

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420778

研究課題名(和文) レーザー衝撃法による高密度格子欠陥導入・高密度結晶構造残存の機構解明とその応用

研究課題名(英文) Elucidation of mechanism for formation of high density dislocations and quenching of high density crystalline structures using laser-driven shocks and its applications

研究代表者

佐野 智一 (Sano, Tomokazu)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30314371

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：結晶構造の異なる5種類の材料に対してフェムト秒レーザーを照射し照射後の金属組織変化および力学的特性変化を調べた結果、鉄、チタン、シリコンに関しては準安定構造が存在すること、また全ての材料に関して高密度の格子欠陥が形成されていることと硬度が上昇することが明らかとなった。純鉄に対してフェムト秒レーザーの条件を変化させて照射し照射後の金属組織変化および力学的特性変化を調べた結果、フェムト秒レーザーパルスのショット数が硬化深さおよび硬化率に影響を及ぼすことがわかった。応用研究項目であるプラズマ閉じ込め媒質を用いない新しいレーザーピーニング手法の開発に取り組み、材料の疲労特性を向上させられることがわかった。

研究成果の概要(英文)：We investigated crystalline structures and mechanical properties of femtosecond laser-irradiated materials such as pure iron (bcc), pure titanium (hcp), pure silicon (diamond), aluminum (fcc), and nickel (fcc). Metastable structures, which did not exist in the initial state, were formed in pure iron, pure titanium, and pure silicon, which had polymorphs in higher temperatures or higher pressures. For all materials, high-density lattice defects were formed and hardness increased in the femtosecond laser-affected zone. We found number of pulses and pulse energy of the femtosecond laser influences the depth of the hardened zone and the increment of the hardness. We succeeded in improving fatigue properties of aluminum plates by shooting femtosecond laser pulses on the surface.

研究分野：レーザー加工

キーワード：フェムト秒レーザー 衝撃圧縮 レーザー衝撃法 準安定構造 格子欠陥 ピーニング 転位導入

1. 研究開始当初の背景

高強度レーザーを物質に照射すると、アブレーション時の反跳力によって物質表面に衝撃波が駆動され、固体内を伝播する。このレーザー衝撃波を材料プロセスに適用した時の特長は、数万気圧を超える瞬間的で高強度な一軸応力と、 10^{10} /s を超える高ひずみ速度変形である。このレーザー衝撃法を用いることによって、テーブルトップレーザーで 100 GPa 程度の超高強度衝撃波の発生が容易に可能であり、従って物質に容易に塑性変形を生じさせることが可能である。

このように、レーザー衝撃法は高強度衝撃圧力かつ高ひずみ速度変形という特長を有しているだけでなく、従来の圧縮法では残存しないいくつかの物質の高密度結晶構造がフェムト秒レーザー衝撃法によって残存すること、および従来法と比較して極めて高密度の格子欠陥が導入されることが研究代表者らによって世界に先駆けて示されていることから、ECAP, HPT, ARB といった従来塑性加工法とは異なる機構に基づいた新しいプロセスであると言える。ところがこれらの機構は解明されておらず、またマクロな材料特性向上には至っていない。

2. 研究の目的

申請者はこれまでに、新しい塑性加工プロセスとして“レーザー衝撃法”を提唱し、この手法を用いて固体内部に高密度の格子欠陥を導入し、また高密度結晶構造を残存させることに成功している。ところがこれらの機構は解明されておらず、またマクロな材料特性向上には至っていない。そこで本研究では、レーザーパラメーターと物性値の観点からこれらの現象を定量的に理解し、機構解明することによって、高密度格子欠陥導入過程と高密度結晶構造残存過程を同時に記述するモデルを構築することを目的とする。さらにこのモデルを用いて、これらの現象によるマクロな材料特性向上として高硬化化および圧縮残留応力付与の最適条件を見出し、本手法をプラズマ閉じ込め媒質を用いない新しいレーザーピーニング手法として確立させる。

3. 研究の方法

強度、パルス幅、エネルギーといったレーザーパラメーターと、熱拡散率、電子-フォノンカップリング係数、融点といった物性値の観点から、高密度格子欠陥導入および高密度結晶構造残存現象を定量的に理解し、機構解明することによって、高密度格子欠陥導入過程と高密度結晶構造残存過程を同時に記述するモデルを構築する。さらにこのモデルを用いて、マクロな材料特性向上として高硬化化および圧縮残留応力付与の最適条件を見出し、本手法を新しいレーザーピーニング手法として確立させる。具体的な研究項目は以下の4点である。

