



A. Okada

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

岡田 晃*

1. はじめに

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。本研究で使用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。

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金型の表面仕上げについて検討を行った。また加工法では、電子ビーム照射面に母材組織と異なる薄い再凝固層が形成されるため、その表面特性を向上できる可能性がある。金型寿命に関連すると考えられる耐食性や撥水性などの表面特性についても評価を行った。

2. 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。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(5~15)×10⁻²Pa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

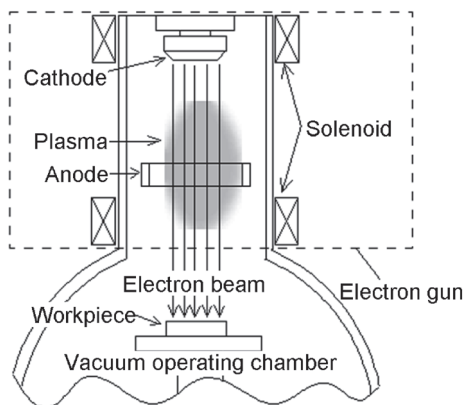


図1 大面積電子ビーム照射装置

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(アノードプラズマ)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、アノード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。

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

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溶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。

図2は、大面積電子ビームのエネルギー密度分布を示

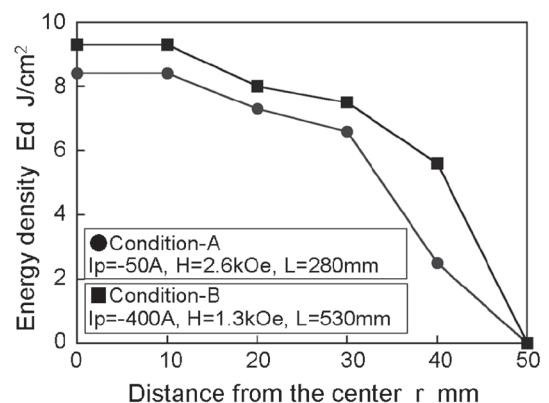


図2 大面積電子ビームにおけるエネルギー密度分布

*岡山大学大学院自然科学研究科 准教授

す。カソードの直径は100mmであるためビームの直径もほぼ100mmとなっている。図より明らかなように、いずれの電子ビーム発生条件の場合にも中心のエネルギー密度が最も高く、中心からの距離が増加するとともに減少することが分かる。しかしながら、半径30mmまでは、中心部の80%以上あり半径30mm以内ではほぼ均一であると見なすことができる。

表1 電子ビーム照射条件

| | | |
|---------------------------|-------------------|----------|
| Energy density Ed | J/cm ² | 1.4-10.7 |
| Acceleration voltage V | kV | 30 |
| Number of irradiation N | shots | 1-50 |
| Pulse duration tp | μ s | 2-3 |
| Pulse frequency Fp | Hz | 0.2 |
| Beam diameter Db | mm | 60 |

表1に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の繰り返し数で照射する。照射試料は、金型材として広く利用されるSKD11であり、照射前の放電加工面の表面粗さは約6 μ mRzとなっている。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. 表面の平滑化

図3はエネルギー密度4.2J/cm²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。また、表面粗さの変化を図4に示す。この場合、1回の照射で溶融の跡が顕著に見られ、数回の照射で平滑がかなり進行していることが分かる。ただし、照射回数が10回以上になると照射面の様子はほとんど変化しない。このとき表面粗さもほとんど変化しないことを確認している。

