

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03807

研究課題名（和文）材料の流動性を考慮したEBポリッシングメカニズムの解明による高能率表面仕上げ

研究課題名（英文）Highly Efficient Surface Smoothing by Clarification of EB Polishing Mechanism with Considering Flow of Material

研究代表者

篠永 東吾（Shinonaga, Togo）

岡山大学・環境生命自然科学学域・助教

研究者番号：60748507

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）：大面積電子ビームを用いたEBポリッシングでは、高エネルギー密度を有する電子ビームをパルス状に繰り返し照射することで、金属材料の極表面を瞬時かつ均一に溶融することができる。本手法により、初期表面粗さが数 μmRz の凹凸形状を有した鉄鋼系金型表面をわずか数分で $1\mu\text{mRz}$ 以下に仕上げることが可能である。ここで、EBポリッシングによる表面平滑化メカニズムについては明らかになっていない。本研究では、凸部への電子集中現象や、溶融金属の流動性を考慮した数値解析手法により、EBポリッシングメカニズムの解明を試みた。また、表面粗さが大きな金属材料に対して、EBポリッシングによる高能率な表面平滑化を試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金属製品は用途に応じて表面仕上げが必要である。これまでの研究で、大面積電子ビーム照射法を用いたEBポリッシングによって、鉄鋼系金型などを高能率に表面平滑化することができることを明らかにしてきた。しかしながら、EBポリッシングメカニズムについては未解明であった。本研究で構築した熱流体解析により、電子ビーム照射による溶融金属の流動や表面形状変化の過程などを見出すことができた。研究成果は、様々な実用材料や加工面に対して、EBポリッシングにより高能率な表面仕上げを実現するために有用であると考えられる。さらに、大面積電子ビーム照射によるフィレット加工など、様々な加工現象の解明にも有効である可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In large-area electron beam (EB) irradiation, metal surface can be melted instantly and uniformly by the EB irradiation with high energy density. Then, metal mold surface with surface roughness of several μmRz can be reduced to less than $1.0\mu\text{mRz}$, and surface finishing of metal molds can be done efficiently by EB polishing. However, mechanism of the EB polishing has not been clarified yet. It is expected that EB is concentrated on small convex parts of metal surface and molten metal is flowed into concave parts. In this study, EB polishing mechanism was clarified by thermo-fluid analysis. EB concentration phenomena on convex parts were also investigated by electro-magnetic field analysis. In addition, highly efficient surface smoothing of metal products with large surface roughness was proposed.

研究分野：特殊加工学

キーワード：大面積電子ビーム EBポリッシング 表面平滑化 表面粗さ 熱流体解析 溶融金属 表面張力 微細凹凸形状

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

金属製品の表面は用途に応じて表面仕上げが必要となる。現在の製造業において大量生産に欠かせないツールである射出成形金型等においてはその表面粗さを一般的に、 $1\ \mu\text{mRz}$ 程度以下となるよう表面仕上げを行うことが必要である。一方、人工関節などに広く用いられているチタン合金製インプラントにおいても、表面仕上げが必要とされている。一般的に、これらの金属製品は手磨きによる表面仕上げが行われているが、熟練者の高度な技術や長時間を要することから、その高能率化が従来からの課題になっている。

金属の高能率表面仕上げ法として、大面積電子ビームを用いた EB ポリッシング法が有効な手法として挙げられる。EB ポリッシングでは高エネルギー密度を有する電子ビームをパルス状に繰り返し照射することで、初期表面粗さが数 μmRz の凹凸形状を有した曲面および半球面形状の鉄鋼系金型表面を、わずか 2 分で有効直径 60 mm の大面積を一括して $1\ \mu\text{mRz}$ 以下に仕上げることが可能である。

