

Lコンドライト隕石に対する衝突実験

～コンドリュール中のクラック分布

○道上達広（近大）、アクセル・ハガーマン（スターリング大）、土山明（京大）、山口裕貴（京大）、入江輝紀（近大）、野村啓太（近大）、佐々木理（東北大）、中村美千彦（東北大）、奥村聡（東北大）、長谷川直（ISAS/JAXA）

研究会で発表した内容は、*Planetary and Space Science* に投稿した。以下はその要旨となる。

はじめに

直径 1km にも満たない小惑星イトカワにおいて、その表面は大小様々な岩塊、粒子を含むレゴリス層で覆われていることが分かった。しかしながら、イトカワのような微小重力下で、どのように小さな粒子が形成されるのか不明な点が多い。小さな粒子の形成メカニズムとして、主に熱疲労と衝突破片の 2 つが考えられる。

Delbo et al. (2014) は、小惑星表面の粒子は、熱疲労で形成される可能性を示した。つまり、小惑星の自転による昼夜の温度差が原因となって、表面物質の熱疲労をもたらし、表面物質がさらに細かく壊れ、粒子の形成が進むとしている。さらに Molaro et al. (2015) は、熱疲労では、斑晶や石基の熱膨張係数の違いで、コンドリュールなどの境界に沿ってクラックが成長することを指摘している（図 1a）。

一方、衝突破片では、小惑星イトカワの母天体が衝突破壊を受け、飛び出した大小様々な衝突破片が再集積し、イトカワが形成、その際に表面に小さな粒子も一緒に再集積したと考えられる。その一つの証拠として、Tsuchiyama et al. (2011,2014) は、解析した直径 120 μm 以下のイトカワ粒子は単結晶、多結晶鉱物に関係なく、形状分布は玄武岩などの衝突破片と同じであることを指摘している。さらに、Michikami et al. (2018) では、イトカワ模擬物質として L5 コンドライト隕石を用い、衝突実験を行った。その結果、それら直径 120 μm 以下の衝突破片粒子の形状分布は、イトカワ粒子の形状分布と等しいことが分かった。また、その形状分布は岩石組織に依らないことから、衝突破片の場合、クラックはコンドリュールの境界に関係なく成長する可能性を示唆している（図 1b）。

そこで本研究では、衝突によってクラックがコンドリュール内部をどのように成長するか明らかにするために、イトカワ模擬物質の L5 コンドライト隕石に対して衝突実験を行った。そして、X 線 CT 撮像を通じて、衝突後の隕石中のクラックの進展（特にコンドリュール内部）を調査した。これらを通じて、イトカワ粒子の形成起源

に制約を与えることが目的である。

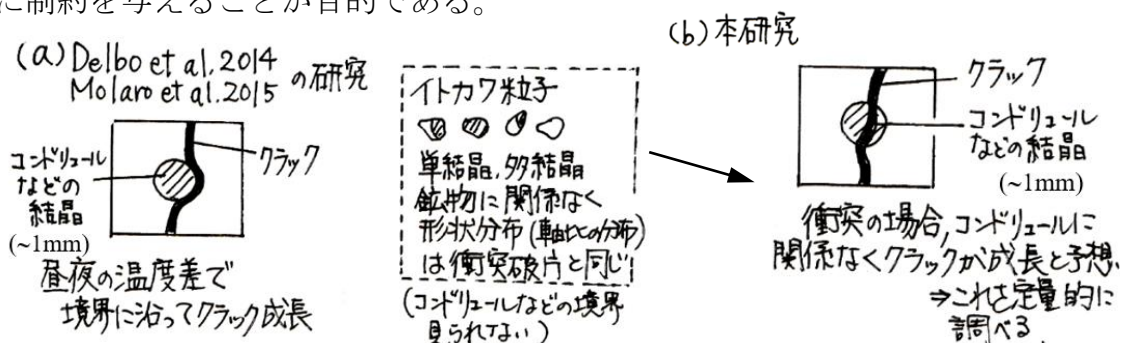


図1 本研究の概念図

Tsuchiyama et al. (2011,2014)

衝突実験と X 線 CT 撮像

今回、標的として L5 コンドライト隕石(The Sayh al Uhaimir 001 (SaU001))を用いた。この物質は、すでに Michikami et al. (2018)の実験でも使用されたものである。実験は JAXA 宇宙科学研究所にある 2 段式軽ガス銃を使用し、弾丸に直径 1.0mm、質量 0.0027g または 0.0030g のアルミナ球を用いた。標的の密度は 3400kg/m^3 であり、一辺が 9.0mm の立方体に加工して衝突実験を行った。今回の実験では、標的が小さく、弾丸の軌道も安定しないため、1つの標的に弾丸を当てるのは困難を極めた。そこで、弾丸を標的に当たりやすくするために、標的を「田」字に4つ並べ、4つのいずれかの標的に当たるよう実験を行った。弾丸の衝突速度は約 2.0km/s で、成功したショットは全部で6ショットであった。衝突の際の真空度は 30 Pa 以下で、高速度カメラで撮影することによって、衝突点および放出された破片の様子を調べた。

