



A. Okada

EB ポリッシングによる 超高能率金型表面仕上げ技術の確立

岡田 晃*

1. はじめに

製造業を支える金型を用いた成形と金型製造技術においては、アジア新興諸国との差別化のためにより高精度な金型が要求され、かつ革新的な金型製造技術が必要となっている。従来、金型の加工は、切削加工、あるいは放電加工によって形状加工がなされ、その後の表面仕上げ加工は一般に手磨きで行われている。一部、単純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。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、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、高速高密度微小穴あけ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 Explosive Electron Emission 現象を利用し、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⁾させることが可能であり、我々はそれを利用した大面積電子ビーム照射法による金型の仕上げ法 (EB ポリッシング) を提唱している²⁾。

これまでに、表面平滑化効果についての研究を行い、**図 1**に示すように、わずか数分で有効径 60 mm 以内の広い加工面全面を一括して 6 μ mRz から 1 μ mRz 以下に減少することができることを明らかにしている。また**図 2**に示すような三次元形状を有する工作物に対しても、ある程度均一なエネルギー密度で電子ビームが照射されるため、一括して表面仕上げを行うことができ、革新的な高能率表面仕上げプロセスを確立できる可能性を見出した²⁾⁵⁾。

しかしながら、これまで主に鉄鋼系金型材に対し表面仕上げの検討を行ってきたが、金型材料の種類によっては照射面に上に直径数 10~数 100 μ m、深さは 1 μ m 以下の微小な凹み (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りその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。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。

一方、**図 3**に示すように、電子ビーム照射面には薄い再

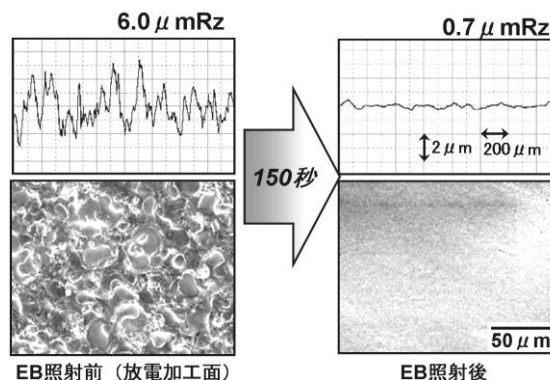
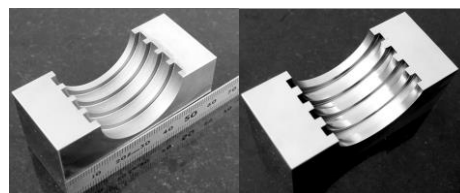


図 1 EB ポリッシングによる高能率表面平滑化



(a) ボトルネック金型



(b) 半球形状

図 2 EB ポリッシング例

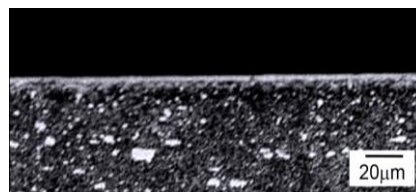


図 3 EB ポリッシング断面

凝固層が形成され母材と異なる組織となっていることから、種々の表面改質効果が発現するものと期待でき、高能率表面平滑化と同時に、新たな表面機能を付与できる表面改質法の可能性を有する。

そこで、本研究では EB ポリッシングの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

* 岡山大学大学院自然科学研究科 教授

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. また, 表面に形成される再凝固層の組織について詳細な考察を行うとともに, 撥水性, 耐食性等の表面改質効果についても検討を行った.

2. EB ポリッシング

図4に大面積電子ビーム照射装置を模式的に示す^{1),6)}. 電子ビームは通常真空状態で発生させ, 使用されるが, この装置においては, 予め 10^{-2} Pa 程度の Ar ガスをチャンパー内に混入しておく. 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, 陰極から爆発的に放出された電子が高い電界によって加速される. 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. さらに, ビームの照射を短パルス状とすることによって, 試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る. 本装置においては, ほぼ均一な強度分布の有効径 60mm の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.

