

氏名	高木 壮大		
学位の種類	博 士 ( 理 学 )		
学位記番号	博 甲 第 9440 号		
学位授与年月日	令和2年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	生命環境科学研究科		
学位論文題目	放射光時間分解X線回折法を用いたジルコニアの衝撃圧縮下での相転移挙動の解明		
主査	筑波大学准教授	博士 (理学)	興野 純
副査	筑波大学教授	博士 (理学)	角替 敏昭
副査	筑波大学准教授	博士 (理学)	黒澤 正紀
副査	高エネルギー加速器研究機構准教授	博士 (理学)	野澤 俊介

## 論 文 の 要 旨

審査対象論文で著者は、天体衝突現象が鉱物に与える影響を解明するため、最新の実験手法の装置開発を行ない、衝撃下での鉱物の挙動を超高速度観察実験による直接観察を実施している。本論文で著者は、まず、高強度レーザーと放射光を利用したレーザー衝撃下時間分解X線回折実験のための装置開発と実験方法の確立について述べ、次に、その実験手法を用いて解明したジルコニアの衝撃下での挙動について示し、その惑星科学における役割に考察を加えている。

第1章で著者は、衝突現象を理解することの惑星科学における重要性とその解明を目指した従来の実験的研究の問題点を述べている。著者は、衝撃による鉱物の変形条件や高圧鉱物の形成条件を理解することの重要性を強調した上で、それらを解明するために衝撃実験が重要であるとしている。従来の衝撃実験手法の問題点として、従来から行われている音速計測と衝撃回収試料観察が、それぞれ時間的・空間的に詳細な観察が不可能であること、また、その問題点を解決するために発展してきた衝撃下その場X線分析手法のこれまでの問題点として、X線の安定性や大規模レーザー施設以外で発生できる衝撃圧について指摘している。そのため、高強度パルスX線を安定的に取り出せる放射光施設に高い衝撃圧を発生させることができる高出力レーザーを整備することが必要であることを強調している。さらに、現在、世界の放射光施設、X線自由電子レーザー施設で衝撃下時間分解X線分析実験の開発が同時に進められている現状について触れ、本研究の意義を説明している。

第2章では、著者が高エネルギー加速器研究機構の放射光施設 Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) のNW14A ビームラインで行なったレーザー衝撃下時間分解X線回折実験の開発について述べている。具体的には、高強度Nd:ガラスレーザーシステムの整備、高強度レーザーシステムと放射光時間分解X線回折測定システムの同期、レーザー速度干渉計実験システムの整備について詳細に記述されている。高強度ガラスレーザーシステムは、本研究の衝撃波発生装置として非常に重要な役割を果たす。本論文で、適切に整備が行われ、均質な衝撃波を発生させられるフラットトップな空間プロファイルを持つレーザーパルスシステム

の開発に成功したことと、その方法が提示されている。次に、NW14A ビームラインでの時間分解 X 線回折測定は先行研究の方法を踏襲し、パルス遅延発生装置を用いてナノ秒のスケールでレーザーパルスと X 線パルスを時間制御して測定を行なえることが確認されたこととその方法が詳細に記述されている。最後に、レーザー速度干渉計として整備した VISAR システムの詳細を論じている。

第 3 章で著者は、整備した実験システムを用いて目標とする衝撃圧力の実験を行うため、最適な測定試料周りの条件について説明している。開発した高強度レーザーを用いて高衝撃圧かつ高ひずみ速度の衝撃波を発生させることを目指し、空気によるレーザーブレイクダウンやレーザー衝撃波発生源のアブレーターの発生衝撃波への影響を、VISAR 測定や時間分解 X 線回折測定から検討している。レーザー集光領域を真空引きすることで空気によるレーザーのブレイクダウンを防げること、レーザー照射によるアブレーションがアブレーター表面で生じていること、アブレーター表面に Al 蒸着を施すことで衝撃波の先駆波をなくすこと、アブレーターの内部で衝撃波の強度が減衰することを明らかにしている。また、衝撃破壊後に測定試料が飛翔することを観察し、衝撃圧縮開始後数 10 ナノ秒以降のタイミングでおき、約 1 km/s の速度で飛翔していくことを示している。これらの結果は、次章以降で本試料の時間分解 X 線回折測定を行い、その解析を行う際に有効な情報として使われている。

第 4 章では、開発した実験システムの有効性を、多結晶 Al 箔を用いた衝撃実験から検証している。構築した高強度レーザーによってピーク衝撃圧 21.7 GPa, 歪み速度  $4.6 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$  の衝撃圧縮現象が再現可能であることを確認した。また、その衝撃下で Al の結晶粒が圧縮過程から微細化することを観察し、さらに、微細化が進む中でも結晶粒の結晶配向性は完全にランダムにはならず、従来保持していた配向性を維持することを初めて明示した。

第 5 章では、ジルコニアについて実施したレーザー衝撃下時間分解 X 線回折実験の結果について議論している。不純物を含まないジルコニアは 3.6 GPa で高压相である直方晶 I 相に相転移することと、Y を 3 mol% 含む正方晶相で安定化されたジルコニア (3Y-TZP) は衝撃圧縮過程では 21.7 GPa まで相転移せず、その後の解放過程で単斜晶相に一部相転移することを明らかにした。純粋なジルコニアの相転移は可逆的に起きるため従来の手法では観察不可能であったが、本研究で初めて純粋なジルコニアの可逆的相転移をその場観察することに成功し、その相転移境界圧力まで明確にした。また、3Y-TZP の実験から微量元素の相転移挙動への影響を調べ、微量元素が濃集した部分で異なる構造特性を示すことを明らかにすることで、天然のジルコニアの衝撃の痕跡から隕石衝突履歴を考えるために重要な考察をまとめている。

## 審 査 の 要 旨

レーザー衝撃による時間分解 X 線回折法は、近年のレーザー技術、放射光技術の発展によって可能となった最新の実験手法の一つであり、地球惑星科学分野に新しい流れを生み出しつつある。著者は、隕石衝突によって引き起こされる瞬間的な高温高压状態での物質変化を明らかにするために、KEK PF-AR の NW14A ビームラインに高強度レーザーシステムと放射光時間分解 X 線回折測定システムを整備し、実験を行った。ジルコニアを使った実験ではジルコニアの複雑な相転移メカニズムの衝撃圧縮下での相転移メカニズムの観測に成功し、ジルコニアの衝撃の痕跡から隕石衝突履歴を考えるために重要な考察を行っている。本研究は、レーザー衝撃時間分解 X 線回折測定装置の開発という点だけでなく、ナノ秒という時間スケールでのその場 X 線回折の高精度測定にも成功しており、地球惑星科学の発展に大変重要な役割を果たしている。

令和 2 年 1 月 20 日、学位論文審査委員会において、審査委員全員出席のもとに論文の審査及び最終試験を行い、本論文について著者に説明を求め、関連事項について質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって合格と判定された。

よって、著者は博士（理学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものとして認める。