

令和 5 年 5 月 17 日現在

機関番号：32410

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05109

研究課題名（和文）光励起衝撃波による難燃性Mg合金FSW継手の攪拌組織改質と疲労信頼性向上

研究課題名（英文）Microstructural modification and fatigue reliability improvement of flame-retardant Mg alloy FSW joints by shock waves generated by a pulsed laser

研究代表者

政木 清孝（Masaki, Kiyotaka）

埼玉工業大学・工学部・教授

研究者番号：30323885

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：難燃性マグネシウム合金を機械構造部材へ適用するうえで、接合部の疲労強度改善が必要不可欠である。本研究では摩擦攪拌接合（FSW）継手を対象として、大気中で継手表面にパルス幅がフェムト秒オーダーのパルスレーザを照射するDry-LP処理を適用し、疲労特性改善と攪拌組織改質との相関を調査した。その結果、Dry-LP処理によってFSW継手の疲労特性を改善できることが明らかとなった。物理的な物体の衝撃によって表面改質を行う従来のショットピーニング処理と比較した結果、Dry-LP処理では顕著な硬さの向上を伴っておらず、従来のピーニング処理とは異なる新たな疲労特性改善要因が存在している可能性を示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水を必要としないDry-LP処理によって、難燃性Mg合金のFSW継手の疲労特性改善が達成されたことは、難燃性Mg合金の幅広い機械構造部材への適用へとつながり、輸送機器の軽量化、省エネルギー化へとつながる。さらには、Dry-LP処理が従来のSP処理と比較してもクリーンな処理であるため、脱炭素社会の達成に大きく貢献する。また、Dry-LP処理では顕著な組織硬さの向上を伴うことなく、従来のSP処理以上の疲労特性改善効果が確認された。パルスレーザのパルス幅とピーニング効果の相関に関する学術的な調査は行われたことが無く、今後のLP処理研究に関する一つの大きな方針を示す研究成果となった。

研究成果の概要（英文）：To use flame retardant magnesium alloys for mechanical structural components, it is essential to improve the fatigue strength at joint part. In this study, friction stir welding (FSW) was focused on and dry laser peening (Dry-LP) treatment was performed to the joints. Dry-LP is one of the surface modification techniques that uses a pulsed laser with a femtosecond pulse width. As the results of plane bending fatigue test, fatigue strength was improved by Dry-LP treatment. As investigation results of changes in microstructural properties, it was found that Dry-LP treatment could be improved the fatigue strength without significantly increasing of hardness. This tendency is different from one of conventional shot peening treatment which uses physical impact of shot media. This difference suggests the possibility that there is a new factor other than the general peening effect (compressive residual stress, hardness improvement) as a fatigue property improvement factor by Dry-LP treatment.

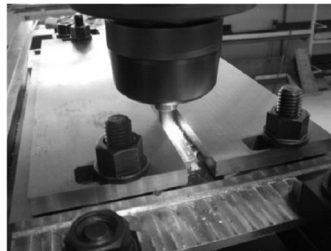
研究分野：材料力学

キーワード：摩擦攪拌接合 難燃性マグネシウム レーザピーニング 表面改質処理 疲労特性評価 ショットピーニング

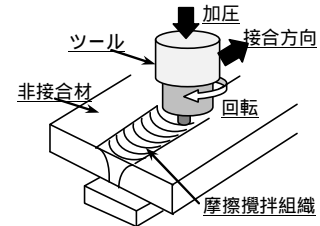
科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

マグネシウム (Mg) 合金は、最も比強度に優れる金属として知られているが、いっぽうで燃えやすいという欠点を有しているため、機械構造材への利用が困難であった。しかし、Ca を添加させた難燃性の Mg 合金が開発され、機械構造材への用途拡大が模索されはじめた。国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の主導する「革新的新構造材料等研究開発」において、新構造材料技術研究組合 (ISMA) が新幹線車両の客室床板部材へと適用し、実機利用に関する実証実験を行うまでに至っている (文献 1) (文献 2) (文献 3)。新幹線車両などの長尺構造物の製造には部材同士の接合が不可欠であるが、実証実験では英国溶接研究所 (TWI) により開発された摩擦攪拌接合 (FSW) が適用されている。FSW とは、図 1 に示すようにピンを有するツールを接合部材に押しつけ、摩擦熱で組織を軟化して攪拌し固相接合する接合技術である。現在では難接合材であるアルミニウム合金の接合技術として広く適用されるようになり (文献 4)、上記プロジェクトでも難燃性 Mg 合金の FSW 接合技術確立が目的のひとつとされていた。一方、機械構造部材では接合部が最弱部となつて破壊することが多く、特に振動などの繰り返し荷重によって生じる疲労破壊を防止することが、機械構造物の安全性を確保するうえで必要不可欠である。しかし、難燃性 Mg 合金 FSW 継手に関しては接合技術の確立が先行していたため、その疲労特性評価と改善に関する研究については行われてこなかった。