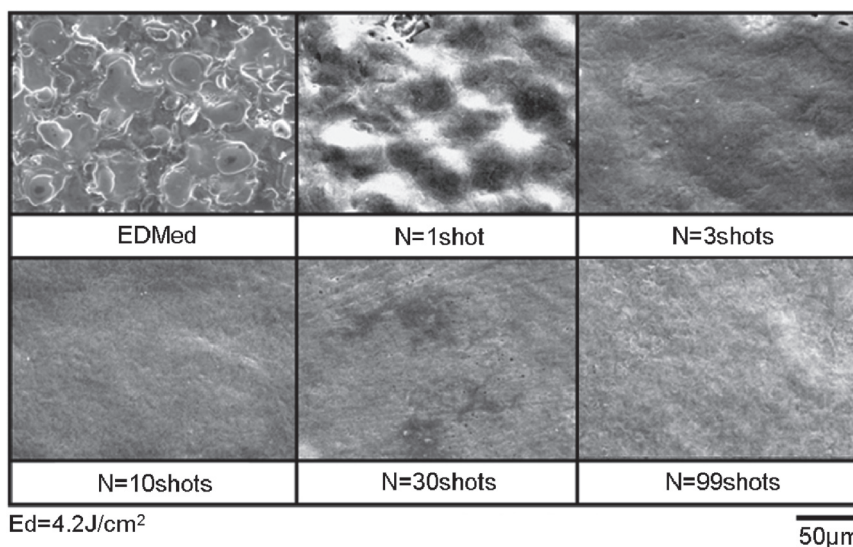


図3 照射回数による大面積電子ビーム照射面の変化

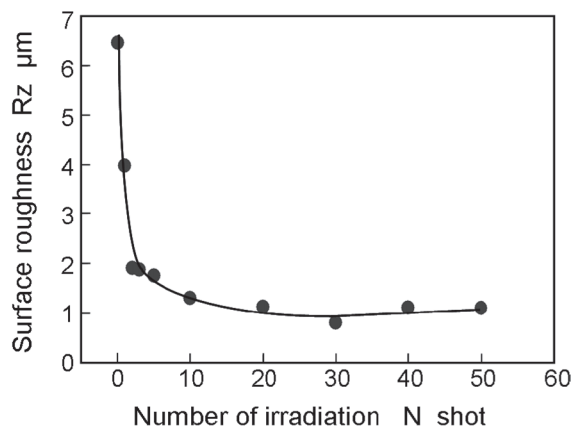


図4 照射回数による表面粗さの変化

次に、図5は、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/cm²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/cm²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とがわかる。図6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1～4J/cm²においては、エネルギー密度の増加とともに減少し、6～7J/cm²において約0.7 μ 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。

以上の結果から、最適な電子ビーム照射条件においては、照射時間わずか数分で直径60mmの大面积を一括して表面粗さ1 μ mRz以下の鏡面に仕上げることができることが明らかとなった。

