

EB ポリッシングによる超高エネルギー金型表面仕上げ技術の確立

岡山大学大学院自然科学研究科

准教授 岡田 晃

(平成 18 年度一般研究開発助成 AF-2006013)

キーワード：大面積電子ビーム，表面仕上げ，金型

1. 研究の目的と背景

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研磨による仕上げの自動化は難しい。そして、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ことから、その高能率が従来からの課題となっている。

一方で電子ビームを用いた加工は、一般的にはビームを細く絞って高エネルギー密度を得た上で、従来より精密切断や高機能精密溶接等に利用されている。これに対して、本研究で用いる電子ビーム照射装置では特別な工夫によって、有効ビーム径 60mm の比較的均一な高エネルギー密度の電子ビームを発生¹⁾ させることができる大面積電子ビーム照射法を開発し、それを用いた金型の仕上げ法 (EB ポリッシング) を提唱している。これまでに、天田金属加工機械技術振興財団研究開発助成 (AF-2003014) の下で表面平滑化効果についての研究を行い、図 1、図 2 に示すように、わずか数分で加工面全面の凹凸を一括して $1\mu\text{mRz}$ 以下に減少することができ、革新的な高能率仕上げプロセスを確立できる可能性を見出した^{2) - 5)}。また、図 3 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。

しかしながら、金型材料の種類によっては照射面に上に直径数 $10\sim$ 数 $100\mu\text{m}$ の凹み (クレータ) の発生を確認している。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 $1\mu\text{m}$ 以下のものが多く、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。

そこで、本研究では、EB ポリッシング実用化に対する検討として、EB ポリッシング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考察を行った。

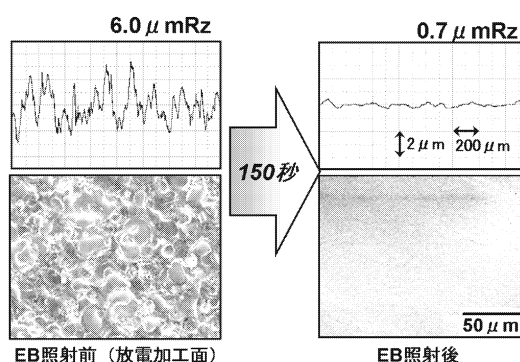
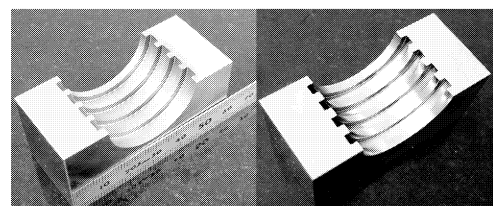
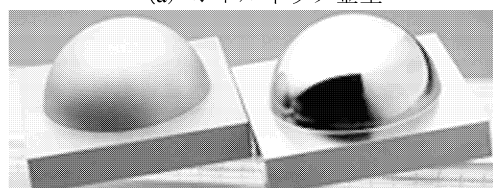


図 1 EB ポリッシングによる高能率表面平滑化



(a) ボトルネック金型



(b) 半球形状

図 2 EB ポリッシングサンプル

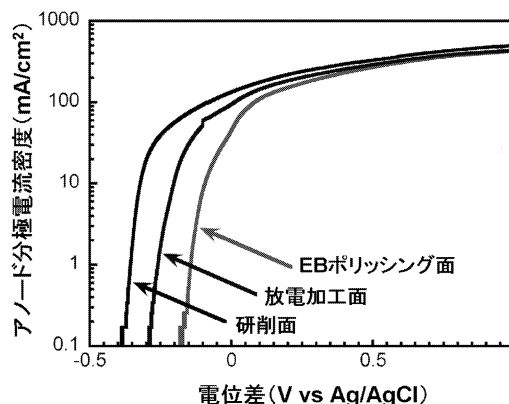


図 3 EB ポリッシングによる耐食性の向上

2. 実験方法

図4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^{7)・8)}。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EBポリッシング照射条件を示す。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。

表1 EBポリッシング条件

Energy density E_d	J/cm ²	1-12
Acceleration voltage V	kV	30
Number of pulse N	shots	1-99
Pulse duration D_p	μ s	2
Pulse frequency F_p	Hz	0.2
Beam diameter D_b	mm	60

