

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：12605
研究種目：若手研究
研究期間：2020～2022
課題番号：20K14620
研究課題名（和文）難削材に対してマルチスケール構造を創成する短パルスレーザー電解複合加工の開発

研究課題名（英文）Development of hybrid process with short-pulsed laser and electrochemical machining to create multi-scale structures on difficult-to-cut materials

研究代表者
小玉 脩平（Kodama, Shuhei）
東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・特任助教

研究者番号：10867237
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、短パルスレーザー電解複合加工による複合表面の創成を実現することを目的とし、硫酸銅水溶液中で低電流を流しながら、レーザー照射を行うことで、レーザー照射のみでは困難な厚さのマイクロライン状の銅の析出を実現した。一方で、塩化ナトリウム水溶液中でレーザー照射を行いながら電解加工を行うことで、加工が困難な難削材のチタンに対して、安定かつ高能率なマルチスケール加工を実現した。以上より、除去加工および付加加工のそれぞれに適切な電解液を選定し、陽極と陰極を変え、レーザー照射のエネルギー密度を制御することで、マルチスケールの除去加工と付加加工を実現する短パルスレーザーと電解加工の複合加工技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
現状のものづくりにおいて形状創成と機能創成を同時に実現する加工技術は確立されておらず、短パルスレーザーによる光加工と電解加工による電気加工を複合し、発生する電磁場・熱を制御し、複合表面を創成する研究は前例がない。また、レーザー加工に対する溶液の影響や電解加工に対する電磁場や熱などの影響は明らかになっておらず、短パルスレーザー電解複合加工による電磁場や熱への影響を解明することはレーザー加工学および電解加工学の発展にもつながる。さらに複合表面を難削材を含めた金属に高能率で創成する技術はいまだ確立されておらず、新しい価値の創出につながる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to achieve the creation of composite surfaces via hybrid processing with short-pulsed laser and electrochemical machining. By flowing a low current in a copper sulfate aqueous solution and performing laser irradiation, the deposition of micro-line copper with a thickness that would be difficult to achieve through laser irradiation alone was achieved. On the other hand, by performing electrochemical machining while conducting laser irradiation in a sodium chloride aqueous solution, stable and efficient multi-scale processing of titanium, a difficult-to-cut material, was achieved. Therefore, a hybrid processing technology using short-pulsed laser and electrochemical machining that enables multi-scale removal and addition processes was developed by selecting appropriate electrolytes and electrodes, and controlling the energy density of laser irradiation and current value.

研究分野：精密加工学

キーワード：短パルスレーザー 電解加工 複合加工 難削材 微細構造 表面改質 複合表面

1. 研究開始当初の背景

近年、様々な価値観に対応し、高機能な製品を生産する高付加価値・少量生産型のものづくりが必要とされている。そこで材料表面上に微細構造を創成することにより、機械的あるいは光学的、表面エネルギー的に機能を発現する機能創成が要求されている。それらの需要を満たす一手段として材料表面にナノ周期構造を創成できる短パルスレーザーが注目されている。この加工法は照射痕内部に自己組織的にレーザー波長以下の周期を有した構造を創成できるため、高能率で機能創成を実現できる。一方で、材料により構造の形状が異なるなど再現性が低く、構造の制御が困難であることや低強度で照射しなければ構造が創成できないため、微細加工にのみ特化し、ミリ・マイクロ単位の形状創成や液中レーザー照射による析出の付加加工は困難である。一方で、電解加工は電気化学反応を利用し非接触で加工および表面処理が可能であるため、難削材などに対して適しているが、電解めっきは電解液に接する部分全体で反応が起こるため、局所的なめっきが困難であることや、チタン合金などの不働態化を起こしやすい材料に対して均一な除去加工が容易くないなどの課題がある。

そこで、電界の発生により非接触で加工が行われる短パルスレーザーと電解加工の複合加工を考案した。付加加工の場合、レーザー照射部で温度上昇とともに金属イオンの還元が促進され、相乗効果により単一の加工に比べて析出量が増加し、複合表面を高能率で創成できると考えられる。また、除去加工においては、レーザーにより不働態被膜を除去しつつ、電解加工を行えばチタン合金などを高能率でマルチスケール加工を行うことが可能であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、短パルスレーザーと電解加工を複合することで、それぞれの加工特性よりも大幅に加工特性を向上し、局所的な金属めっきによる複合表面の創成、および難加工材であるチタン合金のマルチスケール加工を高精度・高能率で行える加工技術を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) レーザー電解複合加工による付加加工

