

大面積電子ビーム照射による金型表面の高エネルギー平滑化および表面改質

岡山大学工学部機械工学科
講師 岡田 晃
(平成 15 年度研究開発助成 AF-2003014)

キーワード：大面積電子ビーム，表面仕上げ，表面改質

1. 研究の目的と背景

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とした上で、精密切断や高機能精密溶接等に利用されている。これに対してここで紹介する電子ビーム照射装置では特別な工夫によって、大面積の比較的均一な高エネルギー密度電子ビームを発生させることができる¹⁾。

一方で放電加工は金型の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、簡単な形状の場合に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、その高能率化が従来からの課題となっている。

そこで、本研究では大面積電子ビーム照射による新たな金型の仕上げ法を提案する^{2) - 5)}。使用する電子ビーム照射装置は従来のビームを細く絞るものと異なり、最大でビーム直径 60mm の大面積照射が可能である。これによって短時間に金型表面を平滑に仕上げる新たな手磨きレス仕上げプロセス実現の可能性について実験的検討を行った。

2. 実験方法

2.1 大面積電子ビーム照射装置

図 1 は、本研究で試作した大面積電子ビーム照射装置を模式的に示す^{6), 7)}。電子ビームは通常真空状態で使用されるが、この装置においては、予め $(5 \sim 15) \times 10^{-2}$ Pa 程度の Ar ガスをチャンバー内に混入しておく。はじめに、チャンバ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る。そして磁場が最大となる瞬間にアノードにパルス電圧を印加する。ペニング効果によりチャンバー内に発生した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バー内の 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、カソード付近に電気二重層が形成されることにより電界強度が増加し、陰極から放出された電子が高い電界によって加速される。この電子の電流密度は次のラングミュア式に従って、プラズマにあるイオン電流密度およびイオンと電子の質量比によって決定される。

$$J_e = J_i (M/m)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 J_e 、 J_i 、 M 、 m はそれぞれ電子電流密度、イオン電流密度、イオン質量、および電子質量である。この式からアノードプラズマのイオン電流密度、すなわちアノードプラズマ量とイオン質量が大きい場合、電子ビームの電流密度を高くすることが可能となる。

また、アノードプラズマの存在は電子ビームの寿命を長くする効果も有する。すなわち、一般に電子ビームは電子間のクーロン反発力により電子が散乱する傾向にあるが、アノードプラズマを通過することにより電子間のクーロン力を遮蔽することで、直進性を向上させることができる。また、ビームの照射を短パルス状とすることによって、材料表面での熱拡散の影響を減少させる利点も有する。

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熔融する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 のビームを得ることができる。

2.2 実験条件

表 1 は電子ビーム照射条件を示す。1 回の照射は 2~3 マイクロ秒であり、それを 0.2Hz の繰り返し数で放電加

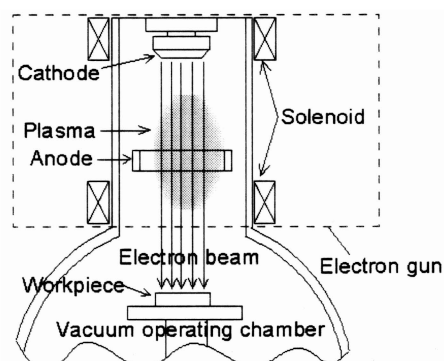


図 1 大面積電子ビーム照射装置

表1 電子ビーム照射条件

Energy density E_d	J/cm^2	1.4~10.7
Acceleration voltage V	keV	30
Number of pulse N		1-50
Pulse duration D_p	μs	2-3
Pulse frequency F_p	Hz	0.2
Beam diameter D_b	mm	60

工面に照射する。主にビームのエネルギー密度および照射回数の条件を変化させて、まず最適照射条件について検討を行った。照射試料は、金型材として広く利用されるプリハードン鋼（大同特殊鋼製 NAK80）を用いた。照射実験は直径 10mm の銅の丸棒電極を用いて作成した放電加工面をビームの中央において照射を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 エネルギー密度の影響

図2は、プリハードン鋼の放電加工面に対して電子ビー

ム1パルスあたりのエネルギー密度を変化させた場合の照射面の様子を示す。照射前の放電加工面の表面粗さは約 $6\mu mRz$ であり、照射回数は全て 30 回としている。図より明らかなように、エネルギー密度の小さい $1.4 J/cm^2$ の場合においては、表面が溶融した形跡が観察できる。 $2.1 J/cm^2$ になると表面の溶融が顕著になり、平滑になっているように見える。さらにエネルギー密度の高い条件では、放電面とは全く異なった表面を形成している。

