

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02048

研究課題名（和文）金属組織制御の新学理に基づく短パルスレーザー誘起圧力波支援高速レーザー溶接法の開発

研究課題名（英文）Development of short-pulse laser induced-pressure wave-assisted laser welding method based on a novel scientific principle of controlling metal microstructures

研究代表者

佐野 智一（Sano, Tomokazu）

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30314371

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：レーザー溶接時に短パルスレーザーアブレーションを行うことで、一般的に割れ感受性が高いとされている2024アルミニウム合金溶接金属の結晶粒を微細化し、凝固割れの進行を抑制することに成功した。ピッカース硬さ試験の結果、結晶粒微細化の効果により硬さが上昇することが確認された。短パルスレーザーで発生した圧力波が高温状態のデンドライト強度を超えたため、デンドライト破碎による等軸結晶形成サイトの増加が結晶粒微細化機構の一つであると考えられる。実験結果から、結晶粒微細化の要因は、デンドライトの破碎と動的核生成という2つのメカニズムに基づくものと推測された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本手法は、微粒化材を添加することなく、高速レーザー溶接における凝固割れを抑制できる可能性がある。本手法を用いてアルミニウム合金溶接部の凝固組織を改善することで、信頼性の高い高速レーザー溶接が可能となり、アルミニウム合金の応用範囲が広がる。

研究成果の概要（英文）：By performing short-pulse laser ablation during laser welding, the crystal grains of 2024 aluminum alloy weld metal, which is generally considered to have a high susceptibility to cracking, were refined and the progression of solidification cracking was successfully suppressed. Vickers hardness test results confirmed that the hardness increased due to the effect of grain refinement. Since the pressure wave generated by the short-pulse laser exceeded the dendrite intensity in the high-temperature state, the increase in equiaxed crystal formation sites due to dendrite crushing is considered to be one of the grain refinement mechanisms. From the experimental results, it is concluded that grain refinement is based on two mechanisms: dendrite crushing and dynamic nucleation.

研究分野：材料加工学

キーワード：レーザー溶接 短パルスレーザー誘起圧力波 金属組織制御

1. 研究開始当初の背景

溶接プロセスは材料局部に熱を集中し、熔融させて接合する技術であり、溶接部は製品の一部分となる。しかし、急速な加熱・冷却によって溶接部の金属組織は大きく変化し、一般的に硬さ、引張強さ、破壊じん性といった機械的特性、疲労特性、耐食性が劣化する。実際に、世の中の製品の多くは溶接部から破壊する。すなわち、製品の寿命は、溶接部の特性に依存すると言える。

アーク溶接、ガス溶接といった従来溶接法と比較したレーザ溶接法の代表的な利点は、パワー密度を大きく出来るため、キーホールが形成され、深い溶け込みの高速溶接が可能であることである。本研究では、溶接の対象をアルミニウム合金とする。アルミニウム合金は軽量で比強度が高いため、自動車や鉄道車両のみならず、近年では橋梁や航空機分野でもアルミニウム合金の溶接の需要が増加している。アルミニウム合金は、鉄鋼材料と比較して反射率と熱伝導率が高く、また溶接中に酸化しやすいなどの理由から、一般的に溶接が困難である。高パワー・高品質のレーザを用いることによって、溶接が可能となる。

しかしながら、いったん熔融して凝固した溶接金属と、固相のまま熱影響を受けて変質した熱影響部は、他の溶接法と比較して狭いとは言え、存在する。構造材料として用いられる 2000 系、6000 系、7000 系アルミニウム合金といった熱処理型の析出強化型アルミニウム合金の場合、これら溶接金属と熱影響部の力学特性は、母材と比較して著しく劣化する。さらに、一般的に析出硬化型アルミニウム合金は高速でレーザ溶接を行うと割れが発生しやすいという問題点がある。従って、析出強化型アルミニウム合金を接合する場合、レーザ溶接のような熔融溶接法では無く、リベット締結のような機械的接合法や、摩擦攪拌接合といった固相接合法が用いられることが多い。しかしながら、リベット締結の場合は重量が増加し、摩擦攪拌接合の場合は処理速度が遅いという問題点がある。

