

鉄鉄標的クレーター形状の温度・衝突速度依存性

○小川諒¹, 中村昭子¹, 長谷川直²

1 神戸大学大学院理学研究科, 2 宇宙科学研究所/JAXA

1. はじめに

鉄隕石の供給源と考えられる鉄質天体は、ほぼ全体が鉄ニッケル(FeNi)合金からなる天体とされ、分化天体の金属コアの名残ではないかと注目されている。鉄質天体の母天体は直径が 20 km -1000 km 程度の分化天体とされ[1, 2]、さらにその形成時期は、普通コンドライトの母天体よりも 100-200 万年早いと考えられている[3, 4, 5]。鉄質天体の候補として 16Psyche などの M 型小惑星が挙げられており[6]、その多くは小惑星帯に存在している。しかし、母天体である分化天体が小惑星帯で形成されたとする考えには以下の問題点がある

- ・観測的には、分化天体やその破片がメインベルトに普遍的に存在しているという証拠が示されていない

- ・鉄隕石母天体を早期に形成するには、小惑星帯における惑星形成の材料が乏しい

これらのことから、鉄質天体の母天体は惑星形成の材料が比較的豊富な地球型惑星形成領域で早期に形成し、天体衝突によってコアがむき出しの鉄質天体が形成され、その後原始惑星の近接遭遇などに伴う重力作用や軌道共鳴によって、小惑星帯へと運ばれたということが考えられている[7]。このことから鉄質天体は、地球型惑星形成領域から小惑星帯へ移動する過程で、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考えられる。鉄質天体表面には、天体の衝突によって多くのクレーターが形成されているはずであり、そのクレーター形状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(地球型惑星形成領域)と 150 K(小惑星帯)とし衝突実験及び衝突数値シミュレーションを行った。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衝突速度を 40 km/s まで拡張した衝突と天体規模の衝突を行った。そしてクレーターの深さ直径を詳細に計測し、衝突速度と標的温度のクレーター深さ直径比への影響と、鉄質天体の軌道進化制約について考察する。

2. 実験

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。標的には数cmサイズのGibeon鉄隕石のブロックと炭素鋼(SS400)の立方体を用い、数 mmサイズのかんらん岩、玄武岩の円柱弾丸とSUS, Cu, Al,アルミナの球弾丸を速度1.9-7.0 km/sで衝突させた。神戸大学の縦型一段式火薬銃を用い、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)も行った。低温標的については液体窒素で冷却し、130-160 Kの範囲で温度を維持し実験を行った。

3. シミュレーション

本研究の衝突実験では最大衝突速度が 7 km/s である一方、実際に太陽系ではそれより高速の衝突も起きている。また、実験における衝突体と標的のサイズは数 mm～数 cm 程度だが、実際には数 m～数 km 以上の規模の天体衝突が起きている。実験結果を実際の天体衝突に応用するためには、非常に高速の衝突と天体規模の衝突シミュレーションを行う必要がある。本研究では物質の塑性変形や衝撃波の伝播を計算できる iSALE(impact- Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian)を用いて、7-40 km/s の高速衝突と直径 1km の弾丸を直径 250 km の標的に衝突させる天体規模の衝突シミュレーションを行った。モデルの信頼性については、実験と同じ条件での衝突シミュレーションを行いその結果を比較することで評価した。

4. 結果

標的溫度と衝突速度のクレーター直径深さへの影響を以下に示す無次元量(π スケール)を用いて議論する。

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

ここで、 D と d はそれぞれクレーター直径と深さ、 U は衝突速度、 ρ_t と ρ_p はそれぞれ標的と弾丸の密度、 Y は標的強度、 m_p は弾丸質量である。図 1 に見られるように、クレーター直径、深さともに温度の影響は見られないが、直径と深さで π_3 への依存性が異なる。フィッティングラインを引くと以下の式になる

