

令和元年5月23日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04248

研究課題名(和文) 大面積パルス電子ビーム表面仕上げ法の高性能化に関する研究

研究課題名(英文) Study on High-performance Surface Finishing by Large-area Electron Beam Irradiation

研究代表者

岡田 晃 (Okada, Akira)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：60263612

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)：大面積パルス電子ビーム照射により金型の高能率表面仕上げの高性能化を目的とし、まず、電磁場解析および熱伝導解析による凸部形状変化現象を解明した。そして、その現象を利用した微細バリ取りを検討し、放電加工やレーザ加工によって生じる熱加工ばりを効率的に除去できることを明らかにした。また、磁場制御による電子ビーム軌跡変化についても検討を行い、それを利用して穴底面の平滑化に取り組んだ。その結果、適切に磁場を制御することで穴底面の平滑化にも成功した。さらに、工作物の磁性や熱物性値が表面平滑化へ及ぼす影響についても検討を加えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大面積電子ビーム表面仕上げ技術は、すでに単純形状の金型や金属部品の表面仕上げに一部実用されており、高能率表面仕上げ技術としての応用拡大が期待される。しかし、複雑形状や深穴底面の一括仕上げはこれまで困難であり、また、鉄鋼材料以外の表面平滑化特性は不明であった。本研究遂行によって、凸部へのビーム集中現象、磁場によるビーム制御の可能性、材料特性による表面平滑化特性の違いが解明されたことで本加工法の高性能化が実現できた。特に微細バリ取りや穴底仕上げの実用技術が確立できたことは、本加工法の応用拡大による金型や部品製造全体の高能率化・低コスト化に貢献できるものである。

研究成果の概要(英文)：For high-performance surface finishing of metal molds by large-area electron beam irradiation method, the shape-changing phenomena were firstly discussed experimentally and analytically by using electron track analysis with electro-magnetic field simulation model and heat conduction analysis. Then, the applicability of this method to micro-burring were investigated, and it was clarified that high-efficient removal of micro-burr generated in thermal processing was possible by large-area EB irradiation method. Furthermore, control of electron beam track by changing magnetic field in the operating chamber was discussed, and the finishing of hole bottom surface was tried. As a result, the bottom surface could be successively finished under appropriate magnetic field and EB conditions. In addition, the influence of workpiece material properties on the surface smoothing characteristics were experimentally and analytically discussed for wide application of this method.

研究分野：機械工学

キーワード：電子ビーム 金型 表面仕上げ 熱伝導解析 穴底面

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大量生産を可能とする金型の製作において、複雑形状の金型の場合最終的な表面磨き作業は一般に手作業によって行われる。この手磨き仕上げは熟練者の技能に頼るところが多く、またかなりの長時間を要することから、その高能率が従来からの課題となっている。近年、大面積電子ビーム照射による新たな金型表面の仕上げ法を提案され、一部実用化されている。

しかしながら、電子ビーム照射の際には凸部への電子集中および熱の拡散のし難さに起因し、凸部形状が丸みを帯びて形状精度の悪化を招く。また、表面形状に比較的高低差のある複雑形状や深穴底面では底面部への電子ビーム照射が不十分となり、その表面の平滑化は困難である。さらに、工作物材質の熱物性値や磁性などが表面平滑化に及ぼす影響についても不明である。本加工法の応用拡大によって、金型や部品製造全体の高能率化・低コスト化に貢献するためには、これらの課題を解決し、本仕上げ法の高性能化を図る必要がある。

2. 研究の目的

上述の技術的課題を解決し、大面積パルス電子ビーム照射による金型の高能率表面仕上げを確立することを目的とし、電磁場・電子軌道解析と熱伝導解析による凸部形状変化現象の解明、電子ビーム軌跡制御と形状精度維持のための照射法の検討、低部・凹部の表面仕上げの実現、および、大面積電子ビーム照射によるエッジ処理への応用、工作物物性が表面平滑化特性に及ぼす影響についても検討を行った。

