

令和 5 年 4 月 10 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04048

研究課題名（和文）炭素質隕石に対する衝突実験とX線CT撮像～小惑星リュウグウへの応用

研究課題名（英文）Cracking the chondrules of carbonaceous meteorites in hypervelocity impact experiments.

研究代表者

道上 達広（Michikami, Tatsuhiro）

近畿大学・工学部・教授

研究者番号：60369931

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：炭素質隕石に対して衝突実験を行い、生じたクラックの3次元分布をX線CT撮像（衝突前後に撮像）から明らかにした。その結果、CM隕石においては、クラックは、コンドリュールの境界に関係なく成長することが分かった（水質変成を受けた部分の強度が弱くなり、そこにクラックが存在している）。一方、衝突でない、熱疲労でクラックが生じる場合、熱膨張率の違いから、クラックはコンドリュールの境界に沿って成長することが知られている。将来、CM隕石と同じ物質であろう小惑星ベンヌから持ち帰られるサンプル粒子を調査し、今回の実験結果と比較することで、小惑星ベンヌの表層の形成過程を推定（衝突か熱疲労か）することができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の探査機による直接探査によって、小惑星表面はレゴリス層と呼ばれる数cm以下の破砕物で覆われていることが分かった。しかし、レゴリス層の生成メカニズムはよく分かっていない。レゴリス層の形成要因として、小惑星の昼夜の温度差がもたらす熱疲労による表面物質の細粒化、小惑星母天体からの衝突破片の再集積の2つがある。本研究によって、炭素質小惑星と同じ物質のCM隕石の場合、コンドリュール中のクラック成長が、熱疲労と衝突で異なることが分かった。今回の結果を小惑星ベンヌ粒子の調査結果と比較することで、小惑星レゴリス層の形成メカニズムの解明が期待される。

研究成果の概要（英文）：In order to investigate how chondrules are affected by impact-induced crack growth, we fired spherical alumina and glass projectiles (diameter 1 and 0.8 mm) into 1 to 2 cm-sized targets of carbonaceous meteorites at a nominal impact velocity of 2.0 and 4.0 km/s. Before and after the six successful impact experiments, the cracks within chondrules in the respective targets are examined using X-ray microtomography at a resolution with the voxel size of ~10 μm. The results show that most cracks in CM chondrites grow regardless of the boundary surfaces of the chondrules. We found that most chondrules in CM chondrites have experienced aqueous alteration and become structurally weak.

研究分野：惑星科学

キーワード：小惑星リュウグウ 衝突実験 コンドライト隕石 X線CT撮像実験 小惑星ベンヌ

## 1. 研究開始当初の背景

近年の探査機による直接観測によって、1km 未満の小さな天体に関わらず、小惑星イトカワ、リュウグウ、ベンヌの表面には岩塊や数 cm 以下の碎屑物のレゴリス層に覆われていることが分かった。レゴリス層の主要な形成要因として、小惑星の昼夜の温度差がもたらす熱疲労による表面物質の細粒化、小惑星母天体からの衝突破片の再集積の2つが考えられる。表面物質が細粒化された場合、太陽風や微小隕石による宇宙風化作用で、小惑星表面のスペクトルが変化する。また、隕石衝突によるクレーター形成やそれに伴う表層のガーデニングなど、小惑星表面は当初あった状態から変化する。地球からの観測や探査機による直接観測でも、小惑星表面の観測が主であるので、レゴリス層形成の解明は、小惑星の衝突進化を考える上で重要な課題である。

最近、小惑星探査機はやぶさ2が小惑星リュウグウに到着、大きな科学的成果を挙げている。小惑星リュウグウは、炭素質小惑星で、含水鉱物の形で水が存在することが分かった(Kitazato et al., 2019)。地球の水は、以前は彗星起源と考えられていたが、彗星探査機ロゼッタの科学成果によって、地球の水の成分と彗星の水の成分は異なることが明らかになった(Altwegg et al., 2015)。近年、小惑星リュウグウのような炭素質小惑星から地球の水がもたらされた可能性が高くなっている。炭素質小惑星からの水の供給形態として、小惑星同士の衝突、小惑星表層から放出された惑星間塵などがある。炭素質小惑星のレゴリス層形成の解明は、惑星間塵への移行など、地球の水の供給形態を知る上でも重要である。

このように小惑星のレゴリス層形成の解明は重要にあるにも関わらず、1km 未満の小さな小惑星の微小重力下で、どのようにレゴリス層が形成されたかよく分かっていない。特に炭素質小惑星の表層進化を考える上で、それと同じ物質である炭素質隕石に対する衝突実験は、非常に高価であるためこれまで行われていない。そこで本研究では、レゴリス層は天体衝突によって形成されたとの立場で、炭素質隕石に対して衝突実験を行うことにした。

