

令和 6 年 6 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20947

研究課題名（和文）レーザー高速圧縮とパルスX線瞬間回折による衝突融解現象の時間進展解析

研究課題名（英文）Laser-driven shock compression experiments for time-evolution analysis of impact-induced melting process

研究代表者

奥地 拓生（Okuchi, Takuo）

京都大学・複合原子力科学研究所・教授

研究者番号：40303599

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：46億年の昔、原始の太陽をとりまく星雲の中で無数の小天体が衝突と合体を繰り返し惑星、衛星、小惑星が成長した。そこでは強い圧縮と加熱が同時に引き起こされ、融解現象を代表例とする顕著な状態変化が物質に引き起こされた。本研究課題では、この衝突融解の現象を高強度レーザーの応用によって実験室で再現し、その時間進展をX線自由電子レーザーで回折計測することを通して、始原的な隕石などの物質の融解事後の状態を理解することを試みた。実際に、無水ケイ酸塩、含水ケイ酸塩、炭酸塩の構造の時間進展を観察した結果、含水ケイ酸塩と炭酸塩の非晶質化は無水ケイ酸塩よりも容易に進展することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無水ケイ酸塩の実験によって、融解が未だ起こらない範囲の圧縮における鉱物内の原子の再配列の現象が、ナノ秒程度のごく短時間で大きく進む場合があることがわかった。これは従来の見解を覆す発見であった。短時間の圧縮は小さな天体の衝突によって起こりえるために頻度は高い。再配列の現象で生成する高密度の鉱物が多数の隕石や小惑星サンプルリターン試料に残されている可能性は高くなった。それらを丁寧に探してゆけば、地球の誕生に至る太陽系の先史の様子を具体的に描くことが可能になるだろう。

研究成果の概要（英文）：4.6 billion years ago, in the primordial solar nebula surrounding the youngest sun, many small bodies were repeatedly colliding to merge to form planets, satellites, and asteroids. During such a process, strong compression and heating were simultaneously induced to significantly affect the state of the materials, such as inducing their melting. In this research, we attempted to understand the post-impact states of primitive meteorites by reproducing the impact-induced melting phenomenon in the laboratory by using a high-power laser and an X-ray free-electron laser as a couple to observe the diffraction as a function of time during the compression process. Specifically, we observed the time evolution of structures of anhydrous silicate, hydrous silicate, and carbonate during the compression. We found that the amorphization of hydrous silicate and carbonate more easily proceeded than that of anhydrous silicate.

研究分野：鉱物学

キーワード：衝突融解現象 高強度レーザー X線自由電子レーザー

1. 研究開始当初の背景

原始の太陽をとりまく星雲の中で、無数の小天体が衝突と合体を繰り返すことで、地球型の惑星や小惑星が成長した。これらの天体の内部では、強い圧縮とともに起こる加熱や、摩擦変形による発熱に起因する岩石の融解が頻繁に起きていた。その結果として、隕石が含むコンドリュールのもとになったマグマのしびきや、高密度鉱物の結晶化の場であったショックベインが作られたと考えられている(文献)。小天体の集積が次第に進むとともに衝突の速度が上がってくると、衝突した天体の大部分は融解する場合もあった。惑星形成の最終期においては、そのようにしてマグマオーシャンが作られ、核形成に繋がる大規模な分化が誘発されたであろう。

2. 研究の目的

本課題では、このように重要な意味を持ちながらこれまで実験的研究が困難であった「衝突融解現象」が引き起こす微視的な物質構造の変化過程を、高強度レーザーとX線自由電子レーザーを組み合わせて高圧力その場で時間分解観察した。無水のケイ酸鉱物を中心に、含水ケイ酸塩鉱物や炭酸塩鉱物も含めた惑星物質を、衝撃波の伝播によって瞬間的に圧縮して加熱した上で、その状態をX線回折で計測した。無水のケイ酸塩鉱物については、加熱 - 融解 - 膨張冷却 - 結晶化又はガラス化、の過程を一続きで捉えるとともに、高密度鉱物(高圧相)の出現を調べた。含水ケイ酸塩鉱物や炭酸塩鉱物については、隕石母天体で起きたであろう脱水分解反応の過程を調べることを試みた。生成するマグマや結晶の状態の時間進展を捉え、その結果を隕石の多様な衝突融解の凍結組織と対比させ、最終的には天体サイズや衝突速度などの太陽系の衝突進化史を復元することを研究の目的とした。