3. クレータ生成メカニズム

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 ($E_d=9\text{J}/\text{cm}^2$, $N=20\text{shots}$) で照射を行った場合のクレータ発生が顕著の箇所の表面写真である. 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, 材料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

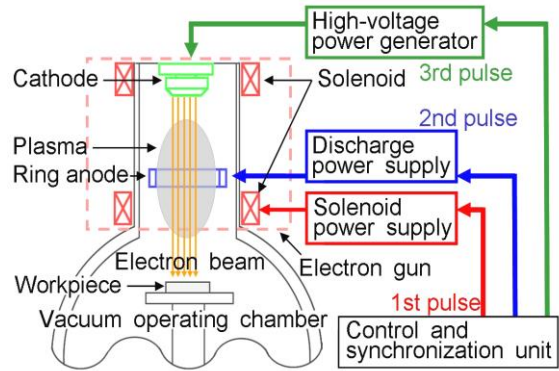
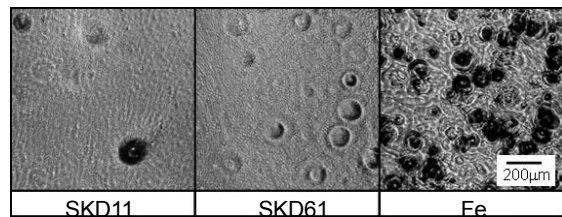


図4 大面積電子ビーム照射装置

表1 EBポリッシング条件

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



$E_d=9\text{J}/\text{cm}^2$, $N=20\text{shots}$

図5 EBポリッシング面に発生するクレータ

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. これらの結果から, EBポリッシング面に観察されるクレータは発生, 成長, および消滅を繰り返すことが明らかとなった.

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, すなわちクレータ発生密度を評価した. 表2に工作物として用いた純金属の主な熱物性値を示す. そして, 図7に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

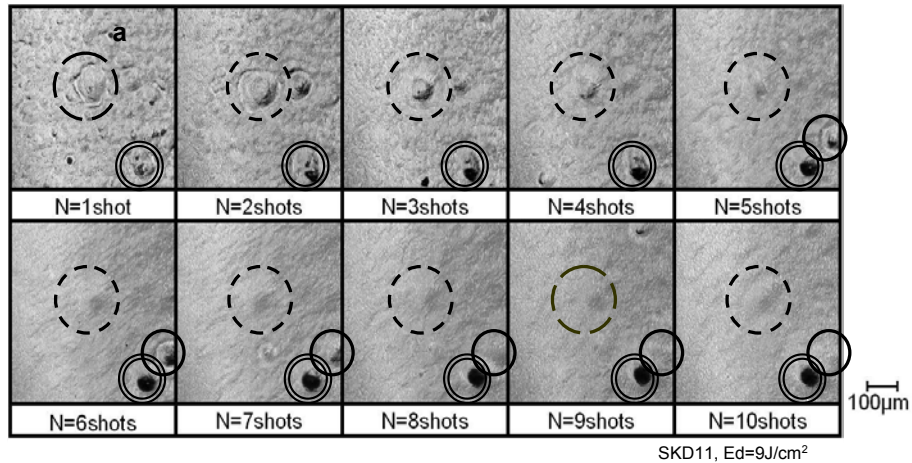


図6 大面積電子ビーム照射に伴うクレータ変化

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

で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 ポリッシング時に工作物表面で熔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熔融・蒸発した場合、あるいは熔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と考えられる。

次に鉄鋼系金型材料数種に対して、表面のクレータ発生を詳細に観察したところ、工作物の圧延方向に連続してクレータが発生する様子が確認できた。特に非金属介在物として MnS や AlO₂ 等の酸化物を含む鋼材でクレータ発生数が多いことがわかった。S は沸点が低く、EB ポリッシングの熱加工による平滑化機構を考慮すると、その部分が優先的に蒸発すると考えられる。また、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。

4. クレータの抑制

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 介在物の含有量のみ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8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。