## 2. 研究の目的

本研究では、炭素質小惑星のレゴリス層形成の解明のために、炭素質隕石に対する衝突実験を行う。衝突前後の標的のX線CT撮像で、炭素質隕石が衝突を受けた際のクラックの成長を調査する。

過去の天体衝突を模擬した室内衝突実験では、小惑星模擬物質として、玄武岩、ガラスビーズ焼結体、石膏が用いられ、衝突破片の質量、速度の測定が多く行われてきた。しかしながら、隕石そのものに対する実験は少なく、特に高価で強度の弱い炭素質隕石に対する実験は行われていない。さらに衝突による破片内部のクラック分布は、過去のX線CT撮像の解像度が低く、ほとんど調べられていない。近年、X線CT撮像機器の性能向上によって、 $\mu\text{m}$ サイズの解像度で撮像ができるようになり、cmサイズ以下の試料であれば、内部クラックの詳細な3次元構造解析が可能になっている。本研究では、1cm程度の小さな標的を用いることで、試料を節約する。また、衝突前後の標的をX線CT撮像することによって、炭素質隕石のクラックの空間分布およびクラック成長を3次的に明らかにすることに特徴がある。

## 3. 研究の方法

今回、標的として、大きさが1-2cmのアエンデ隕石(CV3)、マーチソン隕石(CM2)、アグアス・ザルカス隕石(CM2)を用いた。実験はJAXA宇宙科学研究所にある2段式軽ガス銃を用いて実施した。弾丸として、CVコンドライト隕石に対しては、直径1mmのアルミナ球を秒速2.0kmで、CMコンドライト隕石に対しては、直径0.8mmのガラス球を秒速4.0kmで衝突させた。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難しい。そこで、弾丸を標的に当たりやすくするために、標的を複数個置き、いずれかの標的に当たるよう実験を行った。解析した標的の数は、アエンデ隕石で7個、マーチソン隕石、アグアス・ザルカス隕石で各2個ずつである。衝突の際の真空度は20 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、今回用いた標的を東北大学博物館にて、X線CT撮像を行い(解像度約 $10\mu\text{m}/\text{voxel}$ )標的内部の3次元構造を調べた。衝突前、アエンデ隕石においては、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。一方、マーチソン隕石、アグアス・ザルカス隕石においては、隕石の内部にいくつかのクラックが存在していた。衝突後、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成長について調べた。

#### 4 . 研究成果

図1は、各ショットにおける衝突前の標的、衝突後の最大破片を示している。弾丸の軌道のずれによって、標的に衝突する位置がショットごとに異なり、標的の表層の一部が壊れるものからカタストロフィック破壊まで、様々な壊れ方をしたことが分かる。

