

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13673

研究課題名（和文）磁場制御電子ビーム誘導による三次元金型表面の高効率EBポリッシング

研究課題名（英文）Highly Efficient EB polishing of metal mold with 3D shape by guiding EB under control of magnetic field

研究代表者

篠永 東吾（Shinonaga, Togo）

岡山大学・自然科学研究科・助教

研究者番号：60748507

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：磁場制御電子ビーム誘導による三次元形状金型の表面平滑化を目的とし、EBポリッシングによる高アスペクト比穴底面の表面平滑化を試みた。磁場制御の基礎的検討として磁石を工作物下部に設置し、電磁場解析によって電子ビーム照射時の工作物近傍における磁力線分布を算出した。電子は磁力線に対してらせん運動しながら進む性質があるため、解析で得られた磁力線分布から電子ビームを穴底面に誘導できる可能性を見出した。高アスペクト比穴底面試料に対して磁場制御下で電子ビームを照射した結果、穴底面中心部から端部まで電子ビームを誘導することができ、穴底面全面を均一に平滑化できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大面積電子ビームを用いた表面仕上げ技術（EBポリッシング）は、平坦形状や緩やかな凹凸形状を有する金型や金属部品の表面仕上げに一部実用化されている。しかしながら、高アスペクト比の穴形状などを有する工作物では、穴入口や穴内壁の上部へ電子ビームが集中し穴底面全面の平滑化が困難であった。本研究では、磁場制御による電子ビーム誘導に着目し、はじめに、電磁場解析により電子ビーム照射時の工作物近傍の磁場を算出できることを明らかにした。さらに、磁場制御下でのEBポリッシングにより高アスペクト比穴底面仕上げが可能となった。本研究成果は三次元複雑形状金型の高効率表面仕上げに寄与するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Bottom surface smoothing of high aspect ratio hole by EB polishing was proposed. As a basic study for control of magnetic field, magnet was set under the hole bottom surface, and magnetic field lines near the workpiece in large-area EB irradiation were calculated by electric magnetic field analysis. The magnetic field lines distributions show that the EB can be guided to the hole bottom surface since electrons tend to spirally move along the magnetic field lines. Experimental results clarified that the bottom surface of high aspect ratio hole can be uniformly smoothed by guiding the EB to the surface under control of magnetic field.

研究分野：電子ビーム加工，レーザ加工

キーワード：大面積電子ビーム 金型 表面平滑化 磁場 ビーム誘導 電磁場解析 高アスペクト比 穴底面

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

金型は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り、射出成形金型等においては一般に表面粗さを $1\mu\text{mRz}$ 程度以下にする表面仕上げが必要である。複雑形状を有する金型の表面仕上げは主に手磨きにより行われているが、熟練した技術や長時間を要するため、表面仕上げの高能率化が従来からの課題となっている。

大面積電子ビーム法は、有効直径 60mm の大面積に対して均一な高エネルギー密度を有する電子ビームにより金属材料の極表面を瞬時に溶融することができ、数 μmRz 程度の表面粗さを有する鉄鋼系金型材料に対して高能率に表面仕上げ (EB ポリッシング) が可能である。

しかしながら、高アスペクト比の底付き穴などを有する三次元形状金型の場合、電子ビームはその性質上穴の入り口辺縁や凸部に集中し、穴底面に照射される電子ビームのエネルギー密度が減少するため、穴底面全面の表面仕上げが困難となる。ゆえに、三次元形状金型表面に対して大面積電子ビームを所望の位置へ誘導する方策が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、工作物近傍の磁場を制御することで高アスペクト比穴底面へ電子ビームを誘導・集中させ、従来の EB ポリッシングでは実現不可能であった高アスペクト比穴底面仕上げを行うことを目的とする。

