

炭素質小惑星上の微小クレータ形成過程の熱力学

黒澤耕介^{1,2}, 荒川創太³, 松本恵⁴, 中村智樹⁴

¹神戸大学 大学院人間発達環境学研究科, ²千葉工業大学 惑星探査研究センター, ³海洋研究開発機構, 数理科学・先端技術開発センター, ⁴東北大大学 大学院理学研究科

はじめに: 日本の探査機はやぶさ₂は炭素質小惑星リュウグウから試料を持ち帰った。リュウグウの石は各機関の実験室にて詳細に分析された。宇宙からの帰還試料と隕石との決定的な違いは、隕石では地球大気圏突入時に焼けてしまう宇宙空間に曝露されていた最表面の情報を保持していることである。リュウグウ粒子の表面には宇宙塵の衝突と思われる痕跡が複数発見されてきており、宇宙環境で小惑星の表面がどのように風化していくのか、その詳細を明らかにできる時代になってきたと言える。

本研究ではリュウグウ表面に見られた無数の直径 $0.1\text{--}1 \mu\text{m}$ の微小衝突孔群に注目した。 1 mm^2 の領域で >100 個が観察される場合もある。微小衝突孔群の産状からは無作為に起こる独立な宇宙塵衝突ではなく、同一イベントで同時に形成された可能性が高い。そこでサイズ頻度分布を作成してみると、指數関数になっており、動圧によって分裂した液滴群のサイズ頻度分布と近いことが明らかになった。数 mm の衝突孔の生成時に溶融物が生じ、それに動圧がかかって分裂して無数の二次孔を作ったと考えると微小衝突孔群の産状を説明できるが、そのようなことはおこるだろうか？

天体衝突の熱力学: 1991 年に Melosh&Vickery は、高速度衝突後の岩石物質が辿る熱力学経路を検討し、衝突速度がちょうどよい範囲(具体的にはエントロピー増加量が全溶融に必要なそれからから臨界点におけるそれまで、石英であれば $10\text{--}14 \text{ km s}^{-1}$ 程度の衝突速度に対応)であれば、超臨界流体状態からの減圧中に部分蒸発によって発泡が生じ、分裂液滴群を生じるとするモデルを提唱した。彼らは「An expanding splay of droplets」と呼んでいる。炭素質小惑星構成物質は含水鉱物や有機物を含む、複数物質からなっており、詳細な相境界の検討は容易ではないものの、

このモデルはリュウグウ粒子上で観察された微小衝突孔群の特徴と合致する。このモデルが成立するには(1) ある程度以上の高速度衝突が発生すること、(2) 減圧過程は断熱であること、が必要である。そこで本研究では微小衝突孔形成過程の熱力学を検討した。

宇宙塵衝突時の特徴量: 最初に現象の特徴量を整理する。小惑星への宇宙塵の衝突速度を調べた文献によれば、宇宙塵の衝突速度は $\sim 10 \text{ km s}^{-1}$ に達する場合もある。「An expanding splay of droplets」を発生させる「親孔」の直径を $1\text{--}3 \mu\text{m}$ 程度とし、リュウグウの石と同程度の強度を持つ堆積岩の Scaling 則を参考にすると、親孔を作った宇宙塵の直径は $0.6 \mu\text{m}$ 程度と見積もられる。蛇紋岩の Hugoniot 曲線を参考にすると、 $>13 \text{ km s}^{-1}$ の衝突では衝突直下点の温度は 10^4 K を超える。以下ではこれらの数字を基準として議論を進めよう。

高速度衝突で引き起こされる現象のスケール依存性: 直径 $0.6 \mu\text{m}$ 程度の宇宙塵の衝突が、従来の衝突現象、つまり固体天体上で普遍的に視られる巨視的な衝突孔の形成過程と同様に記述できるか、を議論する。具体的には(1)衝撃波が到達する前に衝撃波面からの熱放射による Pre-heating が効く可能性、(2)断熱膨張による減圧中の冷却よりも熱放射や熱伝導による冷却が支配的になる可能性について検討した。前者は高強度レーザーを用いた衝撃圧縮実験でよく知られている現象である。後者では特に熱伝導過程は温度の空間²階微分で記述されることからスケール依存性が強く現れると思った。

Pre-heating が顕著に起こるとすれば、Hugoniot 曲線が高エントロピー側にずれるため、「An expanding splay of droplets」を生じる衝突速度範囲が低速度側へずれる。衝撃波面から衝撃波が未到着な領域の物質への電磁波

の影響は本来であれば、詳細な輻射輸送計算が必要であるが、今回は簡単に Wien 則で記述される黒体放射の最大値の波長分程度の領域が Pre-heating に晒されると仮定した。 10^4 K での黒体放射の最大波長は~ $0.3 \mu\text{m}$ であるため、宇宙塵のサイズと同程度である。検討の結果、衝撃波面背面温度が 10^4 K 程度であれば Pre-heating は無視できることがわかった。これは加熱率(K s^{-1})自体は大きいものの、持続時間の短さによって相殺されるためである。

続いて冷却過程を検討した。熱放射、熱伝導の両者で最も冷えやすい仮定を置いたとしても、 $0.6 \mu\text{m}$ の宇宙塵が~ 10 km s^{-1} で衝突し、衝突直下点温度が~ 10^4 K というような条件では断熱膨張冷却が支配的であることがわかった。つまり巨視的な衝突孔形成過程と同様に扱うことができるようである。

まとめ: リュウグウ表面にみられた、指数関数のサイズ頻度分布を持つ微小衝突孔群は親孔形成時に発生した「An expanding splay of droplets」による二次孔群である可能性を示した。

謝辞: iSALE の開発者である Gareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausen の各氏、pySALEPlot の開発者である Tom Davison 氏に感謝致します。

※図や参考文献についてはスライドの PDF ファイルをご参照下さい。