

鉄へのクレータリング：温度と衝突速度の影響

○小川諒¹, 中村昭子¹, 長谷川直², 鈴木絢子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

初期の太陽系は主にガスやダストからなる原始太陽系円盤を形成していたとされており、その後衝突合体などを繰り返し微惑星、原始惑星、現在の惑星へと進化していったと考えられている。惑星の成長過程において直径 20km 以上に達した微惑星は溶融分化が可能となり鉄コアが形成される[1]。その鉄コアの形成時期は非常に早く、最も始原的な物質である CAI 形成後の 30-60 万年とされる[2]。始原的な物質であるコンドリュールが CAI 形成後の約 250 万年に形成されている[3]ことを考えると、鉄コアの形成は非常に始原的な出来事であり、初期の惑星進化を理解するために重要だと言える。鉄コアの調査については小惑星 16Psyche が注目されており、次の NASA のディスカバリーミッションの候補にその直接探査が挙げられている。Psyche は鉄コアがむき出しになっている鉄質天体だとされており[4]、探査されるとなれば惑星形成の理解の飛躍的な進歩が期待できる。

本研究では普遍的に起こっている衝突現象を、鉄質天体表面について理解していくことを念頭に置き、鉄への衝突実験及び衝突シミュレーションを行った。実験・シミュレーションはクレータリングに関する基礎データ収集を目的とし、クレータ形状への温度と衝突速度の影響に着目して行っている。

2. 方法

2.1 実験方法：標的には各辺が 50 mm の立方体の炭素鋼(SS400)を用いた。SS400 を標的に用いる理由はギベオン鉄隕石と脆性-延性の変化が同様な温度域で起きるためである[5][6]。弾丸については、直径が 3.2 mm のステンレス(SUS)、銅、チタン、タングステンカーバイトの球を用い、それらを速度 1.2-6.5 km/s の範囲内で、宇宙科学研究所にある横型二段式軽ガス銃を用い衝突させた。チャンバー内の気圧は 0.5-5 Pa まで減圧させた。さらに、より低速域での実験を行うために、神戸大学にある一段式縦型火薬銃を用いて、直径・高さ 15 mm の円柱鉄(SUS)を速度 0.6-1.2 km/s で衝突させた。そして、クレータリングへの温度の影響を調査するため、液体窒素で 150 K 以下に冷却した標的と室温(293 K)の標的に対し、同じ弾丸・衝突速度において形成されたクレータ形状を比較し観察した。

2.2 シミュレーション方法：衝突シミュレーションについては Shock physics code である iSALE を用いて行った。衝突実験との比較のため、実験と同じ衝突条件を設定し計算を行った。本シミュレーションでは金属に対する強度モデル”Johnson-Cook モデル”に着目している。Johnson-Cook モデルでは、物質強度 Y を次のように表す。

$$Y = (A + B\varepsilon^N)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}) \left[1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_m - T_{ref}} \right)^M \right]$$

上記の式について、 ε は歪量、 $\dot{\varepsilon}$ は歪速度、 T は温度、 T_m は熔融温度、 T_{ref} は reference 温度で、ここでは液体窒素の温度 77K としている。この式には 5 つのパラメータが含まれており、 A が温度 77K での降伏強度を、 N と B が歪量依存性を、 C が歪速度依存性を、そして M が温度依存性を表している。そのうち $\{M, B, C, A\}$ を、衝撃や準静的圧縮において鉄隕石と似た振る舞いをするアームコ鉄[7]のパラメータ[8]を基準として変化させクレーター直径・深さへの影響を調査した。そしてシミュレーションが、実験にみられるクレーター形状への温度・衝突速度依存性を再現できるのかを調査した。

3. 結果

結果は 3 つの無次元変数 $\pi_D = \left(\frac{\rho_t}{m}\right)^{1/3} D$, $\pi_d = \left(\frac{\rho_t}{m}\right)^{1/3} d$, $\pi_3 = \left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right)^{0.738} \left(\frac{Y}{\rho_p U^2}\right)$ で整理した。 D