大面積電子ビーム照射法では、図 1 のように電子銃の外部に設置されたソレノイドコイルより電子ビーム照射時にカソードから工作物へ磁力線が向かうように磁場を発生させている。工作物が非磁性体材料の場合、ソレノイドコイルから生じた磁力線は工作物近傍で拡散すると予測され、カソードから照射された電子ビームは工作物に達するまで拡散して照射される。ここで、磁性体材料を工作物の下部に設置すると、磁力線が磁性体材料に向かって集中する。電子は磁力線に沿ってらせん運動しながら進む性質があるため、磁性体材料の設置により非磁性体工作物の表面に電子ビームを誘導・集中させることが可能である。すなわち、工作物近傍の磁場を制御できれば、所望の位置へ電子ビームを誘導・集中させることが可能であると考えられる。

本研究では、磁場制御の基礎的検討として、工作物下部へ磁石を設置し、磁石への磁力線集中現象を利用して穴底面へ電子ビームを誘導する方策を試みた。ここで、工作物表面の所望の位置に電子ビームを誘導・集中させるために有効な磁場の状態は明らかになっていない。磁場制御下における電子ビームの誘導・集中現象を解明するため、電磁場解析によって電子ビーム照射時の工作物近傍の磁場を算出した。

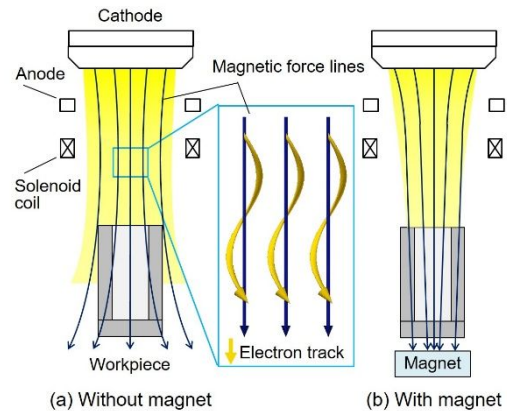


図 1 磁場制御による電子ビーム誘導

3. 研究の方法

(1) 磁場制御による電子ビーム誘導・集中現象の基礎的検討

磁場制御による電子ビーム誘導・集中現象を実験的に明らかにするため、基礎的検討として図 2 に示すように平坦形状を有した非磁性体工作物 (純アルミニウム板: $100\times 100\times 5\text{mm}$) の下部に、 $20\times 20\times 10\text{mm}$ のネオジム磁石を設置し、工作物上方より電子ビームを照射した。

この際、工作物表面から磁石表面までの距離 L_m および磁石の水平方向のオフセット量 δ_m をそれぞれ変化させ、 L_m および δ_m による電子ビームが照射される領域のシフト量 δ_a を調べた。

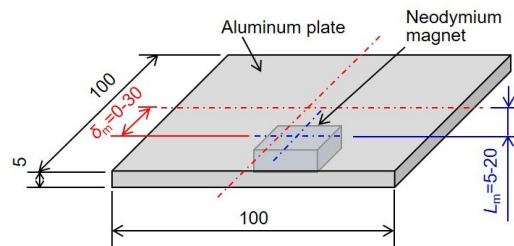


図 2 電子ビーム誘導・集中現象の基礎的検討のための磁石設置概略図

(2) 電磁場解析を用いた電子ビーム誘導・集中現象の解明

磁場制御による穴底面への電子ビーム誘導の可能性を明らかにするため、図 3 に示すよう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を構築した。実際の電子ビーム照射装置と同様、モデル内にソレノイドコイル、非磁性体の鉄鋼系金型材料として底付き穴を有する工作物をモデル内に設置した。さらに、穴底面下部に実測値と同様の磁束密度を有する磁石を設置した。磁石の設置位置としては、穴底面表面から磁石表面までの距離 L_m を一定とし、穴底面中心から磁石中心までの距離 δ_m をそれぞれ変化させた。構築した電磁場解析により工作物近傍の磁力線分布を算出した。

