鉄へのクレーター形成における温度と衝突速度への依存性

〇小川諒[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

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いる。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のコアが形成される(Moskovitz and Gaidos,2011)。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 の形成後の 30-60 万年とされる(Kruijer et al., 2014)。一方で始原的物質であるコンドリュールは CAI 形成後の約 250 万年に形成されている。このことから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。現在、鉄コアの調査について小惑星 16Psyche が注目されており、次回の 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、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、クレーター形状への温度と衝突速度の影響を調査した。

衝突実験の方法：鉄(SS400)の立方体標的に、直径 3.2 mm の鉄球(SUS)を宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いて速度 1.8-5.1km/s で衝突させ、直径,高さ 15mm の円柱鉄(SUS)を神戸大学にある一段式縦型火薬銃を用いて速度 0.8-0.9km/s で衝突させた。クレーター形状への温度の影響を調査するため、標的は 298K の SS400 と液体窒素を用いて 150K まで冷却した SS400 を用い衝突実験を行った。

衝突シミュレーションの方法：Shock physics code の iSALE を用いて行った。衝突実験との比較のため、衝突条件を実験と同じにして計算を行った。シミュレーションでは以下の、金属に対する強度モデル”*Johnson-Cook モデル*”を用いている。

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

{M, N と B, C, A}はそれぞれ{温度依存性, 歪量依存性,歪速度依存性, 温度 77K での降伏強度}に関するパラメータである。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のパラメータを基準として変化させクレーター形状への影響を調査した。そして最終的に、実験において確認された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。

実験結果：クレーター直径には温度・衝突速度の影響は見られなかったが、クレーター深さについてはそれらの影響がみられた。クレーター深さは 150K の時の方が 298K の時よりも小さくなった。さらにこの温度による違いは低速域(1-2km/s)では顕著に見られたが、高速域(5km/s)ではほとんど確認できなかった(図 1：赤と青のプロット)。つまりクレーター深さの温度依存性は衝突速度によって左右されることが考えられる。

鉄は低温にすると強度が増加することが知られている(e.g. Petrovic, 2001)。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。直径について、温度による変化が見られないことの原因ははっきりと分かっていないが「そもそもクレーター直径への標的強度の影響が小さいので低温による強度増加の影響も小さい」ということで説明できるかもしれない。

シミュレーション結果：パラメータを変更することで、クレーター深さ直径について、実験同様の温度・衝突速度依存性を再現できた(図 1：橙と水色のプロット)。実験を最も再現する M, C の値はアームコ鉄の値とほぼ同じであった。しかし、実験を再現する{A, B}については、定数 A は 175[MPa]から 800[MPa]に、歪量依存性に関するパラメータ B は 380[MPa]から[135MPa]と大きく変化した(図 2)。アームコ鉄の強度は鉄隕石よりも弱いとされているため、降伏強度 A が著しく大きくなったと思われる。歪量依存性関してはパラメータ N を固定し B のみ変化させていたため、今後 N についても調査し評価する必要がある。

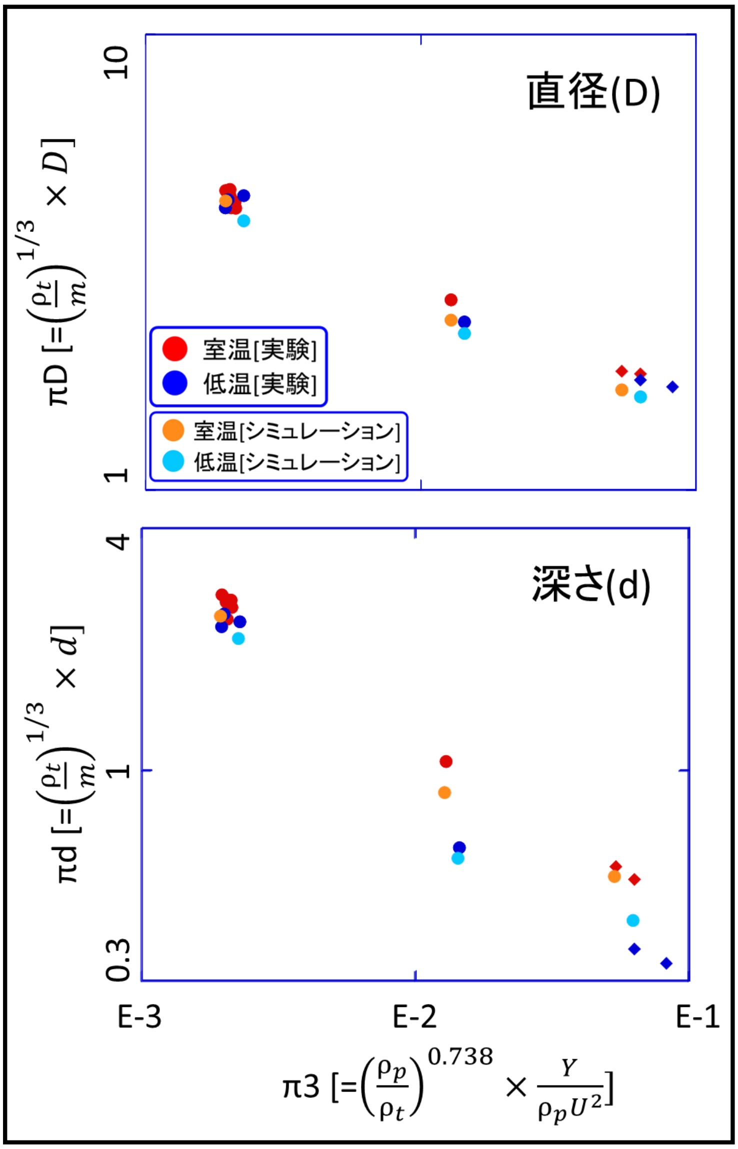

図 1. クレーター深さと直径の実験-シミュレーション比較(π スケール)

	強度モデルのパラメータの変更		
		アームコ鉄	本研究
定数	A[MPa]	175	➡ 800
歪量	B[MPa]	380	➡ 135
歪速度	C	0.06	0.05
歪量	N	0.32	0.32
温度	M	0.55	0.5

図 2. Johnson-Cook パラメータの変更

謝 辞： iSALE の開発者である G. Collins, K. Wünnemann, B. Ivanov, J. Melosh, and D. Elbeshausen の各氏に感謝致します.