3. 研究の方法

容器を使わずに圧縮と加熱を引き起こすことができるレーザー衝撃圧縮の方法によって、試料を瞬間的に高温高圧状態へと変化させる(図1)。圧縮と同時にX線自由電子レーザー(XFEL、右上からの矢印)の高強度フェムト秒パルス照射を照射して、そのシングルショットで回折パターンを取得する。大量に準備した同一組成・同一形状の試料を次々に取り替えて、高強度レーザーとXFELパルスの照射の時間差を少しずつ変えることで、ストロボスコープの原理により、コマ送りX線回折パターンが得られる。

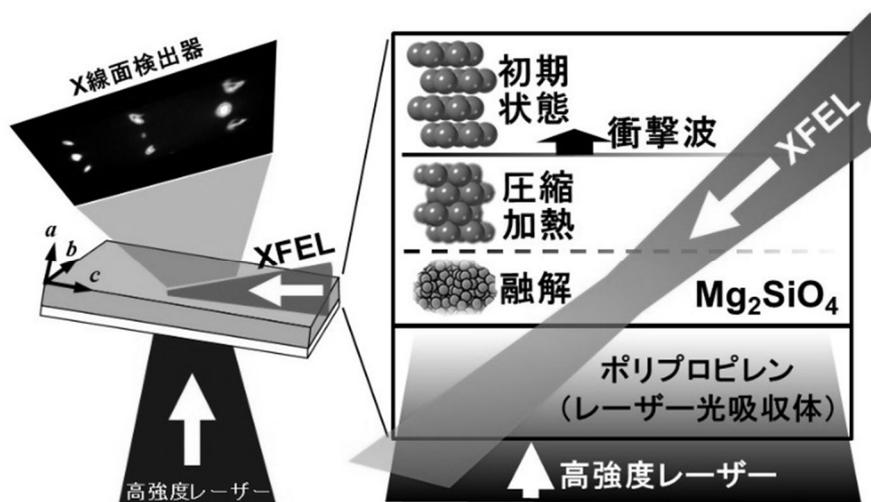


図1. 高強度レーザーによる衝撃圧縮加熱と組み合わせた XFEL 回折計測実の模式図。ポリプロピレンに高強度レーザー光を吸収させて爆発を引き起こし、衝撃波を発生させる。それが試料中へと伝播して高温高圧の状態がつけられる。XFEL パルスは全試料厚みを通過できるため、初期状態から融解に至るまでを併せて計測することができる。実験は理化学研究所 X 線自由電子レーザー施設・SACLA の BL3 EH5 で実施した。

4. 研究成果

上記の方法によって、各試料の微視的構造の時間進展をサブナノ秒の時間分解能で計測した。無水のケイ酸塩については、工業的に合成されたフォルステライトの単結晶[$\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$]の衝撃圧縮実験に加えて、隕石パラサイトのカンラン石の単結晶[$\text{-(Mg,Fe)}_2\text{SiO}_4$]、天然の斜長石の単結晶[$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$]などの惑星構成物質を計測した。これらの実験の結果から、惑星構成物質が衝突融解した後に生成する液体構造の時間的な進展を捉えることができるようになった。実験の結果、フォルステライトの単結晶は60~100 GPa程度の衝撃圧力において、10ナノ秒程度のごく短い間に高密度構造のリングウッドイトへと相転移した。この構造相転移は無拡散型の過程を経たものと考えられる。さらに高い圧力では非晶質の構造が生成したが、その当初は圧縮方向に依存した構造の異方性を示した。このような特徴的な非晶質構造の以後の緩和によって、圧縮及び加熱されたフォルステライトは熱力学的に平衡な液体の構造に近づいていくと考えられる。この過程は圧力の解放の後も続き、液体の状態が維持される。隕石パラサイトのカンラン石の結果についても同様の構造の時間進展の結果が得られた(図2)。また、含水ケイ酸塩と炭酸塩の非晶質化は以上のような固体間の構造相転移を経ずに起こり、変化が起こる圧力値も低く、衝撃圧縮の下では容易に進展する現象であることがわかった。

