大面積電子ビームによる 金型加工面の高能率仕上げに関する研究 (第3報) *

- クレータ発生と工作物材質の関係 -

岡田 晃** 大地慶明*** 近藤 温† 宇野義幸** 佐野定男*** 植村賢介††

High Efficiency Surface Finishing of Metal Mold by Large-area Electron Beam Irradiation (3rd Report)

- Relationship Between Crater Generation and Workpiece Material -

Akira OKADA, Yoshiaki DAICHI, Atsushi KONDOH, Yoshiyuki UNO, Sadao SANO and Kensuke UEMURA

A new finishing process for metal molds by large-area electron beam irradiation (EB polishing) was proposed and the fundamental effects of EB irradiation conditions on surface finishing, the surface modification effect and others were investigated in the previous report. As a result, the surface roughness on the whole surface within 60mm in diameter could be reduced from $6\mu\text{mRz}$ to less than $1\mu\text{mRz}$ in just a few minutes under a proper condition, and the surface roughness could be well improved even if the surface tilting angle is close to 90 degrees. In addition, the corrosion resistance of metal mold surface could be improved. However, small craters sometimes were generated on the EB irradiated surface, which might deteriorate the quality of products. In this study, the relationship between crater generation and workpiece material was examined. Experimental results made it clear that the generation of crater and its disappearance were repeated on the surface with EB irradiation, and the generation of crater greatly depends on the nonmetallic additives in base material, particularly on MnS. Moreover, the impurity of workpiece material also has a significant influence on the crater generation.

Key words: electron beam, large-area, surface finishing, metal mold, crater

1. 緒 言

放電加工は金型の加工に広く用いられるが、実際には放電加工面をそのまま使用することはまれであり、表面粗さの低減、マイクロクラックや白層等の表面欠陥層の除去、形状精度改善のために最終的には手磨き仕上げが行われる。一部、簡単な形状の場合はロボットによる研磨が行われている例もあるが、ほとんどの金型は複雑な形状をしているためロボットによる仕上げの自動化は難しい。さらに、この手磨き工程は熟練者の技能に頼るところが多く、また長時間を要するため、その高能率化が従来からの課題となっている。

そこで、我々は面積バルス電子ビーム照射による金型加工面の高能率仕上げ法を提案している¹⁾。本研究で使用する電子ビーム照射装置は、ビームを小さく絞って高いエネルギー密度を得る従来の方式とは異なり、最大有効ビーム径 60mm の大面積照射が可能である^{2) 3)}。第1報¹⁾では、表面粗さ低減のための最適照射条件について検討を行い、図1に示すように、最適条件下では表面粗さ約 $6\mu\text{mRz}$ の放電加工面に対して直径 60mm の大面積を一括してわずか数分で $1\mu\text{mRz}$ 以下にすることが可能であることを明らかにした。また、第2報⁴⁾では、傾斜した面に対しても十分な平滑化が可能であることや、図2に示すように、平滑化と同時に表面の耐食性が向上することを明らかにし、高能率仕上げとしての高い有効性を示唆した。さらに生体材料の表面仕上げにも適用できることを明

らかにしている⁵⁾。

しかしながら、これまでの研究において工作物の材質によっては照射面上に直径数 10～数 100 μm の凹み (クレータ) が形成されることを確認している。これらのクレータは主に工作物鋼種によって発生状況が異なるようであり、いくつかの金型鋼種においてはほと

Fig.1 High efficient surface smoothing by large-area EB irradiation

Fig.2 Anodic polarization current density curves with 1N-HCl solution

* 原稿受付 平成 19 年 8 月 13 日
** 正 会 員 岡山大学工学部 (岡山市津島中 3-1-1)
*** ソディック (横浜市都築区仲町台 3-12-1)
† 岡山大学大学院自然科学研究科
†† 永田精機株式会社 (新潟県燕市上諏訪 8-2)

んど生じない場合もある。クレータの深さは $1\mu\text{m}$ 以下のものが多いが、表面粗さという観点では金型の性能上問題とはならないことも多いが、成形品にクレータ形状が転写されるため成型品の外見上は問題となる場合もある。

本研究では、大面積電子ビーム照射によるクレータの発生状況の把握、工作物材質や組織がクレータ発生に及ぼす影響、ならびにクレータを抑制する方法について実験的検討を行った。