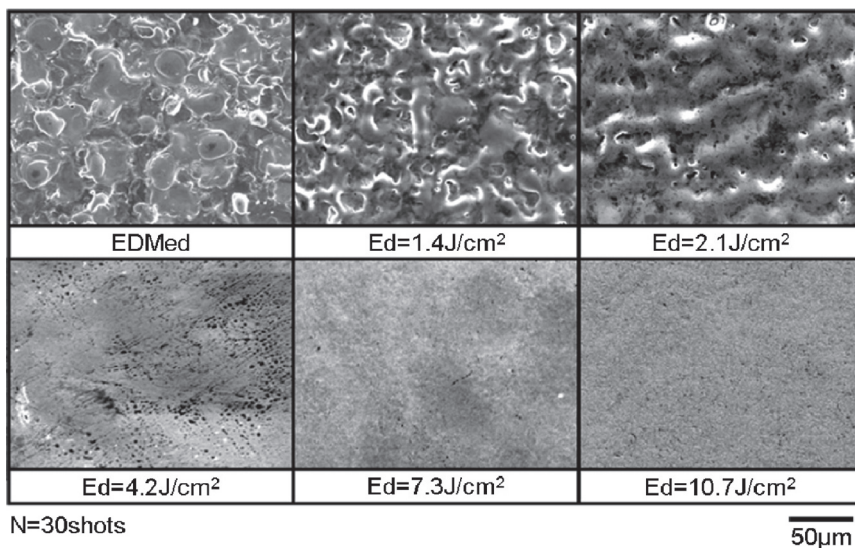


図5 ビームのエネルギー密度による大面積電子ビーム照射面の違い

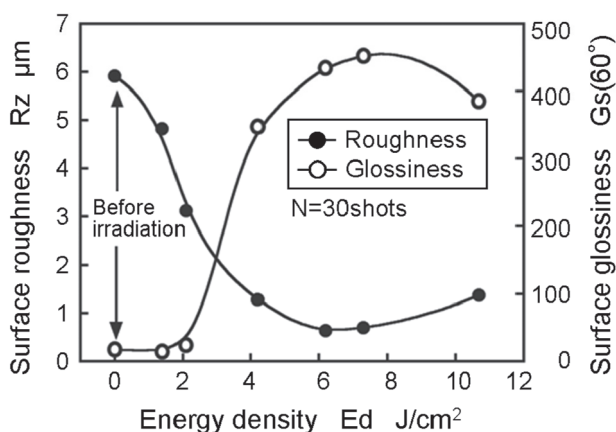


図6 エネルギー密度による表面粗さと光沢度の変化

4. 表面平滑化メカニズム

照射断面の観察を行い、本加工法における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ほど薄い。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2～3µs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。

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1µm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。

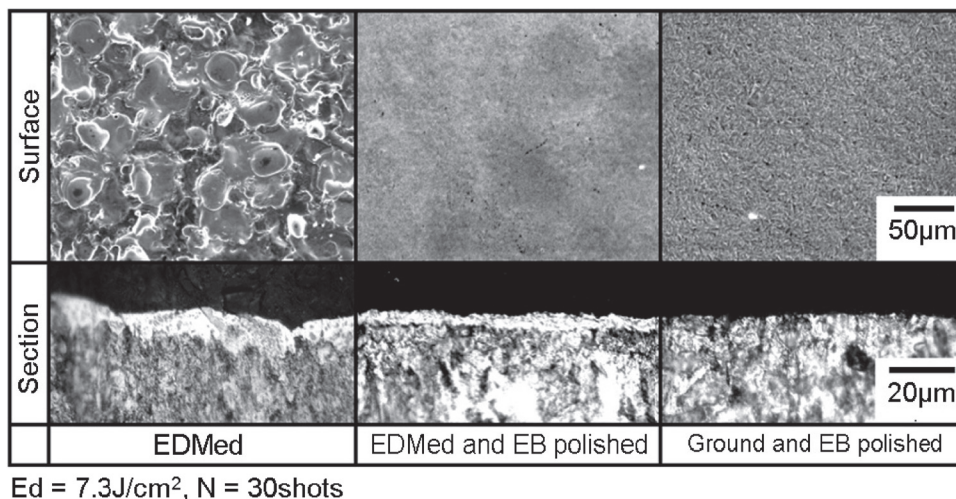


図7 断面観察結果

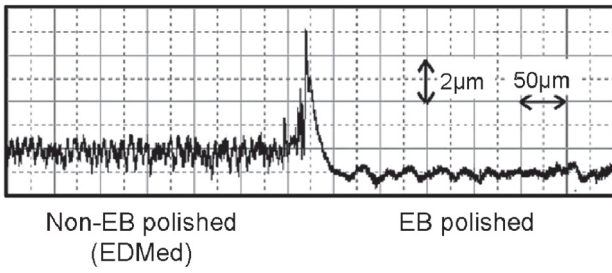


図8 表面除去厚さ

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。

5. 傾斜面の平滑化特性

これまで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ために照射面の傾斜角 θ を変化させて照射後の表面粗さを計測した。図9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 $E_{d0} = 7.3 \text{ J/cm}^2$, $N = 30 \text{ shots}$ とした。