このときのそれぞれの断面曲線を図3に示す。照射前の放電加工面は凹凸が激しいのに対し、エネルギー密度の増加とともに表面の凹凸が減少していき、エネルギー密度の大きい条件では十分に平滑化されている。図4はエネルギー密度による照射面の表面粗さおよび光沢度の変化を示す。光沢度の測定は、JIS (Z8741) に準拠した測定により行い、測定角は金属の測定に適するといわれる 60° とした。この場合完全鏡面の光沢度は 1000 となる。表面粗さはエネルギー密度 $1\sim 4 J/cm^2$ においては、エネルギー密度の増加とともに減少し、 $6\sim 7 J/cm^2$ において約 $0.7\mu mRz$ で最小となる。エネルギー密度がそれ以上高くなると粗さは若干増加する。いっぽう、光沢度は表面粗さとよく対応した

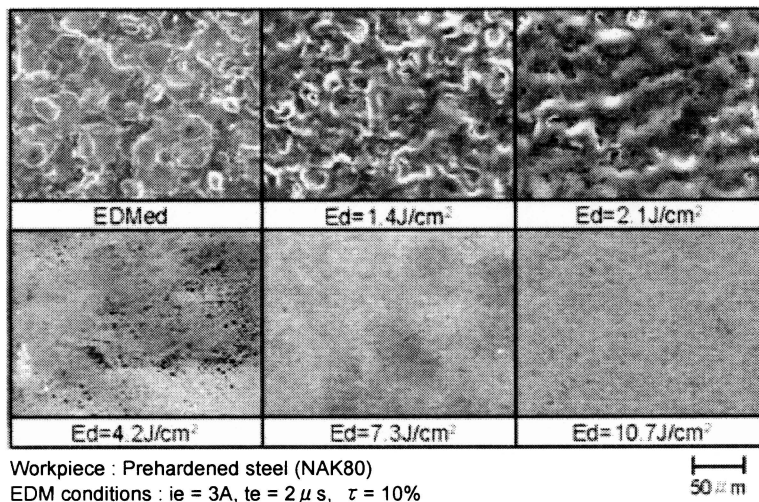


図2 エネルギー密度による照射面の変化

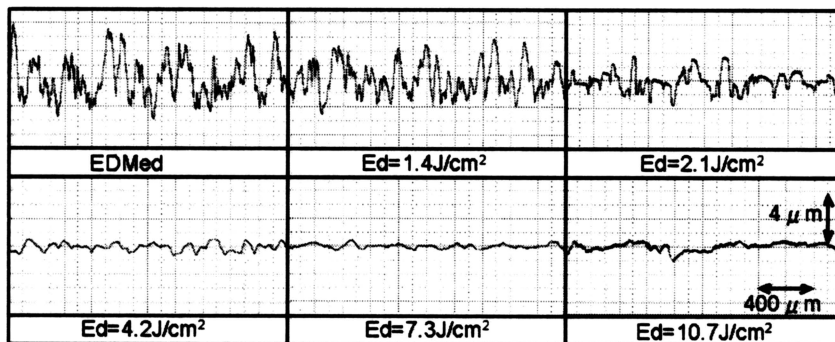


図3 エネルギー密度による断面曲線の変化

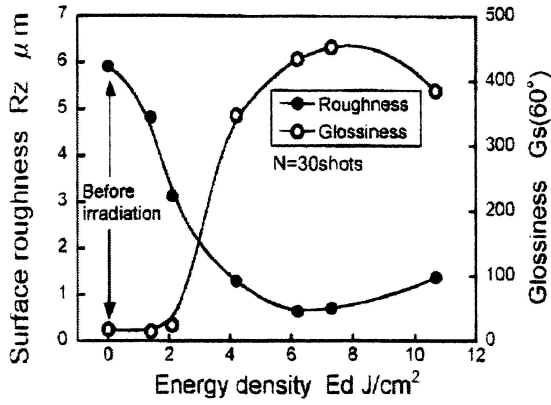


図4 エネルギー密度による表面粗さおよび光沢度変化

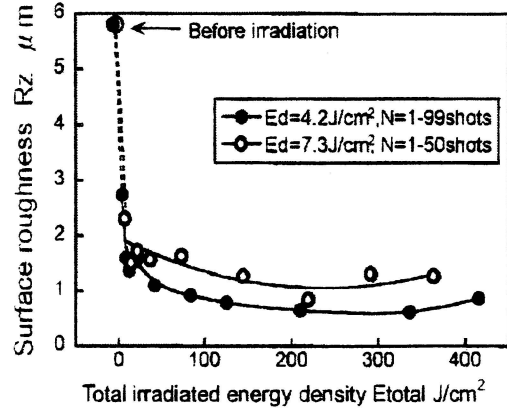


図6 総照射エネルギーと表面粗さの関係

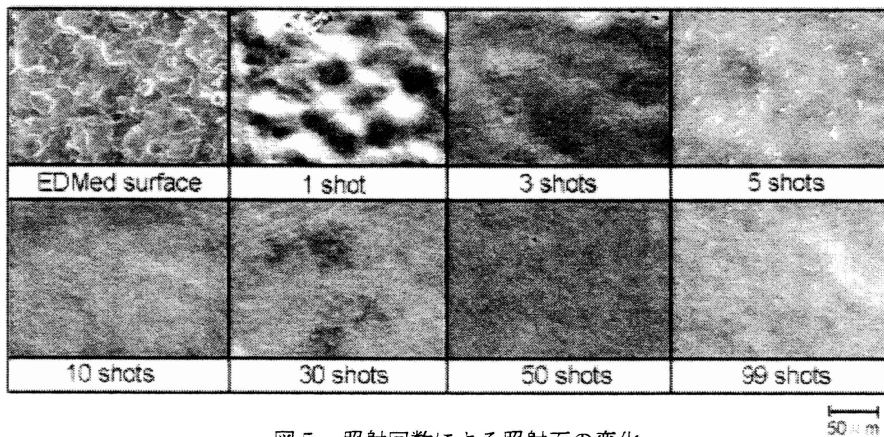


図5 照射回数による照射面の変化

変化を示しており、表面粗さが最小となる場合に光沢度は最大となることがわかる。

3・2 照射回数の影響

次に照射回数の影響について検討を行った。図5はエネルギー密度 $4.2\text{J}/\text{cm}^2$ の条件において、照射回数を変化させた場合の照射面の変化を示す。この場合、1回の照射で溶融の跡が顕著に見られ、数回の照射で平滑化がかなり進行している。そして、10回以降の照射では照射面の様子はほとんど変化しない。