3. クレータの形状

図5は代表的な金型鋼種2種SKD11, SKD61および純鉄に対して、同一EBポリッシング照射条件 ($E_d=9\text{J/cm}^2$, $N=20\text{shots}$) 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6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 μm から数100 μm 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 μm 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7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1~2 μm であるが、深いものになると10 μm に達する。EBポリッシング照射法において得られる表面粗さは1 μmRz 以下であ

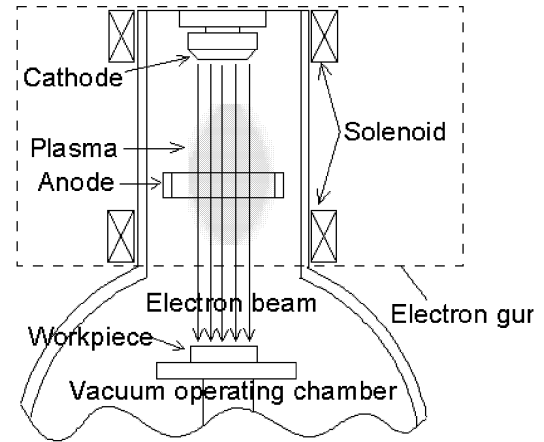
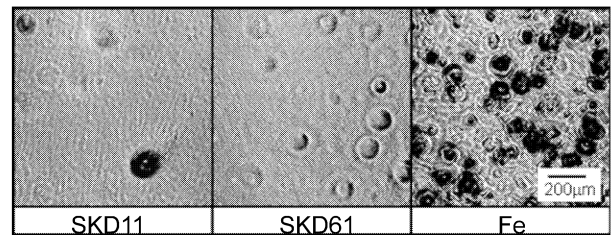
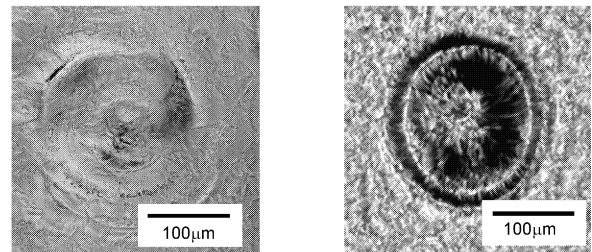


