

「隕石に残る衝撃変成度 2 分性:初期太陽系の軌道力学環境復元」

神戸大学 大学院人間発達環境学研究科

黒澤耕介

1. 研究の背景と目的

隕石は地上で発見された宇宙の岩石である。岩石は鉱物の集合体である。隕石は鉱物学、岩石学、地球化学の手法で分類されている。本研究では有機物を多く含む炭素質隕石と有機物をあまり含まない普通隕石に注目する。隕石が地球に飛来するまでに宇宙空間を移動した年月は地球化学的な分析で宇宙線に起因する元素の量を測ることで推定されており、ほとんどの隕石が 100 万年以内に地球に落下している。隕石を構成する鉱物が固化したのは太陽系形成と同時期であるので、それまでの~45 億年間はより大きい隕石母天体上の岩体の一部であったと考えられている。隕石母天体はおおよそ直径 100 km 以上の小惑星であると推定されている。

隕石中の鉱物に注目すると、過去の天体衝突による損傷が確認できることがある。これは衝撃変成と呼ばれている。衝撃圧力は衝突速度と相関があり、天体同士の衝突速度は太陽系における軌道力学によって決まる。つまり、隕石群の衝撃変成度の頻度分布から過去の太陽系の軌道力学を解読できる可能性がある。「衝撃を受けた隕石たち」は太陽系にのこされた「Rosetta Stone たち」である。どの程度の衝撃圧力を受けた際にどのような変成組織ができるのか、7 段階の分類表が提案されている。これは **Stöffler table** と呼ばれ隕石を解読するための辞書として活用されている。これに従って隕石を分類した先行研究によれば、過半数の普通隕石が S_3 と呼ばれる衝撃変成度以上に分類されるのに対して、炭素質隕石の過半数は極弱い衝撃変成(S_1)しか受けていない「衝撃変成度 2 分性」が存在する。炭素質隕石と普通隕石には Ti と Cr の同位体が系統的に異なる「同位体 2 分性」も存在していることがわかっており、隕石母天体の形

成場所が異なることが示唆されている。衝撃変成度 2 分性は何を意味しているのだろうか？ 炭素質隕石母天体と普通隕石母天体の形成領域で大きく異なる軌道力学環境であったという太陽系全域に関わる魅力的な推論が成り立つ。しかし、炭素質隕石の母天体候補は普通隕石の母天体と同様に現在では火星と木星の間の小惑星帯に位置しており、どこかの時点で遠方から移動してきたと考えられている。炭素質小惑星リュウグウから回収された試料が示した強い残留磁化は、リュウグウの母天体が太陽系形成から数 100 万年以内に内側太陽系に移動してきたことを示唆している。直径~100 km の小惑星の軌道を大きく変化させるような軌道変化の駆動力は木星をはじめとする巨大ガス惑星の軌道変動時の重力散乱の他に考えにくい。リュウグウの母天体だけでなくその他の炭素質隕石母天体も同時期に小惑星帯に移動してきたと考えられる。すなわち炭素質隕石と普通隕石の母天体は共に木星の重力の影響を受ける小惑星帯で~45 億年を過ごしてきたと推定される。

隕石の衝撃変成度 2 分性は 30 年以上前から知られているが、その成因は明らかではなかった。2003 年に神戸大学の留岡和重教授らの研究チームがある種の炭素質隕石に多く含まれる含水鉱物が衝撃をうけた際に脱水し、衝撃変成組織を吹き飛ばした、とする説を *Nature* 誌に発表している。このアイデアは素晴らしいものの含水鉱物を含まない種類の炭素質隕石もやはり衝撃変成をあまり受けていないことを説明できない。また組織観察のみからの推察であり、衝撃変成組織が隕石母天体の地中に埋め込まれたり、再集積したりすることなく宇宙空間に散逸するのだろうか、定量的な検討は行われていない。さらに近年研究代表者を中心とする研究チームは含水鉱物からの脱水は従来考えられてきたよりも起こりにくいことを報告 [Kurosawa et al., 2021, *Communications Earth and Environment*]しており、含水鉱物から脱水で衝撃変成度 2 分