A) 高密度格子欠陥導入および高密度結晶構

造残存現象の定量的理解

B) 高密度格子欠陥導入および高密度結晶構造残存現象の機構解明

C) 高密度格子欠陥導入および高密度結晶構造残存過程のモデル構築

D) プラズマ閉じ込め媒質を用いない新しいレーザーピーニング手法確立

4. 研究成果

(1) 高密度格子欠陥導入および高密度結晶構造残存現象を定量的に理解することとその機構解明を目的として、鉄(体心立方格子)、チタン(細密六方格子)、シリコン(ダイヤモンド構造)、アルミニウム(面心立方格子)、ニッケル(面心立方格子)の5種類の材料に対してフェムト秒レーザーを照射し、照射後の金属組織変化および力学的特性変化を調べた。その結果、鉄、チタン、シリコンに関しては準安定構造が存在すること、また全ての材料に関して高密度の格子欠陥が形成されていることと硬度が上昇すること、が明らかとなった。さらに、鉄、チタン、アルミニウムに関しては、フェムト秒レーザーを重ね合わせて照射することによって、圧縮残留応力が付与されることがわかった。

2) 高密度格子欠陥導入現象を定量的に理解することとその機構解明を目的として、純鉄に対してフェムト秒レーザーの条件(パルスエネルギー、ショット数)を変化させて照射し、照射後の金属組織変化および力学的特性変化を調べた。その結果、フェムト秒レーザーパルスのショット数が硬化深さおよび硬化率に影響を及ぼすことがわかった。また、表面約 3 μm 以内の領域には高密度転位を有するマイクロバンドが存在し、その領域は硬化領域に一致することがわかった。これらのことから、表面硬化の要因は、フェムト秒レーザー駆動衝撃波の繰り返し負荷に起因する高密度な転位進展構造の形成であると考えられる。さらに、衝撃波の繰り返し負荷に伴い局所的に転位堆積部が形成され転位の易動度に差異が生じ、これが転位堆積を助長することによってマイクロバンドが形成されると考えられる。

3) フェムト秒レーザー駆動衝撃波による材料の圧縮過程における格子面間隔の挙動を高輝度超短パルスX線プローブで計測した。その結果、フェムト秒レーザー駆動衝撃圧縮後に形成される高密度の転位は、従来言われている増殖機構では無く、衝撃波頭背後での生成機構に基づくことがわかった。

4) 応用研究項目であるプラズマ閉じ込め媒質を用いない新しいレーザーピーニング手法の開発に取り組み、材料の疲労特性を向上させることに成功した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 9 件)

佐野智一, "フェムト秒レーザー駆動衝撃圧縮下のその場 XFEL 回折計測," 放射線化学会誌, Vol. 96, p. 23-28 (2013). (解説記事)

http://www.radiation-chemistry.org/kaishi/096pdf/96_23.pdf

T. Matsuda, T. Sano, K. Arakawa, and A. Hirose, "Multiple-shocks induced nanocrystallization in iron," Applied Physics Letters 105, 021902 (2014). (査読有)

DOI: 10.1063/1.4890389

T. Matsuda, T. Sano, K. Arakawa, and A. Hirose, "Dislocation structure produced by an ultrashort shock pulse," Journal of Applied Physics 116, 183506 (2014). (査読有)

DOI: 10.1063/1.4901928

T. Matsuda, T. Sano, K. Arakawa, O. Sakata, H. Tajiri, and A. Hirose, "Femtosecond laser-driven shock-induced dislocation structures in iron," Applied Physics Express 7, 122704 (2014). (査読有)

DOI: 10.7567/APEX.7.122704

松山法央, 佐野智一, 廣瀬明夫, "マイクロ接合部強化のためのフェムト秒レーザーピーニング技術の開発," 第20回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム (Mate2014) 論文集, 391-392 (2014). (査読有)

佐野智一, 廣瀬明夫, "固体のフェムト秒レーザー駆動衝撃圧縮," レーザー研究 Vol. 42, No. 6, 452-455 (2014). (解説記事)

