

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22061

研究課題名（和文）超高速変形下の塑性発現機構の解明とその塑性加工法としての応用

研究課題名（英文）Mechanism of plasticity under ultrafast deformation and its application

研究代表者

佐野 智一（Sano, Tomokazu）

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：30314371

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）：塑性変形の機構は、一般的には、材料中に内在する転位がある特定のすべり面上において特定のすべり方向に移動するせん断変形による、とされている。本研究では、超高速変形下で発現していると考えられる、この一般的な塑性変形の原理とは異なる機構を解明し、それを新しい塑性加工法として応用することを目的とする。本挑戦的萌芽研究を通じて、フェムト秒レーザー駆動衝撃波は、BCC、FCC、HCPの結晶構造に依存せず塑性変形を容易に起こすことが可能であることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、これまでに無かった新しい塑性変形機構を提唱出来るだけでなく、この機構を利用することによって、これまで従来法では強化することが難しかった材料を強化することが可能になる。例えば、CO2削減のため自動車の軽量化が進められており、このことを実現するために軽量で高強度である高張力鋼板が用いられている。ところが、この高張力鋼板を後処理でさらに強度を上げることは極めて難しい。その理由は、既に臨界密度に近い転位を内在しているためである。本研究によって、転位を効率的に追加することが出来るようになり、マクロ的にはさらなる高強度化が可能になると見込まれる。

研究成果の概要（英文）：In general, mechanism of conventional plastic deformation is the shear deformation caused by dislocation movement involved in the material to a slip direction on a slip plane. The purpose of this study is to investigate the mechanism of ultrafast deformation which is expected to be different from the conventional deformation and apply the predicted mechanism as a new plastic deformation process. We found that the ultrafast deformation is able to deform the materials plastically having BCC, FCC, and HCP structures owing to the new mechanism.

研究分野：材料工学

キーワード：フェムト秒レーザー 衝撃圧縮 フェムト秒レーザー駆動衝撃波 超高速変形

### 1. 研究開始当初の背景

本研究では、材料を超高速変形させるために、パルス幅がフェムト秒～ピコ秒の超短パルスレーザー駆動衝撃圧縮を利用する。マクロな塑性ひずみと転位とを結びつけるオロワンの式  $\gamma = k \rho b l$  を時間  $t$  で微分すると、 $d\gamma/dt = kb(\rho dl/dt + l d\rho/dt)$  と示される。ここで  $\rho$  は塑性ひずみ、 $k$  は定数、 $\rho$  は可動転位密度、 $b$  はバーガースベクトル、 $l$  は転位の平均移動距離である。塑性ひずみ速度  $d\gamma/dt$  は、転位の移動速度  $dl/dt$  の項と転位の増加速度  $d\rho/dt$  の項の和で表される。すなわち、超高速変形を実現するには、超高速転位あるいは転位の超高速増加が必要となる。

申請者らはフェムト秒レーザー駆動衝撃圧縮過程で材料が  $10^8 \sim 10^9$  /s の超高速で変形することを実測している。一般に、ひずみ速度  $10^7$  /s 以上で降伏応力が急激に増加する原因は、マクロには粘性の増加によるものとされている。しかしながら、微視的すなわち格子欠陥レベルでの十分な説明はなされていない。一般に、転位は音速以上で動くことは出来ないと言われていたが、超音速転位は存在するとの報告もある [ref. Gumbsch and Gao, Science 283 (1999) 965]。逆に、高速変形下では転位を介さない塑性すべりが生じるとの報告もある [ref. Kiritani, Arakawa, et al., Philos. Mag. Lett. 79 (1999) 797]。また、衝撃波頭の移動速度は超音速であるので、衝撃波頭に追隨して転位が動くようなことがあれば、これは超音速転位と見なせるかもしれない。また、衝撃波頭背後で転位の核生成が起こるとの報告もあり、いくつかモデルも示されているが、決定的な証拠は無い [ref. Meyers, Dislocations in Shock Compression and Release]。