$$\pi_D = (0.765 \pm 0.076)\pi_3^{-0.293 \pm 0.018} \pi_4^{-0.331 \pm 0.041}$$

$$\pi_d = (0.180 \pm 0.020)\pi_3^{-0.441 \pm 0.019} \pi_4^{-0.071 \pm 0.021}$$

この結果は、クレーター直径よりも深さの方が π_3 に依存する、つまり衝突速度と標的強度に依存するというを示す。

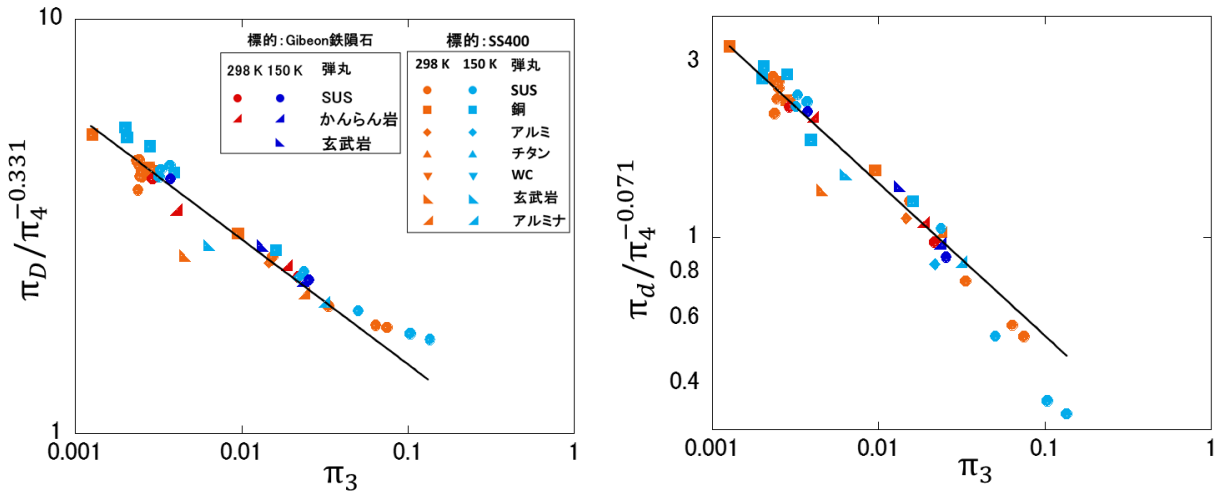


図 1 π スケールで整理したクレーター直径(左)と深さ(右)の結果。

次に、シミュレーションの結果を、パイスケールを用いて示す(図 2)。まず、シミュレーションの妥当性について実験との比較を行ったところ、結果はよく一致しており、本研究で用いた Gibeon 鉄隕石のモデルパラメータは妥当であった。また、天体規模の結果については、実験室規模の結果とよく一致しており、 π スケールの結果について実験室内規模の結果を天体規模に外挿できることが示された。そして、クレーター深さと直径の π_3 への依存性については、直径についてはほぼ一定だが、深さの場合は高速域において π_3 への依存性が小さくなることがわかった。理由については、弾丸サイズに対してクレーターサイズが十分大きくないために点源近似が成り立っていないことや、岩石に比べ強度が高いことで低速衝突での掘削が困難になっていることなど挙げられるが、はっきりとは分かっていない。

