

開放系における固体-液体(水)間衝突現象の観測 III

西澤学¹、松井洋平¹、渋谷岳造¹、須田好¹、高井研¹、矢野創²

1. 海洋研究開発機構、2. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

Experimental study of hypervelocity impact of solid material into liquid water III

Manabu Nishizawa¹, Yohei Matsui¹, Konomi Suda¹, Takuya Saitou¹, Takazo Shibuya¹, Hajime Yano² and Ken Takai¹,

¹ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

² Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency for Space and Technology (JAXA)

1、背景と本研究の目的

生命活動を担うアミノ酸や核酸といった生体有機物の起源の解明は、宇宙における生命の分布を推定するカギとなる。地球における生体有機物の起源について、宇宙空間で合成され、始原天体(小惑星、彗星、宇宙塵)によって初期地球に運搬されたとする「宇宙有機物起源説」と、初期地球において無機物から非生物的に合成されたとする「地球有機物起源説」が提唱されている。どちらの仮説も有力な証拠の提示には至っていないが、約 40 億年前に集中して起きた海洋への天体衝突が宇宙起源有機物の変質(低分子化や無機化)や地球起源有機物の合成において重要な役割を果たしていた可能性がある。これまで閉鎖系での岩石-水間衝撃実験から衝撃圧縮によって N₂ や CO₂ といった原始大気成分から有機物やその主原料となるアンモニアが最終産物として生成されることが指摘されている(Nakazawa et al., 2005)。一方で、開放系での超高速衝突に伴う水中での隕石の破壊様式やその支配要因ならびに最終産物については実験に基づく理解が進んでいない。本研究は、開放系で隕石-水間超高速衝突実験を行い、隕石の破壊過程をリアルタイムで計測するとともに、アンモニアや固体微粒子といった最終産物の定性・定量分析を行う。これにより、開放系でおこる隕石の海洋衝突による最終産物を推定することを最終目的とする。

平成 29 年度まではポリカーボネート、ステンレス、およびに普通隕石を飛翔体とした衝突実験(4-6km/s)を行い、水中での破壊様式やクレーター形成条件が飛翔体の種類で大きく異なることを初めて観測した。さらに普通隕石の水中衝突では、隕石内部の成分(鉱物、有機物)の間で水衝突時の物理的挙動が大きく異なる可能性が見いだされた。平成 30 年度は、普通隕石と水の衝突実験を主に行い、実験後に回収した固体微粒子の観察と組成解析およびにアンモニアの生成量を測定した。また、衝突速度 2km/s で実験を行い、衝突速度が飛翔体の破壊過程やクレーター形成条件に果たす役割を調べた。

2、実験方法

宇宙科学研究所に設置された縦型二段式軽ガス銃を用いて衝突実験を行った。直径 2mm、高さ 2mm の普通コンドライト(LL6)を飛翔体として、プラスチック製容器に注いだ水に衝突させた。衝突速度は 5.5-5.8 km/s とした。容器の底には金属鉄もしくは寒天(密度 1 g/cm³)の標的を固定した。標的までの水深の条件は 8-30 mm とした。高速カメラ(Shimadzu HPV-X)を用いて水中での飛翔体の挙動を時間分解能 1-2μs で撮像した。実験後に標的を回収し、衝突面に形成されたクレーターの三次元構造をレーザー変位計で計測した。実験前後で水を 10mL 程度分取し、HPLC でアンモニア濃度を計測した。また孔径 0.8μm のセルロースアセテートフィルターを使って、水を全量濾過し、微粒子を回収した。寒天を標的にした実験では、実験後に光学顕微鏡で寒天の断面観察をした。そののちに寒天を熱湯で溶かし、溶液を孔径 0.8μm のセルロースアセテートフィルターでろ過して粒子を回収した。SEM/EDS や顕微ラマン分光で微粒子の観察と組成分析を行った。衝突速度が飛翔体の破壊過程やクレーター形成条件に果たす役割を調べるため、直径 2mm のステンレス球を速度 2.0 km/s で水面に衝突させた。標的までの水深は 0-20 mm で変化させた。高速カメラおよびにレーザー変位計を用いて破壊過程の観察とクレーター痕の体積を測定した。