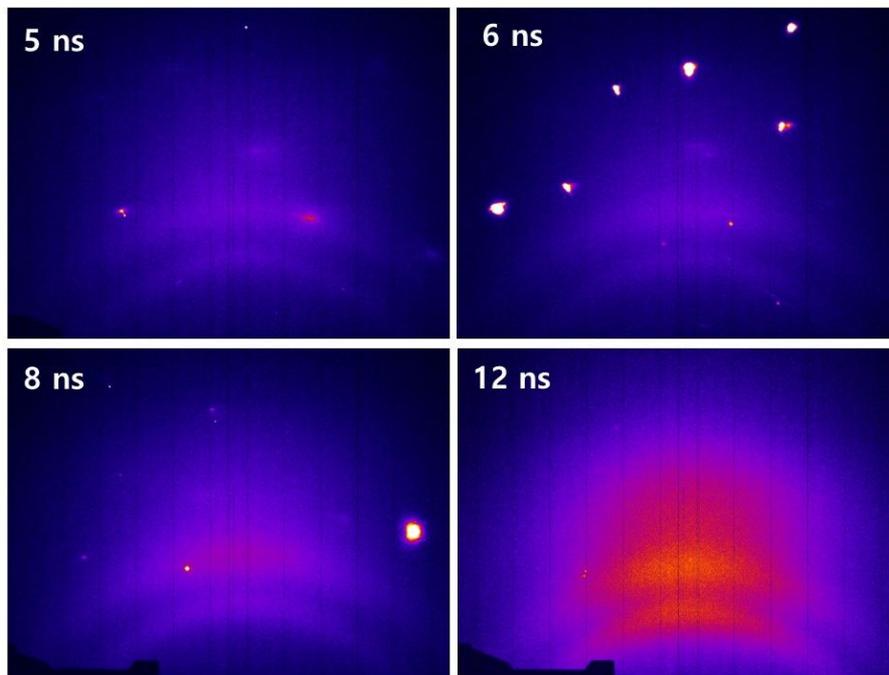


図2. 隕石パラサイトのカンラン石単結晶の衝突融解現象の再現実験の結果。各図の左上の数字は高強度レーザー照射開始からXFELパルス照射までの時間差を示す(nsはナノ秒)。各図は二次元のX線回折パターンであり、上方に向かって回折角が増加する。明るい点は初期状態及びそれが圧縮された状態の単結晶の反射を示す。左右に広がった円弧は非晶質構造の反射を示す。時間の経過とともに非晶質化が急速に進展している。

参考文献

Tomioka, N., Okuchi, T., A new high-pressure form of Mg_2SiO_4 highlighting diffusionless phase transitions of olivine, *Scientific Reports*, 7, 2017, 17351.

Tomioka, N., Bindi, L., Okuchi, T., Miyahara, M., Iitaka, T., Li, Z., Kawatsu, T., Xie, X., Purevjav, N, Tani, R., Kodama, Y., Poirierite, a dense metastable polymorph of magnesium iron silicate in shocked meteorites. *Communications Earth & Environment*, 2, 2021, 16.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 UMEDA Yuhei, NAGAI Yuma, TOMIOKA Naotaka, SEKINE Toshimori, MIYAKAWA Masashi, KOBAYASHI Takamichi, YUSA Hitoshi, OKUCHI Takuo	4. 巻 119
2. 論文標題 Deformation microstructures in shock-compressed single crystal and powdered rutile	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 230706
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.230706	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 Takagi Sota, Ichiyonagi Kouhei, Kyono Atsushi, Kawai Nobuaki, Nozawa Shunsuke, Ozaki Norimasa, Seto Yusuke, Okuchi Takuo, Nitta Souma, Okada Satoru, Miyanishi Kohei, Sueda Keiichi, Togashi Tadashi, Yabuuchi Toshinori	4. 巻 49
2. 論文標題 Phase transition and melting in zircon by nanosecond shock loading	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics and Chemistry of Minerals	6. 最初と最後の頁 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00269-022-01184-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Okuchi, Y. Seto, N. Tomioka, T. Matsuoka, B. Albertazzi, N. J. Hartley, Y. Inubushi, K. Katagiri, R. Kodama, T. A. Pikuz, N. Purevjav, K. Miyanishi, T. Sato, T. Sekine, K. Sueda, K. A. Tanaka, Y. Tange, T. Togashi, Y. Umeda, T. Yabuuchi, M. Yabashi, N. Ozaki	4. 巻 12
2. 論文標題 Ultrafast olivine-ringwoodite transformation during shock compression	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-24633-4	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 OKUCHI Takuo, OZAKI Norimasa	4. 巻 31
2. 論文標題 Ultrafast In-Situ Analysis of Shock-Compressed Planetary Materials	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Review of High Pressure Science and Technology	6. 最初と最後の頁 166 ~ 171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4131/jshpreview.31.166	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 -