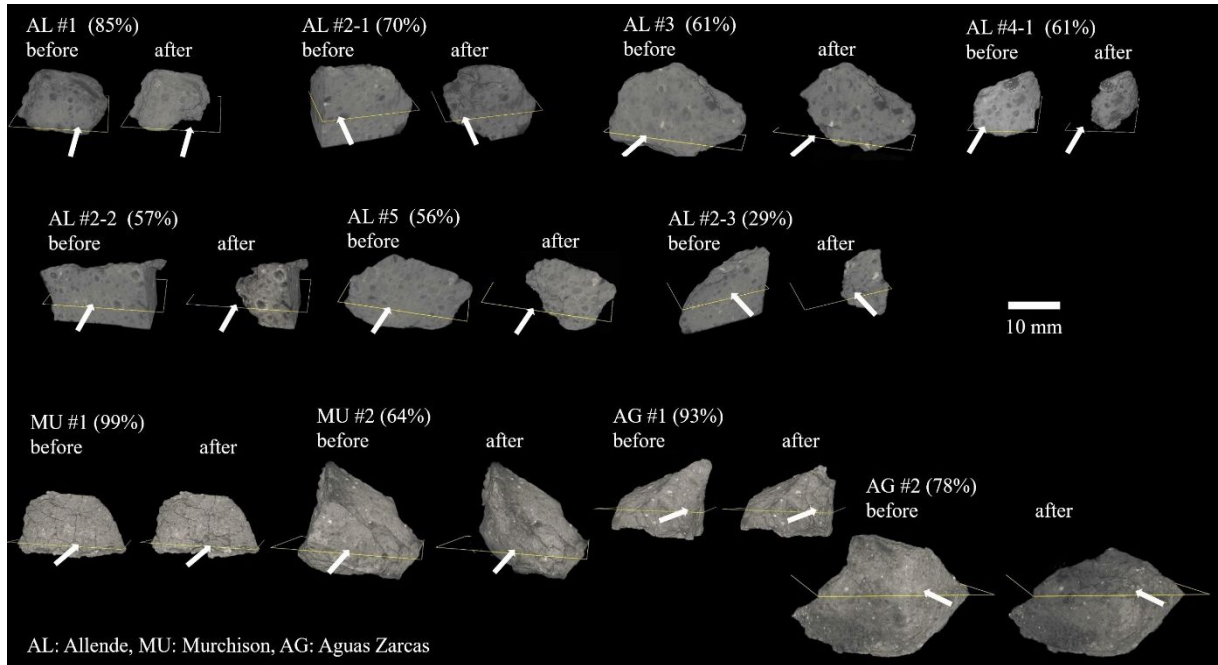


図1 各ショットにおける衝突前の標的と衝突後の最大破片。括弧には、「最大破片質量/衝突前の標的質量」を示してある。弾丸の軌道は矢印で示した。(Michikami et al., 2023 の Fig. 2 より引用)

X線CT画像を確認したところ、衝突によって生じた多くのクラックは、標的の表面もしくは破断面に平行に形成されていた(図2)。このため、クラックは主に稀薄波によって形成されたと考えられる。また、CMコンドライト隕石では、いくつかのクラックが衝突前の隕石内部に存在し、そのクラックが成長していくつかの破断面が形成されていた。今回、稀薄波によって生じたと考えられるクラック沿いのコンドリュールに注目し、コンドリュールとクラックの関係を調査した。調査したコンドリュールの数は、アエンデ隕石で66個、マーチソン隕石で28個、アグアス・ザルカス隕石で14個である。

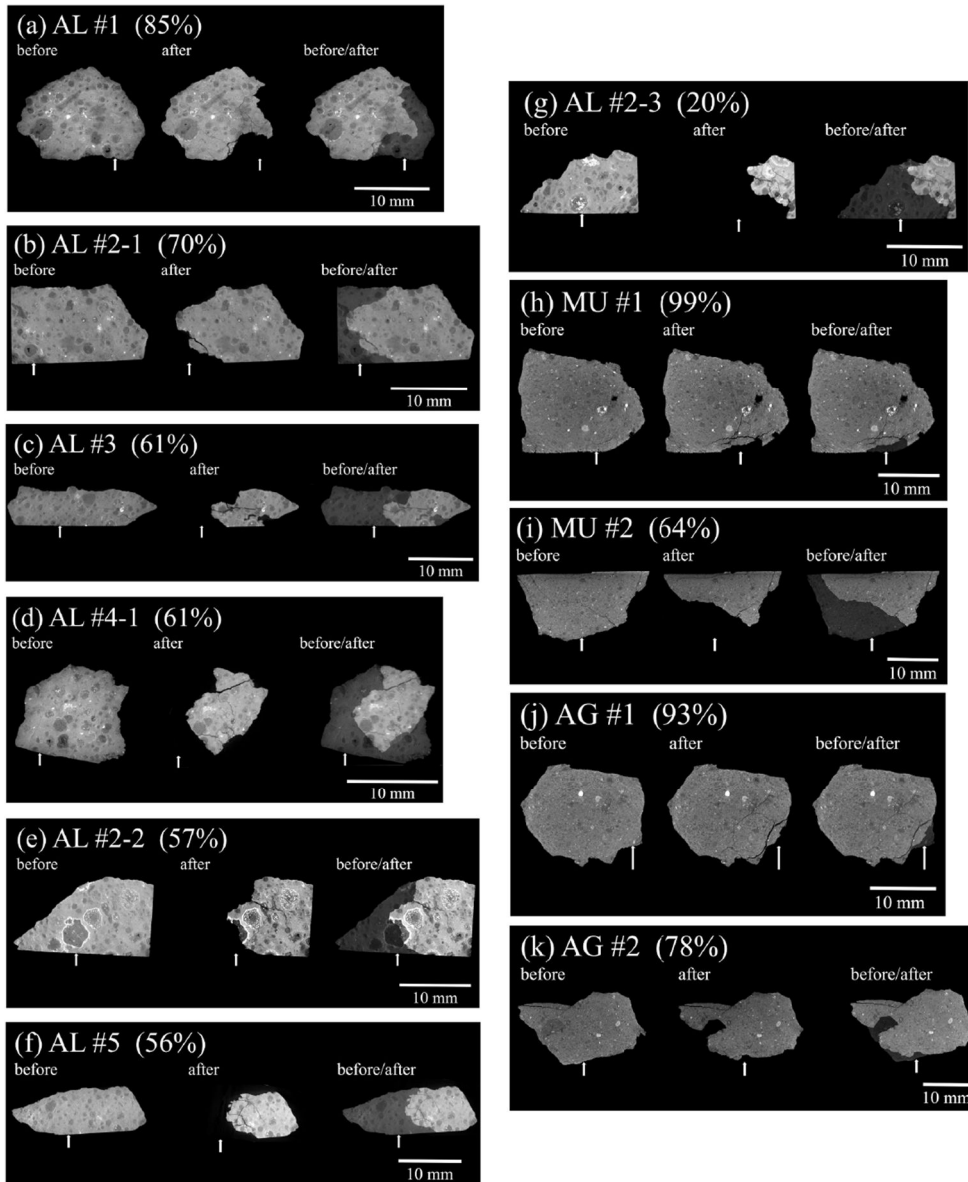


図 2 各ショットにおける衝突前の標的、衝突後の最大破片、及びその 2 枚を重ねた X 線 CT 断面図(図 1 の黄色で示した箇所)。括弧には、「最大破片質量/衝突前の標的質量」を示してある。弾丸の軌道は矢印で示した。(Michikami et al., 2023 の Fig. 3 より引用)