3. 研究の方法

電子ビーム照射実験は図1に示す大面積電子ビーム照射装置を用いて行った。従来のビームを細く絞って高いエネルギー密度を得る方式とは異なり、パルス状にマイクロ秒オーダの短時間で電子を放出する方式によりビームを絞ることなく均一な高いエネルギー密度を得ることができる。このため直径60mmの電子ビーム照射により材料表面を均一に加熱することができる。

一方で解析的検討も行った。大面積電子ビーム照射を再現した電磁場解析モデルを構築し、電子軌道解析による工作物凹凸表面上での電子ビームのエネルギー密度分布などを求めた。加工室の断面を180×250mmとして作成し、チャンパー内は真空としている。また、ソレノイドに電流値およびコイル巻き数を設定し、カソード、アノードにそれぞれ電位を与えている。さらにソレノイド、アノード、カソードへの電圧の印加タイミングは実際と同様に設定した。また、電子侵入現象や工作物材料の潜熱を考慮した非定常熱伝導解析モデルを構築し、工作物表面温度分布の時間変化を算出し、工作物表面の除去厚さや再凝固層厚さ、表面形状変化を検討した。

4. 研究成果

(1) 電磁場・電子軌道解析と熱伝導解析による凸部形状変化現象の解明

まず、電磁場解析モデルによって電子ビーム照射時の装置内の電磁場、ならびに電子の軌道を解析した。電子ビーム径の測定実験によって得られた照射距離による大面積電子ビーム径の変化は、図2に示すように、電子軌道解析結果と定量的に一致し、構築した電子軌道解析モデルの妥当性が示された。

次に、電子軌道解析によって得られる凸先端形状を有する工作物表面へ到達する電子の位置と速度から算出したエネルギー密度分布を図3に示す。黒線が平坦面、赤線が60°、青線が90°、緑の線が120°を示す。どの角度形状においてもエネルギー密度は先端で増大し、両端部で減少している。またその傾向は先端角度が鋭いほど顕著になっている。

これらのエネルギー密度分布を用い、さらに電子ビーム侵入深さや材料の潜熱を考慮した熱伝

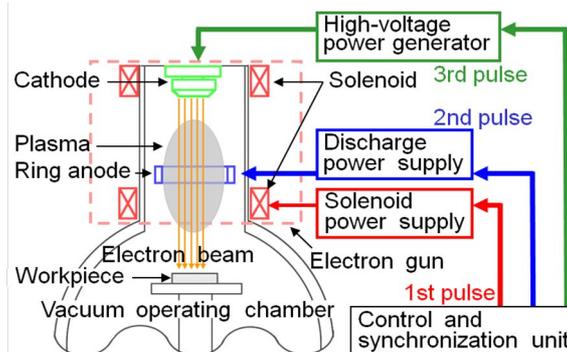


図1 大面積電子ビーム照射装置

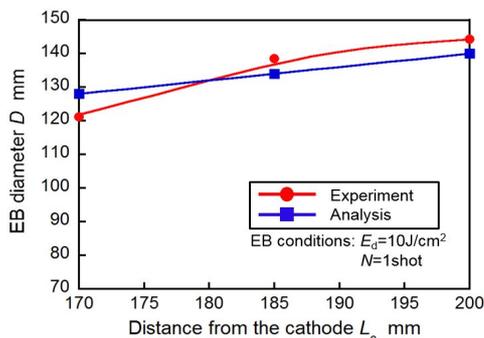


図2 大面積電子ビーム径変化

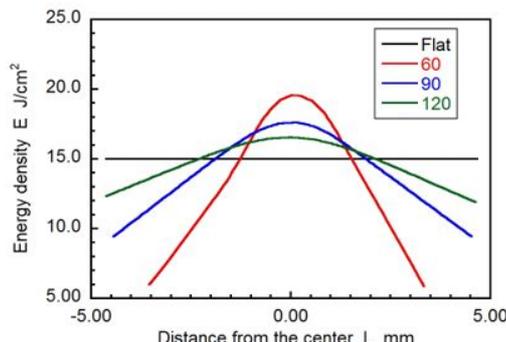


図3 凸先端形状到達電子のエネルギー密度分布

導解析により図4に示すように、照射終了時の凸形状表面の温度分布を電子ビーム照射ごとに算出し、材料の沸点以上となる領域を削除することで電子ビーム照射ごとの凸形状先端形状の変化を予測した。解析された形状と同条件での実際の断面形状の先端半径の変化を図5に示す。図より明らかなように、電子軌道解析と非定常熱伝導解析によって大面積電子ビーム照射の際の形状変化を高精度に予測できることが明らかとなった。また、これにより形状変化が先端への電子集中と先端での熱拡散のし難さに起因するものであることが判明した。