性を説明することは難しいと思われた。

このような問題意識のもとに我々は炭素質隕石に多く含まれる有機物に注目した。炭素質隕石中の有機物は隕石基質に含まれている。有機物と鉱物が共存していると機械物性が異なるだけでなく、加熱時の酸素分圧も大きく変わることになる。我々は隕石基質模擬物質を標的とした高速度衝突実験を行い、発生する気体を直接分析することで、有機物の役割を調べることにした。

2. 研究方法・研究内容

隕石基質模擬物質として 4 種類の標的を用意した。(1)酸化鉄のみ(Fe-O), (2)酸化鉄+黒鉛(Fe-O-C), (3)石英のみ(Si-O), (4)石英+炭素(Si-O-C)である。粉末試薬を購入し、均質に混合させてペレットを作成した。空隙率は隕石基質に近い~60%に調整した。酸化鉄は水質変成を受けた炭素質隕石の基質の 2 番目に多い成分である。最も多い成分は含水鉱物であるが、前述の Kurosawa et al. (2021)にてすでに評価済みであるので、今回はより単純な標的として Fe-O-C を水質変成を受けた隕石基質模擬物質とした。石英は無水の炭素質隕石基質模擬物質として選択した。石英は隕石にはほとんど含まれないが、橄欖石、輝石、斜長石などの主要珪酸塩鉱物と似たような衝撃応答特性と化学安定性を示すことから採用した。黒鉛は最も単純な不溶性有機物として隕石有機物の模擬物質とした。また一部の実験では S/N 比向上のため同位体ラベリングをした炭素粉末(¹³C Amorphous)も使用した。酸化鉄, 石英, 黒鉛, ¹³C Amorphous については比較的安価に安定した品質の粉末を購入可能であることから、再現性よく系統的な実験を実施することができる。また今回は系から水素を省き、発生ガスを CO, O₂, CO₂ に絞った。この簡略化により、炭化水素による化学分析への干渉がなくなり、高精度な分析が可能になる。

高速度衝突実験は二段式水素ガス衝撃銃を用いて行った。この装置は火薬と水素ガスをを用いて飛翔体を加速する。通常は化学汚染ガスが大量に実験用真空槽に侵入してしまい、衝突によって発生する試料由来の微量なガスを計測することはできない。前述の Kurosawa et al. (2021)ではこのような化学汚染ガスを排除し、試料由来の μmol オーダーの気体の量を定量的に計測する手法を確立した。今回はこの実験手法を4つの隕石基質模擬ペレットに適用した。飛翔体には高温まで安定な酸化アルミニウムの球を用い、 $3\text{--}7\text{ km s}^{-1}$ の範囲で衝突速度を変化させた実験を行った。

3. 研究成果

実験の結果、炭素を含む標的からは CO , O_2 , CO_2 のいずれか、あるいは全てが検出された。これらのガス分子が含む炭素原子は黒鉛から、酸素原子は酸化鉄もしくは石英から放出されたものである。発生した CO , CO_2 は黒鉛が酸化鉄もしくは石英から放出された酸素によって「燃焼」したことを意味する。衝突速度の関数として各標的からの発生ガス量を調べたところ、(1)発生ガス量は衝突体質量の $0.1\text{--}10\%$ 程度であること、(2)発生ガス量は衝突速度の増加に対して急激に増加すること、(3)炭素と隕石基質模擬鉱物が共存している場合、発生ガス量が最大で2桁程度上昇することが明らかとなった。続いて研究チームは衝撃物理学と熱統計力学に基づく数値解析を実施し、(4)実際の実験標的の中では数値モデルでは考慮されない局所的なエネルギー集中による加熱が起きていること、(5)ガス温度はおよそ $1,700\text{ }^\circ\text{C}$ もの高温になっていることを明らかにした。

隕石母天体表面で鉱物が放出した酸素によって有機物が $1,700\text{ }^\circ\text{C}$ で酸化される、これは身近な言葉でいうと爆発である。天体衝突時に衝突点の近傍では有機物が爆発し、宇宙空間に向けて急激に膨張するガス流が形成されることになる。衝突点近傍に存在

