

令和2年9月7日

報道関係者各位

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構  
国立大学法人筑波大学  
国立大学法人熊本大学

## 隕石衝突の規模を鉱物から探る — 高強度レーザーで再現した隕石衝突の瞬間を超高速X線撮影 —

### 本研究成果のポイント

- 鉱物が隕石衝突のような強い衝撃を受ける状況を実験室で再現し、その瞬間の結晶構造変化を放射光X線により超高速撮影した
- ジルコニア鉱物（バドレイアイト<sup>(※1)</sup>）について実験を行い、衝撃圧縮により結晶構造が変化し、その後、圧縮が解放されると元の結晶構造に戻ることが分かった
- バドレイアイトの衝撃挙動が解明されたことで、クレーターに存在する衝撃を受けたバドレイアイトの持つ痕跡を正確に読み解くことができるようになり、過去の隕石衝突履歴から惑星の形成、進化過程を解明する研究に貢献することが期待される

### 【概要】

高エネルギー加速器研究機構（KEK）、筑波大学、熊本大学は、KEKの放射光実験施設フォトンファクトリーアドバンスリング（PF-AR）において、ジルコニア（ $ZrO_2$ ）鉱物であるバドレイアイトについて衝撃実験を行い、衝撃を受けている最中に起きる結晶構造の変化をナノ秒（1ナノ秒=1億分の1秒）の時間スケールで直接観測することに成功しました。

これは、KEK物質構造科学研究所の高木壮大研究員、一柳光平研究員、野澤俊介准教授、深谷亮特任助教、船守展正教授、足立伸一教授、筑波大学生命環境系の興野純准教授、熊本大学の川合伸明准教授らを中心とした共同研究グループの成果です。本研究は、KEK PF-ARの時間分解X線回折実験ステーションNW14Aを利用して行われました。

本成果は、アメリカ地球物理学連合（AGU：American Geophysical Union）の発行する科学雑誌『Geophysical Research Letters』（9月16日号（Volume47, Issue17））に掲載されます。

## 【背景】

隕石などの天体の衝突は、惑星の形成を引き起こし、形成後の惑星にも影響を与えてきました。例えば地球では白亜紀における恐竜の大量絶滅のような生命への大きな影響を引き起こしたことはよく知られています。過去の隕石衝突の痕跡は惑星表層の岩石に残されていて、その情報を正確に読み解くことでいつどのような規模の衝突が起きたのかを理解することができます(図1)。そのためには、岩石を構成する最小単位である鉱物がどのくらいの衝撃でどのような変化を起こして最終的な状態に至るのかを知ることが非常に重要です。

隕石衝突履歴を知ることができる鉱物の一つにバッドレイアイトがあります。バッドレイアイトは化学組成  $ZrO_2$  で、存在量は多くありませんが地球表層から隕石中まで幅広い岩石中に見られます。また、ウラン-鉛同位体年代測定法を用いることでその鉱物がいつ形成されたのか、いつ変形したのかを知る「時計」としても用いられる鉱物です。これまでの研究で、カナダの隕石衝突クレーターに見られるバッドレイアイトが隕石衝突の衝撃により微細化を起こし、その一つ一つの結晶粒は同じバッドレイアイトの結晶構造を持ちながらもある特定の方向を向いて並んでいることが報告されています。これは衝撃を受けた瞬間だけ別の結晶構造に変化し、衝撃が解放されて元の結晶構造に戻るときに形成されたものと考えられています。しかしながら、クレーターの観察ではもちろん、実験室でのこれまでの衝撃実験でも実際に衝撃を受けている瞬間にどのように結晶構造が変化するのは直接観察されたことがありませんでした。