局所的な銅めっきを実現するため、電流を流せる液中レーザー照射装置を構築し、ナノ秒レーザーを用いて、硫酸銅水溶液中でレーザー照射のみの検証を行い、銅の析出に対するレーザーの影響を検討し、銅の析出を促進するため、電解援用ナノ秒レーザーにより、電解のみではめっきが起こらない低い電流を流しながらレーザー照射を行い、局所的な銅の析出を試みた。

(2) レーザー電解複合加工による除去加工

電解液吸引工具を用いた走査電解加工へのレーザー援用を提案した。工具電極が加工点に到達する直前にレーザー照射を行い、不働態被膜を除去しながら電解加工を行うことが期待できる。まず、レーザー照射を行いながら電解液吸引工具を用いた走査電解加工を行える加工装置を構築し、Ti-6Al-4V に対して電解液中でレーザー走査による除去加工が可能であるか検証した後、レーザー援用電解加工を行うことでレーザーと電解加工による複合効果の検証を行った。

4. 研究成果

(1) レーザー電解複合加工による付加加工

図1に示すように、工作物と工具電極を対置し、その間に電解液を流して、電流を流しながら、工作物表面にレーザーを照射できる加工装置を開発した。この装置を使用して、まず、ナノ秒レーザーを用いて、硫酸銅水溶液中で照射実験を行い、銅の析出に対する影響を検討した結果、図2に示すようにエネルギー密度が増加するとともに粒子の析出が増加し、粒子が熔融・合体し拡大することを確認した。これは、照射部で温度上昇が促進され析出および熔融が起こりやすくなったためだと考えられる。また、図3に示すように走査速度の減少すなわち照射回数の増加に伴い中心部で粒子の析出量が減少していることを確認した。これは、照射回数の増加とともに中心部に付着していた粒子の蒸発・飛散が促進したことが考えられる。

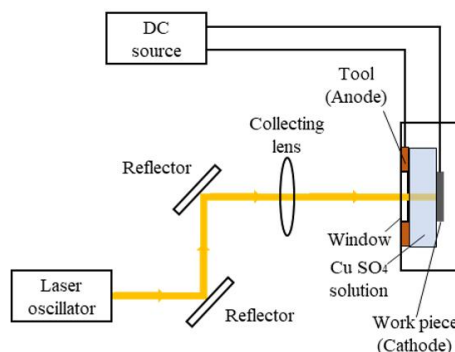


図1 レーザー電解複合加工装置の概要図

次に電解援用レーザー照射を行った結果、図4に示すようにエネルギー密度が大きい方が銅の析出が多いこと、および電解を援用した方が銅粒子の析出量が多いことが分かった。これは、電解を援用して電流を流すことによりレーザー照射部で還元力が高くなり、銅イオンの還元が促進され、特にレーザー照射部で銅の析出が促進したことが考えられる。さらに、複数回走査した結果、