ここで、EB ポリッシングによる表面平滑化メカニズムについては明らかになっていない。これまでの研究により、凸形状を有した工作物に電子ビームを照射すると、凸部先端が丸みを帯びる現象が明らかになった、また、電子ビーム照射による再凝固層の観察より、熔融金属が凸部から凹部へ流動する可能性があることを見出していた。すなわち、凸部への電子集中現象や、熔融金属の流動現象を解明することで、EB ポリッシングメカニズムが解明できると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、熔融金属の流動性を考慮した数値解析手法により、EB ポリッシングメカニズムを解明することを目的とする。凹凸形状を有する金属材料表面に大面積電子ビームを照射すると、**図 1** に示すように『凸部先端への電子ビーム集中、および熱拡散のしにくさによる凸部の優先的溶融・除去』、『熔融金属の凹部への流動・再凝固』が生じると予想される。

電子ビーム照射による凸部への電子集中現象を解明するため、電磁場解析を行った。また、電子ビーム照射による熔融金属の流動現象を明らかにするため熱流体解析を試みた。さらに、熱流体解析により、熔融金属を流動させる駆動力の解明を試みた。

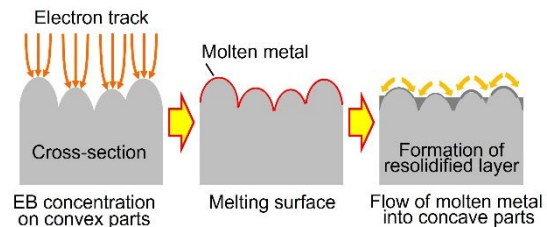


図 1 予想される EB ポリッシングメカニズム

3. 研究の方法

3 - 1. 凸部への電子集中現象の解明

凸部への電子集中現象を解明するため、大面積電子ビーム照射装置を再現した電磁場解析モデルを構築した(**図 2**)。電子ビーム照射装置チャンバー内の一断面をモデルとし、実際の電子ビーム照射装置と同様、モデル内にカソード、アノードおよびソレノイドコイルを設置した。また、工作物としては先端に角度を有する凸形状および平坦形状を設置した。

工作物表面に照射される電子ビームの電子速度および電子密度を算出することで、凸部への電子集中現象の解明を試みた。

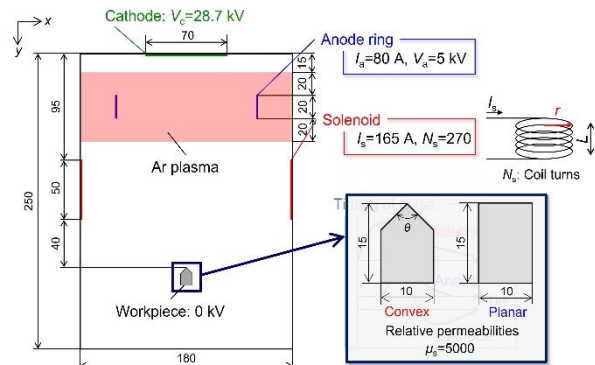


図 2 電磁場解析モデル

3 - 2. 熔融金属の流動・再凝固現象の解明

EB ポリッシングメカニズムを解明するため、電子ビームチャンバ内の圧力、金属材料の物性値などを考慮した熱流体解析モデルを構築した。本解析では、明確な自由表面を持つ液体として熔融金属が流動する様子を追跡することができる VOF (Volume-of-Fluid) 法を用いた。

図 3 に示すように、表面に微細凹凸形状 (凹凸平均間隔: 約 $88\ \mu\text{m}$, 表面粗さ: 約 $13\ \mu\text{mRz}$) の左右対称性を考慮し、形状の 1 周期分を表面形状とした工作物をモデル内に設定した。また、工作物はチタン合金 (Ti-6Al-4V) を想定し、熱物性値、粘度、表面張力などの各物性値について温度依存性を考慮して設定した。工作物上方よりカソードの電圧波形を考慮したパルス幅を有する電子ビームの熱流束を与えた。構築した熱流体解析モデルを用い、電子ビームを 1 shot 照射した際の熔融金属が流動する過程およびその駆動力などについて調べた。