母材と比較して力学特性が劣化しない溶接金属と熱影響部を形成し、さらに割れが発生しないレーザ溶接法を開発するためには、そのような金属組織を形成するための新しい学理が必要である。本研究では、金属組織を作り込むときに通常考慮される「温度場」だけでなく、これまで無視出来るほど小さかった「圧力場」を新たに取り入れることによって、これまでに無い新しい金属組織制御法の基盤となる新しい学理を構築する。具体的には、液相から凝固が開始する際に圧力を印加し微細な凝固組織を形成する学理（新学理 A）と、固相に衝撃波を印加し通常の塑性変形では考慮されない転位生成を陽に考慮し効率的に塑性変形を誘起する学理（新学理 B）の 2 つを構築する。新学理 A では、ナノ秒レーザ誘起圧力波がエンブリオからの核生成、デンドライト破碎、熔融池対流に及ぼす影響を調べ、凝固組織微細化機構を明らかにする。新学理 B では、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 $\gamma = k\rho b\bar{l}$ を時間 t で微分して得られる $d\gamma/dt = kb(\rho d\bar{l}/dt + \bar{l} d\rho/dt)$ における、これまで無視されてきた転位の増加速度 $d\rho/dt$ の項を陽に考慮することによって、現存する衝撃圧縮下の転位導入モデルを改良し、単なる圧力波ではなく圧力波面前後の圧力が不連続にジャンプする衝撃圧縮下の転位導入モデルを新たに構築し、これが重畳することによってピーニング効果が発現する機構を解明する (γ : 塑性ひずみ、 k : 定数、 ρ : 可動転位密度、 b : バーガースベクトル、 \bar{l} : 転位の平均移動距離)。

2. 研究の目的

本研究では、金属組織を作り込むときに通常考慮される「温度場」だけでなく、これまで無視出来るほど小さかった「圧力場」を新たに取り入れることによって、これまでに無い新しい金属組織制御法の基盤となる新しい学理を構築する。具体的には、液相から凝固が開始する際に圧力を印加し微細な凝固組織を形成する学理（新学理 A）と、固相に衝撃波を印加し通常の塑性変形では考慮されない転位生成を陽に考慮し効率的に塑性変形を誘起する学理（新学理 B）である。

本研究の目的は、この新しい学理を基に、ナノ秒レーザ誘起圧力波とフェムト秒レーザ誘起衝撃波を「圧力場」として利用することによって、割れの無い高強度な溶接継手を実現する新しい高速レーザ溶接法を開発することである。

3. 研究の方法

厚さ 3.175 mm の 2024-T3 アルミニウム合金を使用した。この合金の化学組成を表 1 に示す。レーザ溶接の前にアセトンで油分と水分を除去した。ビードオンプレートのレーザ溶接は、圧延方向と直交する方向で行った。レーザ溶接の実験装置の概略を図 1 に示す。溶接実験は、波長 1070 nm、出力 1000 W のシングルモードファイバーレーザ（古河電工製、FEC1000S）を用い、溶接速度 16.6 mm/s で実施した。短パルスレーザ照射位置が凝固組織に及ぼす影響を評価するため、溶接レーザ照射位置と短パルスレーザ照射位置の相対位置を変化させた。短パルスレーザの照射位置は、熔融池の前方、後方、境界、側方と変更した。この実験では、パルス幅 10 ns、波長 1064 nm、パルスエネルギー 430 mJ、周波数 10 Hz の Nd:YAG レーザ（Spectra-Physics 社、Quanta-Ray）を使用した。レーザパルスは、焦点距離 2 m の平凸レンズを用いてスポットサイズ 2.1 mm に集光し、 1.3×10^9 W/cm² の強度に相当する。短パルスレーザの照射位置を図 2 に示す。本稿では、照射位置を (x, y) 座標で表現し、例えば (x, y) = (1.5, 0) とする。図 2 に示すように、