走査回数の増加に伴い、銅の析出高さが増加することが分かった。このことから、繰り返し走査することで析出高さを制御し、マイクロ構造体を創成することに成功した。

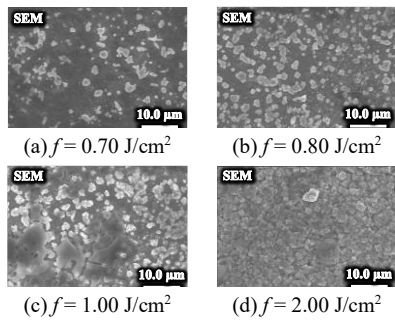


図2 液中レーザー照射による析出粒子

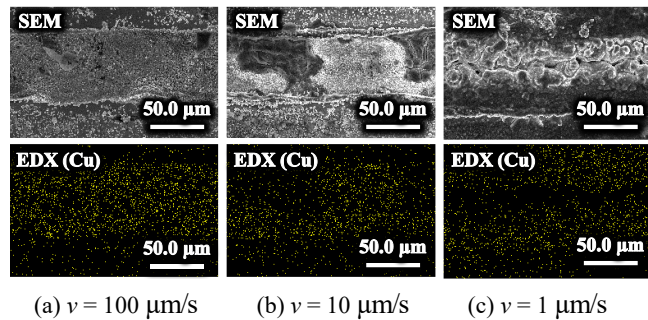


図3 析出粒子の銅マッピング

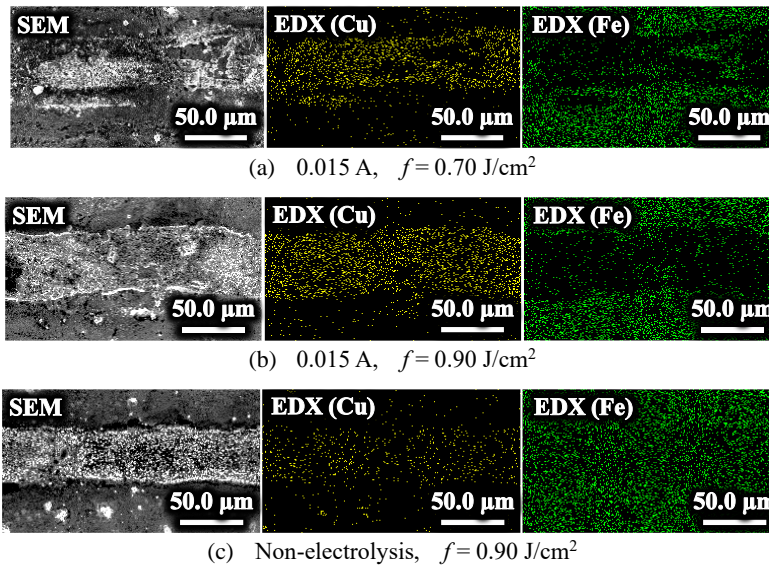


図4 走査レーザー照射と走査電解援用レーザー照射による銅の析出

(2) レーザ電解複合加工による除去加工

レーザー照射を行いながら電解液吸引工具を用いた走査電解加工を行える加工装置を開発した。図5に装置の概要図を示す。青色の矢印は電解液流れ、赤色の矢印がレーザー照射を示している。工作物はX軸ステージ上、工具はZ軸ステージ上に固定されており、電解液タンクから電解液が供給され、吸引ポンプによって吸引し、廃棄タンクへと流れていく。これによって工具直下でのみ電解液流れが生じ、電解液領域を限定できる。電源は、電極に負極、工作物に正極が接続されており、電圧印加を行う。電解液吸引工具は、2つのアクリル部品によってSUS304を用いた1mm四方の棒状電極が囲われており、電極の真横にレーザー用の通路を設ける。不動態被膜が生成された加工点が電極直下に到達する直前にレーザーによって不動態被膜を除去し、電解加工を行うことでレーザー援用電解加工を行う。

まず、Ti-6Al-4Vに対して電解液中でレーザー走査による除去加工が可能であるか検証するため、工具を用いて濃度20 wt%のNaCl水溶液中で工作物を電解液流れ方向に1度の片道走査することにより、走査レーザー照射を行った。その結果、図6に示すように、どの走査速度の場合も、除去加工が行われ、使用しているレーザーは、ガウシアンビームであるため、工作物に対してレーザーを照射した場合、強度分布を模したように中心で最も

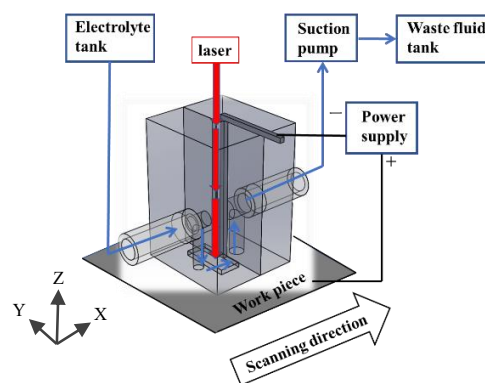


図5 レーザ電解複合加工装置

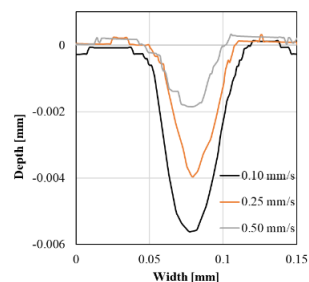


図6 レーザ加工による溝の断面

加工が進行していく V 字の溝形状が得られたと考えられる。また、走査速度が遅いほど、面積当たりの照射回数が増すため、加工幅は広くなり、加工深さは深くなることが分かった。

