

減衰衝撃波を利用した衝撃回収実験 1: 炭酸塩の波状消光の発生条件

黒澤耕介¹, 大野遼¹, 新原隆史², 三河内岳², 富岡尚敬³, 玄田英典⁴, 境家達弘⁵, 近藤忠⁵, 鹿山雅裕², 小池みずほ⁶, 佐野有司², 松崎琢也⁷, 村山雅史⁷, 佐竹渉¹, 松井孝典¹

¹千葉工業大学, ²東京大学, ³海洋研究開発機構, ⁴東京工業大学, ⁵大阪大学, ⁶広島大学, ⁷高知大学

はじめに: 地球上で発見される隕石のほとんどは程度の差はあるが, 衝撃を経験し, その証拠が衝撃変成として刻まれている. 過去の衝撃回収実験によって隕石に含まれているような珪酸塩鉱物については変成の程度と衝撃圧の関係が整理されている. 衝撃圧は衝突速度と相関があるため, 隕石の衝撃変成度の頻度分布から過去の太陽系の衝突速度分布を復元することも可能であろう.

多くの炭素質隕石は水質変成を経験したことがわかっている. この水-岩石-有機物の相互作用によって炭素質隕石中では様々な興味ある有機化合物が合成されたと期待されている. 水質変成鉱物そのものから衝撃の程度を推定することができるになればこの化学反応場に制約を与えることが可能になるだろう.

炭酸塩の衝撃変成: 今回我々は典型的な水質変成鉱物である炭酸塩(Calcite, CaCO_3)に注目して研究を行った. Calcite は多くの CM chondrite に含まれていることが知られており, 中には $10 \mu\text{m}$ を超える大きさの粒子を含む隕石も報告されている. さらに NASA の小惑星探査機 OSIRIS-Rex が小惑星 Bennu の試料を採集した地点近傍では炭酸塩の鉱脈が発見されており, 回収試料に Calcite が含まれていることも期待できる.

Calcite の衝撃変成としては機械双晶の発生(>0.48 GPa)と衝撃脱ガス(>20 GPa)が知られている. 実際の小惑星への天体衝突を想定して衝撃圧力分布を検討すると, 前者は圧力が低すぎ, 後者は高すぎで母天体中での Calcite の位置についてほとんど制約を与えることができない. 中間衝撃圧力領域での衝撃変成指標の確立が必要であった.

旧来の衝撃回収実験の問題点: 上記の問題

意識から我々は Calcite の衝撃回収実験を計画した. 旧来の衝撃回収実験は金属コンテナに平板飛翔体を衝突させ, 試料に衝撃波を作用させる手法が用いられていた. この手法は試料にかかる衝撃圧力を精度良く計算可能であるという得難い長所がある. しかしよく知られているように衝撃波の反射によって試料が複数回の圧縮を受けてしまい, 天然の衝突とは異なる衝撃圧縮条件となるという弱点がある. また, 一般的に 1 shot で達成される衝撃圧は 1 点のみであること, 実験ごとに金属コンテナが丸ごと破壊されてしまうことから時間的・金銭的なコストが高くデータの蓄積に向かない, という弱点があった.

減衰衝撃波の利用: 衝撃後の試料回収には金属コンテナの利用は不可欠であろう. そこで我々は高強度レーザーを用いた衝撃回収実験で確立された実験手法を二段式水素ガス銃で使えるように実験系の設計を行った. 金属コンテナに対して十分に小さい飛翔体を用いれば試料中で衝撃波が減衰し, 反射衝撃波の影響を無視できる. この手法は衝撃圧力を直接求めることができないのが難点であるが, 近年の数値衝突計算コードは試料中の衝撃圧力を精度良く推定することを可能にしている.

実験条件: 実験は千葉工業大学惑星探査研究センターの高速度衝突実験室にて実施した. 飛翔体には直径 4.8 mm のポリカーボネイト球を使用した. 衝突速度は $5.1\text{--}7.3 \text{ km/s}$ の範囲で変化させた. 標的は Carrara marble を円柱形状(直径 30 mm , 高さ 24 mm)に加工して使用した. Carrara marble は $100\text{--}300 \mu\text{m}$ 程度の Calcite 粒子が無秩序に並んでいる大理石である. バルク密度は結晶の Calcite とほぼ同じであり, 空隙はほとんどない. 金属コンテナはチタンで製作し, 衝突面の金属蓋にはチタン,

もしくはアルミ(厚みは 3 mm か 4 mm)を用いた。

数値計算条件: 試料中を伝播する衝撃波を評価するため iSALE shock physics code を用いた数値衝突計算を実施した。垂直衝突を表現するため 2 次元円柱座標を用いた。計算中の弾丸, 試料, 金属コンテナの実サイズは全て衝突実験と同じ値である。弾丸半径を 46 格子で分割した。これは衝撃圧力分布を計算するには十分な計算解像度である。弾丸, 金属コンテナにはそれぞれポリカーボネイト, チタンに対応する Tillotson EOS を用いた。ポリカーボネイト球は完全流体として扱い, 金属コンテナには von Mises strength model を用いて金属の降伏挙動を表現した。Calcite 試料には ANEOS calcite を用い, 脆性物質の弾塑性挙動を表現する Rock strength model を適用した。初期温度は 300 K, 重力は無視し, 衝突速度は衝突実験の実測値そのものを与えた。