2. 大面積電子ビーム照射装置および照射条件

図3は、本研究で用いた大面積電子ビーム照射装置と大面積電子ビーム発生メカニズムを模式的に示す^{2) 3)}。まず、 10^{-2}Pa 程度のArガスをチャンパー内に導入する。はじめに、チャンパー外部に設けたソレノイドコイルによって磁場を発生させ、磁場の強度が最大となる瞬間にアノードにパルス電圧を印加する。チャンパー内の電子がアノードに向かい移動するが、同時にローレンツ力を受けるため電子は螺旋運動を行う。走行距離を伸ばした電子がチャンパー内のAr原子との衝突を繰り返すことによって、アノード付近にプラズマが発生する。そのプラズマ領域が最大となる瞬間にカソードにパルス電圧を印加すると、カソード付近の電界強度が増加し、陰極から放出された電子が高い電界によって加速され、工作物表面に照射される。以上のようなメカニズムによって、ビームを絞ることなく金属材料表面を溶融するのに十分なエネルギー密度での電子ビーム照射が可能であり、本装置においては、最大で直径60mmの大面積電子ビームを得ることができる。

表1は電子ビーム照射条件を示す。1回の照射は数マイクロ秒であり、それを0.2Hzの繰り返し数で、ビームのエネルギー密度および照射回数を適宜設定しながら照射実験を行った。

3. クレータ発生状況

3.1 クレータの形状

図4は代表的な金型鋼種2種SKD11、SKD61および純鉄に対して、同一照射条件 ($E_d=9\text{J}/\text{cm}^2$, $N=20\text{shots}$) で照射を行った場合の表面写真である。図より明らかなようにFeを主成分とする鉄鋼系金型材質でもCやCrの含有量や組織の違いによりクレータの発生状況が異なることがわかる。また、純鉄であってもクレータは発生する。図5は典型的な2つのタイプのクレータを示す。(1)のタイプでは、その直径が数 $10\mu\text{m}$ から数 $100\mu\text{m}$ の円形の凹みである。表面は滑らかでその最底部に高さ $1\mu\text{m}$ 程度の凸部を有する。いっぽう(2)のタイプでは中央が窪んだ形状である。図6に凹部が最も深い場合の3次元図を示している。ほとんどの場合はその深さは約 $1\sim 2\mu\text{m}$ であるが、深いものになると $10\mu\text{m}$ に達する。本大面積電子ビーム照射法において得られる表面粗さは $1\mu\text{mRz}$ 以下であることから、表面粗さや光沢度などの評価にしばしば影響を及ぼすことがある。

3.2 クレータの発生と消滅

図7は大面積電子ビーム照射に伴うクレータ変化を捉えた顕微鏡写真である。SKD11の表面の同一位置を大面積電子ビームの照射ごとに試料を装置から取り出しレーザ顕微鏡で観察した。このとき、試料の洗浄、乾燥およびエアブローの清浄前処理を照射毎に行った。まず図中aのクレータに注目すると、1回目の照射によって生じた後、照射を繰り返すに

Fig.3 Large-area electron beam irradiation equipment

Table 1 Machining conditions

Energy density E_d	J/cm^2	1-12
Acceleration voltage V	kV	30
Number of pulse N	shots	1-99
Pulse duration Dp	μs	2
Pulse frequency Fp	Hz	0.2
Beam diameter Db	mm	60

Fig.4 EB irradiated surface of various pure materials

(1)Type I (2)Type II
Fig.5 Laser micrographs of two types of crater

Fig.6 3D image of crater

Fig.7 Laser micrographs of crater after each single EB irradiation

Fig.8 EB irradiated surface of various pure materials

従って徐々に消滅していくことが分かる。またbにおいては、1回目の照射によって最低部に窪みを有するクレータが生じており、これが照射を重ねるごとに中心の窪みを起点としてさらに大きく成長していく様子が観察できる。さらに、cに示すクレータは最初は存在せず、5回目の照射によって突然発生している。これらのことから、クレータは発生、成長、および消滅を繰り返すことがわかった。

3.3 純金属のEB照射によるクレータ発生状況

試料表面に照射される電子ビームは最終的には熱エネルギーに変換されるためクレータ発生の試料材質による差異は工作物の熱物性値と相関があることが予測される。それを検証するため、容易に入手できる純度の高い純金属に対し大面積電子ビーム照射を行いクレータ発生状況を比較した。図8は工作物として、チタン、純鉄、ニッケル、モリブデン、およびタングステンを用いた場合の大面積電子ビーム照射面の写真である。照射条件は $Ed=9J/cm^2$, $N=20shots$ であるが、他の加工条件においてもクレータ数変化に大きな違いはなかった。図より明らかなように、鉄およびニッケルにおいては直径が約 $50\mu m$ 以上のクレータが発生している。これに対し、モリブデンおよびタングステンにおいては数 $10\mu m$ 以下のクレータが多数発生していることが分かる。