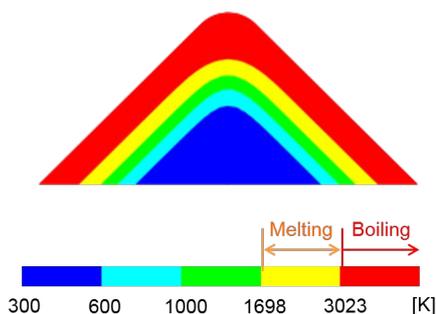


図4 凸先端形状温度分布

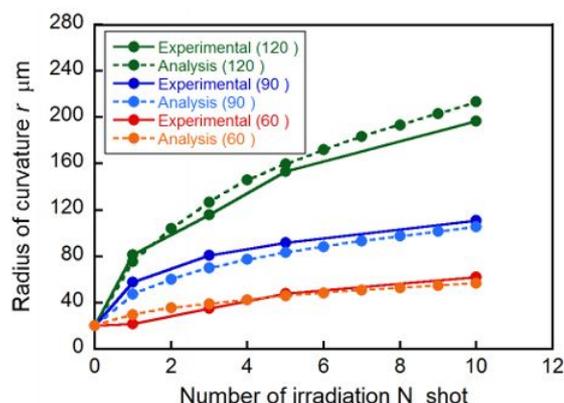


図5 凸先端形状半径の変化

(2) 電子ビーム軌道制御と形状精度維持の可能性

大面積電子ビーム照射法では、電子銃カソード直下にアルゴンプラズマを発生させる際に磁場を発生させているが、その際電子銃カソードから工作物方向に向かって鉛直方向に磁力線が生じる。電子はこの磁力線に対して螺旋運動を行いながら磁力線にそって進行する性質があるため、この磁場を制御できれば電子ビームを所望の位置に集中できる可能性がある。

まず、磁場による電子ビーム軌道制御の可能性を探るため、工作物下部に磁石を設置し、その位置を変化させた場合の電子ビーム照射位置の追従を調査した。図6に非磁性の底付き穴を有した工作物の直下に磁石を設置した場合の電磁場解析によって得られた磁力線分布を示す。図より工作物直下の磁石の位置によって磁力線分布は変化することが分かる。従って、実際の電子ビーム照射において磁石の設置位置を変化させることでビームを所望の位置に誘導、制御できる可能性がある。

また、図7は電子ビームが照射されにくい高アスペクト比穴底面に対し、工作物直下に磁石を設置しない場合と設置した場合の底面の平滑化の様子を示す。磁石を設置しない場合には穴入口のエッジや側面上部に電子ビームが集中し、穴底面では十分な照射が行われず、表面が溶融した様子はあまり見られない。これに対し工作物下部に磁石を設置した場合には、穴底面部へ電子ビームが誘導されることで穴対面に高いエネルギー密度の電子ビームが照射され、表面溶融が十分に行われていることがわかる。以上のことから、工作物下部への磁石の設置によって電子ビームを誘導できる可能性が示された。

(3) 低部・凹部の表面仕上げの実現

電子ビームの磁場による誘導の基礎検討結果を基に、これまで不可能であった磁場制御による深穴底面仕上げの可能性について検討を行った。図8は直径10mm、穴深さ50mmの高アスペクト比の底付き穴を有する工作物の下部に、縦横30mm、高さ10mmのネオジウム磁石を設置し、穴底面中心から磁石中心までの磁石の設置距離 δ_m を0-15mmへと変化させて電子ビームを照射した後の光学写真である。図より、磁石を穴底面直下に設置した $\delta_m=0$ mmの場合、穴底面中心部で光沢を有する平滑化領域が得られているが、穴底面端部は光沢のない表面であることがわかる。一方で、 δ_m を増加させるにつれて、光沢を有した平滑化領域が穴底面端部へ移動していることが分かる。しかしながら、 $\delta_m=15$ mmの場