松田朋己, 佐野智一, 塚田貴大, 荒河二渡, 廣瀬明夫, "フェムト秒レーザー駆動衝撃波を繰り返し負荷した鉄中に形成される高密度転位組織," レーザ加工学会誌, Vol. 22, No. 1, 46-51 (2015). (査読有)

岩田匠平, 佐野智一, 廣瀬明夫, "チタニウム合金 Ti-6Al-4V のフェムト秒レーザーピーニング技術の開発," 第21回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム (Mate2015) 論文集, 445-446 (2015). (査読有)

佐野智一, "フェムト秒レーザーピーニングとその動的計測," 第83回レーザー加工学会論文集, 167-170 (2015). (依頼原稿)

〔学会発表〕(計 43 件)

T. Sano, T. Matsuda, R. Kashiwabara, N. Matsuyama, K. Arakawa, Y. Sano, and A. Hirose, "Femtosecond laser peening of iron and aluminum for microjoint," International Conference on Processing & Manufacturing of

Advanced Materials (THERMEC'2013), Rio Hotel, Las Vegas, NV, USA, Dec. 2-6, 2013. (招待講演)

T. Sano and A. Hirose, "Femtosecond laser shock processing of solids and its dynamics," 13th International Ceramics Congress (CIMTEC), Montecatini Terme, Italy, June 8-13, 2014. (招待講演)

松田朋己, 佐野智一, 廣瀬明夫, 荒河二渡, "フェムト秒レーザー駆動衝撃波により形成される衝撃初期の転位組織," 日本金属学会 2014 年秋期(第 155 回)講演大会, 名古屋大学, 平成 26 年 9 月 24-26 日.(第 23 回優秀ポスター受賞)

T. Sano, "Ultrafast Structural Dynamics of Shock-Compressed Iron Probed with XFEL," Symposium TT: Advanced Materials Exploration with Neutrons and X-Rays - The State-of-the-Art in the International Year of Crystallography, 2014 MRS Fall Meeting & Exhibit, Boston, USA, Nov. 30 - Dec. 5, 2014. (招待講演)

T. Sano and A. Hirose, "Ultrafast Visualization of Structural Dynamics in Femtosecond Laser-Driven Shocked Iron Probed with XFEL," The International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation (Visual-JW), Hotel Hankyu Expo Park, Osaka, Japan, Nov. 26-28, 2014. (招待講演)

T. Sano, S. Iwasaki, S. Katsura, K. Yoshida, A. Nakayama, and A. Hirose, "Patterning of Indium Tin Oxide Microwires using Laser-induced Thermal Printing Method," 2nd International Conference on Nanojoining and Microjoining, Emmetten, Switzerland, Dec. 7-10, 2014. (招待講演)

佐野智一, "フェムト秒レーザー衝撃圧縮された結晶格子のその場 X 線自由電子レーザー回折計測," レーザー学会学術講演会第 35 回年次大会, 東海大学高輪校舎, 平成 27 年 1 月 11-12 日.(依頼講演)

T. Sano, T. Eimura, S. Iwata, N. Matsuyama, R. Kashiwabara, T. Matsuda, Y. Isshiki, A. Hirose, K. Arakawa, T. Hashimoto, S. Tsutsumi, K. Masaki, and Y. Sano, "Femtosecond Laser Peening without Sacrificial Overlay under Atmospheric Conditions," 5th International Conference on Laser peening and Related Phenomena, University of Cincinnati, USA, May

10-15, 2015. (招待講演)
佐野智一, "フェムト秒レーザピーニングとその動的計測," 第83回レーザ加工学会講演会, 大阪大学, 平成27年6月11, 12日. (依頼講演)

他34件

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐野 智一 (SANO, Tomokazu)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 30314371

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

荒河 一渡 (ARAKAWA, Kazuto)
島根大学・総合理工学研究科・准教授
研究者番号: 30294367

犬伏 雄一 (INUBUSHI, Yuichi)
理化学研究所・ビームライン開発チーム・特別研究員
研究者番号: 40506250

細貝 知直 (HOSOKAI, Tomonao)
大阪大学・大学院工学研究科・特任准教授
研究者番号: 80361533

(4) 研究協力者

佐野 雄二 (SANO, Yuji)
松田 朋己 (MATSUDA, Tomoki)
柏原 亮太 (KASHIWABARA, Ryota)
松山 法央 (MATSUYAMA, Norihiro)