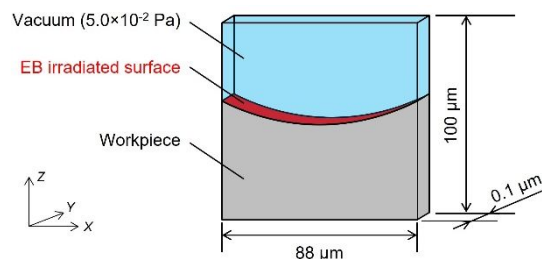


図 3 熱流体解析モデル

3 - 3 . EB ポリッシングによる金属の高エネルギー表面平滑化

EB ポリッシングによる金属の高エネルギー表面平滑化を実験的に試みた。チタン合金 (Ti-6Al-4V) の表面にボールエンドミルにより切削溝を複数本形成し、微細凹凸形状 (凹凸平均間隔: 約 88 μm , 表面粗さ: 約 13 μmRz) を作成した (図 4)。

次に、試料上方より大面積電子ビーム照射を行った。電子ビーム照射装置の模式図を図 5 に示す。電子ビーム照射時のエネルギー密度は低エネルギー密度 4.0 J/cm^2 および高エネルギー密度 10.0 J/cm^2 と設定し、照射回数は 1 ~ 30 shots へと変化させた。

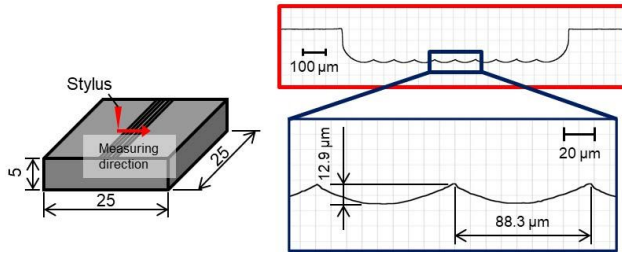


図 4 微細凹凸形状の断面プロファイル

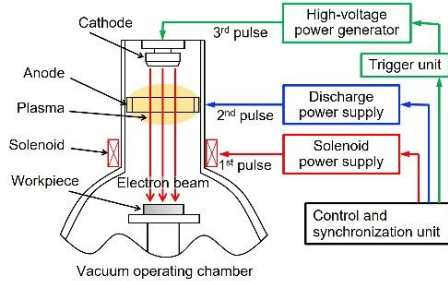


図 5 大面積電子ビーム照射装置概略図

4 . 研究成果

4 - 1 . 凸部への電子集中現象の解明

図 6 に、大面積電子ビーム照射装置を再現した電磁場解析モデルにより、先端角 90° の工作物において工作物近傍の電場ベクトルを算出した結果を示す。図より、平坦形状と比較して凸部先端において電場ベクトルが集中していることが分かる。本結果は、電子ビームが凸部先端へ集中して照射される可能性を示唆している。次に、電子ビーム照射が試料に照射される際の電子線密度および速度より、相対エネルギー密度を算出した結果を図 7 に示す。図より、電子のエネルギー密度は工作物の形状に沿った分布になっており、凸形状において、平坦形状と比較して凸部先端におけるエネルギー密度が増大していることがわかる。また、 $\theta = 60, 90, 120^\circ$ を比較すると、先端角が大きいほど全体的にエネルギー密度は増加している。本現象は、先端角が大きいほど電子速度が増大するためであることを確認している。すなわち、凸部への電子集中に伴い、凸形状先端部では大きなエネルギー密度で照射されることがわかった。