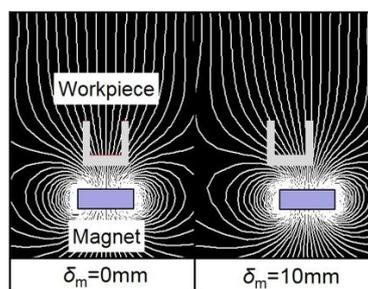


図6 磁力線分布

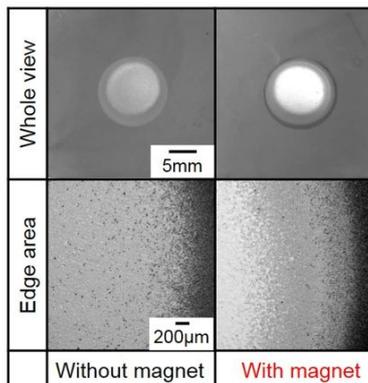


図7 底面平滑化の違い

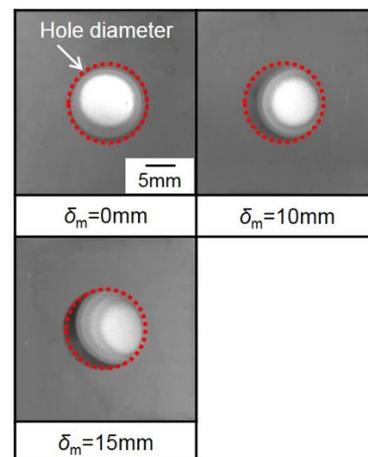


図8 磁石位置による平滑化の違い

合、 $\delta_m=10\text{mm}$ と比較して穴底面端部の光沢度は低下しているように見える。本理由は、磁石の設置領域が穴底面中心から大きく移動したことにより、穴壁面に照射される電子ビームが増加してしまい、穴底面端部へ誘導される電子ビームが減少したことを示唆している。すなわち、適切な磁石の設置位置とすることによって表面平滑領域の制御が可能であることを見出した。

そこで、高アスペクト比穴底面全面仕上げを実現するため、図9のように電子ビームを一定回数照射するごとに磁石の設置位置を移動させる、多ステップ照射法を考案した。図10に直径10mm、穴深さ50mmの高アスペクト比穴底面に対して、多ステップ照射法を行った後の穴底面端部の表面粗さを測定した結果を示す。図より、穴底面直下に設置した $\delta_m=0\text{mm}$ の場合と比較して、多ステップ照射法を用いることで、穴底面中心から約4.8mmまでの領域で表面粗さが $1.5\mu\text{m}$ 以下の平滑化領域が得られることが明らかになった。以上のことから、磁石の設置位置を適切に移動させながら電子ビーム照射を行うことで、高アスペクト比穴底面の表面平滑化が可能となった。

(4) 大面積電子ビーム照射によるエッジ処理への応用

凸部優先材料除去を積極的に利用した高能率な微細バリ取りの可能性を検討するため、切削バリや熱加工バリ形状が電子ビーム照射によりどのように変化するかを検討した。図11に、切削ロールオーバーバリに対して、大面積電子ビームを照射した結果を示す。図より、電子ビーム照射によって切削ロールオーバーバリが溶融。除去される様子が観察され、エネルギー密度の増加によりバリ高さが低減していることがわかる。切削ロールオーバーバリのような連続したバリにおいては電子の集中効果がさほど大きくないため、バリの完全除去は難しいが、ある程度の低減は可能であることが分かった。

大面積電子ビーム照射による切削ロールオーバーバリの形状変化について詳細に議論するため、非定常熱伝導解析により照射回数ごとのバリ高さ変化を算出した。図12に実験および解析により得られた照射回数によるバリ高さ変化を比較した結果を示す。照射回数によるバリ高さの減少傾向およびその値は、実験値と解析値で定量的に一致しており、照射回数によるバリ形状変化を予測することができた。