1. 著者名 奥地拓生	4. 巻 26
2. 論文標題 天体衝突を記録する結晶の生成過程の超高速その場計測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SPring8/SACLA利用者情報	6. 最初と最後の頁 341-348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 奥地拓生, 尾崎典雅	4. 巻 49
2. 論文標題 高強度レーザーを用いた惑星物質の衝撃圧縮実験	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 35-39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Katagiri, N. Ozaki, S. Ohmura, B. Albertazzi, Y. Hironaka, Y. Inubushi, K. Ishida, M. Koenig, K. Miyanishi, H. Nakamura, M. Nishikino, T. Okuchi, T. Sato, Y. Seto, K. Shigemori, K. Sueda, Y. Tange, T. Togashi, Y. Umeda, M. Yabashi, T. Yabuuchi, and R. Kodama	4. 巻 126
2. 論文標題 Liquid Structure of Tantalum under Internal Negative Pressure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 175503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.175503	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 梅田悠平
2. 発表標題 レーザー衝撃圧縮法による炭酸塩鉱物の天体衝突再現実験
3. 学会等名 レーザー学会第43回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takuo Okuchi, Naotaka Tomioka
2. 発表標題 Laser-driven shock experiments of planetary silicate minerals for finding evolution history of the solar system
3. 学会等名 2022 IUCr High-Pressure Workshop "Advanced High-Pressure Crystallography" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥地拓生
2. 発表標題 超高速時間分解X線プローブによる鉱物の衝撃圧縮状態研究の現在と今後
3. 学会等名 第63回高圧討論会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永井優馬, 梅田悠平, 小林敬道, 遊佐齊, 富岡尚敬, 奥地拓生
2. 発表標題 衝撃圧縮による二酸化チタンの構造相転移
3. 学会等名 第63回高圧討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naotaka Tomioka, Masaaki Miyahara, Luca Bindi, Takuo Okuchi
2. 発表標題 High-pressure minerals in planetary materials: Witnesses of asteroid impact events
3. 学会等名 23rd International Mineralogical Association General Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥地拓生、富岡尚敬、尾崎典雅、瀬戸雄介、兒玉了祐、宮西宏併、関根利守、梅田悠平、藪内俊毅
2. 発表標題 パワーレーザー/XFEL利用によるフォルステライトの高速相転移と高速融解
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥地拓生
2. 発表標題 衝撃圧縮による惑星物質の高密度原子配列の生成過程
3. 学会等名 SPring-8シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuo Okuchi
2. 発表標題 Laser-Driven Shock Experiments of Planetary Materials for Finding Evolution History of Early Solar System
3. 学会等名 Internaitonal Conference on High Energy Density Sciences 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuhei Umeda
2. 発表標題 Calcite at extreme conditions with implications for hypervelocity planetary impacts
3. 学会等名 Internaitonal Conference on High Energy Density Sciences 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 梅田悠平、奥地拓生、関根利守、佐野孝好、犬伏雄一、片桐健登、兒玉了祐、宮西宏併、瀬戸雄介、清水健二、篠田圭司、末田敬一、富樫格、富岡尚敬、藪内俊毅、尾崎典雅
2. 発表標題 レーザー衝撃圧縮法で再現する高速天体衝突極限環境における含水鉱物の高圧物性計測と時間分解構造観察
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuo Okuchi
2. 発表標題 Planetology using high-power laser and X-ray free electron laser
3. 学会等名 4th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuo Okuchi
2. 発表標題 Laboratory exploration of planetary materials using high power lasers
3. 学会等名 光・量子ビーム科学合同シンポジウム 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥地拓生
2. 発表標題 水素を含む地球惑星内部物質の構造と拡散の研究
3. 学会等名 日本鉱物科学会2020年度年会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuo Okuchi、Naotaka Tomioka
2. 発表標題 Structure transformation of silicate minerals during hypervelocity collisions of planetary bodies
3. 学会等名 11th International Workshop on Warm Dense Matter (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takuo Okuchi、Naotaka Tomioka
2. 発表標題 Ultrafast solid-state phase transformation of silicate minerals during shock compression
3. 学会等名 23rd Biennial Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 梅田悠平、永井優馬、富岡尚敬、関根利守、宮川仁、小林敬道、遊佐斉、奥地拓生
2. 発表標題 ルチルの衝撃変形微細組織
3. 学会等名 日本鉱物科学会2023年年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 荒賀大翔、梅田悠平、小林敬道、遊佐斉、瀬戸雄介、奥地拓生
2. 発表標題 二酸化ゲルマニウムの衝撃圧縮による構造変化
3. 学会等名 日本鉱物科学会2023年年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroto Araga
2. 発表標題 Time-resolved structure analysis of shock compressed GeO2
3. 学会等名 SACLA Users' Meeting 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024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
研究 分担 者	梅田 悠平 (Yuhei Umeda) (90815705)	京都大学・複合原子力科学研究・助教 (14301)	

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		
韓国	延世大学校		
中国	四川大学	北京高压科学研究中心	