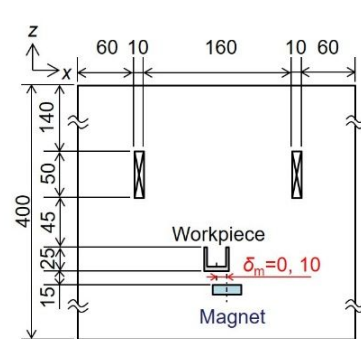


図 3 電磁場解析モデル

(3) 磁場制御下の電子ビーム誘導による高アスペクト穴底面仕上げ

磁場制御による電子ビーム誘導・集中現象を用いた高アスペクト比穴底面仕上げを試みた。穴側面および穴底面試料を組み立て、穴径が10mm、穴深さが50mmの高アスペクト比穴を有する工作物を作成した。穴底面下部にネオジム磁石(30×30×10mm)を設置し、工作物の上方より電子ビームを照射した。この際、磁石の設置位置は電磁場解析結果を元に、穴底面中心から磁石中心までの距離 δ_m を変化させることで、高アスペクト比穴底面における平滑化領域の変化について調べた。

また、磁石の水平方向のオフセット座標を $\Delta_m(x,y)$ と定義し、あるオフセット座標へ磁石を設置して電子ビームを照射した際を1ステップとする。図4のように穴底面中心を磁石のオフセット座標 $\Delta_m(0,0)$ と定義し、 $\Delta_m(10,0)$ 、 $\Delta_m(0,10)$ 、 $\Delta_m(-10,0)$ 、 $\Delta_m(0,-10)$ へと変化させて多ステップで電子ビームを照射し、高アスペクト比の穴底面全面の平滑化を試みた。

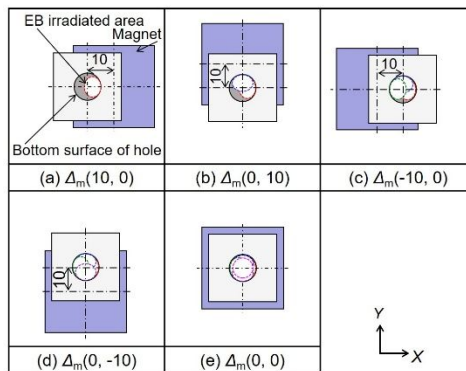


図4 多ステップ照射法

4. 研究成果

(1) 磁場制御による電子ビーム誘導・集中効果

工作物下部に磁石を設置し、穴底面表面から磁石表面までの距離 L_m および磁石の水平方向のオフセット量 δ_m を変化させて大面積電子ビームを照射した、図5に L_m および δ_m を変化させた際の、電子ビーム照射領域のシフト量 ϕ_a を測定した結果を示す。図より L_m が0mmから15mmまでは水平方向のオフセット量の変化に追従して電子ビーム照射領域が移動しているが、 L_m が20mmの場合では照射領域のシフト量が明らかに減少し、電子ビームの誘導効果は低減することが分かる。本結果は、磁石の磁場が及ぼす適切な位置に工作物を設置することで、平面形状の工作物表面に電子ビームを誘導・集中させることが可能であることができることを示している。