一方で、放電加工やレーザー加工で生じる数十ミクロンの高さを有する断続的な熱加工微細バリに対しては、大面積電子ビーム照射により微細バリの完全除去が可能であると考えられる。図13に放電加工およびレーザー加工で形成された熱加工微細バリに対して、大面積電子ビームを照射した結果を示す。図より、適切な照射条件で大面積電子ビームを照射することで、工作物の表面平滑化と同時に熱加工微細バリの完全除去が可能であることがわかった。

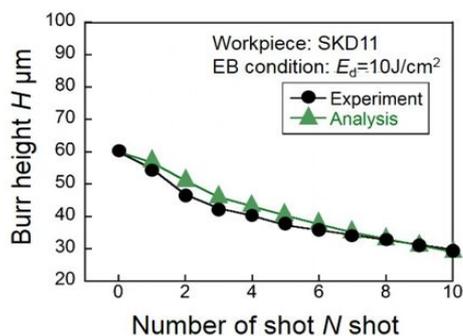


図12 バリ高さと電子ビーム照射回数の関係

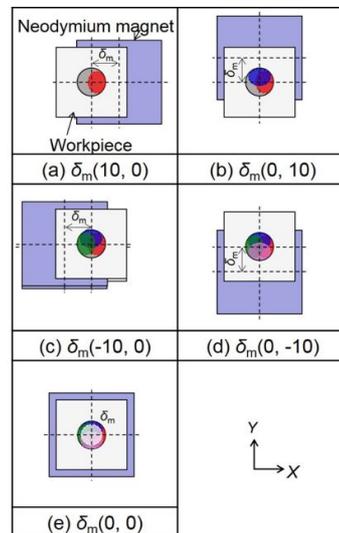


図9 多ステップ照射法

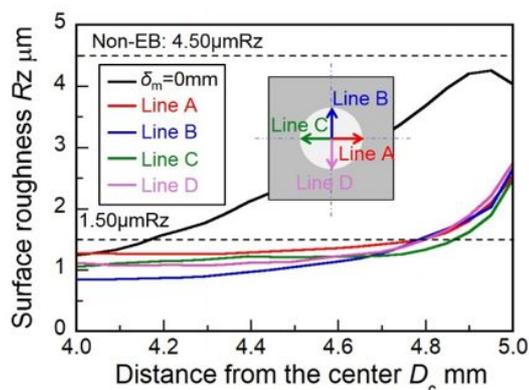


図10 穴底面全面の平滑化

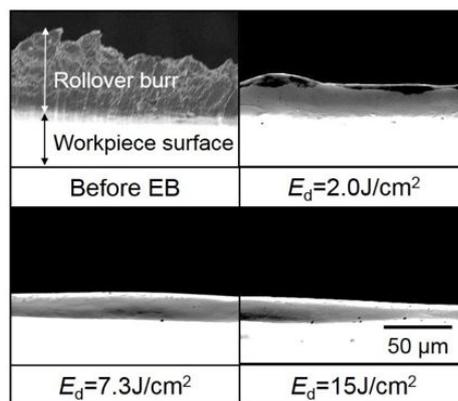


図11 ロールオーバーバリ高さの低減

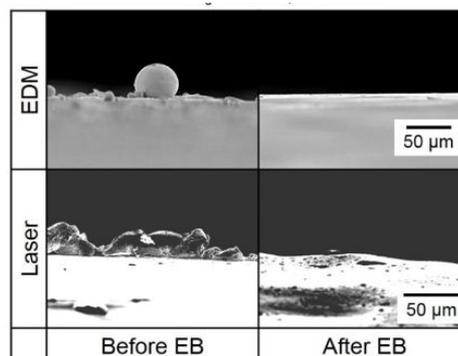


図13 熱加工微細バリの完全除去

(5) 工作物物性が表面平滑化特性に及ぼす影響

最後に本仕上げ加工法の応用拡大を目的とし、鉄鋼系材料以外の材料に対する平滑化特性を解明するため、工作物の熱物性値や磁性が電子ビーム照射時の工作物表面温度分布推移や再凝固層形成に及ぼす影響について非定常熱伝導解析により検討した。