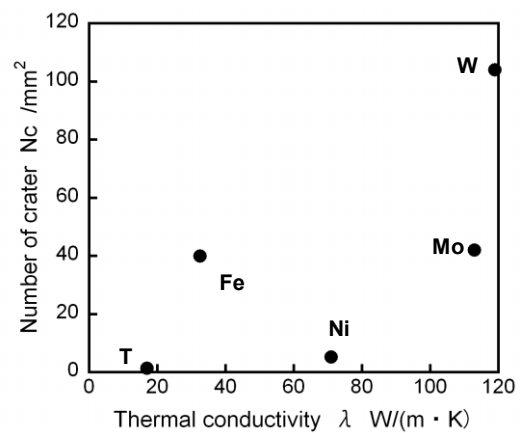


図7 単位面積あたりのクレータ数

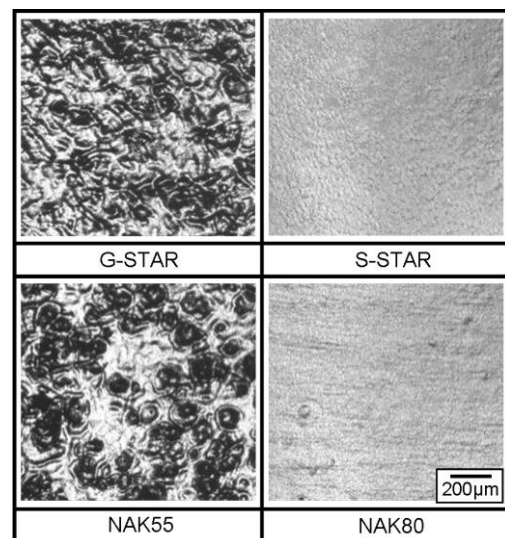


図8 MnS 含有量によるクレータ発生の違い

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 $Ed=9J/cm^2$ 、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、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。

いっぽう、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たため、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。照射条件は電子ビームのエネルギー密度 $E_d=6$, および $9\text{J}/\text{cm}^2$, 照射回数 $N=20\text{shots}$ である。図 9 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。

5. 再凝固層性状

表面に形成される再凝固層の組織について詳細な考察を行った。図 10 は電子ビームのエネルギー密度 E_d , および照射回数 N を変化させた場合の合金工具鋼 SKD11 に形成される再凝固層厚さの変化を示す。各条件で照射を行った後に工作物を切断・研磨し、断面積の顕微鏡観察から再凝固層厚さを計測した。図より照射回数の増加に対する再凝固層厚さの増加は小さい。一回の照射後の休止時間に工作物表面は十分に冷却し、工作物に対する熱の蓄積がほとんどないといえる。一方、電子ビームのエネルギー密度の増加とともに再凝固層厚さが顕著に増加することがわかる。エネルギー密度の増加とともに、表面からの電子の貫入深さが大きくなるとともに、表面から熔融に達する高温領域も増大するためと考えられる。したがって、電子ビームのエネルギー密度によって形成される再凝固層厚さを制御できるといえる。

図 11 は EB ポリッシング前後の SKD11 表面の EDX 分析結果である。EB ポリッシング前と比較すると、EB ポリッシング面では、Cr と O のピークが高くなっていることが確認できる。SKD11 はクロム炭化物が分散した組織となっているが、電子ビーム照射による表面の熔融と再凝固により、表面では耐食性の高い Cr, あるいはその化合物の割合が平均的に増加しているのではないかと考えられる。

そこで、更に詳細に検討するために、再凝固層断面の TEM 観察を行った。その結果を図 12 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、この層の下側が電子ビーム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、照射前の組織とは異なる微細な結晶粒が確認できる。熱伝導解析による考察では、照射終了後に工作物表面は急冷されると示唆されたため、アモルファス化が期待されたが、結晶性