溶接方向を正の x 軸で記述し、垂直方向を y 軸で記述した。溶融池の形状やスポット径は、高速度カメラで測定した。高速度カメラ (nac Image Technology 社製、MEMRECAM HX-3) によるその場観察を行い、短パルスレーザー照射が溶融池の流れに及ぼす影響を観察した。この観察では、10,000 フレーム/秒を使用し、照明には、カメラ前方に中心波長 940 ± 10 nm のバンドパスフィルターと組み合わせた波長 938 ± 5 nm のレーザー (JENOPTIK Optical Systems GmbH, JOLD-45-CPXF-IL) を追加して使用した。接合開始端から 15 mm 離れた位置から組織観察用の試料を取り出した。この試料をバフ研磨で鏡面研磨し、バーカー試薬を用いて電圧 20 V で 3 分間陽極電解エッチングを行った後、エッチング後の試料を偏光顕微鏡で分析した。各照射条件の試験片について、Jeffries 法により平均粒径の測定を行い、短パルスレーザーが粒径に及ぼす影響を評価した。Jeffries 法では、対象面積 A 内の結晶粒数 Na を測定することで粒径を算出する。対象領域の境界線上に位置する結晶粒の数を 1/2 とカウントする。平均粒径は A と Na から求めた。短パルスレーザーの影響領域を評価するために、各試験片の図 3 に示す領域で測定を行った。最も結晶粒が微細化した $(x, y) = (-1, 0)$ の短パルスレーザーを照射した試料についてビッカース硬さ試験を行い、結晶粒の微細化が硬さに及ぼす影響を測定した。硬さ試験は、ビード中心に沿った領域で、荷重 1.96 N、保持時間 10 s、測定間隔 200 μm で行った。測定位置を図 4 に示す。

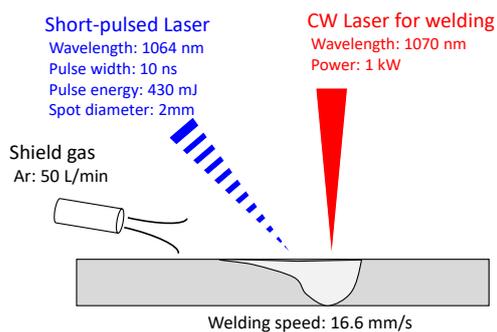


Fig. 1. Experimental setup for laser welding.

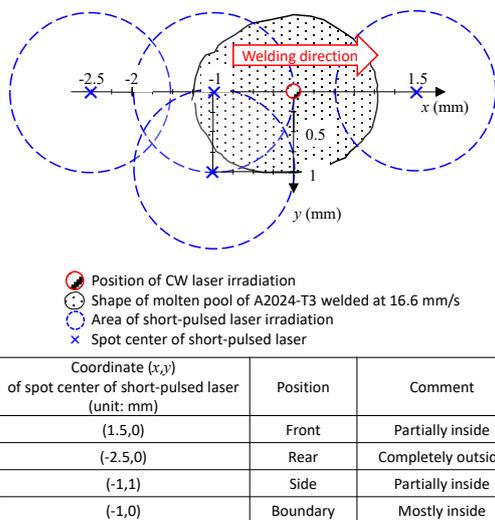


Fig. 2. Positions of laser irradiation.