(a) 摩擦攪拌接合例



(b) 摩擦攪拌接合概略

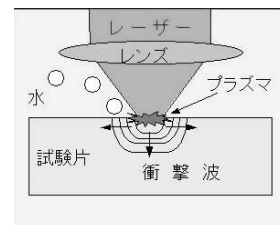
図 1 摩擦攪拌接合

FSW 継手の疲労特性改善方法とし

ては、表面改質処理の一つであるショットピーニング (SP) 処理が有効であることは広く知られている。ただし、一般的な SP 処理では粉塵発生の問題があり、難燃性を付与したとはいえ Mg 合金の粉塵は危険物扱いとなるため、施工時の粉塵爆発発生などの懸念が残る。本研究の申請者は、光 (パルスレーザー) を材料表面に照射して発生する衝撃波を用いて材料をピーニング処理する技術、いわゆるレーザーピーニング (LP) 処理に関する研究を研究連携者とともに永年手掛けてきた (文献 5)。本処理は粉塵が発生しないクリーンなピーニング処理であり、粉塵の発生が問題となる難燃性 Mg 合金 FSW 継手への疲労特性改善技術として最適であると考えた。しかし従来の LP 処理においては、図 2 に示すように被加工材を水中に設置するか、もしくは表面に水膜を付与する必要があるため、水に対して容易に腐食する Mg 合金への適用が困難であった。Mg 合金への LP 処理適用に関する検討を行っていた時、研究チームの一人である大阪大学の佐野智一氏により、使用するパルスレーザーのパルス幅をフェムト秒まで短くすることによって大気中での LP 処理が可能であることが見出され、その LP 処理を Dry Laser Peening (Dry-LP) 処理として確立した (文献 6)。この技術の確立により、難燃性 Mg 合金 FSW 継手に対する LP 処理適用が可能となったことから、その疲労特性改善と破壊メカニズムの調査に関する研究に着手した。



(a) 施工例



(b) 原理概略

図 2 LP 処理の概念

2. 研究の目的

本研究では、当初下記の二つを主たる目的に設定して研究を実施した。

- ：難燃性 Mg 合金 FSW 継手部の組織学的特徴と疲労特性との相関性調査
- ：パルスレーザー照射による FSW 継手部の組織変化と疲労信頼性向上の相関性調査

(1) 難燃性 Mg 合金 FSW 継手部の組織学的特徴と疲労特性との相関性調査

難燃性 Mg 合金 FSW 継手を機械構造部材として使用するには、その疲労特性に関する設計データの蓄積と、疲労破壊メカニズムの調査が必要不可欠である。FSW 継手における接合部の組織は、一般的に図 3 に示すような「攪拌部 (SZ)」、「機械的熱影響部 (TMAZ)」、「熱影響部 (HAZ)」、「母材部 (BM)」で構成される特異な内部組織となる。従来から広く研究されている Al 合金 FSW 継手に関して、疲労き裂は硬さが最弱となる「機械的熱影響部」と「熱影響部」の境界で発生し、進展することがわかっている。しかし、供試材に難燃性 Mg 合金を用いた場合、Mg 合金

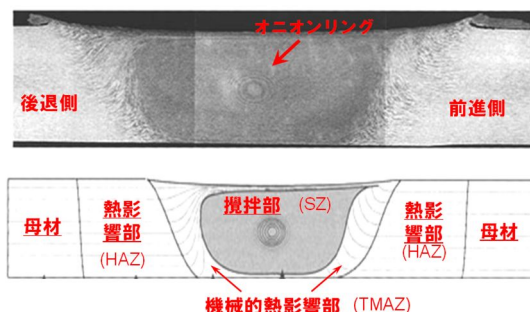


図 3 FSW 継手の断面組織

がすべり方位の少ない最密六方構造であることに起因して、特異な内部組織と結晶方位の異方性や集合組織が形成されるため、疲労き裂の発生挙動がその影響を受けると考えられる。さらに、難燃性を付与するために添加する Ca が介在物として偏析することにより、き裂発生を助長することも分かっているため、組織学的な観点から FSW 継手の疲労き裂の発生・進展に関する調査が必要である。そこで本研究では、難燃性 Mg 合金 FSW 継手を機械構造部材に適用する場合の設計基礎データの取得と、組織学的な知見から学術的に破壊メカニズムの解明を目指す。