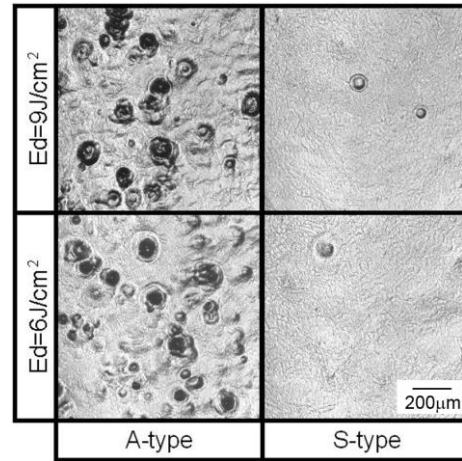


図 9 精錬法によるクレータ発生の違い

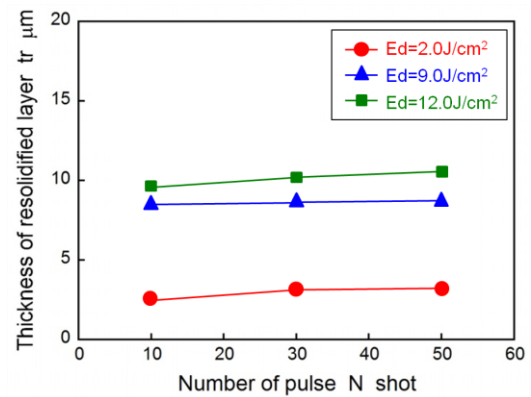


図 10 再凝固層厚さの変化

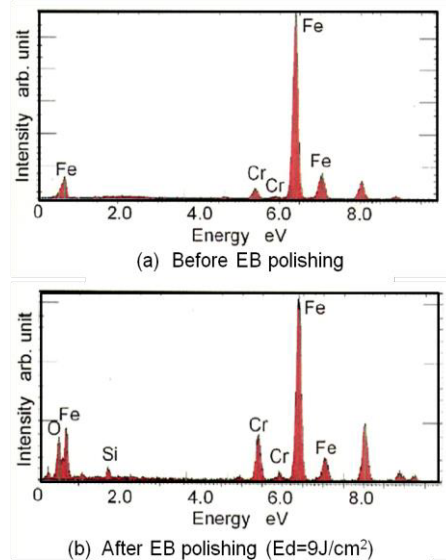


図 11 EB ポリッシング前後の工作物表面の EDX スペクトル

は存在することがわかる。

以上の結果から大面積電子ビーム照射された SKD11 表面では、緻密な組織の再凝固層が形成され、その層では Cr 酸化物や Cr 化合物が均一に分布しているものと考えられる。

6. 表面改質効果

EB ポリッシング面では、上記のように、母材と組織の異なる薄い再凝固層が表面に形成されることから、様々な表面改質効果が発現すると考えられる。そこで特に射出成形金型への応用を想定した場合に必要なとされる耐食性や離型性について評価を行った。

図13は耐食性を定量的に評価するために用いた電気化学測定システムを模式的に示す。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1 mV/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、アノード分極電流密度の測定を行った。電解液には3%NaCl水溶液を用いている。測定試料は、SKD11研削面、および各照射条件でEBポリッシングを行った面である。

図14にその結果を示す。図より明らかなように、電解電流が流れ始め腐食が開始する自然電位はEBポリッシング前の研削面が小さく、腐食しやすいことがわかる。また、同じ電位で比較すると、EBポリッシング面が電解電流密度の値が最も小さく、研削面は常に大きい。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向上できることが明らかである。さらに、電子ビーム照射回数が多いほど表面の耐食性が向上することもわかる。電子ビームのエネルギー密度が大きいほど耐食性が大きくなることを確認しており、再凝固層厚さの増加と相関があると考えられる。耐食性向上は、樹脂の射出成型時に発生する腐食性ガスや離型剤に対する耐食、金型の品質維持、保管にとって大きな利点となる。

次にEBポリッシングの表面状態を評価するために、表面自由エネルギーを反映する水の接触角を測定した。その結果を図15に示す。研削面、手磨き研磨面と比較すると、EBポリッシング面の接触角は、いずれの電子ビーム照射条件においても高くなることがわかる。また、照射回数の増加とともに接触角は高くなる傾向がある。したがって適切な電子ビーム照射条件により、90°以上に向上させることができ、撥水面を得ることができる。

これら撥水性の向上は表面での再凝固層形成に影響されていると考えられる。すなわち、前述のようにEBポリッシング表面ではCr酸化物等が均一に分布することによって表面自由エネルギーが減少したものと考えられる。そこで、純鉄、純CrとSKD11研磨面およびそのEBポリッシング面の接触角を比較した。結果を図16に示す。図に示すように、純クロム表面では接触角が大きいが、表面でのクロムの増加に伴い接触角が大きくなるのがわかる。しかしながら、SKD11のEBポリッシング面の接触角は純クロムの場合よりも大きく、Cassie-Baxterの定理⁷⁾に従って表面のクロム含有量だけで接触角が決定しているわけではないことがわかる。表面粗さも同等であることから、これは前述の再凝固層のTEM観察で確認されたように、母材と異なる微細な結晶粒組織も表面自由エネルギーの低下に関係していると考えられる。