図10に結果を示す。図中破線で示す曲線は図5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

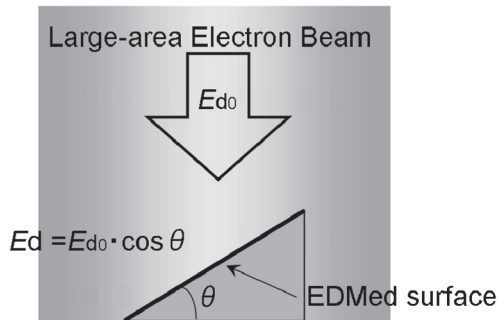


図9 傾斜面への大面積電子ビーム照射

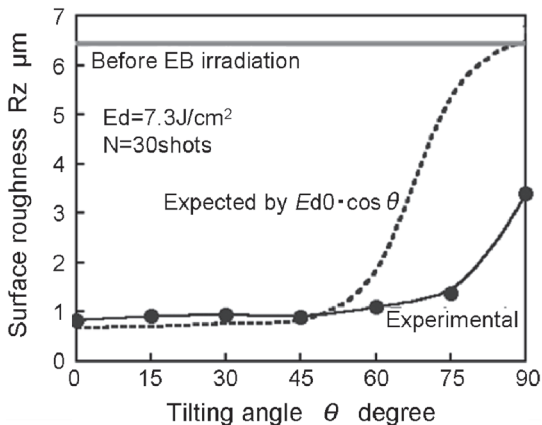


図10 傾斜面にビーム照射後の加工面粗さ

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° までほぼ $1 \mu \text{ mRz}$ の値が得られた。さらに、 90° の場合に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。

6. 耐食性の向上

図11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、研削面には至るところに錆が発生しており、またもと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。

そこで、電気化学測定システムを用いて電子ビーム照射面の耐食性の定量的な評価を行った。参照電極を銀/塩化銀電極、対向電極を白金とし、ポテンショスタットにより 1 mV/s の電圧掃引速度のもとで、自然電位から最高 1 V 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 $3\% \text{ NaCl}$ 水溶液を用いている。測定試料は、SKD11 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12にその結果を示す。

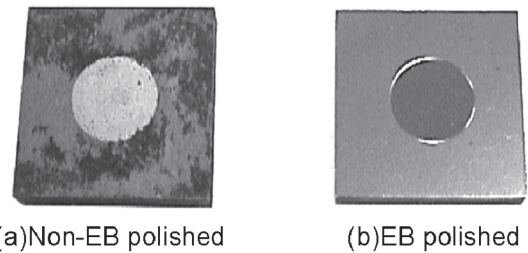


図11 大気中に1年放置した電子ビーム照射サンプル

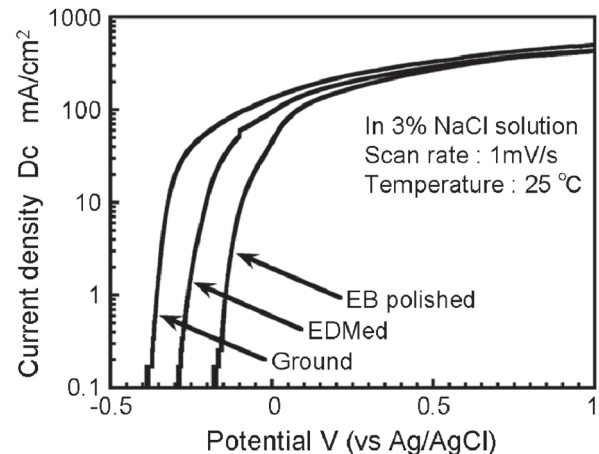


図12 アノード分極電解電流密度

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。また撥水性も向上することを明らかにしている。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。

7. 表面の組織変化

大面積電子ビーム照射により表面組織・構造が変化していることが予測され、それが前述の耐食性の向上をもたらしたと考えられる。そこで電子ビーム照射面の観察・分析を行った。TEMによる最表面の断面観察結果を図13に示す。写真中表面に見られる白い層はFIBによる試料断面出しの際に表面保護用に蒸着したカーボン層であり、この層の下側がEB照射面となっている。断面写真を比較すると、大面積電子ビーム照射を行うことにより結晶粒が微細化していることが確認できる。