減衰衝撃波の特徴付け: 最初に本実験手法で試料に作用する衝撃波の諸量について述べる。定常運転の最高到達速度に近い 6.8 km s^{-1} の衝突の場合, 爆心点(金属蓋の直下の試料)で達成される圧力は $\sim 10 \text{ GPa}$ であった。試料中で衝撃波は減衰し, 裏面付近では $\sim 1 \text{ GPa}$ まで衝撃圧力が下がることがわかった。顕著な温度上昇が起こるのは爆心点の近傍数 mm の領域に限られた。PVDF 応力計測計を用いた垂直応力の実測値との比較も実施した。Hugoniot 弾性限界よりも大きい衝撃圧力では衝撃圧力値を精度良く再現でき, Hugoniot 弾性限界以下においては iSALE の計算値は 2 倍程度の過大評価を与えることがわかった。

衝撃後の Calcite の変化: 実験後には衝撃を受けた大理石を回収し, 30 mm の厚さの薄片に加工し, 偏光顕微鏡で観察した。衝撃を加えていない試料も同様に薄片に加工し, 衝撃前後の Calcite 粒子の様子を比較した。

今回用いた Carrara marble に含まれる Calcite 粒子は衝撃を加える前にすでに機械双晶を含むものであったが, 偏光顕微鏡上で回転観察すると, 結晶粒子全体が鋭く消光した。また粒子間にはほぼ隙間がなく, 粒子中には

割れなどの筋状構造も観られなかった。それに対して, 衝撃を受けた試料は衝突点からの距離に応じて変化が観られた。試料裏面付近では出発試料とあまり変化がなかったが機械双晶の数密度は有意に増加していた。先述したように裏面付近の圧力は $\sim 1 \text{ GPa}$ であり, 機械双晶の発生条件を上回っているため, 今回の衝撃で新たに発生した機械双晶であろう。衝突点近傍では以下のような変化が認められた。(1) 「波状消光」を示す粒子が衝突点に近づくに従って増えた。(2) 機械双晶が複雑に入り組み消光しないような粒子も観られた。(3) 大きな割れ構造に加えて個々の粒子間にも微小な隙間が空いていた。波状消光とは偏光顕微鏡上で回転させた場合に粒子全体が消光するわけではなく, 消光領域が粒子を掃引していく様を指しており, 珪酸塩鉱物でも弱い衝撃変成の証拠として頻繁に用いられるものである。

波状消光発生頻度と衝撃圧力の関係: 試料裏面付近では波状消光を示す粒子がほとんど観られず, 衝突点近傍ではほとんどの粒子が波状消光を示していたことから試料中に波状消光の発生閾値となる衝撃圧力が存在していることがわかった。この閾値を決定するため, 衝突点真下の領域を ~ 15 個の小領域に区切り, 詳細な観察を行った。小領域中には ~ 100 個程度の Calcite 粒子が含まれる。波状消光の発生頻度を定量化するため, 一つの小領域から 10 個の粒子を選び出し, 偏光顕微鏡の対物レンズ 20 倍で詳細に観察し, 波状消光の有無を調べた。主観が入り込むことが避けられない計測であるため 3 名の研究者が独立に計測を実施した。小領域に対応する衝撃圧力値を iSALE で算出した。その結果 $>3 \text{ GPa}$ の衝撃圧力の領域で半分以上の粒子が波状消光を示すことがわかった。この閾値は Calcite の Hugoniot 弾性限界より少し大きく, 顕著な塑性変形が起こると波状消光として観察されることがわかった。

炭素質隕石母天体への応用: 炭素質隕石母天体への天体衝突の際に $>3 \text{ GPa}$ を超える領域の深さを調べるため, 隕石母天体への衝突と

して、よく想定されている直径 20 km の天体が直径 100 km の隕石母天体に 5 km s^{-1} で衝突する条件の iSALE 計算を実施した。両天体は空隙率 25%の蛇紋岩(含水鉱物)からなる、と仮定した。この条件では深さ~30 km まで 3 GPa の衝撃圧力が与えられることがわかった。つまり隕石中から波状消光を示す Calcite 粒子が見いだされた場合、母天体の表層から 30 km 以浅の位置で衝撃を受けた可能性が高いということになる。

結言: 水質変成鉱物の衝撃変成指標を得るべく減衰衝撃波を用いた衝撃回収実験手法を確立した。Calcite の波状消光は $>3 \text{ GPa}$ で顕著になり、偏光顕微鏡で判別可能である。Calcite の波状消光を利用して炭素質隕石母天体中の水岩石反応場の深さに制約を与えることができるかもしれない。

※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。