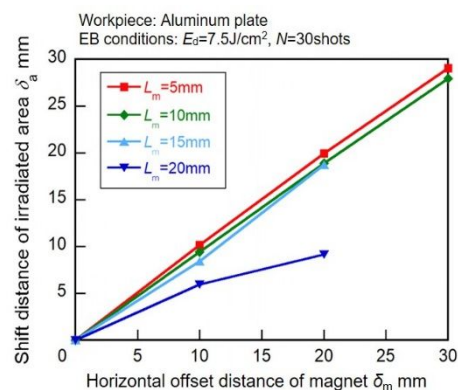


図5 磁石の水平方向のオフセット量による電子ビーム照射領域変化

(2) 電磁場解析による電子ビーム誘導・集中現象の解明

電子ビーム誘導・集中現象の解明、および穴底面への電子ビーム誘導の可能性を明らかにするため、電磁場解析モデルにより工作物近傍の磁力線分布を算出した。図6に示すように、磁石を設置していない場合、電子ビーム照射装置外部に設置されたソレノイドコイルにより生じた磁力線が工作物近傍で拡散していることが分かる。一方、磁石の設置位置が $\delta_m=0$ mmのとき、穴底面中心部に磁力線が集中している。さらに、 δ_m を10mmへと増加させることで、磁力線が集中する領域が穴底面中心部から穴底面の端部へと変化することがわかる。電子は磁力線に対してらせん運動しながら進む性質があるため、磁場制御によって電子ビームを穴底面へ誘導することができ、穴底面に形成される平滑化照射領域を中央部から端部へと制御できる可能性が示された。

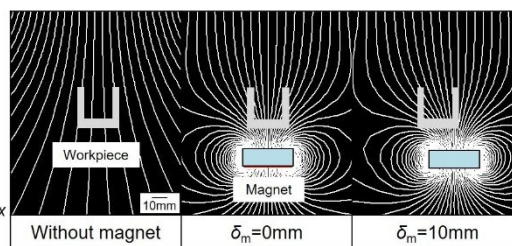


図6 磁場制御による磁力線の集中

解析で得られた穴底面への電子ビーム誘導の可能性を実験的に確かめるため、側面試料および穴底面試料を組み立てて作成した高アスペクト比深穴形状を有する工作物に対して電子ビーム照射実験を行った。図7に磁石の水平方向のオフセット量を変化させた時の穴底面中心からの距離による表面粗さ分布を示す。磁石を $\delta_m=0$ mmの位置に設置した場合、高アスペクト比穴底面の中心部において $1.5\mu\text{mRz}$ 以下の平滑化領域を得ることができるが、穴底面全面の平滑化領域は得られない。一方で、電磁

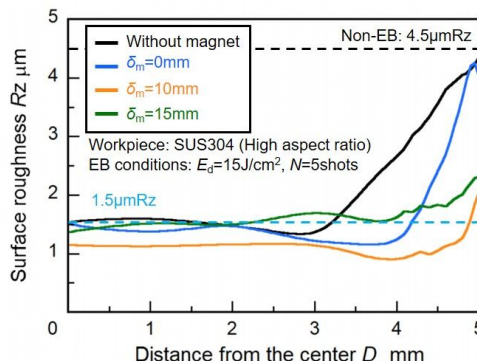


図7 磁石の水平方向のオフセット量による表面平滑化領域の変化

場解析と同様に磁石の設置位置 δ_m を 10mm まで増加させたところ、穴底面端部まで平滑化領域が得られることが明らかになった。本結果は、電子ビーム照射時において磁石の設置位置を変化させることで、高アスペクト比を有する穴底面全面を平滑化できる可能性を示唆している。

(3) 電磁場解析による電子ビーム誘導・集中現象の解明

磁石の水平方向のオフセット座標を $\Delta_m(10,0)$, $\Delta_m(0,10)$, $\Delta_m(-10,0)$, $\Delta_m(0,-10)$ へと変化させて多ステップで電子ビームを照射し、穴底面全面の平滑化を試みた。この際、穴底面中心部は重複して電子ビーム照射が行われるため、クレータ発生等により表面粗さが増加する懸念がある。4ステップの照射後に穴底面中心部へ電子ビームを照射し、均一な表面粗さが得られるようにした。多ステップ照射を行った結果、図8に示すように穴底面中心部から穴底面端部まで光沢のある領域が得られることが明らかになった。図9に高アスペクト比穴底面端部の表面粗さ分布を示す。磁石を穴底面中心部に設置した場合には、未平滑化領域は0.8mmであるが、多ステップ照射法を用いることで穴底面端部まで電子ビームが誘導でき、未平滑化領域はわずか0.2mm以下となった。すなわち、磁場制御による電子ビーム誘導・集中現象を利用することで、従来のEBポリッシングでは困難であった高アスペクト比の底付穴を有する穴底面全面を均一に仕上げられることが分かった。