実験を行う前に、一辺が 9.0mm の標的を東北大学博物館にて、X 線 CT 撮像を行い (画像サイズは $9.0\mu\text{m}/\text{voxel}$)、標的内部の3次元構造を調べた。標的の破壊強度に影響するような大きなクラックは、この解像度では発見できなかった。衝突後は、壊れた標的の最大破片に対して、X 線 CT 撮像を行い、その内部のクラック分布、特にコンドリュール内部のクラックの進展について調べた。

実験結果と考察

図2は、衝突後の各ショットにおける最大破片を示してある。衝突点の位置によって、少し壊れたものから (s3542)、半分以上壊れたものまで(s3798,s4021)多様な破片を得ることができた。図3は、X 線 CT 撮像した各最大破片の典型的な断層写真である。これらの断層写真を ImageJ というソフトを使って重ね合わせ、各粒子の3次元画像を作成した。そして、これらの画像から、コンドリュール (図の比較的黒く見える粒子) 内部のクラックの進展、および Fe-Ni 金属 (比較的白く見える)、トロイライト (白いが若干灰色に見える) のクラックの進展についても調べた。

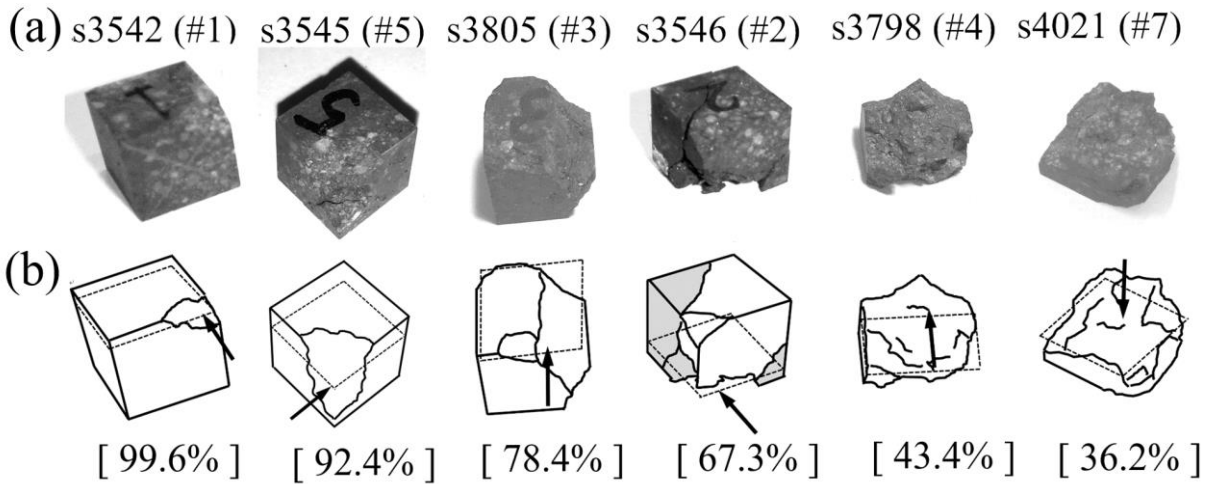


図2 衝突後の最大破片。(a)最大破片の写真を、破壊の程度の小さなものから左から順に並べた。ショットナンバーと標的ナンバーが記載してある。(b) 対応するイラスト。括弧には、「最大破片質量/衝突前の標的質量」を示してある。弾丸の軌道は矢印で示した。s3546 だけ、2 番目、3 番目、4 番目に大きい破片も載せ、色掛けの部分で示してある。点線は図3のX線CT断層写真に対応している。