4. 研究成果

短パルスレーザー照射時の溶接池表面の高速度カメラ画像を図 5 に示す。表面でアブレーションプラズマが確認された時刻を $T = 0$ とし、パルス幅が 10 ns であり、プラズマの発光時間が 2 フレーム (0.2 ms) 以上観測されていないことから、 $T = 0$ の定義の時間誤差は 0.1 ms 以内と判断した。レーザー溶接のみを行った場合、レーザーが直接照射された場所のみ酸化膜が溶融し、溶融池の表面には膜状に残っていることが確認された。これは、酸化アルミニウムの融点 (2072 $^{\circ}\text{C}$) が純アルミニウムの融点 (660 $^{\circ}\text{C}$) より高いために起こる現象である。

溶融池内部に短パルスレーザーを直接照射した場合 $(x, y) = (-1, 0)$ 、溶融池全体がアブレーション圧で大きく変形した。溶融池内部に部分的に照射した場合 $(x, y) = (-1, 1)$ は、溶接線から 1 mm 離れた溶融池側面から波面が伝播することが確認された。いずれの条件でも、短パルスレーザーは溶融アルミニウムではなく、表面の酸化皮膜に照射された。

偏光顕微鏡による溶接金属の表面および垂直部の顕微鏡写真を図 6-8 に示す。なお、各画像における溶接方向は、画像の左から右に向かっている。図 6 に示すように、溶接速度 16.6 mm/s でレーザー溶接のみを行った場合の結晶粒構造を解析すると、溶接金属の組織は、母材からエピタキ

Table 1. Chemical composition of 2024-T3 (thickness: 3.175 mm) (mass %).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.05	0.16	4.6	0.64	1.5	0.00	0.09	0.03	Bal.

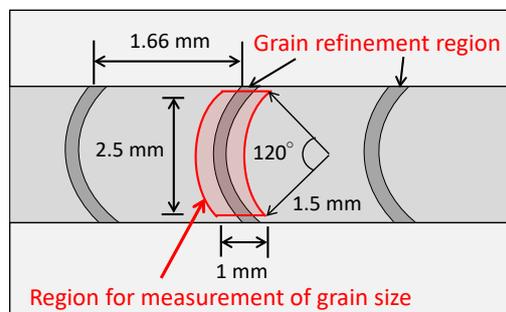


Fig. 3. Grain size measurement region.

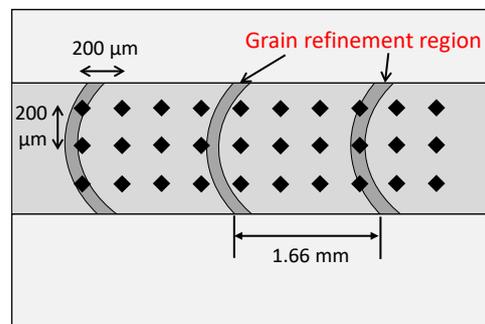


Fig. 4. Schematic of measured positions for the hardness test.

シャル成長した柱状結晶とストレイ結晶が主であり、等軸結晶はほとんど形成されていないことがわかる。

図7(a)の顕微鏡写真は、溶融池 $(x, y) = (-1, 0)$ 内で短パルスレーザーを主に照射した試料の結晶粒構造を示す。ビード面により、結晶粒微細化領域が半円状に周期的に形成されていることがわかる。図7(b)は垂直断面図、図7(c)は図7(b)で示した領域Aを拡大した図である。図7(c)に見られるように、粒状に微細化された領域は、深さ約1 mmで一列に存在した。

図8は、溶融池内で部分的に照射した試験片の観察結果 $(x, y) = (-1, 1)$ である。粒状微細化領域も半円状に周期的に形成されていた。図7および図8に示すように、結晶粒微細化領域の間隔は1.66 mmであった。溶接速度が16.6 mm/s、短パルスレーザーの繰り返し周波数が10 Hzであることから、パルスの空間間隔は1.66 mm/パルスとなり、これが結晶粒微細化領域の間隔に相当する。したがって、これらの結晶粒微細化領域は、パルスレーザーの照射によるものである。また、短パルスレーザーは溶融池の一部に照射されたが、結晶粒の微細化領域は半円形であった。これは、短パルスレーザーが直接照射されない固液界面でも短パルスレーザーが有効であったことを示す。