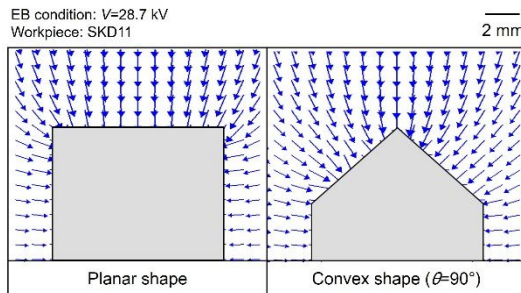


図 6 電場ベクトル分布

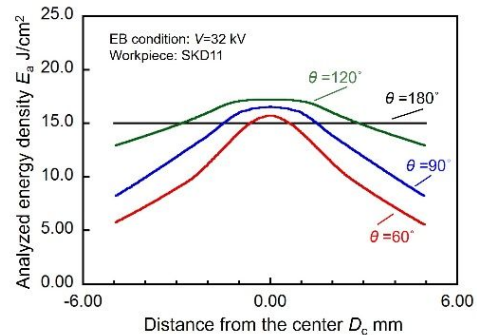


図 7 相対エネルギー密度分布

4 - 2 . 溶融金属の流動・再凝固現象の解明

微細凹凸形状 (凹凸平均間隔: 約 88 μm , 表面粗さ: 約 13 μmRz) に対して電子ビームを照射した後の断面観察画像、および熱流体解析により形状変化が定常状態となった時の溶融層分布を図 8 に示す。溶融層分布では、赤色の領域が電子ビーム照射により溶融した領域を維持して示した溶融領域、青色の領域が固相を示している。また、実験および解析で得られた表面形状を定量的に比較するため、それぞれの断面形状プロファイルを測定した結果を図 9 に示す。電子ビーム 1 shot 照射後の表面形状および再凝固層厚さ分布が解析と実験でほぼ一致している。本結果は、構築した熱流体解析モデルが高精度であることを示唆している。

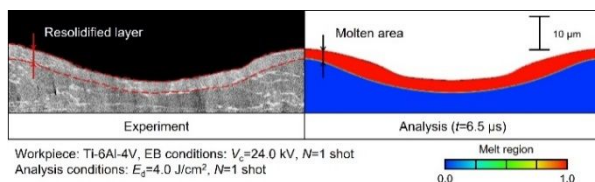


図 8 断面形状および溶融層分布の比較

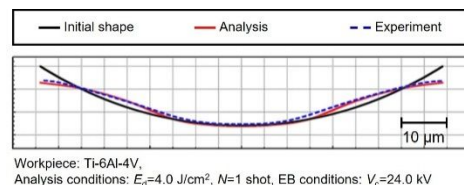


図 9 実験および解析による断面形状プロファイルの比較

また、電子ビームを照射した際の時間経過とともに表面形状変化を詳細に議論するため、時間経過に伴う液相率分布および流速分布を図 10 に示す。液相率分布については赤色が液相、青色が固相を示している。また、流速分布については暖色ほど流速が大きいことを示している。時刻 1.0 μs の時、電子ビームの入熱により表面全体が溶融し、凸部近傍で溶融領域厚さが増大しており、溶融金属が凸部から凹部方向へと流動していることが分かる。電子ビームのパルス幅である 2.0 μs まで溶融領域が増大し、入熱が終了した時刻 2.0 μs 以降、徐々に溶融金属が再凝固していき、時刻 6.5 μs において凹凸形状の斜面にて溶融金属が再凝固している。よって、電子ビームを 1 shot 照射した際の、微細凹凸形状表面の溶融、溶融金属の流動により表面形状が変化する過程が明らかになった。

次に EB ポリッシングにおいて溶融金属が流動する駆動力を明らかにするため、表面張力および重力、表面張力のみ、重力のみを考慮した熱流体解析を行った。図 11 に表面張力および重力、表面張力のみ、重力のみを考慮した際の溶融層分布を示す。重力のみを考慮した場合、表面形状は初期形状からほとんど変化していないことが分かる。一方で、表面張力のみを考慮した場合、表面形状は大きく変化し、重力および表面張力を考慮した場合と同様であることが分かる。すなわち、EB ポリッシングでは、表面張力が溶融金属の流動に大きく影響することが示された。