表2にここで用いた純金属の主な熱物性値を示す。また、図9は工作物の熱伝導率とEB照射面に生じる単位面積あた

Table 2 Thermal properties of workpiece material

	Ti	Fe	Ni	Mo	W
Thermal conductivity $W/(m \cdot K)$	17	33	71	113	119
Thermal diffusivity m^2/h	5.4	4.3	18.0	44.1	46.4
Melting point K	1948	1808	1728	2883	3660
Boiling point K	3535	3027	3004	5077	6200
Purity $\%$	99.5	99.99	99.7	99.95	99.95

Fig.9 Variations of number of crater with thermal conductivity

りのクレータ数の関係を示す。図より、鉄においては発生クレータ数が相対的に多いが、熱伝導率が大きくなるにつれクレータの個数が多くなる傾向があることが分かる。熱伝導が高い材料においては大面積電子ビーム照射時に表面に溶融した材料の冷却速度が高いため、凝固するのも早いと考えられる。従って何らかの要因で熱的特性の異なる部分が選択的に溶融・蒸発した場合、あるいは溶融せずに固相のままに残った場合、その表面形状が残りやすく、クレータ形状を呈するのではないかと考えられる。

3.4 非金属介在物の影響

次に、クレータ形状を引き起こす熱的特性の異なる部分として非金属介在物の影響について考察を行った。すなわち鉄鋼系金型材料においては、様々な非金属介在物を有していることから、それらがクレータ発生の起点となるか検討した。そこで、炭化物、酸化物、ならびに MnS が非金属介在物として多く存在する金型材料 3 種（日立金属製 DAC55, SLD, HPM1）を用いた。ここでは、SEM、光学顕微鏡観察、および EDX 面分析によって特定の非金属介在物の位置を確認した後、大面積電子ビーム照射を行い、同一場所を再観察することで非金属介在物がクレータ発生に及ぼす影響を調査した。電子ビーム照射条件はエネルギー密度 $Ed=2J/cm^2$ と小さく、照射回数も $N=1shot$ とし、表面の非金属介在物の影響が明確に把握できるようにした。

まず図 10 は、非金属介在物として $10\mu m$ 程度の炭化物が分布するダイカスト金型鋼の場合を示す。図より明らかなように成分分析を行った炭化物部分には大面積電子ビーム照射後にクレータが生じていることがわかる。しかしながら、炭化物以外の部分にもクレータは生じており、炭化物がクレータ発生の主要因とは判断できない。

次に図 11 は、酸化物（アルミナ）が分布する冷間ダイス鋼の場合である。圧延方向が横方向であるため、 $10\sim 20\mu m$ の酸化物がやや引き伸ばされた形状で横方向に連続して分布している。大面積電子ビーム照射後の表面を観察すると、かなり多くのクレータが発生しており、この酸化物の存在がクレータ発生の主要因であるか否かは判別できない。しかしながらクレータ群は横方向に連続して発生しており、酸化物分布と何らかの相関があるといえる。

さらに、非金属介在物として長さ $100\mu m$ 程度の MnS が分布するプリハードン鋼の大面積電子ビーム照射結果を図 12 に示す。EB 照射後の表面には MnS が存在していた部分以外の場所にもクレータが多数発生しており、MnS がクレータ発生の起点となっているかは判断できない。しかし、先ほどの酸化物の場合と同様にクレータ群は横方向に連続して発生していることを確認しており、MnS 分布が影響しているといえる。

以上の結果から非金属介在物が存在する部分でクレータの発生が確認でき、また特に MnS を含む金型鋼種では発生するクレータ数が非常に多いことがわかった。S は沸点が低く、大面積電子ビーム照射において優先的に蒸発すると考えられる。いっぽう、表面に非金属介在物が見られない部分においてもクレータの発生が確認できた。これらのクレータにおいては照射前の表面を詳細に観察すると不明瞭ながら非金属介在物の存在が確認できる場合もある。すなわち、表面のやや

Fig.10 Effect of carbide on crater generation

Fig.11 Effect of alumina on crater generation

Fig.12 Effect of manganese sulfide on crater generation

内部に点在している非金属介在物もクレータの形成に影響していると考えられる。さらに、非金属介在物以外の不純物もクレータ発生に起因する可能性があることも分かった。これ