各レーザー照射条件における結晶粒の数を測定し、図9に示す平均結晶粒径を算出した。このグラフから、パルスレーザーを照射すると平均結晶粒径が減少し、溶接用レーザーの後方1 mmを境界としてパルスレーザーを照射すると、平均結晶粒径が著しく減少することがわかる。しかし、溶接レーザーの前後で短パルスレーザーを照射した場合は、結晶粒の微細化効果は小さかった。結晶粒数の測定領域には、結晶粒が微細化されていない領域も含まれるため、結晶粒微細化領域の厳密な平均結晶粒径は小さくなった。例えば、図7(a)では、微細な結晶粒の粒径は約30 μm であった。

レーザー溶接時に境界 $(x, y) = (-1, 0)$ で短パルスレーザーを照射した試験片の溶接金属のビッカース硬さ試験結果を図10に示す。母材の平均硬度は120 HVであった。このグラフから、溶接線に沿って硬度が周期的に上昇・下降していることがわかる。この周期は約1.66 mm間隔であることから、硬度の上昇は短パルスレーザー照射による結晶粒微細化によるものであることがわかる。この結果から、パルスレーザーの照射による結晶粒の微細化によって、ビッカース硬度を約5 HV上昇させることが出来ることが分かった。

溶接凝固割れが発生する溶接条件下で、溶接池 $(x, y) = (-1, 0)$ に短パルスレーザーを照射した試験片の顕微鏡写真を図11に示す。これらの画像から、結晶粒の微細化領域では凝固割れの進行が抑制されていることがわかる。これは、結晶粒の微細化により低融点合金相が分散し、応力集中が緩和されたためである。この結果から、短パルスレーザー誘起結晶粒微細化法は、高速レーザー溶接において、結晶粒微細化剤を添加することなく凝固割れを抑制出来ることがわかった。

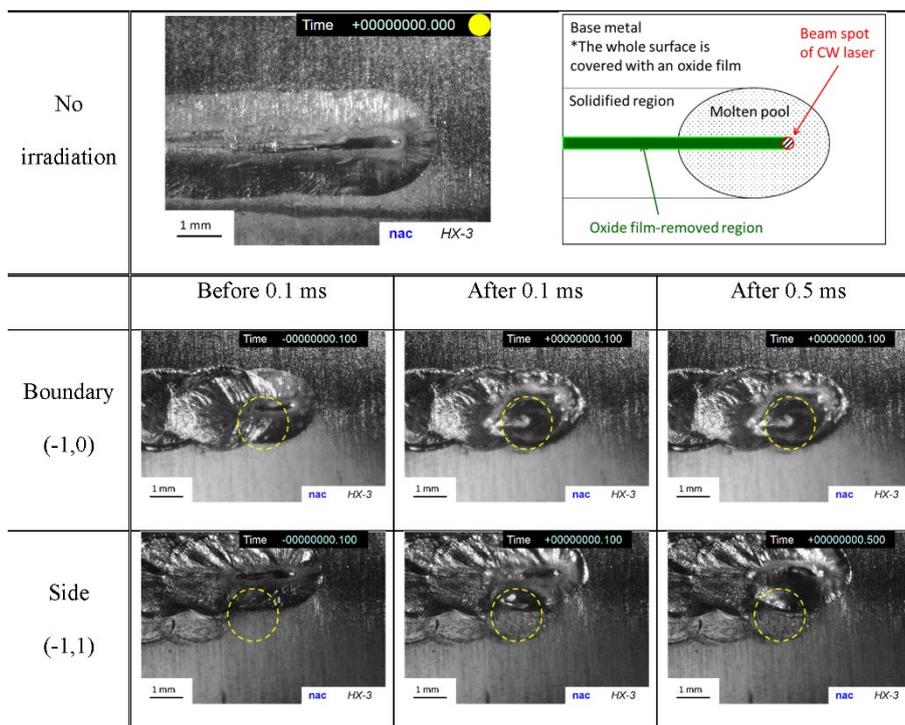


Fig. 5. High-speed photographs of 2024-T3 aluminum alloy irradiated at various positions. Yellow dashed circles indicate short-pulsed laser irradiation area.