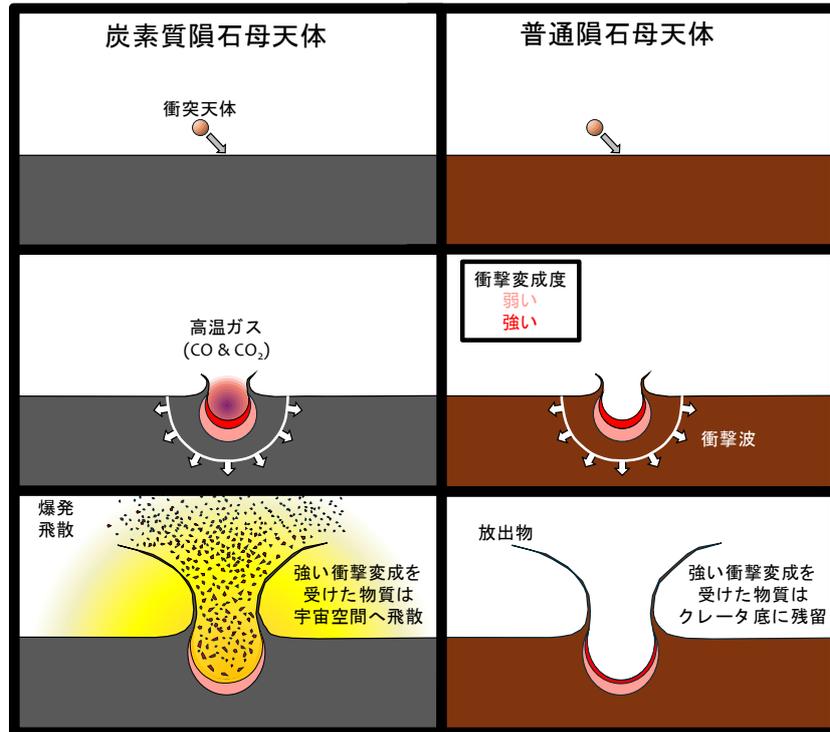


図1. 隕石の衝撃変成度、分性の成因の模式図

していた強い衝撃変成を受けた物質はこの爆発によって破碎されつつ宇宙空間に向かって加速されるだろう。研究チームは、実験で得られたガスの量と温度をもとに簡単な物理モデルを組み立て、隕石母天体の重力を振り切って宇宙空間に流出可能な物質の質量を推定した。計算の結果、典型的な大きさ(直径 100 km)の隕石母天体からは衝突天体質量の 2 倍以上の物質が宇宙空間に散逸してしまうことがわかった。強い衝撃変成を受けた物質は丸ごと失われてしまう。このような有機物の爆発は炭素を多く含む炭素質隕石母天体の上では起こるが、炭素をあまり含まない普通隕石母天体上では起こらない。よって研究チームは衝撃変成度 2 分性の成因は天体衝突時の有機物の爆発が原因であると結論付けた。このメカニズムを模式的に以下の図 1 に示す。

4. 生活や産業への貢献および波及効果

本研究で得られた知見は基礎科学の発展に寄与するものであり、残念ながら生活および産業への短期的な貢献にはなり得ない。本研究は近年世界的にも注目が高まっている小天

体の科学の潮流を強化するものである。小惑星は地球ではもう存在しない「未踏の大地」であり、そこに到達し画像を得たり、表面に小型機を下すことは国威発揚を促すだろう。今回の我々の発見は典型的な直径 100 km 程度の炭素質小惑星からは過去の天体衝突の証拠が失われてしまうが、大型の炭素質小惑星の上には強い衝撃変成を受けた鉱物が蓄積されていることを示唆する。今後の小惑星探査に指針を与えるものである。

研究成果

Kurosawa, K., G. S. Collins, T. M. Davison, T. Okamoto, K. Ishibashi, T. Matsui, Role of carbon in chondrite matrix during impact heating, LPS XVI, 1399, (2025)

Kurosawa, K., G. S. Collins, T. M. Davison, T. Okamoto, K. Ishibashi, T. Matsui, Impact-driven oxidation of organics explains chondrite shock metamorphism dichotomy, Accepted for publication in *Nature Communications*