図4 大面積電子ビーム照射装置



Ed=9J/cm², N=20shots

図5 EBポリッシング面に発生するクレータ



(1)Type I

(2)Type II

図6 クレータの分類

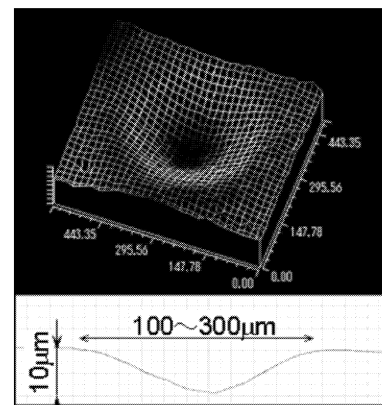


図7 クレータ形状

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。

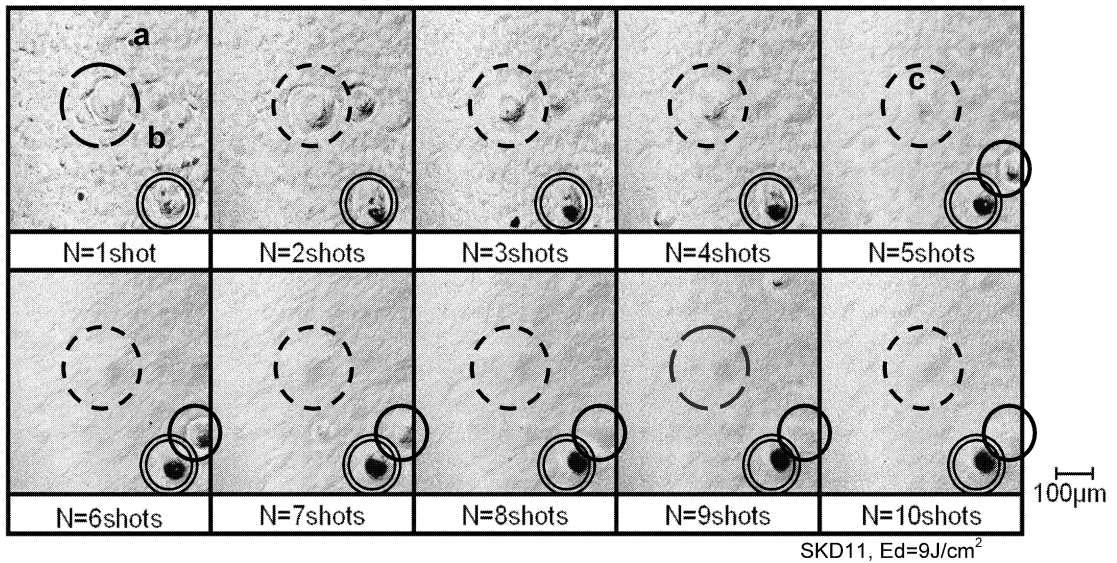


図8 大面積電子ビーム照射に伴うクレータ変化

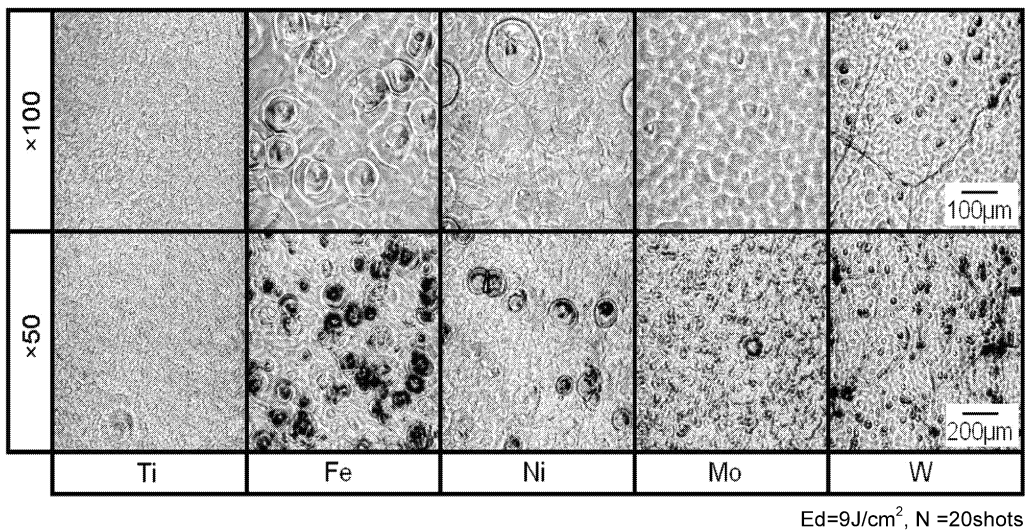


図9 純金属に対するEBポリッシング

4. クレータの発生と消滅

図8はEBポリッシングにおける電子ビーム照射回数に伴う照射面の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電子ビーム照射ごとに試料を装置から取り出しレーザー顕微鏡で観察を行なった。まず図中aの箇所に発生したクレータに注目すると、1回目の照射によって生じた後、照射を繰り返すにしたが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に示すクレータにおいては最初の段階では存在していないが、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明らかとなった。

5. 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EBポリッシングを行いクレータ発生状況を比較した。図9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EBポリッシング面の写真である。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 純金属の主な熱物性

	Ti	Fe	Ni	Mo	W
Thermal conductivity W/(m·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

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10は工作物の熱伝導率とEBポリッシング面に生じる単位面積あた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EBポリッシング時に表面に溶解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解・蒸発した場合、あるいは溶解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。

6. 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にEBポリッシングを行い、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11は、非金属介在物として10 μ 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EBポリッシング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12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、10~20 μ 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。EBポリッシング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