前述のエネルギー密度依存性の結果と併せて考慮すると、一回のパルスエネルギーが大きい、あるいは、照射回数を多くすることによって十分な平滑化が可能になることがわかる。すなわち、照射される電子ビームのエネルギー密度の総和によって照射面の粗さが決定するのではないかと推測される。そこで、1パルスあたりのエネルギー密度の異なる2つの条件で照射回数を変化させて面粗さを比較してみた。

図6はエネルギー密度 $4.2\text{J}/\text{cm}^2$ および $7.3\text{J}/\text{cm}^2$ で照射回数、すなわち総照射エネルギー密度を変化させた場合の表面粗さの変化を示す。いずれのエネルギー密度の場合も照射回数、すなわち総照射エネルギー密度が増加すると

もに表面粗さが低下し、 $200\sim 300\text{J}/\text{cm}^2$ の総照射エネルギー密度の場合に最小となる。しかしながら、その最小値はエネルギー密度の小さい $4.2\text{J}/\text{cm}^2$ のほうが小さい。従って、総照射エネルギー密度が同じであっても、小さいエネルギー密度で多数回照射するほうが平滑化の効果が高いことが明らかとなった。

3・3 平滑化メカニズム

照射断面の観察を行い平滑化のメカニズムについて考察を行った。図7の写真は、左から放電加工面、放電加工面に電子ビームを照射した面、および研削面に電子ビームを照射した面である。照射前の放電加工面を見ると再凝固層（白層）が形成されている。これに対し、電子ビーム照射後にはその白層の厚さが数ミクロン減少し、かつ表面の凹凸が減少していることが確認できる。いっぽう、研削面に対して電子ビームを照射した面においては、白層はほとんど確認できない。従って、放電面に電子ビームを照射した後に確認できる白層は、放電加工によって形成された白層が除去されずに残っているものであるといえる。本加工法では1パルスの電子ビーム照射時間は $2\sim 3\mu\text{s}$ と非常に短いため、材料表面での熱拡散の影響が少なく、材料内