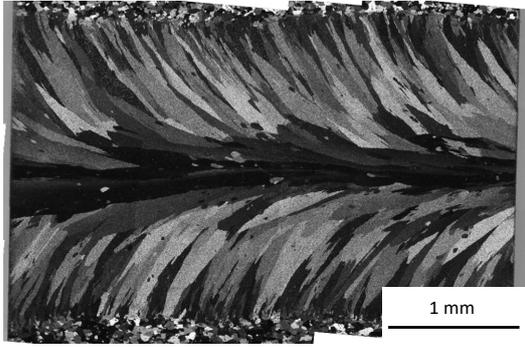


Fig. 6. Polarized optical microscope image of 2024-T3 aluminum alloy without short-pulsed laser irradiation.

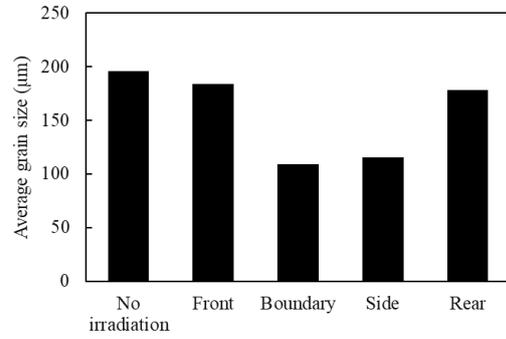
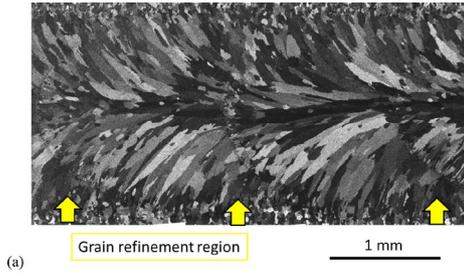
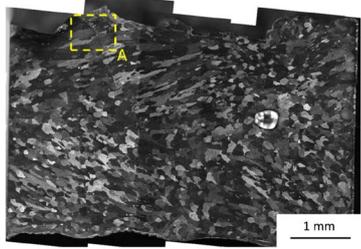


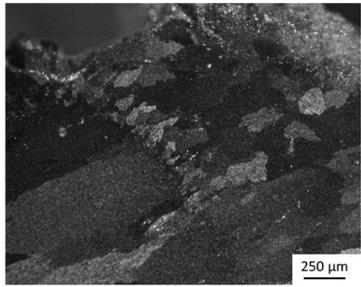
Fig. 9. The average grain size for each irradiation position.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. Polarized optical microscope image of 2024-T3 irradiated by short-pulsed laser at boundary $(x,y)=(-1,0)$. Micrographs show the (a) front surface, (b) vertical cross-section, and (c) magnified image of Region A in (b).