今回のコンドリュール内部のクラックの成長において、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。

図 3 はその結果で、各分類の割合を円グラフで示してある(同じ隕石のショットでは、標的の壊れ方に依らず、各分類の割合は類似していた)。

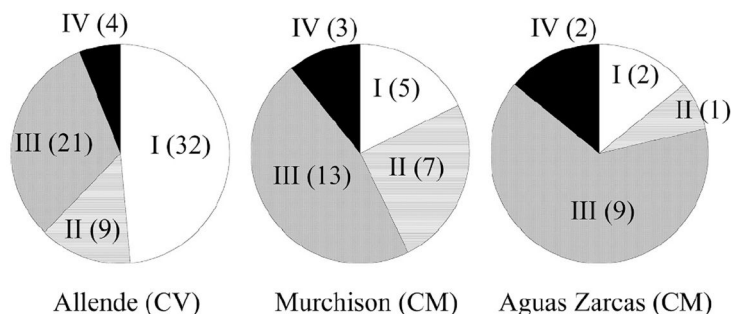


図 3 各コンドライト隕石とクラック成長の各分類の割合。観測された粒子の個数を括弧に示してある。(Michikami et al., 2023 の Fig. 6 より引用)

図 3 から、CV コンドライト隕石では、半数以上がコンドリュール境界（もしくは付近）を沿うようにクラックが成長していることが分かった。これは、熱疲労で形成されるクラックの成長と同じ傾向を示している。一方、CM コンドライト隕石では、半数以上がコンドリュール境界に関係なく、コンドリュール内部をクラックが貫通していることが分かった。この CV コンドライト隕石と CM コンドライト隕石の違いとして、CM コンドライト隕石は水質変成していることが挙げられる。マーチソン隕石の薄片を作製し、光学顕微鏡観察したところ、コンドリュール内部の水質変成している部分の強度が弱くなっていることが分かった。そのため、CM コンドライト隕石では、コンドリュールとマトリックスの強度の違いが小さく、クラックはコンドリュール内部を貫通したと考えられる。

2023 年夏に地球に持ち帰られる予定のベンヌ粒子は、CM コンドライト隕石と同様の物質と考えられている。そのため、ベンヌ粒子内部におけるクラック成長の解析結果と今回の実験結果を比較することで、ベンヌ粒子が、熱疲労で形成されたのか、衝突によって形成されたのか類推できるかもしれない。

#### < 引用文献 >

Altwegg et al., 2015, Science 347, 1261952

Kitazato et al., 2019, Science 364, 272-275

Michikami et al., 2023, Icarus 392, 115371

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Michikami Tatsuhiro, Hagermann Axel, Morota Tomokatsu, et al	4. 巻 381
2. 論文標題 Three-axial shape distributions of pebbles, cobbles and boulders smaller than a few meters on asteroid Ryugu	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 115007 ~ 115007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2022.115007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Michikami Tatsuhiro, Hagermann Axel	4. 巻 357
2. 論文標題 Boulder sizes and shapes on asteroids: A comparative study of Eros, Itokawa and Ryugu	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2020.114282	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Michikami Tatsuhiro, Tsuchiyama Akira, Hagermann Axel, Takeda Akio, Shishido Katsuki, Otsuka Yushi, Sasaki Osamu, Nakamura Michihiko, Okumura Satoshi, Kano Harumasa, Hasegawa Sunao	4. 巻 392
2. 論文標題 Three-dimensional imaging of high-velocity-impact induced crack growth in carbonaceous meteorites	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 115371 ~ 115371
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2022.115371	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 道上 達広
2. 発表標題 炭素質隕石に対する衝突実験～X線CT撮像による隕石内部クラックの3次元分布
3. 学会等名 日本惑星学会2022年秋季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 道上 達広
2. 発表標題 炭素質隕石に対する衝突実験～コンドリュール内部のクラック成長
3. 学会等名 第18回天体の衝突物理の解明
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 道上 達広
2. 発表標題 炭素質隕石に対する衝突実験～コンドリュール内部構造とクラック
3. 学会等名 令和4年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム（書面発表）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
スウェーデン	Lulea University of Technology		