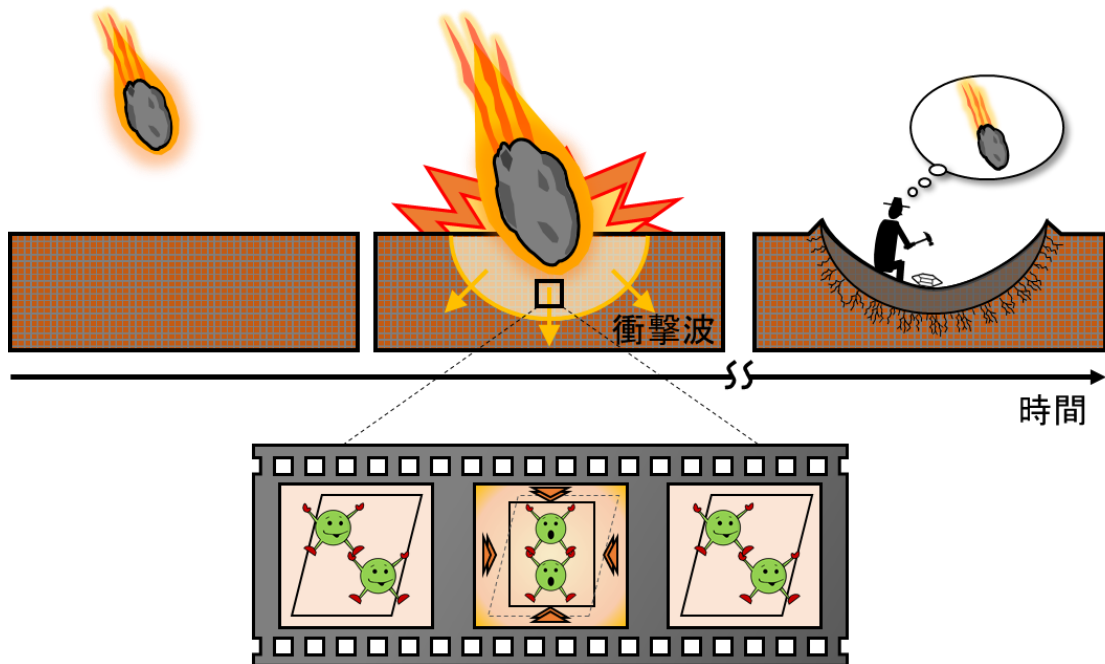


図1 隕石衝突履歴調査のイメージ図

隕石衝突の衝撃を受けた瞬間、鉱物の結晶構造は変化する。地質学者は衝突後に残された痕跡から過去の衝突の歴史を読み解く。

## 【研究内容と成果】

そこで研究グループは、放射光実験施設 PF-AR に構築した衝撃下その場 X 線回折測定システム<sup>(※2)</sup>を用いて、衝撃を受けている瞬間のバッドレイアイトの結晶構造の変化を詳

細に観察しました。この手法では高強度レーザーを照射することで衝撃波を発生させ、その衝撃波が伝播している瞬間の結晶構造を放射光 X 線パルスにより撮影することができます (図 2)。

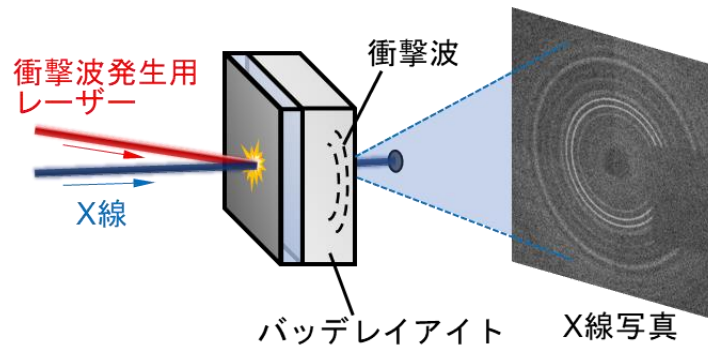


図2 衝撃を受けている瞬間に超高速X線撮影をする実験の概略図

その結果、衝撃圧縮により X 線写真に変化が見られ (図3)、わずかに結晶構造を変える (図4) ことが初めて直接観察されました。衝撃圧縮により、高压で安定な構造に変化して、その後衝撃波が通過し圧縮が解放される過程で元のバッデレイアイトの結晶構造に戻っていく、という挙動を示すことができます。また、その結晶構造の変化が起きる圧力境界が3.3 ギガパスカル (=3.3万気圧、ギガは $10^9$ の意味) であることも明らかになり、バッデレイアイトから隕石衝突規模を推定するための正確なデータを得ることに成功しました。