4 - 3 . EB ポリッシングによる金属の高エネルギー表面平滑化

チタン合金 (Ti-6Al-4V) の表面にボールエンドミルにより作製した微細凹凸形状 (凹凸平均間隔: 約 88 μm , 表面粗さ: 約 13 μmRz) に対して、試料上方より大面積電子ビーム照射を行った。図 12 にエネルギー密度 4.0 J/cm^2 で照射した際の照射回数ごとの断面形状プロファイル測定した結果を示す。図より、凸部において、照射回数の増加に伴い凸部が丸みを帯びており、凸部の位置が下降している。一方、凹部では、照射回数 1 shot では初期形状からほとんど変化していないが、照射回数の増加に伴い、凹部の位置が上昇していることが確認できる。さらに、照射回数 30 shots まで増加すると平坦な形状が得られていることが分かる。

図 13 に照射回数およびエネルギー密度による表面粗さおよび凹凸平均間隔の変化を示す。エネルギー密度 4.0 J/cm^2 で照射した場合、30 shots 照射時に表面粗さが 1 μmRz 程度まで低減することができている。エネルギー密度 10.0 J/cm^2 で電子ビームを照射すると、照射回数わずか 10 shots 程度で表面粗さを 1 μmRz 程度まで低減することができている。一方で、凹凸平均間隔についてはエネルギー密度の大小に関わらず照射回数を変化しても初期形状からほとんど変化しないことが分かる。すなわち、EB ポリッシングによって、初期形状の凹凸平均間隔を維持したまま高エネルギーな表面平滑化が可能であることが示された。