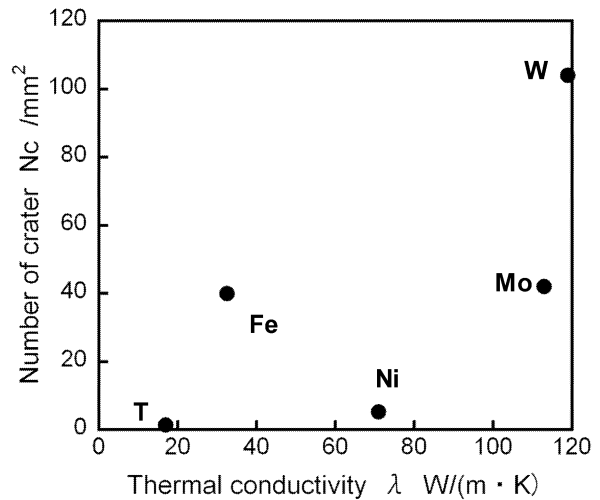


図10 単位面積あたりのクレータ数

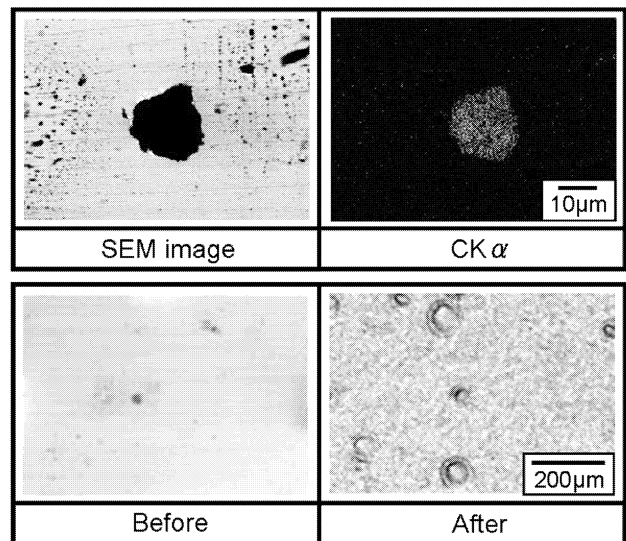


図11 炭化物の分布の影響

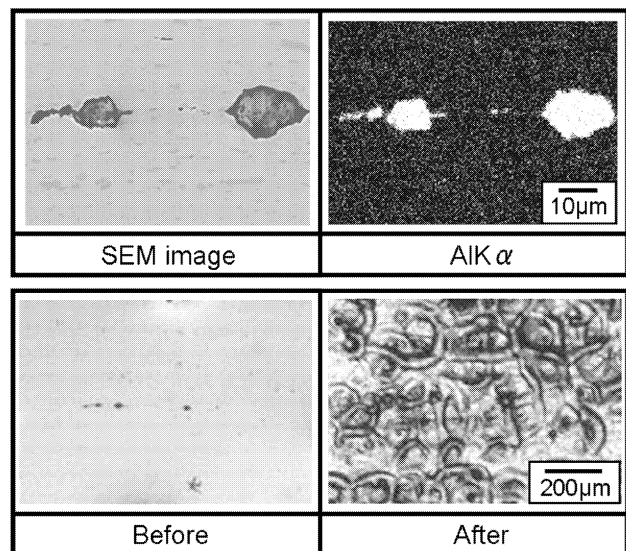


図12 アルミナ分布の影響

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 μm 程度の MnS が分布するプリハードン鋼の EB ポリッシング結果を図 13 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、EB ポリッシング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。

7. 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 14 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。EB ポリッシング条件はエネルギー密度 $E_d=9\text{J}/\text{cm}^2$, 照射回数 $N=20\text{shots}$ 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。EB ポリッシング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。