(2)パルスレーザー照射による FSW 継手部の組織変化と疲労信頼性向上の相関性調査
難燃性 Mg 合金 FSW 継手の疲労信頼性向上を図るため、水を使わないレーザーピーニングである Dry-LP 処理を適用する。Dry-LP 処理は開発者の大阪大学 佐野智一氏と連携して行うが、Mg 合金への Dry-LP 処理の前例がないため、適切な残留応力を付与するための処理条件の見出しからおこなう。処理条件が決定したら FSW 継手へと適用し、その疲労特性改善効果を確認するとともに、光の照射によって生じた衝撃波が攪拌部近傍の特異な組織にどのような影響を及ぼすのかを明らかにする。最終的に、難燃性 Mg 合金 FSW 継手強度の信頼性を図るのみならず、疲労き裂の発生・進展抑制を主とする損傷許容設計の設計指針の提唱へとつなげる。

3. 研究の方法

上記の目的達成のため、下記のとおり研究を計画した。

(1)難燃性 Mg 合金 FSW 継手部の組織学的特徴と疲労特性との相関性調査

Al 合金 FSW 継手の疲労特性評価に関してはこれまでに多くの研究実績を積んでおり(文献 5)、これまでの手法を難燃性 Mg 合金に拡張することで接合条件を確立する。接合にあたっては、従来通り機械工場に設置されている汎用フライス盤を使用する。また FSW 継手の作成と並行して、母材 (BM) の基本的な疲労特性取得用の試験片を作成し、東京衡機製の PBF-30X 型平面曲げ疲労試験機を使用して応力比 $R=-1$ 、室温大気中条件下にて疲労試験を行う。難燃性 Mg 合金の FSW 接合条件確立後には疲労試験片を作成し、BM 材と同様の方法にて疲労試験を実施して疲労特性の基礎データを蓄積する。破壊メカニズムの調査には、FSW 継手部の特異な組織を光学顕微鏡、X 線成分分析 (EDX)、結晶方位解析 (EBSD)、X 線残留応力測定、硬さ分布特性などを援用して調査し、き裂発生場所と組織特性との相関性を調査する。また、時間的な余裕が生じれば、レプリカ法による表面き裂の進展調査、断層撮影技術を援用した非破壊的なき裂進展挙動調査、破面の形状調査などを行い、さきに調査した組織特性とあわせてき裂進展メカニズムを調査する。

(2)パルスレーザー照射による FSW 継手部の組織変化と疲労信頼性向上の相関性調査

開発者の佐野智一氏の協力をいただき、まずは BM 材に対する Dry-LP 施工を試みるとともに、表面に圧縮残留応力が付与される条件を見出す。その条件出しが終了したのちには、疲労試験片への Dry-LP 処理を適用して平面曲げ疲労試験を実施する。疲労特性評価にあたっては、比較材として従来手法である SP 処理を適用した試験片を用意する。粉塵発生の懸念があるが、試験片が小さくて施工時間が短いことから、問題ないと判断した。SP 処理の施工にあたっては、新東工業にご協力戴く。これにより Dry-LP 処理と SP 処理の疲労特性の相違が検討できる。FSW 継手の作製条件を確立した後は、FSW 継手に対しても Dry-LP 処理と SP 処理を適用して、疲労特性の比較検討を行う。Dry-LP 処理による FSW 継手の攪拌組織の変化については、上述の目的 (1) と同様な手法により調査を行うこととする。