電解加工により、チタンに生成される不働態被膜の厚みは、数 nm から数百 nm であると報告されており、レーザーにより不働態被膜の除去は行えると考え、次にレーザー電解複合加工を行った。図 7 に加工痕中心を通るように走査方向に垂直に測定した形状測定結果をそれぞれ示す。横軸は加工幅、縦軸は加工深さを示している。同図より走査速度が 0.10 mm/s の時、いずれの電圧の場合も、レーザー援用電解加工では、照射部で最も加工深さが大きくなる V 字形状が得られることがわかる。また、電圧が増加するに従い、底面の頂点の角度が増加する。これより、レーザーによる不働態被膜の除去によって、照射部分を中心として加工が広がっていくことを示している。不働態被膜の破壊が生じにくい 10 V の低電圧の場合、加工量も増加し、照射跡をガイドとして切削加工のように走査電解加工を行えることがわかった。20 V の高電圧の場合、電解加工のみとレーザー援用電解加工の最大加工深さの変化はあまりない。これは、電解加工のみの場合でも、高電圧であるほど、局所的に不働態被膜を破壊しやすくなり、破壊部を優先的に加工が進行したためであるが、レーザー援用することで、照射部で最も優先的に加工を進行させることができた。以上より、走査電解加工に対してレーザーを援用することでレーザーと電解加工の複合効果が得られた。走査速度が 0.50 mm/s の場合、電解加工のみの場合は、まばらに加工が行われるが、レーザーを援用することで照射部で限定的に加工が進行し、最大加工深さも深くなることがわかる。しかし、レーザーの照射点直下では、山形状が残り、加工が行えていない。これは、レーザーによって照射部で電解液が蒸発したことが原因であると考えられる。電解液領域が照射部では存在せず、電流が流れなくなり、電解加工が進行しない。走査速度が低速であるほど、照射部での電解液の蒸発が生じたとしても、照射点を通過した後、電解加工が進行するまでの時間が長くなるため、再びレーザー通過跡にも電解液が広がりやすくなる一方、高速度走査であれば、レーザー通過跡に電解液が広がらないままに電極直下を通過してしまい、電解加工が進行しづらくなったと考えられる。