3、実験結果と考察

ステンレス球の水中での破壊過程やクレーターの形成条件は水面への衝突速度により変化することがわかった。水中痕について、5km/s の場合は複数の突起が生じる桜島大根型的水中痕ができたが、2km/s の場合は先がとがったニンジン型的水中痕が生じて突起物は観測されなかった。“海底”に設置した鉄板に生じたクレーターについて、5km/s の場合は水深 7mm を境に単一クレーターから複数クレーターへと形状の変化が観察された。一方で、2km/s の場合は水深が増大しても単一クレーターが形成された。水深の増大にともなうクレーターの体積の減少率は、2km/s の時の方が 5km/s の時に比べて低かった。以上をまとめると、水面衝突速度 2km/s では水中でのステンレス球の破壊が生じず海底に到達しているのに対して、5km/s ではステンレス球が水深 7mm まで到達した時点ですでに破壊されていることが示された。これは、ある飛翔体と水の衝突の場合、水面衝突速度が速いほど、飛翔体のサイズが小さいほど水中で破壊が起きやすいことを意味する。コンドライトはステンレス球に比べて水中で破壊しやすいこと(前年度の研究成果)、初期海洋への隕石衝突速度は 10-30km/s と見積もられていることを考慮すると(Bottke et al., 2010)、水中でのコンドライトの破壊は初期海洋では高い頻度で起きた一般的な現象であると結論した。

普通隕石と水の衝突実験(水深 11.7 mm)の後、水の全量濾過で回収した微粒子の大部分は直径 5 μ m 以下の鉄球であった(図1)。これは海底面でのクレーター形成によってターゲットの鉄がいったん熔融し、水中に放出されたことを示す。微粒子には forsterite や augite など普通隕石の構成鉱物が確認された(図 1)。これらの微粒子は長辺が 20 μ m 以下の角ばった形状を示し、熔融した痕跡は確認されなかった。以上から、水衝突で生じた普通隕石の微粒子は非熔融のまま“海洋”へ拡散したことが示唆された。これは隕石中の有機物の運命を推定する時の重要な制約条件となる。一方で、海底に“高速”で到達した隕石微粒子を寒天ターゲットで捕集することに成功した(図 2)。寒天には微粒子の衝突によって生じたトラックが複数本にわたり観察され、先端には微粒子が分布していた。微粒子にはガラススフェールや硫化鉄が検出された。今後、多数の微粒子の網羅的解析を行うことで、隕石の構成成分ごとに水衝突にともなう物理的・化学的挙動が解明されると期待される。一方で、隕石の水衝突によるアンモニア生成は観測されなかった。アンモニア合成に有利とされるステンレスと水の衝突でもアンモニアの生成は観測されなかったため、隕石の海洋衝突にともなう大気窒素からのアンモニアの生成は仮に起きたとしても限定的な条件でのみしか起きないことが示唆された。



図 1、隕石—水衝突実験後に水の全量濾過で回収された微粒子。海底には金属鉄のターゲットを固定し、クレーターが形成した。

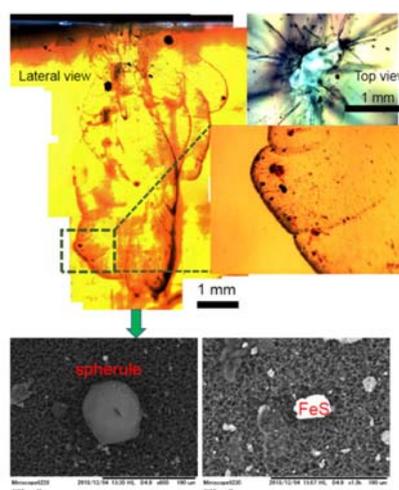


図 2、水中の寒天ターゲットで捕集された隕石微粒子と捕集過程で形成された寒天内部のトラック