また、図14は表面から約6nmの点でのEDX分析結果である。照射前の結果と比較すると、照射後の試料ではCrとOのピークが少し高くなっていることが確認できる。このことから、大面積電子ビーム照射を行うことにより、試料表面では耐食性の高いCr、あるいはCr酸化物の割合が増加しているといえる。

以上のことから大面積電子ビーム照射されたSKD11表面では、CrおよびCr酸化物の増加、さらに結晶の微細化

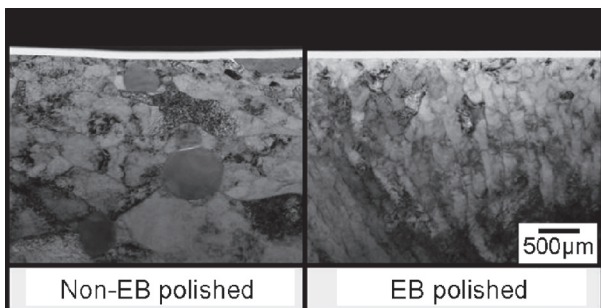


図13 EB照射前後の表面のTEM観察像

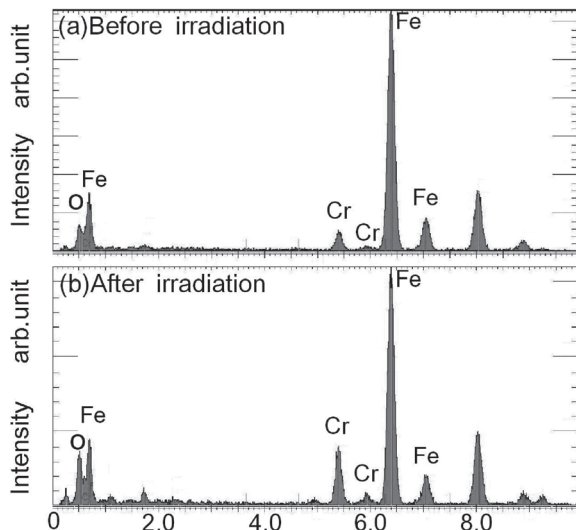


図14 EB照射前後の表面のEDX分析結果

が起こり、それが耐食性を向上させるものと考えられる。

8. 金型への適用例

図15および図16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。また、図17に示すサンプルはサイズが $20\times 50\text{mm}$ で表面の高低差7mm、山のピッチ27mmの超硬合金に対して大面積電子ビーム照射を行った例である。近年は放電加工でも特殊な放電条件のもとで金型の鏡面仕上げが一部可能となっているが、超硬合金に対しては、未だそのような加工は実現できていない。超硬合金の金型としての需要が高まる中で、本大面積電子ビーム照射による表面仕上げが大いに期待できる。

