る直径1mm

と3.2mmの球を用いた。これら金属弾丸に加え、直径3.2mm×高さ2.0mmの円柱形の玄武岩も弾丸に用いた。実験はJAXA/ISASの二段式軽ガス銃を使用し、衝突速度は1.6-7.2km/sで行った。図1は実験配置図である。ターゲットをチャンバーにセットし、ハイスピードカメラを用いバックライトで撮影を行った。

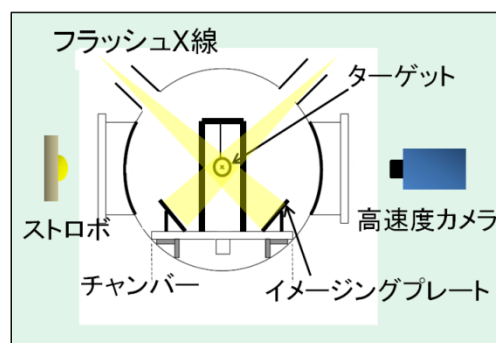


図1 弾丸方向からみた実験配置図

結果

京都大学のCT撮像装置を用いてX線透過画像を取得した。画像よりトラックには輝度の明るい空洞領域と、輝度の暗い周りよりも密度が高い部分が観察された。空隙率94%のターゲットにチタン球を衝突させた結果は、衝突速度が2.6km/sと4.0km/sの場合は弾丸の直径程度の直径を持つトラックとなった(ニンジン型)。一方、衝突速度が6.7km/sの場合は衝突点近くに大きなバルブを持ち、トラック後半は尾が伸びたようになった(カブ型)[6]。これらのトラック形状は低密度物質であるエアロジェルへの貫入実験でもみられている[7]。貫入の深さは衝突速度が増すほど短くなっている。また終端粒子も衝突速度が増すほど壊れているのが観察された。

図2は弾丸の引っ張り強度で規格化した初期発生動圧と最大破片質量割合の関係である。それぞれ弾丸の引っ張り強度 Y_{tp} 、ターゲットの密度 ρ_t 、衝突速度 v_0 、初期の弾丸質量 m_p 、終端に残った粒子の質量 m_L を表す。弾丸の変形は4-7倍程度の初期発生動圧で開始している。変形した弾丸のみでフィッティングを行ったところ、以下の経験式を得た。

$$\frac{m_L}{m_p} = 10^{1.5 \pm 0.7} \times \left(\frac{\rho_t v_0^2}{Y_{tp}} \right)^{-1.5 \pm 0.5} \quad (1)$$

次に弾丸の潜り込み深さを予測できる最大破片貫入モデルを以下のように考えた。弾丸がターゲットに衝突した点で破壊が起こり小破片になると考える。それらの破片がそれぞれターゲットを貫入し、最大破片の貫入深さがトラックの深さとなるというモデルである。破片がターゲットを貫入するときの運動方程式は式(2)に従うとする。

$$m_L \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2} C_d \rho_t S_L v^2 - S_L Y_c \quad (2)$$

それぞれ、 C_d が抵抗係数、 S_L が弾丸の断面積、 Y_c がターゲットの圧縮強度を表す。抵抗係数 C_d はフラッシュX線で得られた画像を解析し、 1.1 ± 0.3 と決定した。図3は以上のモデルで計算を行った貫入深さと実験結果の貫入深さを比較したグラフである。グラフより、実験結果とモデルの貫入深さは同程度となっていて、最大破片貫入モデルで弾丸の潜り込み深さを説明することができた。

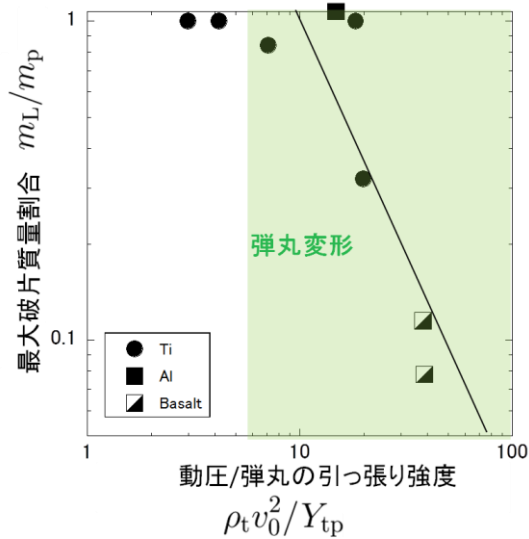


図2 弾丸強度で規格化した動圧と最大破片質量割合の関係

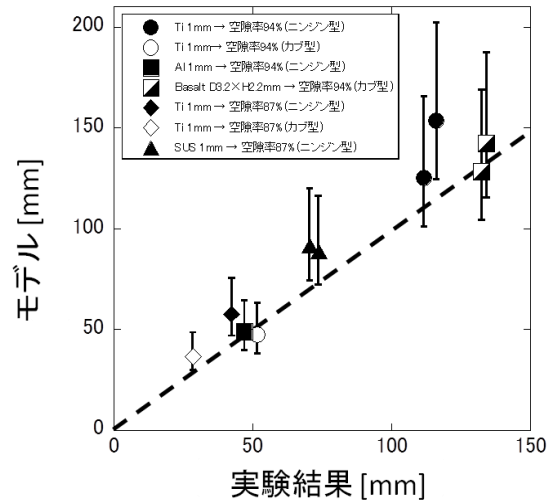


図3 実験結果と最大破片貫入モデルによる潜り込み深さの比較

議論

本研究で得た抵抗係数と最大破片貫入則、そして弾丸破壊の程度を考慮した以下の式、

$$\frac{D_L}{D} = \left(\frac{m_L}{m_p}\right)^{\frac{1}{3}} = \min\left(1, \left\{10^{1.5 \pm 0.7} \times \left(\frac{\rho_t v_0^2}{Y_{tp}}\right)^{-1.5 \pm 0.5}\right\}^{\frac{1}{3}}\right), \quad (3)$$