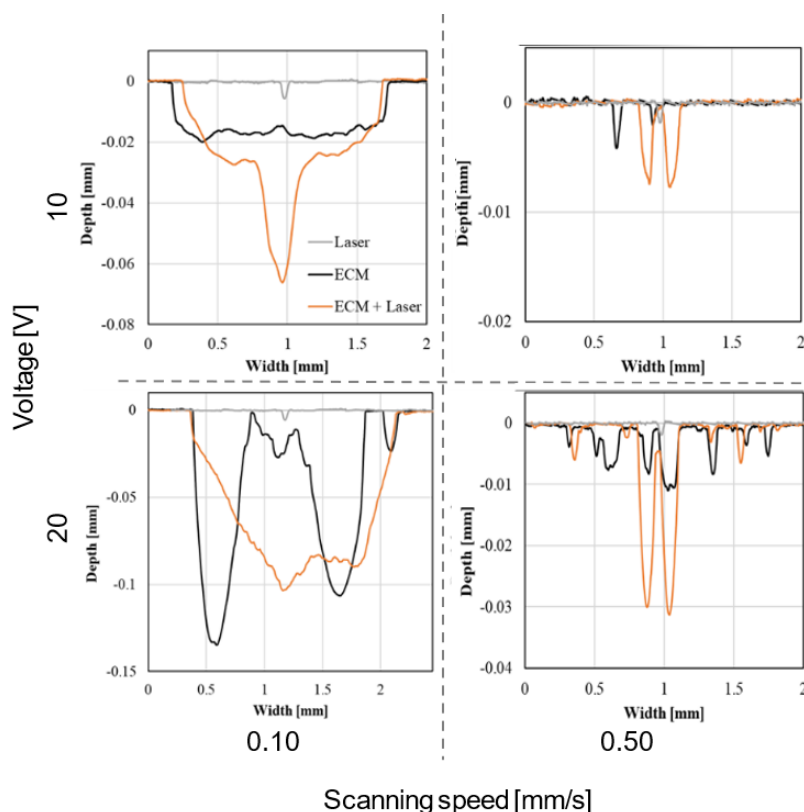


図 7 レーザー電解複合加工による相乗効果

以上より局所的な金属めっき、および難加工材であるチタン合金の加工を高精度・高エネルギーで行える加工技術を開発するため、短パルスレーザーと電解加工の複合加工を考案した結果、付加加工として、電解を液中ナノ秒レーザー照射に複合することで、レーザー照射部で還元力が向上し、銅粒子の析出量が増加し、電解援用短パルスレーザー照射を繰り返し走査して行うことで、マイクロ構造体を創成可能であることが分かった。また、除去加工として、ナノ秒レーザーと走査電解加工を複合することで、不働態被膜を除去しながら、レーザーの照射部で電解加工が集中的に進行し、レーザーと電解加工の複合効果が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Shuhei KODAMA , Reo YABUUCHI , Godai MIYAJI , Wataru NATSU	4. 巻 113
2. 論文標題 Fabrication of nanostructure and deposition of metal particles by femtosecond laser ablation in electrolyte	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Procedia CIRP	6. 最初と最後の頁 439 ~ 444
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.procir.2022.09.197	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 Kodama Shuhei, Natsu Wataru	4. 巻 11
2. 論文標題 Effects of Electrolyte on Laser-Induced Periodic Surface Structures with Picosecond Laser Pulses	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanomaterials	6. 最初と最後の頁 327 ~ 327
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/nano11020327	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 Kodama Shuhei, Natsu Wataru	4. 巻 95
2. 論文標題 Fabrication of multiscale structure by hybrid process with short-pulsed laser and electrochemical machining	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Procedia CIRP	6. 最初と最後の頁 875 ~ 878
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.procir.2020.01.174	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 1件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Shuhei Kodama, Reo Yabuuchi, Wataru Natsu
2. 発表標題 Cu microprecipitation with electrolysis assisted short-pulsed laser irradiation in CuSO4 solution
3. 学会等名 Proceedings of 18th International Symposium on Electrochemical Machining Technology 2022 (INSECT 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Reo Yabuuchi, Shuhei Kodama, Godai Miyaji, Wataru Natsu
2. 発表標題 Local copper precipitation with ultrashort-pulsed laser ablation in copper sulfate solution
3. 学会等名 Proceedings of 19th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shuhei Kodama, Wataru Natsu
2. 発表標題 Effects of electrolytes on fine structures fabricated by hybrid process with short pulsed laser and electrochemical machining
3. 学会等名 Proceedings of 21st International Conference and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shuhei Kodama, Godai Miyaji, Wataru Natsu
2. 発表標題 Effect of electrolyte on ultrashort pulsed laser ablation
3. 学会等名 Proceedings of LPM2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shuhei Kodama, Wataru Natsu
2. 発表標題 Influence of frequency and pulse duration on fabrication of periodic nanostructure by ultrashort-pulsed laser
3. 学会等名 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小玉脩平, 藪内伶旺, 夏恒
2. 発表標題 電解援用ナノ秒レーザーめっきによるマイクロパターニング
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大隈伊吹, 夏恒, 小玉脩平
2. 発表標題 チタン合金の走査電解加工におけるレーザー援用の試み
3. 学会等名 第30回精密工学会学生会員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藪内伶旺, 小玉脩平, 宮地悟代, 夏恒
2. 発表標題 電解液中フェムト秒レーザー照射による微細周期構造の創成と金属粒子の析出
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藪内伶旺, 小玉脩平, 宮地悟代, 夏恒
2. 発表標題 フェムト秒レーザーによる金属粒子析出に対する電解液濃度の影響
3. 学会等名 電気加工学会全国大会(2021)講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 敷内伶旺, 小玉脩平, 宮地悟代, 夏恒
2. 発表標題 硫酸銅水溶液中短パルスレーザー照射による局所的Cu析出
3. 学会等名 第29回精密工学会学生会員卒業研究発表講演会論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小玉脩平, 夏恒
2. 発表標題 液中レーザー照射によるナノ周期構造の創成と金属析出に対するパルス幅の影響
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小玉 脩平, 夏 恒
2. 発表標題 短パルスレーザーによる微細周期構造創成に対する電解液の影響
3. 学会等名 電気加工学会全国大会(2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小玉 脩平, 宮地 悟代, 夏 恒
2. 発表標題 短パルスレーザー電解複合加工におけるパルス幅および電解液の影響
3. 学会等名 2020年度精密工学会 秋季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kodama Shuhei, Natsu Wataru
2. 発表標題 Fabrication of micro/nano structures by hybrid process with short-pulsed laser and machining
3. 学会等名 the International Webinar On Laser Advanced Materials Processing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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

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