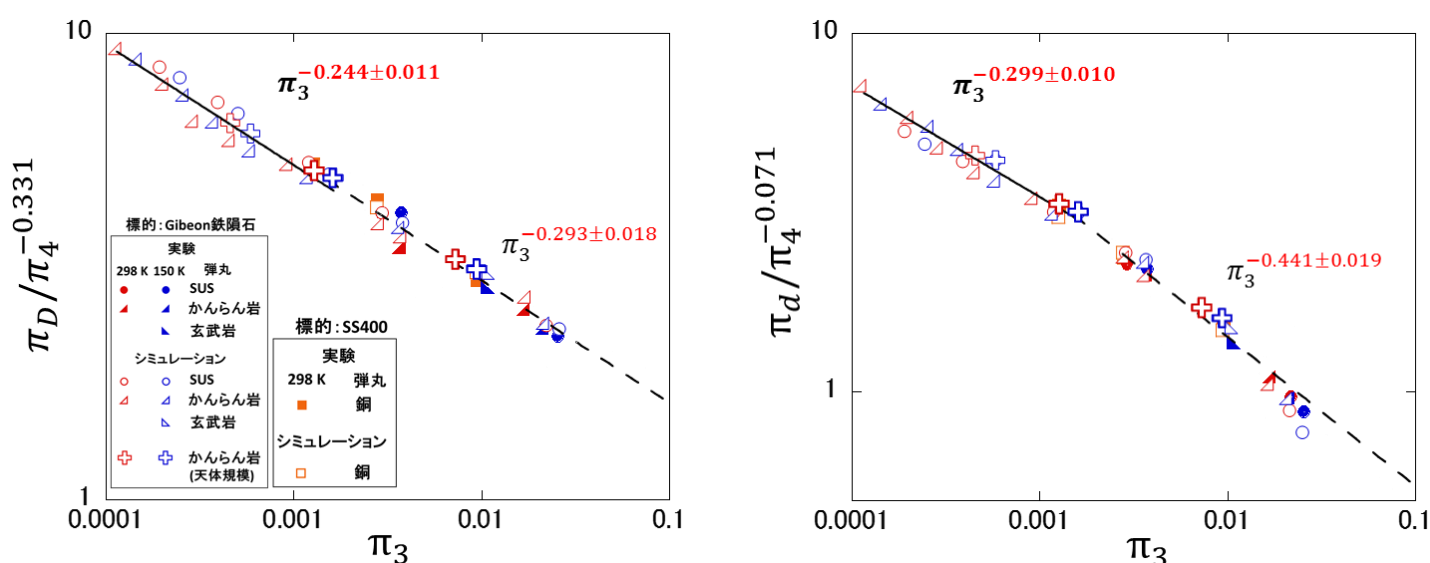


図 2 シミュレーションについて、 π スケールで整理したクレーター直径(左)と深さ(右)。

5. 考察

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よって変化するため、深さ直径比も衝突速度と標的強度に左右され、特にその影響は衝突速度の方が大きい。岩石弾丸に注目すると、深さ直径比は衝突速度とともに増加している。さらにその増加傾向は衝突速度がおおよそ 8km/s を境に変化しており、8 km/s 以上の高速域よりも 8 km/s 以下の低速域の方が増加の度合いが大きくなっている(図 3)。衝突速度と深さ直径比の関係について、地球型惑星形成領域と小惑星帯における衝突速度分布を考え、鉄質天体上で考えられる深さ直径比分布を作ると図 4 のようになる。鉄質天体が地球型惑星形成領域にある場合は深さ直径比のピークが 0.49 である分布なのに対し、小惑星帯へ移動すると、深さ直径比のピークが 0.34 である分布となり、地球型惑星形成領域にある場合とは異なる分布になる。つまり、鉄質天体上のクレーター深さ直径比分布を観測することで、鉄質天体の軌道進化を制約できる可能性がある。