はクレーター直径、 d はクレーター深さ、 m は弾丸質量、 ρ_t, ρ_p はそれぞれ標的と弾丸の密度、 Y は標的強度、 U は衝突速度である。

3.1 実験結果: 図 1 に見られるように、低速度域(0.6-2.3 km/s)では、室温標的に比べ低温標的のクレーター深さが浅くなったが、高速度域(4.2-6.5 km/s)においては、深さに温度依存性は見られず、さらに直径についてはすべての速度域において温度依存性は見られなかった。つまり、温度はクレーター形成において深さ方向に大きく影響し、さらにその温度依存性は衝突速度によって変化することが考えられる。

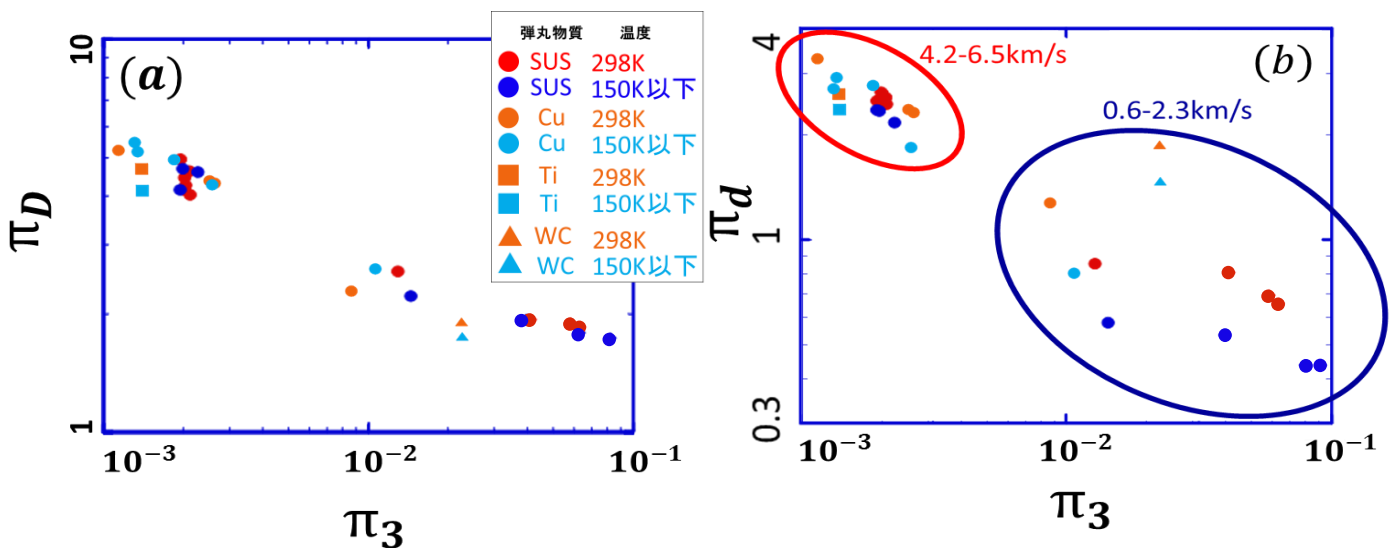


図 1 (a)がクレーター直径、(b)がクレーター深さの結果を表す。青で囲まれた低速度域(0.6-2.3 km/s)において、低温の方がクレーター深さが浅くなっている。

一般的に鉄は冷却すると降伏強度が増加することが知られている(e.g., [9])。そのために低温でのクレーター深さが浅くなった可能性がある。さらに、各実験でクレーターへの弾丸の付着が見られた。そのため、低温の場合に付着量が多くなることで、低温標的の方がクレーター深さが浅くなっている可能性がある。高速度の場合にはクレーター深さに温度依存性がみられなかったことから、クレーター深さへの影響について、弾丸の付着など、低温による強度の増加以外の要因を調査しなければならない。

3.2 シミュレーション結果： SUS 弾丸での衝突シミュレーションを行い実験と比較した。図 2 に見られるように、深さの温度依存性が低速域で顕著であること、直径が温度に影響されないことが実験と整合的であり、シミュレーションによって実験を再現することができた。