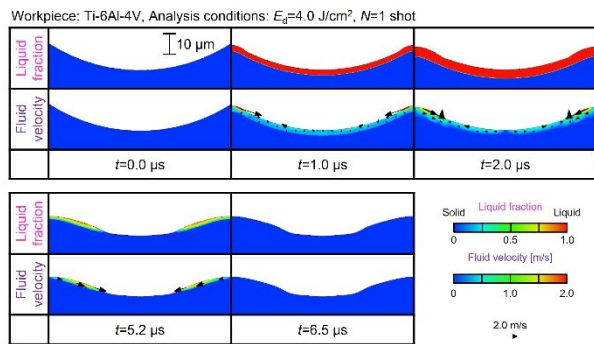


図 10 電子ビームを照射した際の液相率および流速分布の継時変化

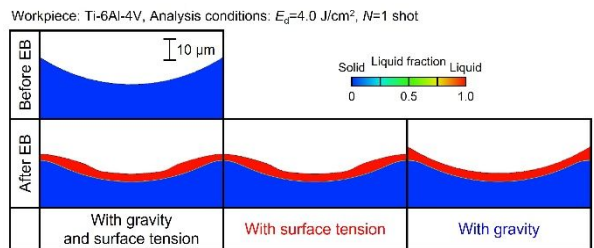


図 11 重力のみまたは表面張力のみを考慮した場合の溶融層分布

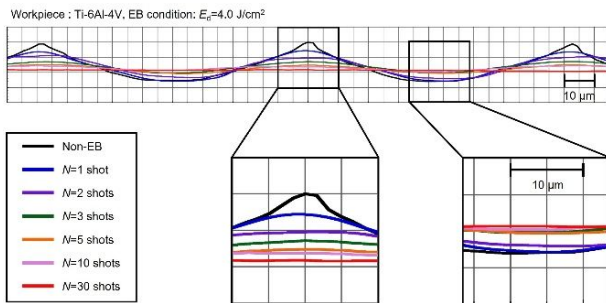


図 12 照射回数による表面形状変化

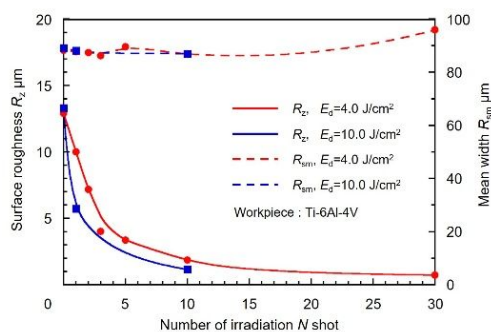


図 13 照射回数およびエネルギー密度による表面粗さ変化

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 1件）

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Hiroya KOBAYASHI, Togo SHINONAGA, Toshiya TSUJI, Akira OKADA | 4. 巻 113 |
| 2. 論文標題 Synergy Effect of Abrasive Blasting and Large-area EB Irradiation on Surface Finishing of AMed Titanium Alloy | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Procedia CIRP | 6. 最初と最後の頁 318 ~ 322 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.procir.2022.09.109 | 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 Togo SHINONAGA, Jiayu LU, Motohiro INOUE, Akira OKADA | 4. 巻 113 |
| 2. 論文標題 Study on Smoothing of Hole Wall Surface by Electron Beam Polishing under Control of Magnetic Field | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Procedia CIRP | 6. 最初と最後の頁 536 ~ 540 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.procir.2022.09.184 | 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 Togo Shinonaga, Jiayu Lu, Mitsuhiro Kimura, Motohiro Inoue, Akira Okada | 4. 巻 119 |
| 2. 論文標題 Bottom surface smoothing of high aspect ratio hole by guiding large-area electron beam with magnet | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology | 6. 最初と最後の頁 4979 ~ 4990 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-021-08380-w | 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 Togo Shinonaga, Hiroya Kobayashi, Akira Okada, Toshiya Tsuji | 4. 巻 127 |
| 2. 論文標題 Surface smoothing of additively manufactured Ti-6Al-4V alloy by combination of grit blasting and large-area electron beam irradiation | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology | 6. 最初と最後の頁 5127 ~ 5137 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-023-11857-5 | 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8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 田島響, 篠永東吾, 岡本康寛, 岡田晃 |
| 2. 発表標題 熱流体解析による大面積電子ビーム照射におけるエッジ部形状変化メカニズムの解明 |
| 3. 学会等名 日本機械学会第14回生産加工・工作機械部門講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 小林裕野, 篠永東吾, 三浦誠也, 岡田晃, 辻俊哉 |
| 2. 発表標題 熱流体解析による凹凸平均間隔がEBポリッシング効果に及ぼす影響の解明 |
| 3. 学会等名 電気加工学会全国大会（2022） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hibiki Tajima, Togo Shinonaga, Akira Okada |
| 2. 発表標題 Investigation on Mechanism of Edge Shape Change in Large-area Electron Beam Irradiation by Thermo-fluid Analysis |
| 3. 学会等名 2022 International Conference on Machining, Materials and Mechanical Technologies (2022 IC3MT) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Jiayu LU, Togo SHINONAGA, Motohiro INOUE, Akira OKADA |
| 2. 発表標題 Fundamental Study on Side Surface Smoothing of Hole by Large-area EB Irradiation Method |
| 3. 学会等名 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shun WATANABE, Togo SHINONAGA, Atsushi YAMAGUCHI, Akira OKADA |
| 2. 発表標題 Surface Smoothing and Surface Modification of Maraging Steel by Large-area EB Irradiation |
| 3. 学会等名 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 太田翔也, 酒井翼, 篠永東吾, 岡本康寛, 岡田晃 |
| 2. 発表標題 熱流体解析によるEBポリッシングメカニズムの解明 |
| 3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 篠永東吾, 松田悠生, 岡田晃 |
| 2. 発表標題 大面積電子ビーム照射による金属AM造形物のめっき皮膜欠陥抑制 |
| 3. 学会等名 電気加工学会全国大会 (2023) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 篠永東吾 |
| 2. 発表標題 大面積電子ビーム照射による表面平滑化技術について |
| 3. 学会等名 砥粒加工学会 次世代固定砥粒加工プロセス専門委員会 第114回研究会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2024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 分担 者 | 岡本 康寛 (Okamoto Yasuhiro) (40304331) | 岡山大学・環境生命自然科学学域・准教授 (15301) | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|