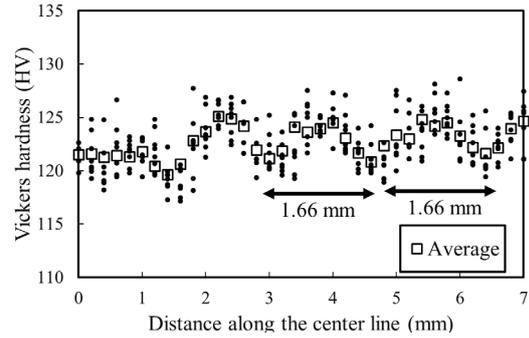
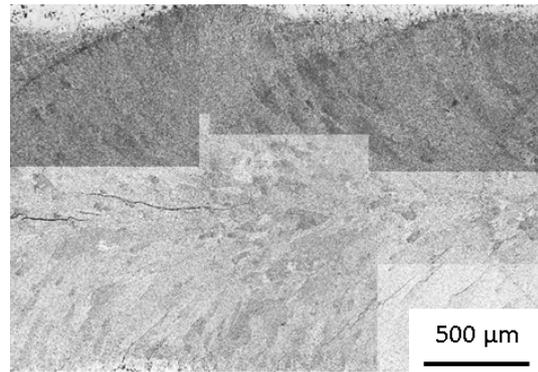
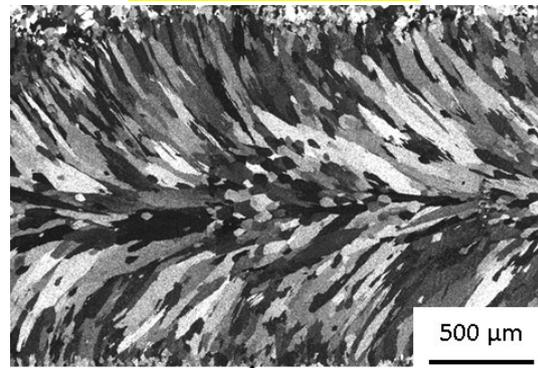


Fig. 10. Hardness distribution of longitudinal direction on surface irradiated at boundary $(x,y)=(-1,0)$.



Optical image

Grain refinement region



Polarized image

Grain refinement region

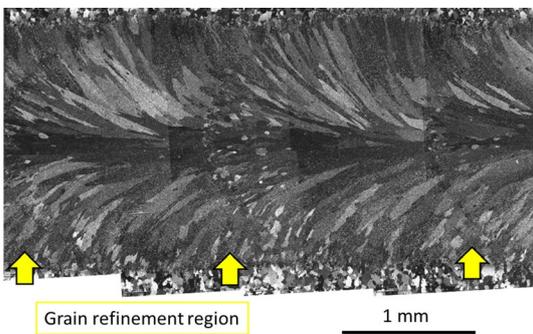


Fig. 8. Polarized optical microscope image of 2024-T3 aluminum alloy irradiated by short-pulsed laser at side $(x,y)=(-1,1)$.

Fig. 11. Observation of crack end irradiated at boundary $(x,y)=(-1,0)$.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nomura Kazufumi, Okuda Hiroyuki, Sano Tomokazu, Asai Satoru	4. 巻 78
2. 論文標題 Simultaneous multipoint emissivity measurement via Zebra-patterned blackbody spray method and application to gas tungsten arc welding process	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Manufacturing Processes	6. 最初と最後の頁 22 ~ 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmapro.2022.04.004	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 Kasano Kazuki, Ogino Yosuke, Sano Tomokazu, Asai Satoru	4. 巻 36
2. 論文標題 Study on practical application for in-process blowholes detection technology	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Welding International	6. 最初と最後の頁 355 ~ 369
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/09507116.2022.2066831	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 Yoshizaki Reina, Ito Yusuke, Ogasawara Kazuma, Shibata Akihiro, Nagasawa Ikuo, Sano Tomokazu, Nagato Keisuke, Sugita Naohiko	4. 巻 154
2. 論文標題 High-efficiency microdrilling of glass by parallel transient and selective laser processing with spatial light modulator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics & Laser Technology	6. 最初と最後の頁 108306 ~ 108306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optlastec.2022.108306	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 Yoshida Masayuki, Nishibata Itsuki, Matsuda Tomoki, Ito Yusuke, Sugita Naohiko, Shiro Ayumi, Shobu Takahisa, Arakawa Kazuto, Hirose Akio, Sano Tomokazu	4. 巻 132
2. 論文標題 Influence of pulse duration on mechanical properties and dislocation density of dry laser peened aluminum alloy using ultrashort pulsed laser-driven shock wave	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 075101 ~ 075101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0083511	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 Iyota Muneyoshi, Matsuda Tomoki, Sano Tomokazu, Shigeta Masaya, Shobu Takahisa, Yumoto Hirokatsu, Koyama Takahisa, Yamazaki Hiroshi, Senba Yasunori, Ohashi Haruhiko, Goto Shunji, Inoue Ichiro, Hayashi Yujiro, Tamasaku Kenji, Osaka Taito, Yamada Jumpei, Yabashi Makina	4. 巻 94
2. 論文標題 A study on convection in molten zone of aluminum alloy during Fe/Al resistance spot welding	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Manufacturing Processes	6. 最初と最後の頁 424 ~ 434
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmapro.2023.03.032	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 Nishibata Itsuki, Yoshida Masayuki, Ito Yusuke, Sugita Naohiko, Hirose Akio, Sano Tomokazu	4. 巻 14
2. 論文標題 Pulse duration dependence of dry laser peening effects in the femtosecond-to-picosecond regime	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 062001 ~ 062001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abfca2	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 佐野智一	4. 巻 95
2. 論文標題 フェムト秒レーザーによるドライレーザーピーニングとそのメカニズム	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第95回レーザー加工学会講演論文集	6. 最初と最後の頁 69-75
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 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 -