4. 研究成果

(1)研究計画の一部変更について

COVID-19 の世界的な蔓延により、研究代表者の所属機関での FSW 接合作業や試験片作成などが禁止されたため、難燃性 Mg 合金 FSW 継手に関する研究計画が大幅に遅延することとなった。本来の研究計画に関しては、作業禁止が解除されてから急ピッチで計画を進めたが、FSW 継手の Dry-LP 処理材や SP 処理材の疲労特性を調査するにとどまり、攪拌組織の変化などの詳細な調査までは踏み込めなかった。上記の作業禁止期間中は、分子研 佐野雄二氏らによって実用化された図 4 に示すようなハンドヘルド型パルスレーザー発振器を使用して、その発振器が LP 処理装置として利用可能か調査することとした。なお、このハンドヘルド型のパルスレーザー発振器は、従来のレーザー発振器に比べてパルス幅が $1/10$ 以下のナノ秒オーダーとなっており、Dry-LP 処理で使用するパルスレーザー発振器 (パルス幅がフェムト秒オーダー) を含めれば、LP 処理時のパルス幅の違いが材料特性に与える影響を調査できるのではと考えた。この装置に関する研究に関しては、コロナ禍における所属機関での作業禁止の影響を受けることなく実施可能であること、そして今後

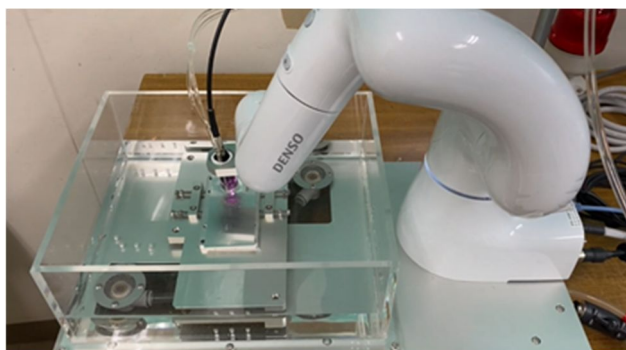


図 4 ロボットに実装したハンドヘルド型レーザー

の研究テーマの発展へとつながることを鑑みて、当初の予定にはなかったが本申請研究テーマの一環として実施することとした。ただ、現時点ではLP処理を従来通りの水中で実施する必要があり、Mg合金への適用が困難であると判断したため、A7075BE-T6511アルミニウム合金や鉄鋼材料（SCM420H浸炭材）を供試材として、回転曲げ疲労特性を調査することとした。以下にそれぞれの研究成果を示す。

(2)難燃性Mg合金FSW継手の強度評価とDry-LP処理による疲労特性改善に関する研究
 難燃性Mg合金に関しては、BM材とFSW継手に対して、それぞれにDry-LP処理とSP処理を施した場合の平面曲げ疲労データを取得した。これまでに得られている疲労試験結果を図5に示す。BM材の見かけの疲労限度（S-N特性水平部）は約100MPaとなった。引張強さからの両振り曲げ疲労限度予測式を過去に研究代表者が提案しているが（文献7）、その予測値（112MPa）とおおむね一致する結果となり、改めて予測式の有用性を示す結果となった。一方のFSW継手の疲労限度はBM材に比べて顕著に低い約60MPaとなり、機械構造材に使用するには何らかの強度改善が必要であることを改めて示した。FSW継手にDry-LP処理を適用すると疲労限度が向上し、SP処理よりも疲労限度が向上することが明らかとなった。破断した試験片について、破断位置（き裂発生位置）を示したものが図6である。さらに、材料の試験片の断面における表面近傍の硬さ分布を調査した結果を図7に示す。破壊起点位置と断面の硬さ分布との相関を調査したところ、SP処理材ではFSW継手中心（SZ領域）の表面近傍に顕著な硬さ増加部分が確認され、接合中心から2mm程度離れた位置で硬さ急変部を生じ、そこから疲労き裂が発生することを確認した。組織硬さの急変部分で疲労き裂が発生する傾向は、従来のAl合金FSW継手と類似の傾向である。しかしDry-LP処理材に関しては、き裂発生起点が接合中心に位置しており、さらにSP処理材のような表面近傍の硬さの顕著な増加や、硬さの急変部を確認することができなかった。試験片の硬さ分布は従来と同じ実施方法で調査したが、Dry-LP処理したFSW継手において硬さとき裂発生位置との相関を見出すことができなかった。この結果は、これまでの表面改質処理材の研究では確認されなかった新たな現象であり、攪拌組織の詳細な調査を行うことで今後明らかにしていきたい。いずれにしても、難燃性Mg合金FSW継手の疲労特性データや表面改質処理材の試験データは世界的にもほとんど取得されていないため、早急に取りまとめて国際会議などで公開したい。