本研究では、材料が超高速変形する際の転位の挙動を X 線で直接計測することによって、超音速転位あるいは転位を介さない塑性すべりの存在を調べ、衝撃波頭背後での転位核生成モデルを新たに構築することによって、超高速変形下の塑性発現機構を明らかにする。さらに、この塑性変形がマクロな機械特性に及ぼす影響を調べ、新しい塑性加工法としての展開を図る。

### 2. 研究の目的

塑性変形の機構は、一般的には、材料中に内在する転位がある特定のすべり面上において特定のすべり方向に移動するせん断変形による、とされている。本研究では、超高速変形下で発現していると考えられる、この一般的な塑性変形の原理とは異なる機構を解明し、それを新しい塑性加工法として応用することを目的とする。

### 3. 研究の方法

理化学研究所 播磨事業所の X 線自由電子レーザー施設 SACLA において実験を行う。フェムト秒レーザー駆動衝撃圧縮現象その場計測装置を構築した (図 1)。超高速変形を誘起するフェムト秒レーザーパルス (波長 800 nm、パルス幅 40 fs、最大パルスエネルギー 100 mJ) を試料表面に集光照射する。X 線自由電子レーザー (X-ray Free Electron Laser: XFEL) の波長は、材料に応じて 10 keV から 11 keV の間で変化させる。フェムト秒レーザーパルスと X 線自由電子レーザーパルスとの間で同期をとり、フェムト秒レーザー側に遅延光路を設け、X 線自由電子レーザーパルスとの間隔をピコ秒オーダーで変化させる。フェムト秒レーザーパルスが照射された箇所に、ある時間遅れて X 線自由電子レーザーパルスを照射し、そこから回折・散乱した X 線を 2 次元検出器 (MPCCD) に記録する。

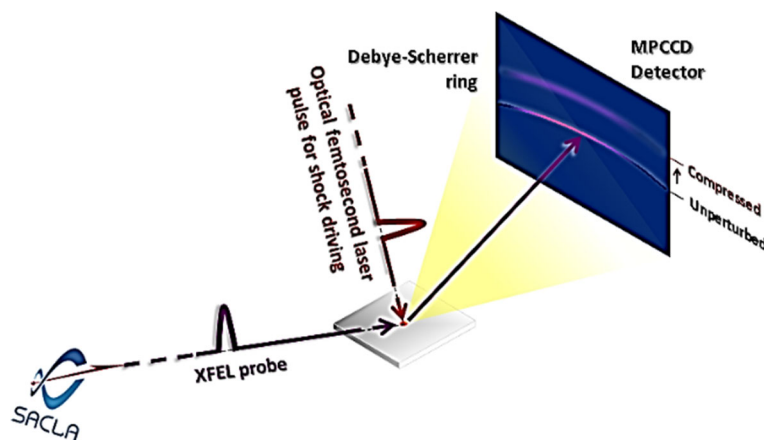


図 1. 実験セットアップの模式図

その場 X 線回折測定の実験原理は以下の通りである。例えば、試料が BCC 構造であり、BCC(110)面がブラッグ条件を満たすとする。BCC(110)面を超高速でひずませると、この面に垂直に衝撃波が伝播する。圧縮された領域の面間隔は初期状態よりも小さくなるので、ブラッグ角は初期状態よりも大きくなる。すなわち、初期の回折パターンよりも高角側に出たパターンは、圧縮された面からの回折パターンである。ここで、ピークのシフト量は弾性ひずみを示し、ピークの幅は塑性

