

## 鉄合金への衝突実験：鉄質天体のクレーター形状による軌道進化制約の可能性

○小川諒<sup>1</sup>, 中村昭子<sup>1</sup>, 長谷川直<sup>2</sup>

<sup>1</sup>神戸大学院理研究科, <sup>2</sup>宇宙科学研究所/JAXA

鉄隕石母天体と考えられる鉄質天体はほぼ全体が鉄ニッケル合金からなる天体とされ、分化天体の金属コアの名残として注目されている。鉄隕石の母天体は小さく直径が 20km 程度とされ(Mittlefehldt, et al., 1998)、さらにその形成は、普通コンドライトの母天体よりも 100-200 万年早い(Kleine et al., 2005; Baker et al., 2005; Bizzarro et al., 2005)。そのため、鉄隕石母天体は  $^{26}\text{Al}$ (半減期 72 万年)や  $^{60}\text{Fe}$ (半減期 260 万年)の短寿命放射性核種による加熱により形成されたと考えられている(Bottke et al., 2006)。しかし現在、16Psyche を含めた M 型小惑星は多くが小惑星帯に存在している。地球型惑星形成領域にあった小天体は、原始惑星の近接遭遇などに伴う重力作用で、その一部が小惑星帯へと運ばれたことがシミュレーションで示されている(Bottke et al., 2006)。つまり鉄質天体は、地球型惑星形成領域から小惑星帯へ移動し、その過程で表面温度の変化と衝突速度分布の変化を経験していると思われる。また、天体の衝突によって鉄質天体表面にはクレーターが形成されていると思われる。もしそのクレーター形状などに衝突直前の天体表面温度や衝突速度の影響が反映されているとすれば、クレーターを観測することで、鉄質天体が経てきた軌道進化を制約できる可能性がある。

本研究では、標的の温度を 298 K(地球型惑星系形成領域)と 150 K(小惑星帯)とし衝突実験及び衝突シミュレーションを行なった。衝突速度の影響も調べるため、衝突速度 0.8-7.0 km/s で衝突実験を行い、シミュレーションでは 25 km/s まで拡張し衝突を行なった。そしてクレーターの深さ直径を系統的に計測し、その結果から速度と温度のクレーター深さ直径比分布 への影響と軌道進化制約について議論する。

衝突実験には宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いた。標的には Gibeon 鉄隕石のブロックと立方体(一辺 40 mm, 50mm または 70 mm)の炭素鋼(SS400)を用い、かんらん岩, 玄武岩の円柱弾丸(直径: 3.15 mm, 高さ: 2.0 mm)と SUS, Cu, Al, アルミナの球弾丸(直径: 1.0, 3.2 mm)を速度 1.9-7.0 km/s で衝突させた。そして SUS の円柱弾丸(直径: 15 mm, 高さ: 15 mm)の低速衝突(0.8-1.2 km/s)も行い、これについては神戸大学の縦型一段式火薬銃を用いた。標的の冷却には液体窒素を用い、160-130 K の範囲で温度を維持し実験を行なった。

実験では 7 km/s 以上で行えないため、7 km/s 以上の高速衝突については衝撃物理コードである iSALE を用いシミュレーションを行なった。Gibeon 鉄隕石の状態方程式は鉄の ANEOS(Thompson, 1990)、強度モデルには Johnson-Cook モデル(Johnson and Cook, 1983)を用いた。Johnson-Cook モデルのパラメータ A, B, N, C, M については Gibeon 鉄隕石と同じオクタヘドライト隕石である Henbury 鉄隕石の応力-歪曲線 (Furnish et al., 1994)から推定した。実験との比較を行い、シミュレーションの妥当性の検証も行なった。

結果を以下の  $\pi$  スケーリング(e.g., Melosh, 1989; Holsapple, 1993)を用いて比較する。

$$\pi_D = \left(\frac{\rho_t}{m}\right)^{1/3} D, \pi_d = \left(\frac{\rho_t}{m}\right)^{1/3} d, \pi_3 = \left(\frac{Y}{\rho_p U^2}\right), \pi_4 = \left(\frac{\rho_t}{\rho_p}\right)$$

ここで、Gibeon 鉄隕石と SS400 は室温から 150 K まで冷却することでそれぞれ強度が 600MPa から 770 MPa, 480 MPa から 600 MPa まで増加し(Gordon, 1970 ; Furnish et al., 1994; Pennet et al., 1966 ; Sakino, 2015)、金属弾丸で低速( $\leq 3$  km/s)の場合、弾丸に対してクレーターが小さく、さらに金属特有の延性により付着が大きく影響する。これらの影響を考慮しベキ乗でフィッティングすると  $\pi_D$ ,  $\pi_d$  と  $\pi_3$ ,  $\pi_4$  の関係は以下ようになる

$$\pi_D = (0.765 \pm 0.076)\pi_3^{-0.293 \pm 0.018}\pi_4^{-0.369 \pm 0.041} \quad (1)$$

$$\pi_d = (0.180 \pm 0.020)\pi_3^{-0.441 \pm 0.019}\pi_4^{-0.046 \pm 0.021} \quad (2)$$

クレーター直径よりも深さの方が衝突速度と標的強度に強く依存する。式(1)(2)からクレーター深さ直径比も以下の式のように、衝突速度と標的強度に依存することがわかる

$$\text{深さ直径比} = \frac{\pi_d}{\pi_D} \propto \left(\frac{Y(T)}{\rho_p U^2}\right)^{-0.165 \pm 0.015} \quad (3)$$

地球型惑星形成領域から小惑星帯までの移動を考えると、放射平衡からその表面温度の変化は 300 K  $\Rightarrow$  150 K 程度であり、衝突速度分布におけるピーク速度の変化は 12 km/s  $\Rightarrow$  4 km/s 程度(Bottke et al., 2006)と考えられる。

それぞれの変化でクレーターの深さ直径比は小さくなるが、その割合は 0.96 倍, 0.7 倍と、衝突速度の変化による影響のほうが大きい。小惑星帯における衝突速度分布を用いると、鉄質天体上でのクレーター深さ直径比分布は図.1 のようになる。青は鉄質天体が小惑星帯にあった場合、赤が地球型惑星形成領域にあった場合の深さ直径比分布である。(a)は SUS や Cu などの金属弾丸、(b)はかんらん岩と玄武岩弾丸の場合である。金属弾丸の場合は付着の影響で岩石弾丸の場合よりも、冷却によってピークとなる深さ直径比が小さくなっているが、どちらの弾丸の場合も、軌道進化によって深さ直径比分布が大きく変化することが分かる。このことから、クレーター深さ直径比分布が鉄質天体の軌道進化を制約する一つの材料となりうる可能性がある。

図 1. クレーター深さ直径比分布