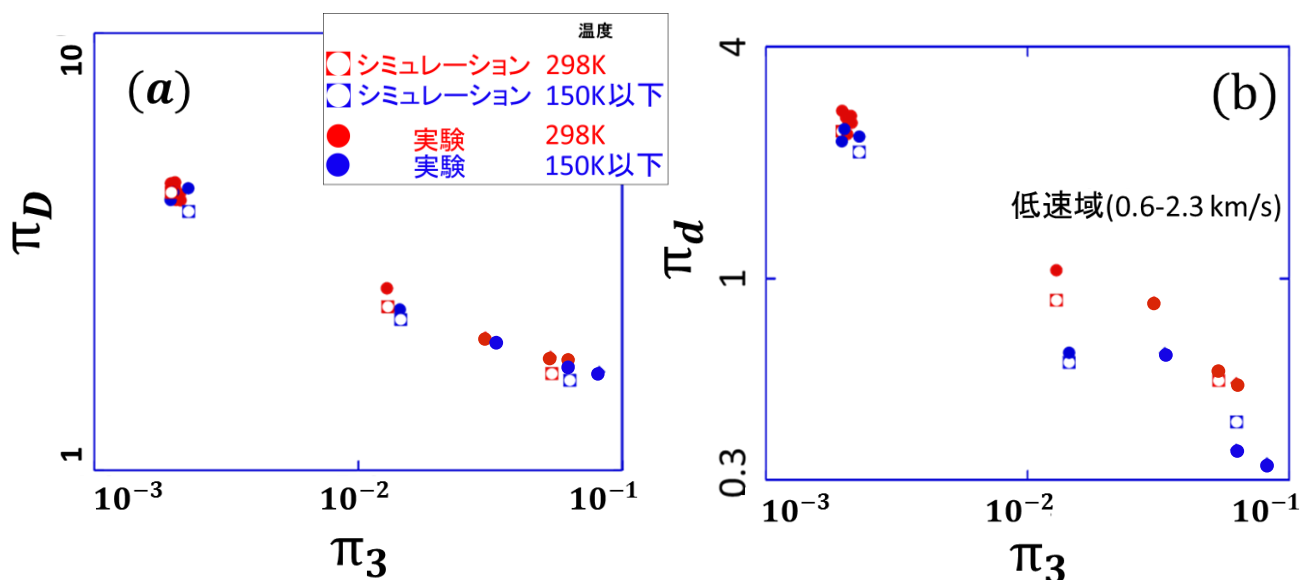


図 2 SUS 弾丸を用いた衝突シミュレーションと実験結果の比較。(a)がクレーター直径、(b)がクレーター深さの結果を表す。シミュレーションも実験と同様に低速域(0.6-2.3 km/s)において、低温の方がクレーター深さが浅くなっている。

今後はシミュレーションを通して衝突規模の影響を調査し、さらに実験について、クレーターの断面から弾丸の付着などを調査する必要がある。

4. まとめ

本研究では、鉄隕石を模擬した SS400 標的に対し 298K と 150K 以下の温度条件において衝突実験及びシミュレーションを行い、クレーター形状の温度依存性を調査した。実験から、低速(0.6-2.3 km/s)で衝突させた時のクレーターの深さにのみ、150K 以下の方が浅くなるという温度の影響がみられた。このことから、温度の影響は深さ方向にのみ現れ、さらにその影響は衝突速度により異なることが推測される。シミュレーションについては、

Johnson-Cook の強度モデルのパラメータを変更し、SUS 弾丸の衝突について、実験でみられたクレーター形状の温度依存性を再現することができた。

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] Moskovitz, N. and Gaidos, E. 2011. *Meteoritics and Planetary Science* 46, 903-918.
- [2] Kruijer, T. S. et al. 2014. *Science* 344, 1150-1154.
- [3] Amelin Y. et al. 2002. *Science*, 297, 1678-1683.
- [4] 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.
- [5] Johnson, A. A. and Remo, J. L. 1974. *Journal of Geophysical Research* 79, 1142 – 1146.
- [6] Shimizu, S. et al. 2009. *日本建築学会学術講演梗概集*, pp. 1009-1010.
- [7] Furnish, M. D. et al. 1995. *International Journal of Impact Engineering* 17, 341 – 352.
- [8] Johnson, G.R. and Cook, W.H. 1983. *Proc. of the 7th International Symposium on Ballistics*, pp.541-547. The Hague, The Netherlands, April 1983.
- [9] Matsui, H. et al. 1978. *Trans. Jpn. Inst. Met.* 19, 163-170.