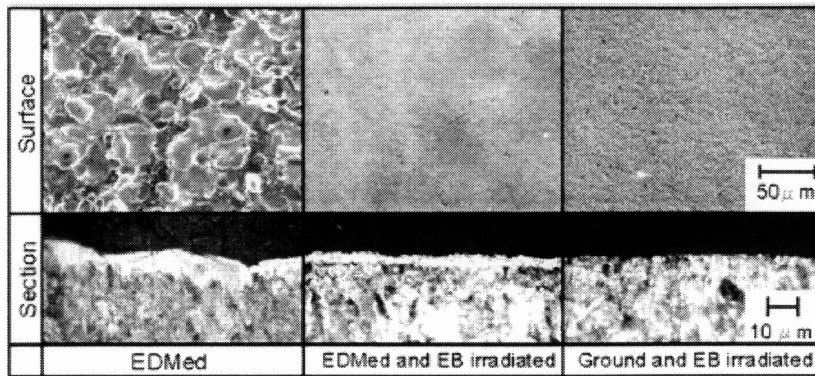


図7 照射表面および断面写真

部への電子ビームの侵入もほとんどないと考えられるため、材料の熔融・蒸発除去が極表面のみで行われていると推測される。

3・4 照射面材料除去量

次に、照射に伴う表面の除去量について検討を行った。ここでは、照射面半分を薄いステンレス板で覆い、照射後の断面形状を測定することで、電子ビーム照射による除去量を計測した。これまでの最適条件で照射を行った場合の結果を図8に示す。照射領域と非照射領域の境界には大きな盛り上がりが形成されているが、これはステンレス板を設けていた影響によると考えられる。照射面と非照射面の表面の位置をみると、照射面では粗さが向上するとともに、約1 μm が均一に除去されていることが確認できる。多少照射エネルギー密度の大きい条件でも数 μm の厚さが均一に除去されるものと推測される。従来の手磨きによる金型加工面の研磨仕上げでは、研磨箇所による除去量の差が

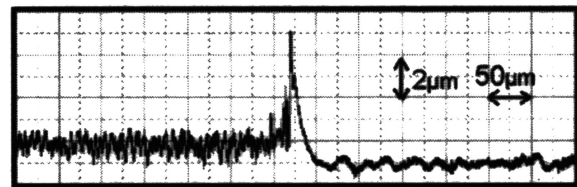


図8 表面の材料除去量

避けられず、場合によっては形状精度の悪化を招くが、本手法においては、予めその除去量を把握しておけば、形状精度をほとんど悪化させることなく、平滑化が行えることになる。

3・5 照射前粗さの影響

これまで照射前の表面粗さが、約6 μmRz の放電加工面に対して検討を行ってきたが、さらに大きな表面粗さの加工面から一気に平滑化が可能ならば、生産能率はさらに高

表2 照射前表面（放電加工面）の断面曲線

Conditions	ie(A)	te (μs)	Rz (μm)	Profiles
1	3	2	5~6	
2	1	200		
3	18	2	10~11	
4	6	200		
5	24	2	21~22	
6	9	200		

くなる可能性がある。そこで、表2に示すような、表面粗さおよび周波数特性の異なる6種の放電加工面でその可能性を検討した。試料1, 2は粗さが約 $6\mu\text{mRz}$, 3, 4は粗さが約 $10\mu\text{mRz}$, 5, 6は約 $20\mu\text{mRz}$ のものであり、試料1, 3および5は凹凸の周期の短い面となっている。

図9はそれぞれの放電加工面の電子ビーム照射前後の表面粗さを示す。照射条件はいずれもビームエネルギー密度 $7.3\text{J}/\text{cm}^2$, 照射回数30回とした。図より明らかなように、照射前の表面粗さが同じ場合、その周波数特性の違いによらず照射後の表面粗さも同程度となることがわかる。また、今回の照射条件においては照射前の面粗さが小さいほど、照射後の面粗さは小さくなる。照射前後の表面粗さにはほぼ線形の関係が成り立ち、照射後面粗さは照射前面粗さのおおよそ5分の1になっていることがわかる。従って、大面積電子ビーム照射後の表面粗さは照射前の表面粗さに依存することが明らかとなった。