ひずみを示す。フェムト秒レーザーパルスと X 線自由電子レーザーパルスとの間の時間を少しずつ変化させながら、データを取得する。

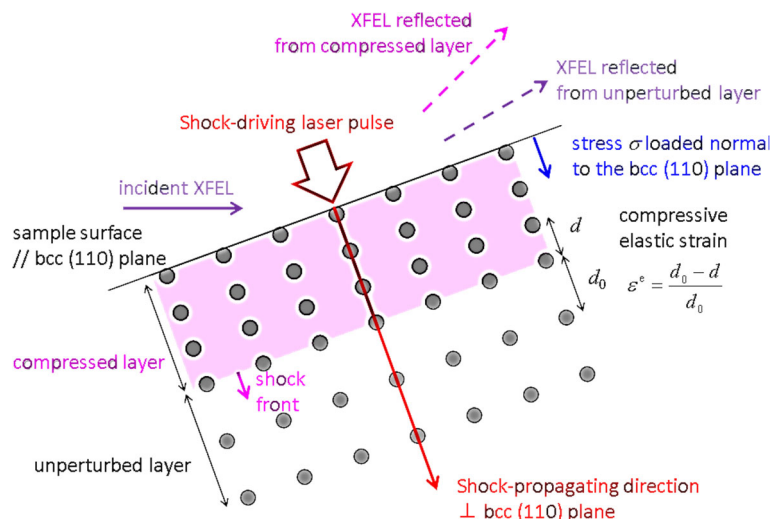


図 2. その場 X 線回折測定の実験原理図

#### 4. 研究成果

降伏応力の高い BCC 構造をもつ鉄鋼材料にフェムト秒レーザーパルスを照射し、材料中に形成される格子欠陥と、硬さ、残留応力といった機械特性と、これらの相関関係を評価した。その結果、パルスエネルギー 0.7 mJ、パルス幅 130 fs のフェムト秒レーザーを高張力鋼 (HT780) および超高張力鋼 (HT980) に照射することによって、表層を硬化し、圧縮残留応力を導入することに成功した。また、硬化した部分の転位密度は 2 倍程度に増加していた。レーザー溶接して引張残留応力がかかっている HT780 にフェムト秒レーザーを照射することによって、引張残留応力を圧縮残留応力に変化させることに成功した。

FCC 構造であるアルミニウム材料と BCC 構造である鉄鋼材料に対し、レーザーのパルス幅、パルスエネルギー、スポットサイズから決まるレーザー強度が材料の硬さ、残留応力といった機械特性に及ぼす影響を明確にするために、レーザー強度等を変化させて材料に照射し、材料の機械的特性を測定した。ピコ秒領域のパルス幅で良好な機械的特性が得られることが分かった。また、照射後の試料表層に凝固層が存在せず高密度転位を有する領域が存在することを見出した。さらに、空間分解能 5 μm で深さ方向の残留ひずみを測定することに成功した。

HCP 構造であるマグネシウム材料に対し、レーザーのパルス幅、パルスエネルギー、スポットサイズから決まるレーザー強度が硬さ、残留応力といった機械特性に及ぼす影響を明確にすることを目標とした。その結果、最適なレーザー条件を選択することにより、一般的に塑性変形が難しいとされる HCP 構造であるマグネシウム材料に対し、表面硬さの向上、圧縮残留応力の付与に成功し、さらに疲労寿命を向上することに成功した。