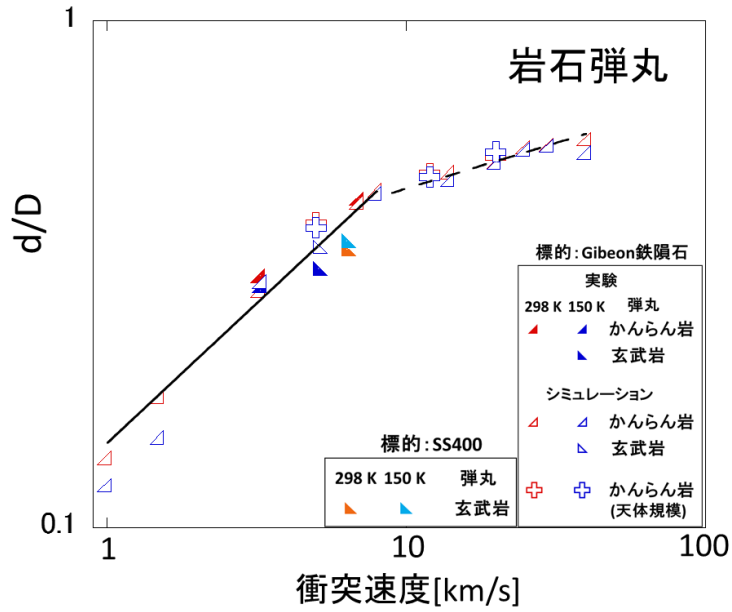


図 3 衝突速度とクレーター深さ直径比の関係。

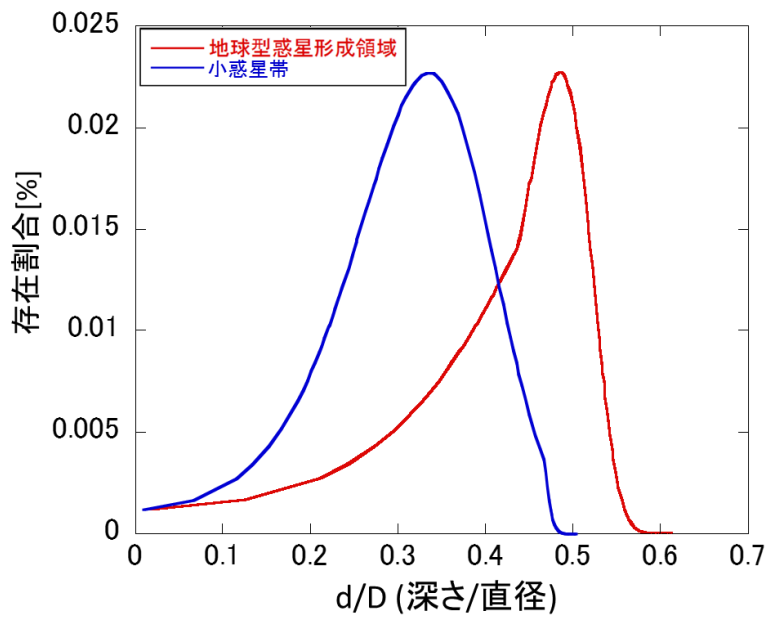


図 4 軌道進化に伴う鉄質天体上におけるクレーター深さ直径比分布の変化。

謝辞

iSALE の開発者である G. Collins, K. Wunnemann, J. Melosh, B. Ivanov D. Elbeshausen に感謝致します

参考文献

[1] Yang, J., Goldstein, J.I., Scott, E.R.D., 2008a. Metallographic cooling rates of IVA iron

- meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 3043–3061.
- [2] Chabot, N.W., Haack, H., 2006. Evolution of asteroidal cores. In: Lauretta, D.S., McSeeen, H.Y. (Eds.), *Meteorites and the Early Solar System II*. University Arizona Press, pp. 747–771.
- [3] Kleine, T., Mezger, K., Palme, H., Scherer, E., Munker, C., 2005. Early core formation in asteroids and late accretion of chondrite parent bodies: evidence from ^{182}Hf – ^{182}W in CAIs, metal-rich chondrites, and iron meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, 5805–5818
- [4] Baker, J., Bizzarro, M., Wittig, N., Connelly, J., Haack, H., 2005. Early planetesimal melting from an age of 4.5662 Gyr for differentiated meteorites. *Nature* 436, 1127–1131.
- [5] Bizzarro, M., Baker, A. J., Haack, H., Lundgaard, L. K., 2005. Rapid Timescales for Accretion and Melting of Differentiated Planetesimals Inferred from ^{26}Al - ^{26}Mg Chronometry. *The Astrophysical Journal*, 632:L41–L44
- [6] Ostro, S. J. 1985. Symposium on New Directions in Asteroids and Comet Research, Northern Arizona University, Flagstaff, AZ, June 1985, *Astronomical Society of the Pacific* 97, 877–884.
- [7] Bottke, W.F., Nesvorny, D., Grimm, R.E., Morbidelli, A., O’ Brien, D.P., 2006. Iron meteorites as remnants of planetesimals formed in the terrestrial planet region. *Nature* 439, 821–824.