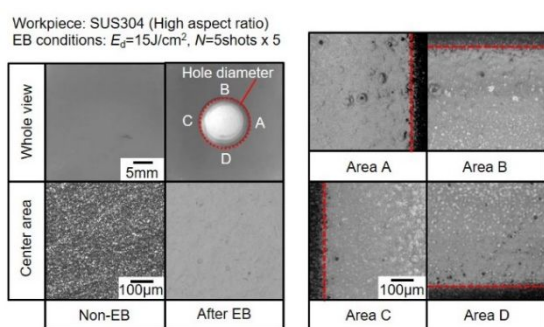


図8 磁場制御による高アスペクト比穴底面への電子ビーム誘導

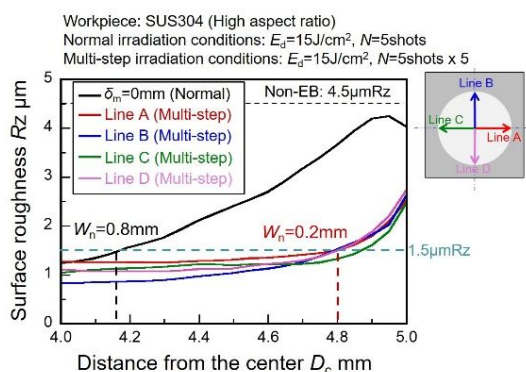


図9 高アスペクト比穴底面全面の平滑化

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 2件）

1. 著者名 Tsubasa Sakai, Togo Shinonaga, Akira Okada	4. 巻 85
2. 論文標題 Influence of magnetic property for workpiece on thickness of removal and modified layers in large-area EB irradiation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 1~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00227	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 Shinonaga Togo, Takata Masashi, Inoue Motohiro, Okada Akira	4. 巻
2. 論文標題 Alumina film sputter deposition on mold steel by large-area electron beam irradiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40684-020-00243-1	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 盧家昱, 篠永東吾, 岡田晃
2. 発表標題 大面積電子ビーム照射法による穴側面仕上げに関する基礎的研究
3. 学会等名 日本機械学会日本機械学会 中国四国支部 第59期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zehua Zhou, Tsubasa Sakai, Togo Shinonaga, Akira Okada
2. 発表標題 Fundamental Study on Micro-edge Filletting by Using Large-area Electron Beam Irradiation Method
3. 学会等名 18th International Conference on Precision Engineering (ICPE2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 篠永東吾, 周 澤華, 岡田 晃, 井上基弘
2. 発表標題 大面積電子ビームを用いたマイクロフィレット加工の曲率半径変化予測
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 篠永東吾, 岡田 晃
2. 発表標題 EBポリッシングによる複雑形状金型の表面仕上げ
3. 学会等名 第225回電気加工研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Togo Shinonaga, Tsubasa Sakai, Motohiro Inoue, Akira Okada
2. 発表標題 Influence of Surface Temperature Field in Large-area Electron Beam Irradiation on Wear Resistance of Zirconia
3. 学会等名 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsubasa Sakai, Shoya Ota, Togo Shinonaga, Akira Okada
2. 発表標題 Change of Thickness of Removal and Modified layers on Workpiece with Different Material Property by Larg-area EB irradiation
3. 学会等名 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mituhiko Kimura, Togo Shinonaga, Motohiro Inoue, Akira Okada
2. 発表標題 Smoothing of Hole Bottom Surface by Guiding Electron Beam with Magnet
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Machining, Materials and Mechanical Technologies (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村充宏, 篠永東吾, 岡田 晃, 井上基弘
2. 発表標題 大面積電子ビーム照射法による高アスペクト比穴底面仕上げ
3. 学会等名 電気加工学会全国大会 (2018)
4. 発表年 2018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