はじめに、電子軌道解析により磁性の異なる材料に対して材料表面に照射される電子ビームの相対電子線密度および速度を求め、比透磁率が5000のSKD11に対する相対エネルギー密度を算出した。図14に磁性の異なる工作物に照射される相対エネルギー密度の変化を示す。図より、比透磁率が5000のSKD11の方が、比透磁率1のSUS304と比較して、工作物に照射される実質的なエネルギー密度が大きいことがわかる。本理由は、(2)で明らかにしたように、磁性を有する材料への電子集中現象が起因していると考えられる。

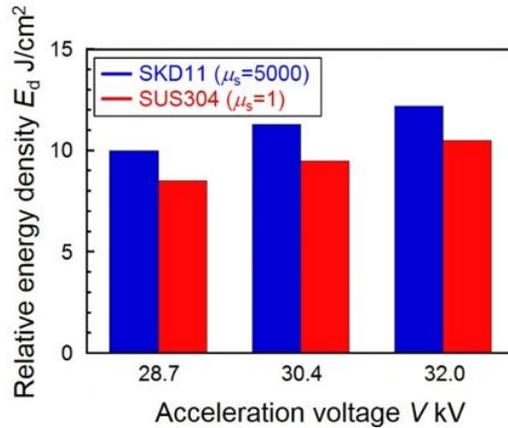


図14 工作物の磁性の有無による照射相対エネルギー密度の違い

次に、非定常熱伝導解析により、材料の磁性が除去および再凝固厚さに及ぼす影響を調べた。図15に、平坦形状を有したSKD11に対して、大面積電子ビームを照射した際の温度分布推移を示す。図より、時刻0.5 μ sにおいて赤色で示す沸点以上の領域が最大となり、この厚さを工作物の除去厚さとして定義した。次に、時刻3.0 μ sにおいて黄色で示す融点以上、沸点未満の領域が最大となり、この厚さから除去厚さを引いた値を再凝固層厚さとして定義した。

図16に実験および解析で得られた磁性の異なる材料における除去および再凝固層厚さの変化を示す。図より、各工作物において、加速電圧による除去および再凝固層厚さの増加傾向は概ね一致していることがわかる。以上の結果より、磁性が異なる工作物に対する、表面材料除去や再凝固層厚さを高精度に予測できることを示した。

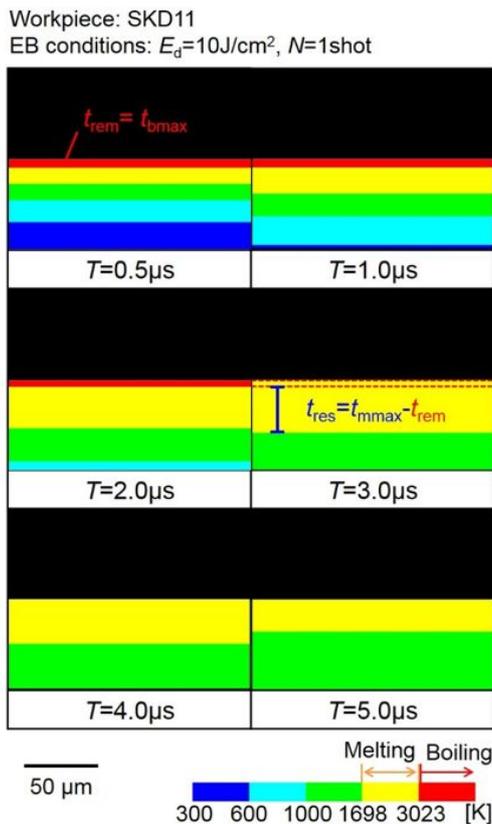
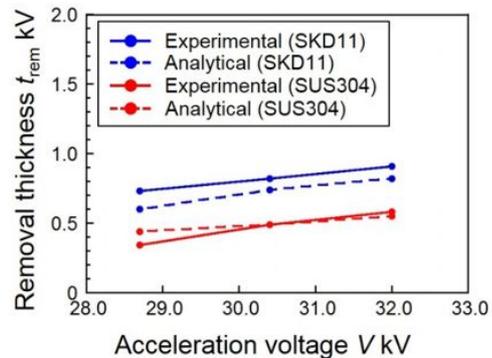
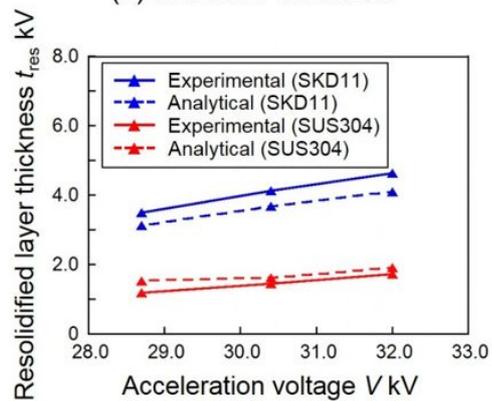