3・6 傾斜面の平滑化特性

09 これまでは電子ビーム照射方向に対して垂直な放電加工について主に検討を行ってきたが、実際の金型への適用を考慮した場合、傾斜した面に対する検討が必要である。そこで、傾斜面への照射における平滑化特性を調べた。図10に示すように、放電加工面(約 $6\mu\text{mRz}$)の傾斜角 θ を変化させて照射後の表面粗さを計測した。図に示すように、傾斜角 θ の面に与えられるエネルギー密度 E_d は、もとのビームのエネルギー密度を E_{d0} とすると、 $E_d = E_{d0} \cdot \cos \theta$ で与えられる。照射条件はこれまで良好な平滑化が可能であった $E_{d0} = 7.3\text{J}/\text{cm}^2$, $N = 30\text{shots}$ とした。

図11に結果を示す。図中破線で示す曲線は図4の垂直な照射面に対する表面粗さのエネルギー密度依存性から予測される表面粗さの結果を示している。実験値と比較すると、傾斜角 θ が小さい 45° 以下では、予測値とほぼ一致しており、 $1\mu\text{mRz}$ 以下の粗さが得られている。注目すべきはそれ以上の傾斜角の場合である。この場合予測値よりもかなり小さい粗さを達成できており、 75° まではほぼ $1\mu\text{mRz}$ の値が得られた。さらに、 90° の場合では原理的には平滑化されないと考えられるが、実際にはその値が半分程度に改善されている。実用を考慮した場合、サイズが小さく、極端に大きい傾斜をもたない金型においては、試料の位置や傾きを全く調整することなく一括して平滑化が可能であることを示しており、有用な特性であるといえる。

3・7 耐食性の評価

図12は電子ビーム照射試料と未照射試料を約1年間放置しておいたものである。中央の丸い部分が放電加工面、その周囲が研削面である。未照射の場合、研削面にはいたるところに錆が発生しており、またもと耐食性に優れている放電加工面においてもミクロの錆の発生が見られる。これに対し電子ビーム照射試料においては、錆の発生は確認できず、放電加工面、研削面ともに、光沢のある表面を維持している。このことから表面の組織変化によって電子ビーム照射面は高い耐食性を示すことがわかる。

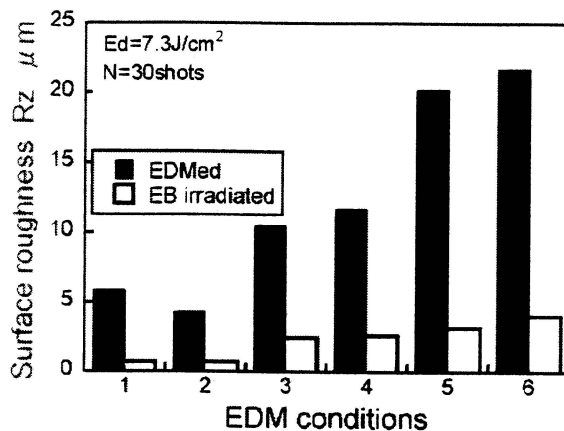


図9 照射前と照射後の表面粗さ

Large-area Electron Beam

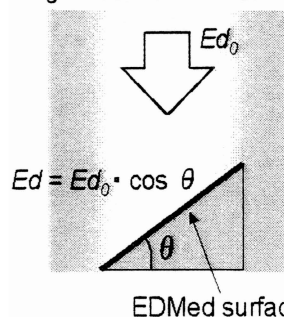


図10 傾斜面への電子ビーム照射

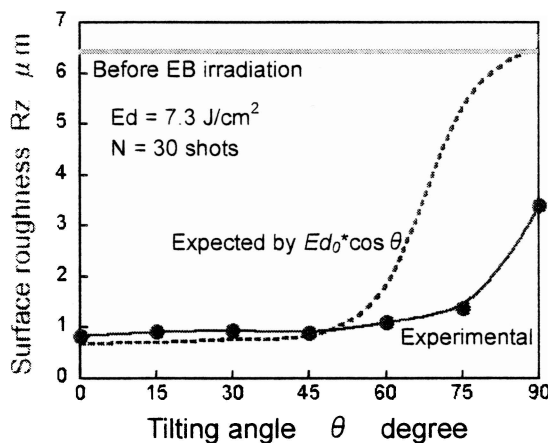
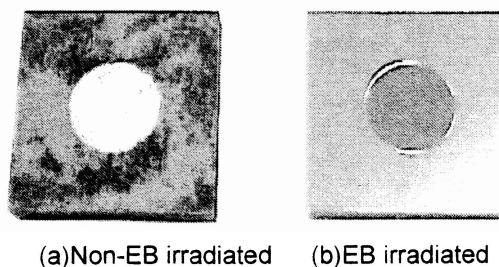