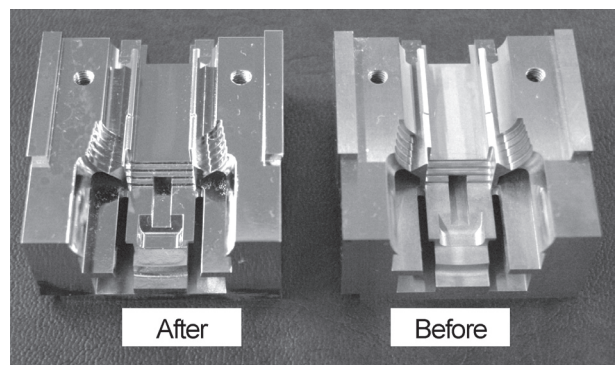


図15 電子ビーム照射金型サンプル1

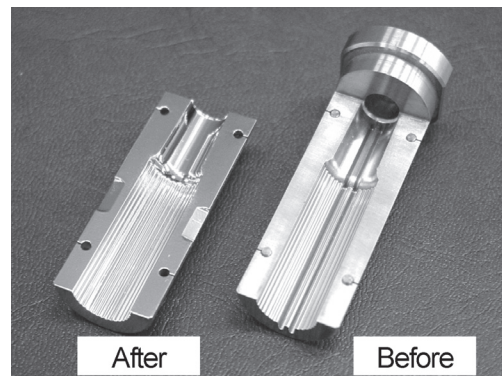


図16 電子ビーム照射金型サンプル2

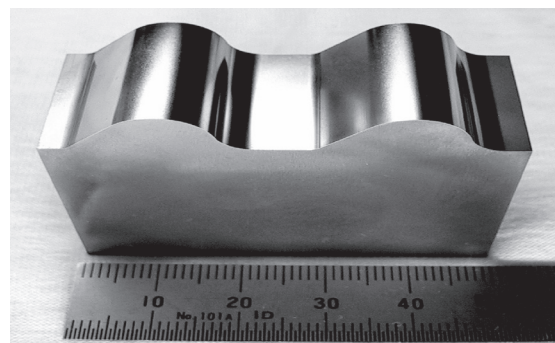


図17 電子ビーム照射金型サンプル3

さらに、図 18 に示すサンプルは、130 × 190mm の大きいサイズの SKD11 金型に対しての加工例である。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、ビームを走査しながら照射を行った。ビームの境界やオーバーラップによる形跡は全く見られず、前面が均一に光沢を帯びていることが分かる。

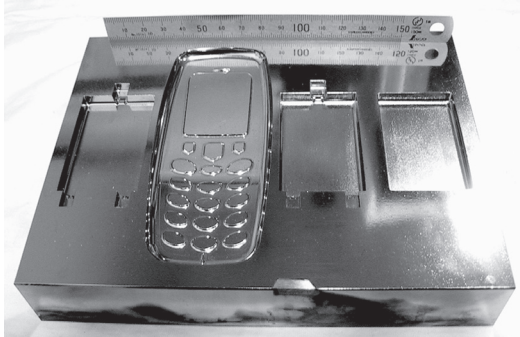


図 18 電子ビーム照射金型サンプル 4

9. 結論

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し、表面の平滑化に加え表面改質を同時に行なう高能率表面処理法を確立するために、照射条件と平滑化特性の相関、平滑化メカニズムの解明、照射面の組織変化、撥水性や耐食性などの表面特性の評価、傾斜面の平滑化等について体系的に検討を行った。

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 大面積電子ビームのエネルギー密度が大きいほうが平滑化の効果が高い。また照射回数の増加とともに照射面の粗さは減少する。
- (2) 大面積電子ビーム照射面にはごく薄い再凝固層が形成され、結晶粒の小さい組織へと変化する。
- (3) 大面積電子ビーム照射によって撥水性、耐食性が向上する。すなわち、金型の表面特性として必要とされる耐食性や撥水性の改善を表面の平滑化と同時に行えるため、有用な表面処理法であることが示された。
- (4) 傾斜面に対して大面積電子ビーム照射を行った場合、試料表面の形状に倣ってある程度均一なエネルギー密度で照射されるため、試料の傾きなどの調整

なく、大面積を一括して均一に平滑化できる。

- (5) 大面積電子ビーム照射による表面除去量は、一回の照射での除去量は数十 nm レベルであり、大面積が均一に除去される。したがって金型の表面形状精度が悪化することなく、表面処理が行える。

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) のもとで行なわれました。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) 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) 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) 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, (2005) 449-455.
- 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.
- 8) Y.Uno, A.Okada, K.Uemura, P.Raharjo, S.Sano, Y.Zhanbo and S.Mishima : A New Polishing Method of Metal Mold with Large-area Electron Beam Irradiation, Materials Processing Technology No.187-188(2007) 77-80.