図15 工作物表面温度分布の時間的推移



(a) Removal thickness



(b) Resolidified layer thickness

図16 除去厚さおよび再凝固層厚さの変化

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

Togo Shinonaga, Tsubasa Sakai, Yasuaki Kimura, Akira Okada, Study on Variation of Burr Height in Micro-deburring with Large-area Electron Beam, International Journal of Electrical Machining, 査読有, Vol. 23, 2018, 45-50.

Yasuaki Kimura, Togo Shinonaga, Akira Okada, Study on Clarification of Large-Area EB Irradiation Phenomenon by Electron Track Analysis, Key Engineering Materials, 査読有, Vol.749, 2017, 118-123, DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.749.118>

Togo Shinonaga, Akira Okada, Tomoaki Miyoshi, Prediction of rounding phenomenon at corner tips in large-area electron beam irradiation, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 査読有, Vol.110, 2016, 18-26, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.08.002>

[学会発表] (計 11 件)

篠永東吾, ジルコニアの大面積電子ビーム照射における温度場が耐摩耗性に及ぼす影響, 2019 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2019.

篠永東吾, 大面積電子ビーム照射法を用いた金属 AM 造形物の表面欠陥修復, 電気加工学会全国大会 (2018), 2018.

篠永東吾, 大面積電子ビーム照射によるジルコニアの耐摩耗性向上, 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2018.

酒井 翼, 大面積電子ビーム照射における工作物表面温度分布の解明, 日本機械学会中国四国支部第 56 期総会・講演会, 2018.

Togo Shinonaga, Influence of Material Property on Thickness of Modified Layer Generated by Large-area Electron Beam, 19th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, 2018.

木村充宏, 大面積電子ビーム照射法におけるビーム誘導による穴底面平滑化の可能性, 電気加工学会全国大会 (2017), 2017.

岡田 晃, 大面積パルス電子ビーム照射による金型の表面仕上げ, 2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2017.

Togo Shinonaga, Expansion of Smoothed Area on Hole Bottom Surface by Setting Magnetic Block in Large-area Electron Beam Irradiation, The 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2017.

木村恭彰, 大面積電子ビーム照射における凸形状変化の数値解析的予測に関する研究, 2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2017.

木村充宏, 大面積電子ビーム照射法における磁場によるビーム制御の基礎的検討, 日本機械学会中国四国支部第 55 期総会・講演会, 2017.

Hao Liu, Fundamental Study on Smoothing of Hole Bottom Surface by Large-area Electron Beam Irradiation, The 2nd International Conference on Machining, Materials and Mechanical Technologies, 2016.

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 岡本 康寛

ローマ字氏名: OKAMOTO, Yasuhiro

所属研究機関名: 岡山大学

部局名: 大学院自然科学研究科

職名: 准教授

研究者番号 (8 桁): 40304331

研究分担者氏名: 篠永 東吾

ローマ字氏名: SHINONAGA, Togo

所属研究機関名: 岡山大学

部局名: 大学院自然科学研究科

職名: 助教授

研究者番号 (8 桁): 60748507

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、研究者個人に帰属されます。