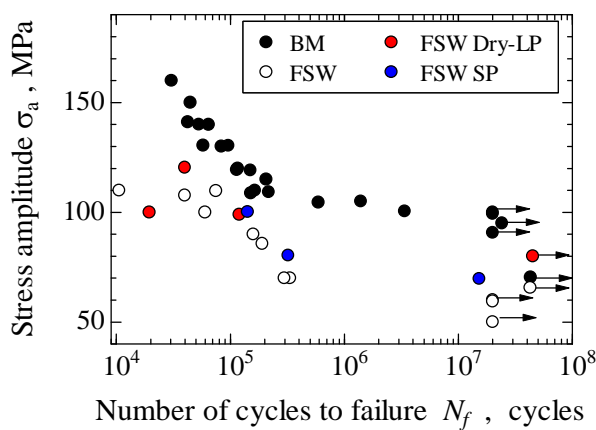


図5 疲労試験結果一覧

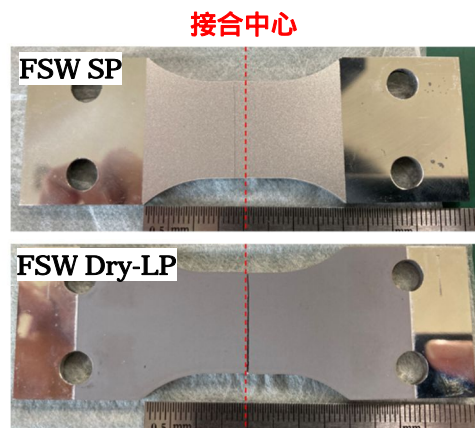


図6 疲労破断位置

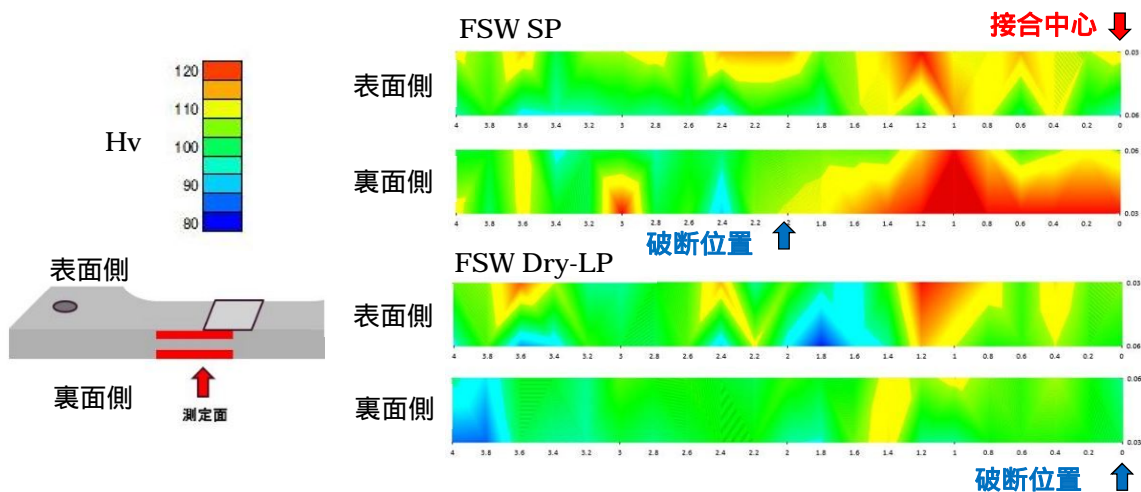


図7 表面近傍の硬さ分布

(3)ハンドヘルド型レーザー発振器により LP 処理した A7075BE-T6511 の疲労特性調査

A7075BE-T6511 アルミニウム合金にハンドヘルド型レーザー発振器による LP 処理（以後 HH-LP 処理と称す）を施し、回転曲げ疲労試験を実施した。その際、施工条件の異なる 2 種類の試験片を用意した。得られた疲労試験結果を図 8 に示す。HH-LP 材は施工条件によらず疲労特性が顕著に向上し、BM 材と比較して 10^7 回疲労強度でおおよそ 1.5 倍程度、疲労寿命で 100 倍程度の改善となった。ハンドヘルド型レーザー発振器での LP 施工は世界初となる研究であり、本研究成果は開発者の佐野雄二氏とともに国内外の講演会で発表したところ、大きなインパクトを与えた手応えを感じた。研究代表者がこの疲労特性改善メカニズムの調査を行ったところ、Dry-LP 施工した難燃性 Mg 合金 FSW 継手と同様に、HH-LP 材の試験片表面近傍に顕著な硬さの向上を確認することができなかった。また、HH-LP 処理材の疲労破面の形態が図 9 に示すように非常に特徴的なものとなっており、その要因が試験片最表面においてき裂の発生が顕著に抑制されているのではと推測した。この HH-LP 処理に関する研究と Dry-LP 処理に関する研究では、従来の LP 処理で使用するパルスレーザーのパルス幅よりも狭いパルス幅であることが共通しており、レーザーピーニング施工時のパルス幅を短くすることで、学術的に明らかになっていない新たな材料強化メカニズムが発現する可能性を見出した。