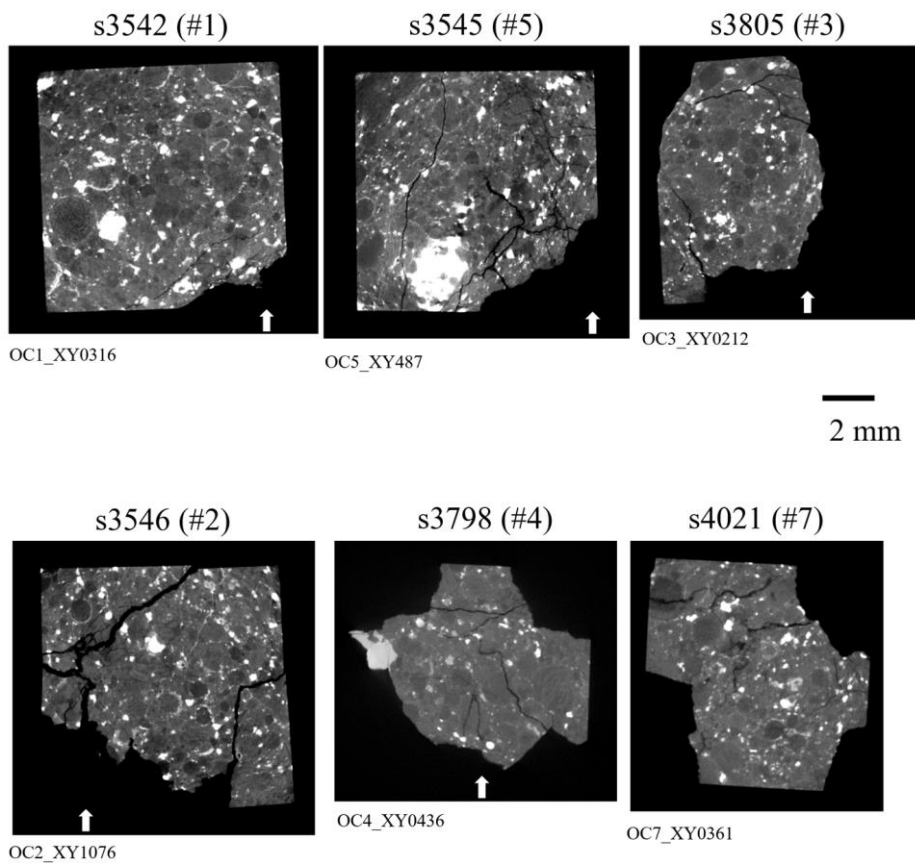


図3 典型的なX線CT断層写真。弾丸の軌道は矢印で示した。S4021 だけ、弾丸の軌道は紙面表から裏の方向になる。

今回のコンドリュール内部のクラックの進展では、便宜上、以下の4つに分類した。
 分類 I) クラックがコンドリュール粒子の境界に沿って成長しているもの。
 分類 II) クラックがコンドリュール粒子の端の近くで成長しているもの。
 分類 III) クラックがコンドリュール粒子の中心付近を貫いて成長しているもの。
 分類 IV) クラックがコンドリュール粒子の中心付近を貫いて複数に枝分かれしているもの。

また、同様の分類を Fe-Ni 金属、トロイライト、それらの複合物に対しても行った。図4はその結果で、各分類の割合を円グラフで示してある（成功した6ショットの合計。ショットごとの大きな違いは見られなかった）。

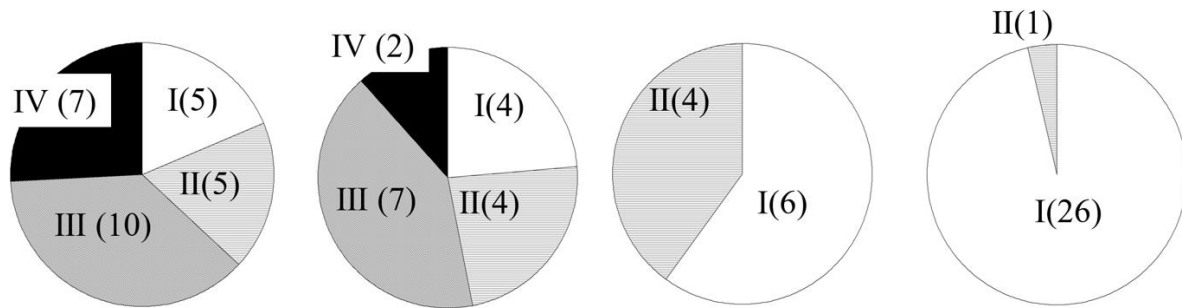


図4 各粒子とクラック成長の各分類の割合。括弧に観測された粒子の個数を示してある。

図4から、コンドリュールでは、分類 III と IV が半分以上の割合を占めることが分かる。これは、粒子の境界に関係なくクラックが成長していることを示している。一方、Fe-Ni 金属では、ほとんどが分類 I で、これはほとんどのクラックが粒子の境界に沿って成長していることを示している。一般に、各粒子の強度は、大きい方から順に、Fe-Ni 金属、Fe-Ni 金属とトロイライトの複合物、トロイライト、コンドリュールと考えられるので、粒子の強度が弱いほど、クラックは粒子の境界に関係なく成長することが分かる。このように、衝突では、クラックはコンドリュール内部を粒子境界に関係なく成長することから、イトカワ粒子は、熱疲労で形成されたというよりは、衝突破壊で形成された可能性が高いであろう。

参考文献

- (1) Delbo et al., 2014. Nature 508, 233-236. (2) Michikami et al., 2018. Icarus 302, 109-125. (3) Molaro et al., 2015. JGR 120, 255-277. (4) Tsuchiyama et al., 2011. Science 333, 1125-1128. (5) Tsuchiyama et al., 2014. MAPS 49, 172-187.