[学会発表] 計14件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Itsuki Nishibata, Masayuki Yoshida, Yusuke Ito, Naohiko Sugita, Akio Hirose, Tomokazu Sano
2. 発表標題 Pulse duration dependence of dry laser peening effects in the femtosecond-to-picosecond regime
3. 学会等名 16th International Conference on Laser Ablation (COLA2021/2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Takekuma, T. Matsuda, K. Arakawa, T. Shobu, A. Shiro, K. Masaki, T. Sano
2. 発表標題 Dry Laser Peening of Magnesium Alloy using Femtosecond Laser-driven Shock Wave
3. 学会等名 14th International Conference on Shot Peening (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomokazu Sano
2. 発表標題 Dry Laser Peening: A New Laser Peening Technique using Femtosecond Laser Pulses
3. 学会等名 14th International Conference on Shot Peening (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江頭尚弥, 松田朋己, 奥地拓生, 瀬戸雄介, 伊藤佑介, 菫蒲敬久, 中新信彦, 犬伏雄一, 富樫格, 宮西宏併, 佐野智一
2. 発表標題 銅のフェムト秒レーザー駆動衝撃変形
3. 学会等名 (一社)レーザー学会学術講演会第43回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森祐大, 吉田雅幸, 松田朋己, 荒河一渡, 菫蒲敬久, 中新信彦, 神門正城, 佐野智一
2. 発表標題 フェムト秒レーザー駆動衝撃波を用いたアルミニウム合金のドライレーザーピーニングと周波数領域干渉計による衝撃波計測
3. 学会等名 (一社)レーザー学会学術講演会第43回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹隈亮太, 松田朋己, 荒河一渡, 政木清孝, 佐野智一
2. 発表標題 フェムト秒レーザー駆動衝撃波を用いたマグネシウム合金のドライレーザーピーニング
3. 学会等名 一社)レーザー学会学術講演会第43回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐野智一
2. 発表標題 フェムト秒レーザーによるドライレーザーピーニングとそのメカニズム
3. 学会等名 第95回レーザー加工学会講演会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中友登, 佐野智一, 富岡尚敬, 松田朋己, 荒河一渡, 奥地拓生
2. 発表標題 静的圧縮によるアルミニウムの微細結晶粒組織の形成
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomokazu Sano
2. 発表標題 Improving Fatigue Performance of Laser-Welded 2024-T3 Aluminum Alloy Using Dry Laser Peening
3. 学会等名 Photonics Asia 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomokazu Sano, Takayuki Eimura, Akio Hirose
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 International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC'2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

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

〔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
---------	---------