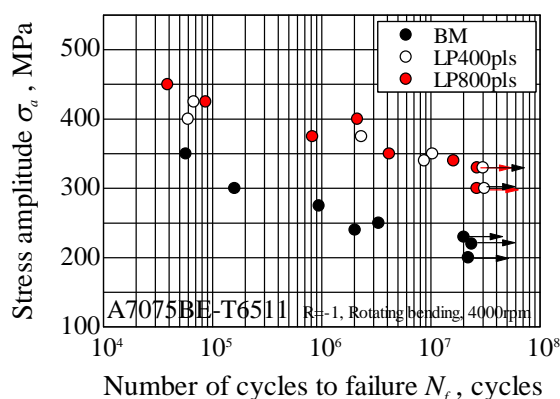


図 8 HH-LP 処理した Al 合金の疲労特性

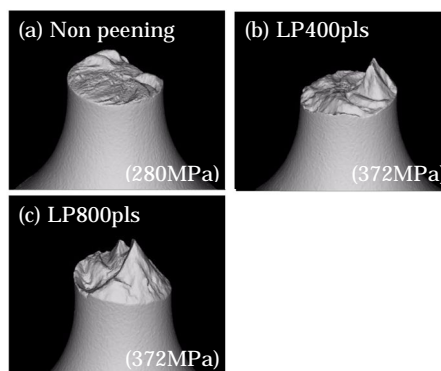


図 9 HH-LP 処理した Al 合金の疲労破壊形態

< 引用文献 >

- 渡井久男、マグネシウム合金の研究開発動向、科学技術動向、2005 年 8 月号、20-29
- NEDO News Release、世界最大級、難燃性マグネシウム合金を使った高速鉄道車両部分構体の試作に成功、2018.6.12
- https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101528.html
- 藤井英俊ほか、各種金属材料の摩擦攪拌プロセスによる高機能化、スマートプロセス学会誌、3 巻、2014、334-340
- 科研費成果報告書 16K0676
- 詠村嵩之、佐野智一、廣瀬明夫、堤成一朗、政木清孝、佐野雄二、アルミニウム合金 A2024 のフェムト秒レーザーピーニングとその疲労特性、溶接学会全国大会平成 27 年度秋季大会講演概要集、講演番号 254、2015、184-186。
- 政木清孝 マグネシウム合金押出材の回転曲げ疲労限度と機械的性質の相関、材料、69 巻、2020、672-678

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 K. Masaki, Y. Sano, Y. Mizuta, S. Tamaki
2. 発表標題 Improvement of fatigue property of A7075 aluminum alloy by laser peening with handheld laser device
3. 学会等名 the 14th International Conference on Shot Peening (ICSP14) (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 the 14th International Conference on Shot Peening (ICSP14) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 政木清孝, 佐野雄二
2. 発表標題 ハンドヘルドレーザーを用いたLP処理によるアルミニウム合金の疲労特性改善
3. 学会等名 日本材料学会 九州支部 第8 回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 政木清孝, 佐野雄二, 水田好雄, 玉置悟司
2. 発表標題 ハンドヘルド型レーザー発振器を使用したLP 施工によるA7075BE-T6511 の回転曲げ疲労特性改善
3. 学会等名 日本機械学会M&M2022材料力学カンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 政木清孝, 佐野雄二, 水田好雄, 玉置悟司
2. 発表標題 ハンドヘルド型レーザー発振器によりLP施工したA7075BE-T6511の回転曲げ疲労特性
3. 学会等名 日本材料学会 第35回疲労シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹隈亮太, 松田朋己, 佐野智一, 荒河一渡, 政木清孝
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 レーザー学会学術講演会第43 回年次大会
4. 発表年 2023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
研究協力者	佐野 智一 (SANO TOMOKAZU)		
研究協力者	佐野 雄二 (SANO YUJI)		

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
---------	---------