を用いて (D は初期の弾丸の直径、 D_L は最大破片の直径を表す)、高温生成物がカイパーベルト帯の氷天体の表面へやってきたときにどの程度潜り込むことができるのかを考える。ここでは以下の仮定をおく。高温生成物として、物性の良く分かっている玄武岩の値、すなわち密度 2700kg/m^3 、引っ張り強度 19.4MPa を用いた[8]。一方、氷天体の表層のバルク密度を $1600 \times (1-\phi)\text{kg/m}^3$ とした[2]。その表層の圧縮強度は乾いた雪層を考え $3.5 \times (1-\phi)^{4.4}\text{MPa}$ と仮定した[9]。 ϕ は天体のバルク空隙率を表す。弾丸の大きさに対して空隙の大きさは非常に小さいものとする。また、カイパーベルト帯の相対速度は $\sim 500\text{m/s}$ と考えられている[10]。そこで $100, 500, 1000\text{m/s}$ で衝突する場合を考えた。図4は以上の仮定を下に、天体の空隙率を弾丸直径で規格化した潜り込み深さの関係を表した図である。速度 100m/s 、 500m/s の衝突では弾丸は壊れずに天体に貫入するが、速度 1000m/s では破壊の域に達し、入り潜り込み深さは空隙率の低いところでは浅くなっている。空隙率 $\sim 90\%$ の天体では、潜り込み深さは弾丸直径の100倍程度となった。すなわち、衝突体がダストサイズであれば表面から数mmしか潜り込めないことを示し、ひとたびダストが表面に捕まえられても長い太陽系の中では失ってしまうかもしれない。しかし、衝突体がもっと大きなサイズであれば、天体内に捕獲されている可能性がある。

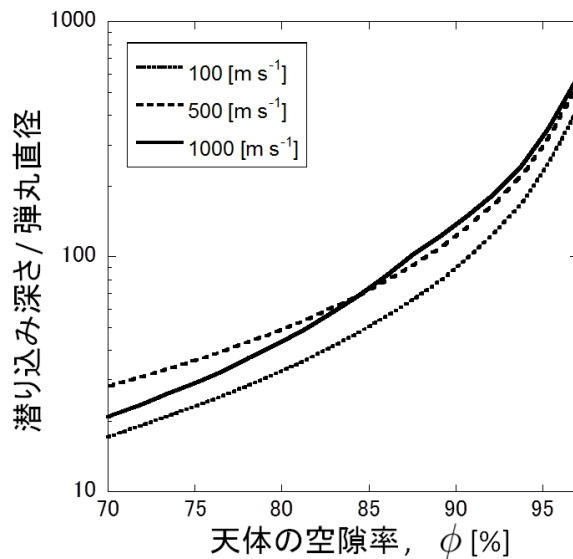


図 4 天体の空隙率と潜り込み深さの関係

まとめ

空隙率の高い天体へのダストが衝突したときにダストはどの程度潜り込むことができるのかを知るために、高空隙率ターゲット（80%, 87%, 94%）を作成して高速衝突実験を行った。衝突速度が速いほど弾丸は崩壊しトラックの長さは短くなった。潜り込み深さを予測する最大破片貫入モデルを考えたところ、このモデルで弾丸の潜り込み深さを説明することができた。この結果を用いて天体応用を考えたところ、玄武岩弾丸が空隙率90%の氷天体表面に衝突した場合には、弾丸直径の100倍程度潜り込むことが分かった。

参考文献

- [1] T. Suyama. et al., ApJ, 684, pp.1310-1322, 2008.
- [2] G. J. Consolmagno. et al., Chemie der Erde (Geochemistry) 68:1-29, 2008
- [3] D. Wooden. et al., Protostars and Planets V. Univ. of Arizona Press, Tuscon, pp. 815-833,2007.
- [4] D. Brownlee. et al., Science 314, pp. 1711-1716, 2006.
- [5] T. Nakamura., et al., Science 321, pp.1664-1667.
- [6] 岡本 尚也 他, フラッシュ X 線を用いた高空隙天体模擬体への弾丸貫入のその場観察, 平成 23 年度スペースプラズマ研究会・講演集, 46.
- [7] F. Horz. et al., Science 314, pp. 1716-1719, 2006.
- [8] A. M. Nakamura. et al., J.Geophys. Res. (Planets) 112, 2007.
- [9] M. Mellor., IAHS-AISH Publ. 114, 251-291, 1975.
- [10] P. Farinella. and D. Davis., Science 273, 938-941, 1996.