本挑戦的萌芽研究を通じて、フェムト秒レーザー駆動衝撃波は、BCC, FCC, HCP の結晶構造に依存せず塑性変形を容易に起こすことが可能であることが分かった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Miyake Masashi, Matsuda Tomoki, Sano Tomokazu, Hirose Akio, Shiomi Yasutomo, Sasaki Mitsuo	4. 巻 64
2. 論文標題 Microstructure and mechanical properties of additively manufactured CoCrW alloy using laser metal deposition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Welding in the World	6. 最初と最後の頁 1397 ~ 1407
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s40194-020-00926-y	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 Sano Yuji, Akita Koichi, Sano Tomokazu	4. 巻 10
2. 論文標題 A Mechanism for Inducing Compressive Residual Stresses on a Surface by Laser Peening without Coating	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 816 ~ 816
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/met10060816	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 Tomokazu Sano, Takayuki Eimura, Akio Hirose, Yosuke Kawahito, Seiji Katayama, Kazuto Arakawa, Kiyotaka Masaki, Ayumi Shiro, Takahisa Shobu, Yuji Sano	4. 巻 9
2. 論文標題 Improving Fatigue Performance of Laser-Welded 2024-T3 Aluminum Alloy Using Dry Laser Peening	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 1192_1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/met9111192	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 Masaki Kasuga, Tomokazu Sano, Akio Hirose	4. 巻 1
2. 論文標題 Grain refining in weld metal using short-pulsed laser ablation during CW laser welding of 2024-T3 aluminum alloy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Extreme Manufacturing	6. 最初と最後の頁 045003_1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/2631-7990/ab563a	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 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Tomokazu Sano, Takayuki Eimura, Akio Hirose
2. 発表標題 Dry Laser Peening: Improving Fatigue Properties of Friction Stir-Welded/Laser-Welded 2024 Aluminum Alloys
3. 学会等名 21st International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐野智一
2. 発表標題 フェムト秒レーザー加工の新しい展開 ~フェムト秒レーザー駆動衝撃波を利用した表面改質~
3. 学会等名 第98回産研テクノサロン (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西端樹, 吉田雅幸, 伊藤佑介, 杉田直彦, 廣瀬明夫, 佐野智一
2. 発表標題 ドライレーザーピーニング効果に及ぼすフェムト-ピコ秒領域でのパルス幅依存性
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田雅幸, 西端樹, 松田朋己, 伊藤佑介, 杉田直彦, 荒河一渡, 廣瀬明夫, 佐野智一
2. 発表標題 パルス幅制御による2024アルミニウム合金のドライレーザーピーニング効果向上
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野智一、荒河一渡、菖蒲敬久、他
2. 発表標題 Dry Laser Peening for Improving Fatigue Properties of Laser Welded 2024-T3 Aluminum Alloy using Femtosecond Laser Pulses
3. 学会等名 The 7th Laser Ignition and Giant-microphotonics Conference (LIC2019), 横浜 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐野智一、荒河一渡、菖蒲敬久、他
2. 発表標題 Dry Laser Peening for Improving Fatigue Properties of Laser Welded 2024-T3 Aluminum Alloy using Femtosecond Laser Pulses
3. 学会等名 The 8th International Congress on Laser Advanced Materials Processing (LAMP2019), 広島 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐野智一
2. 発表標題 Femtosecond laser-driven shock compression of solids and its engineering applications
3. 学会等名 International Symposium Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies (FLAMN2019), St. Petersburg, Russia (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐野智一
2. 発表標題 Dry laser peening for improving fatigue properties of weld joints of 2024 aluminum alloys
3. 学会等名 The 72nd IIW Annual Assembly and International Conference, Bratislava, Slovakia (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐野智一
2. 発表標題 レーザーピーニングのインフラへの適用検討 4 (水を使用しない新しいレーザーピーニング技術による構造材料の疲労寿命延長)
3. 学会等名 日本機械学会 2019年度年次大会、秋田大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐野智一
2. 発表標題 Dry laser peening for improving fatigue properties of aluminum alloys
3. 学会等名 2nd European Workshop on Laser Peening and Related Phenomena (LSP Days 2019), Hamburg, Germany (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 春日仁希、佐野智一
2. 発表標題 Grain refining using pulsed laser ablation during CW laser welding of 2024-T3 aluminum alloy
3. 学会等名 2nd European Workshop on Laser Peening and Related Phenomena (LSP Days 2019), Hamburg, Germany (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西端樹、佐野智一
2. 発表標題 Femtosecond laser peening of pure iron
3. 学会等名 2nd European Workshop on Laser Peening and Related Phenomena (LSP Days 2019), Hamburg, Germany (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐野智一、荒河一渡、菖蒲敬久、他
2. 発表標題 Dry Laser Peening for Improving Fatigue Properties of Laser Welded 2024-T3 Aluminum Alloy using Femtosecond Laser Pulses
3. 学会等名 Photonics Asia 2019, 杭州、中国 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐野智一、荒河一渡、菖蒲敬久、他
2. 発表標題 Improving Fatigue Properties of Friction Stir-Welded/Laser-Welded 2024 Aluminum Alloys Using Dry Laser Peening
3. 学会等名 14th International Aluminium Conference (INALCO)、東京 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Tomokazu Sano	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 22
3. 書名 Laser Micro-Nano-Manufacturing and 3D Microprinting	

〔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
---------	---------



米国	University of Nevada, Reno			
----	----------------------------	--	--	--