8. 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 $E_d=6$, および

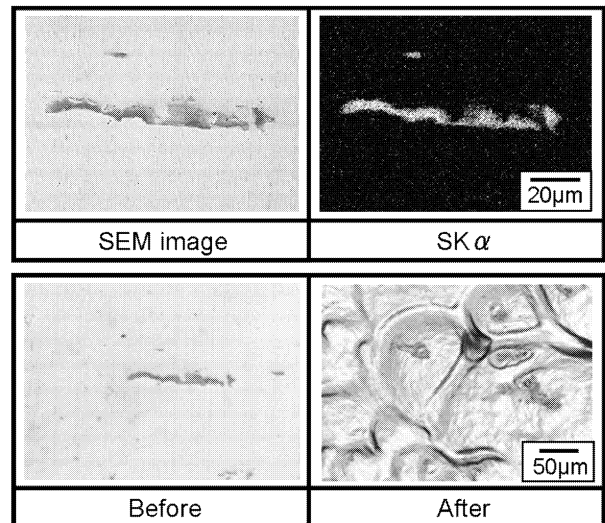


図 13 MnS 分布の影響

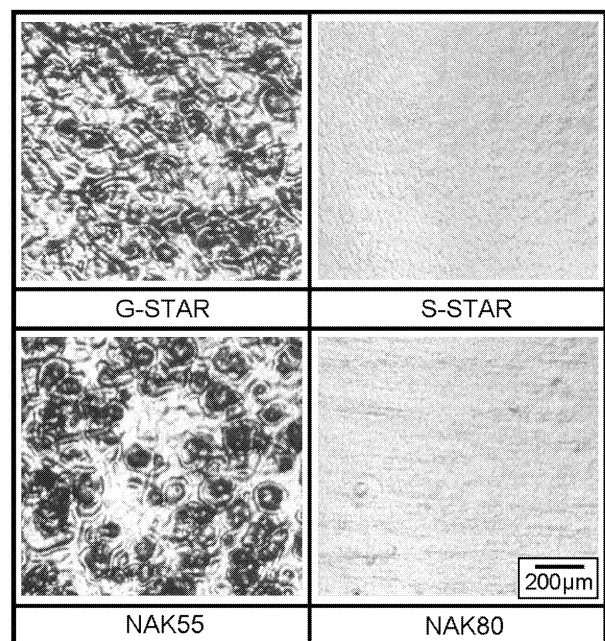


図 14 MnS 含有量によるクレータ発生の違い

$9\text{J}/\text{cm}^2$, 照射回数 $N=20\text{shots}$ である。図 15 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。

9. まとめ

本研究では、大面積の電子ビーム照射法を用いた金型の仕上げ (EB ポリッシング) 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。

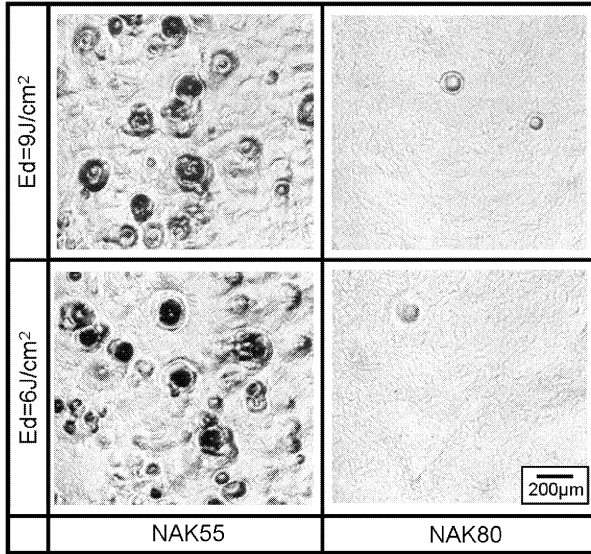


図 15 精錬法によるクレータ発生の違い

- (1) EB ポリッシングによって生じるクレータは発生、成長、消滅を繰り返す。
- (2) 熱伝導率が大きい材料ほど EB ポリッシングによって生じるクレータ数が増える傾向がある。
- (3) 材料中に含まれる非金属介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、天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成 (AF-2006013) のもとで行われました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) G.A.Mesyats, Explosive Electron Emission, URO-Press, (1998).
- 2) P,Raharjo et.al.: Pulsed Electron Beam Technology for Surface Modification of Dental Materials, Proc. of 6th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, (2002), pp.679-682.
- 3) 岡田 晃ら: 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), pp.1464-1468.
- 4) 岡田 晃ら: 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), pp.1399-1403.
- 5) A.Okada et.al.: High Efficiency Finishing Process for Metal Mold by Large-area Electron Beam Irradiation, Precision Engineering, 29-4 (2005), pp.449-455.
- 6) 岡田 晃: 大面積電子ビーム照射による金型表面の高能率平滑化および表面改質, FORM TECH REVIEW, 財団法人 天田金属加工機械技術振興財団, 18-1 (2008), pp.36-41.
- 7) D.I.Proskurovsky, et.al. : Use of Low-energy, High-current Electron Beams for Surface Treatment of Materials, Surface and Coating Technology, 96-1 (1997), pp.117-122.
- 8) D.I.Proskurovsky, et.al. : Physical Foundations for Surface Treatment of Materials with Low Energy, High Current Electron Beams, Surface and Coating Technology, 125, 1-3 (2000), pp.49-56.