らは熱的特性の違いから優先的に蒸発したり、表面の冷却凝固時に核となってクレータを形成することも推測される。

3.5 MnSの影響

非金属介在物のなかでもクレータ発生への影響が最も大きいと推測される MnS に注目し、化学成分がほぼ同程度で MnS 介在物の含有量の異なる材料を用いてその影響を検討した。試料は大同特殊鋼の NAK55, NAK80, G-STAR, および S-STAR であり, NAK55, G-STAR には快削元素として S が添加されており, NAK80, S-STAR には S が添加されていない。従って非金属介在物 MnS の含有量が大きく異なっている。

図 13 に S の含有量の異なる金型鋼種におけるクレータの発生状況を示す。電子ビーム照射条件はエネルギー密度 $Ed=9J/cm^2$, 照射回数 $N=20shots$ である。図より明らかなように S を含有している NAK55, G-STAR ではクレータが多数発生し表面の凹凸が大きいことが分かる。これに対して S が添加されていない NAK80, S-STAR ではほとんどクレータが発生していないことがわかる。電子ビーム照射条件を変化させた場合にも同様の結果が得られた。このことからクレータ発生に対して MnS が大きく影響していることが明らかとなった。

3.6 精錬方法の影響

非金属介在物と同様に不純物の存在がクレータ発生に影響を及ぼすことが考えられる。それを検討するために材料の精錬工程において不純物を取り除いた試料を使用してクレータ発生状況を調べた。試料は SUS316 であり, 大気溶解材 (A-type) と真空溶解材 (S-type) の 2 種類を比較した。照射条件はエネルギー密度 $Ed=6$, および $9J/cm^2$, 照射回数 $N=20shots$ である。図 14 より, 大気溶解材では照射条件にかかわらず, クレータが多数発生していることがわかる。これに対して真空溶解材ではほとんどクレータが発生していない。すなわち, 精錬段階で材料に取り込まれる不純物の存在もクレータ発生の要因であることが明らかとなった。

4. 結 言

本研究では, 大面積電子ビーム照射におけるクレータの発生状況の把握, 工作物材質や組織がクレータ発生に及ぼす影響, ならびにクレータを抑制する方法について実験的検討を行った。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 大面積電子ビーム照射によって生じるクレータは発生, 成長, 消滅を繰り返す。
- (2) 熱伝導率が高い材料ほど大面積電子ビーム照射によって生じるクレータ数が多くなる傾向がある。
- (3) 材料中に含まれる非金属介在物がクレータ発生の要因の一つであり, これらが多く分布する場合には多数のクレータが発生する。特に MnS の分布がクレータ発生に大きく影響する。
- (4) 真空溶解によって材料中の不純物を取り除くことによってクレータの発生を抑制することができる。

謝 辞

本研究は, (財) スズキ財団, および (財) 岡山工学振興会の研究助成のもとに行われたことを記して, 謝意を表します。

Fig.13 Difference in crater generation with sulfur content in workpiece

Fig.14 Effect of impurity in material on crater generation

参 考 文 献

- 1) 岡田 晃, 宇野義幸, 藪下法康, 植村賢介, Purwadi RAHARJO: 大面積電子ビームによる金型加工面の高能率仕上げに関する研究 (第1報), 精密工学会誌, **69**, 10 (2003) 1464.
- 2) D. I. Proskurovsky, V. P. Rotshtein and G. E. Ozur : Use of Low-energy, High-current Electron Beams for Surface Treatment of Materials, Surface and Coating Technology, **96**, 1 (1997) 117.
- 3) D. I. Proskurovsky, V. P. Rotshtein, G. E. Ozur, Yu F.Ivanov and A. B. Markov : Physical Foundations for Surface Treatment of Materials with Low Energy, High Current Electron Beams, Surface and Coating Technology, **125**, 1-3 (2000) 49.
- 4) 岡田 晃, 宇野義幸, 藪下法康, 植村賢介, Purwadi RAHARJO: 大面積電子ビームによる金型加工面の高能率仕上げに関する研究 (第2報), 精密工学会誌, **71**, 11 (2005) 1399.
- 5) 岡田 晃, 宇野義幸, 佐藤公亮, 八野田健, 植村賢介, Purwadi RAHARJO : 大面積パルス電子ビーム照射によるチタン合金製生体部品の高エネルギー表面仕上げ, 電気加工学会誌, **38**, 89 (2004) 27.