図11 傾斜面に対する平滑化



(a) Non-EB irradiated (b) EB irradiated

図12 大気中に一年間放置後の試料

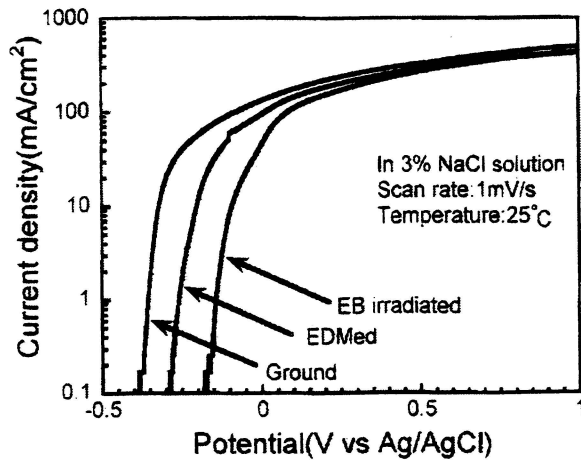


図 13 アノード分極電解電流曲線

そこで電子ビーム照射面の耐食性の定量的な評価を行った。測定には電気化学測定システムを用いた。参照電極を銀/塩化銀電極、対向電極を白金とし、ポテンシostatにより 1mV/s の電圧掃引速度のもとで、自然電位から最高 1V まで電圧を変化させ、アノード分極電流の測定を行った。電解液に 3%NaCl 水溶液を用いている。測定試料は、放電加工面、それに電子ビーム照射を行った面、ならびに研削面である。図 13 にその結果を示す。図より明らかなように、同じ電位で比較すると、電子ビーム照射面が電解電流密度の値が最も小さく、次いで放電加工面、研削面の順となっている。すなわち、本大面積電子ビーム照射により平滑化とともに耐食性も大幅に向上させることができることが明らかとなった。このような特徴は金型の精度維持、保管にとって大きな利点となる。

3・8 金型への適用例

図 14 および図 15 は金型サンプルに対して大面積パルス電子ビーム照射を行った場合の照射前後の写真である。前者においては照射条件をエネルギー密度 $E_d=7.3\text{J}/\text{cm}^2$ 、照射回数 $N=30$ 回とし、ワーク材質は SKD61 である。後者では、照射回数 50 回とした。ワーク材質は NAK80 である。いずれにおいても照射後表面粗さは $2\sim 3\mu\text{m}$ 以下に減少していた。

4. あとがき

以上のように、ここで紹介した大面積パルス電子ビーム照射は金型の手磨きレス仕上げおよび表面改質の可能性をもっていることが明らかとなった。今後、実用化に向け検討を行っていくとともに、他分野への適用の可能性も含めて展開していく予定である。

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-2003014) のもとで行われました。ここに深く感謝いたします。

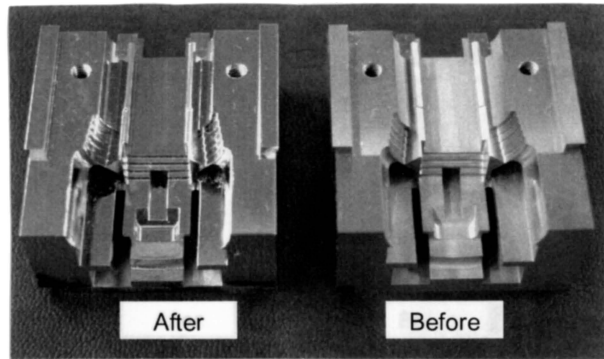


図 14 電子ビーム照射金型サンプル 1

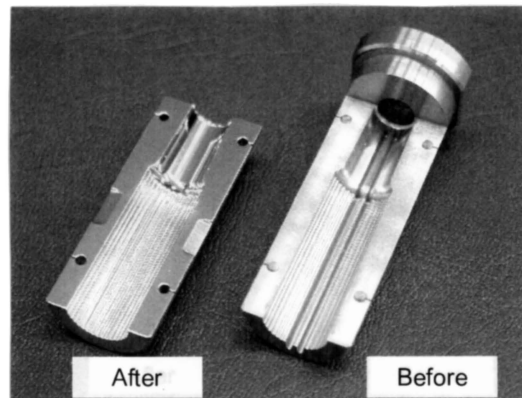


図 15 電子ビーム照射金型サンプル 2

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, Vol.29, No.4, pp449-455, (2005).
- 6) 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) 117-122.
- 7) 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) 49-56.