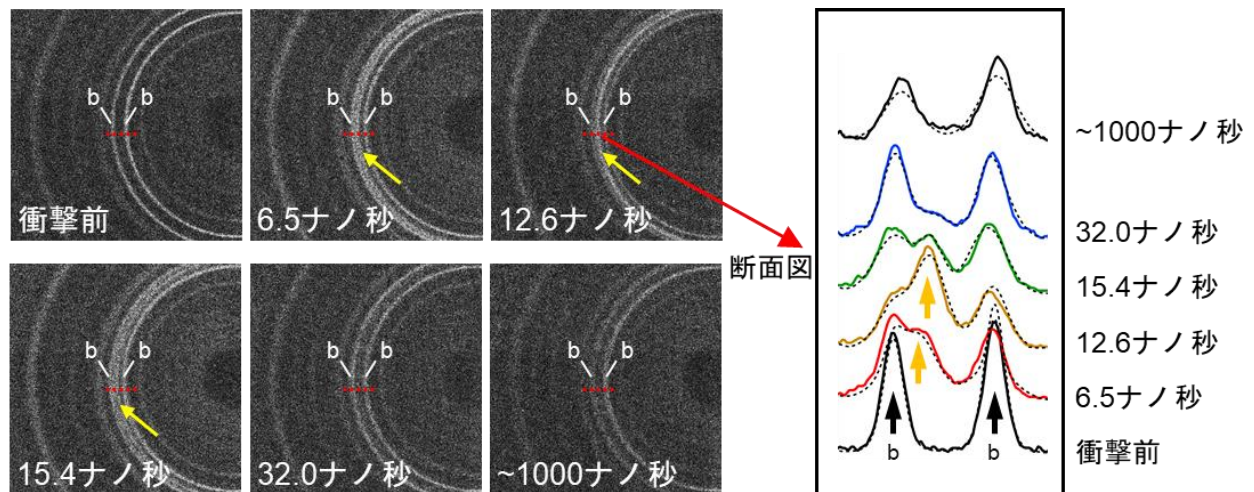


図3 (左) 衝撃下での X 線写真の変化。バッデレイアイトの特徴的な X 線回折線を b で表す。衝撃圧縮中に 2 つの b の線の間で高压で安定な構造由来の X 線回折線 (明るい白線) がみられる (矢印で示す)。(右) X 線写真の一部の断面図の時間変化。

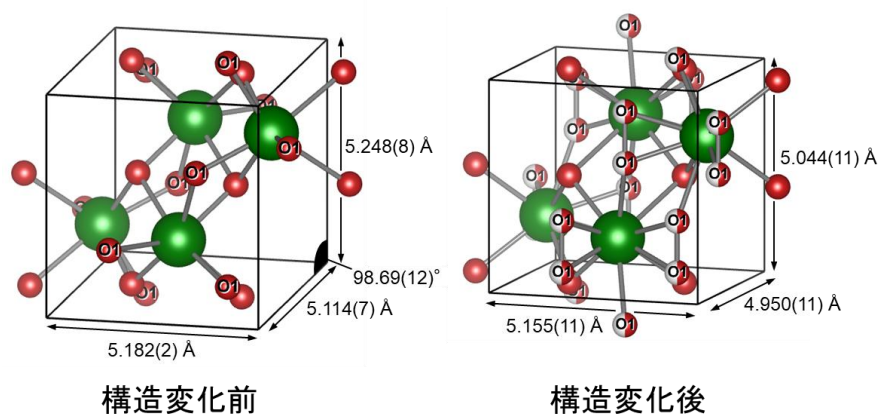


図4 X線写真から導かれる結晶構造

左側が結晶構造変化前のバッドレイアイトの結晶構造、右側が高圧で安定な構造に変化した後の結晶構造。Zr原子を緑色、O原子を赤色で表す。

< 論文名 >

*In situ* observation of the phase transition behavior of shocked baddeleyite

(日本語名：衝撃を受けたバッドレイアイトの相転移挙動のその場観察)

雑誌名「Geophysical Research Letters」9月16日号(オンライン版8月31日)

DOI: 10.1029/2020GL089592

### 【本研究の意義、今後への期待】

本研究は、衝撃の瞬間の鉱物の状態を結晶構造レベルの空間スケールかつナノ秒の時間スケールで撮影し、隕石衝突の鉱物への影響を明らかにすることに成功しました。結晶構造スケールでの変化は、衝撃による鉱物全体の変形に反映されるため、本研究の様に結晶構造の変化過程を理解することは全体の変形・破壊現象を把握するために非常に重要です。

本研究により、バッドレイアイトがどれくらいの衝撃でどのように変形するのかが解明され、隕石中や天体表層にあるバッドレイアイトから太陽系天体の形成、進化過程を正確に紐解いていく研究に貢献することが期待されます。

本研究は、フォトンファクトリー共同利用実験課題のT型(大学院生奨励)課題(課題番号:2017T002)内で行なわれました。また、科研費特別研究員奨励費「時間分解X線分析法を用いたAlCuFe準結晶鉱物形成メカニズムの解明」(研究代表者:高木壮大)、科研費基盤研究(C)「衝撃圧縮その場時間分解X線構造解析法による構造変化ダイナミクスの解明」(研究代表者:興野純)、科研費若手(A)「時間分解ラウエ回折法による衝撃破壊素過程の解明」(研究代表者:一柳光平)、科研費挑戦的萌芽研究「角度分散型時間分解X線回折による3次元衝撃圧縮状態の研究」(研究代表者:一柳光平)、科研費基盤研究(S)「フェムト秒時間分解X線溶液散乱による分子構造の超高速ダイナミクスの直接観測」(研究代表者:足立伸一)の支援を受けて実施されました。

## 【用語解説】

### ※1. バッデレイアイト

常温常圧では単斜晶相の結晶構造を持つ鉱物。化学組成は  $ZrO_2$ 。天然に産出するジルコニアで、装飾品にも用いられる。

### ※2. 衝撃下その場 X 線回折測定システム

物質に衝撃を加えた際の結晶構造変化を、高輝度 X 線パルスによる X 線写真（特に結晶構造が分かる回折像）によって観察する実験システム。日本では PF-AR と X 線自由電子レーザー施設 SACLA で研究が進められている。PF-AR では、本共同研究グループが導入した衝撃発生源としての高強度ガラスレーザーシステム（Takagi et al., *Journal of Synchrotron Radiation* **27**, 371 (2020)) と放射光 X 線を用いた実験が行われている。