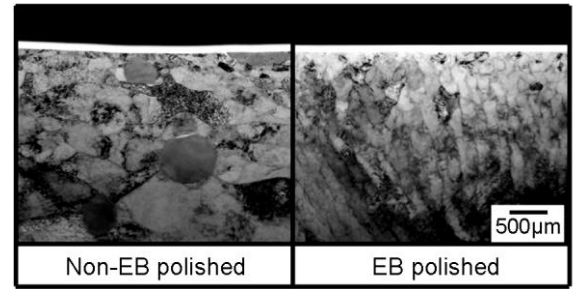


図12 EBポリッシング断面のTEM観察像

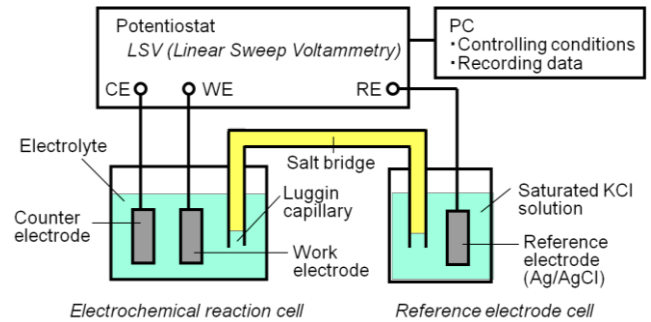


図13 電気化学測定システム

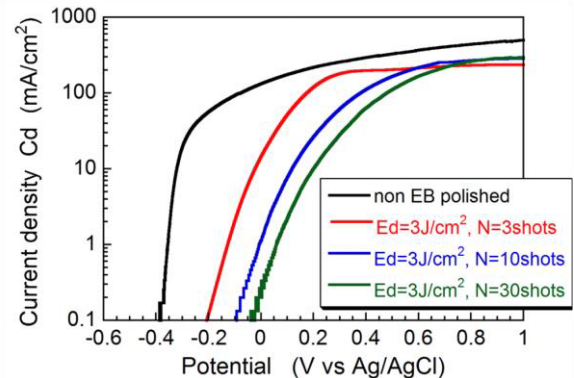


図14 アノード分極電流密度曲線

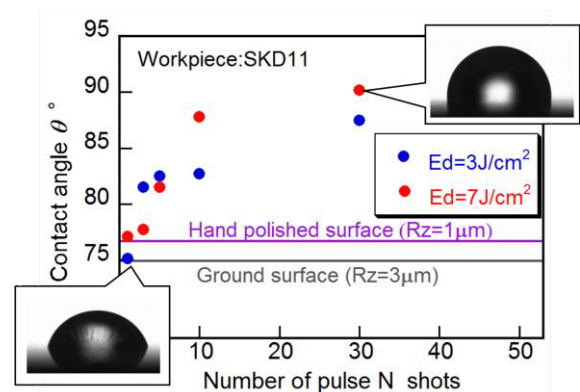


図15 電子ビーム照射条件による接触角の変化

これまで金型表面仕上げへの応用を想定し検討を行ってきた。射出成形金型において必要な表面機能の一つとして成形樹脂と金型の型離れ、いわゆる良好な離型性が求められる。そこで成形樹脂の離型性を評価した。ただし、特定形状の金型の場合その形状が離型性を大きく左右するこ

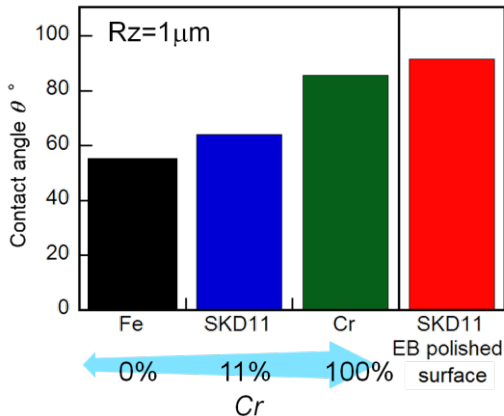


図 16 クロム成分による接触角の変化

とから、本研究では金型加工面と成形樹脂との接着力を比較することで離型性を評価することとした⁸⁾。試料の EB ポリッシング面と成形樹脂との接着界面に垂直方向の引張り荷重を加え、それらが剥離するときの最大荷重を離型力として測定した。図 17 は離型性試験の概略を示す。まず、ヒータ上に試料を固定し、治具金型をセットする。樹脂を充填した後、装置の温度を一定に保ちながら圧縮荷重を負荷した状態で一定時間保持し、樹脂を硬化させる。その後、治具金型ごと成形樹脂を引張り、樹脂と試料表面の剥離荷重を測定する。成形樹脂には熱硬化性エポキシ樹脂を使用した。

図 18 に離型力の測定結果を示す。いずれの EB ポリッシング面においても、研削面や手磨き研磨面と比較すると成形樹脂の離型力が半分程度に減少することがわかる。すなわち、EB ポリッシングによって金型表面と成形樹脂との離型性が向上することが明らかとなった。

7. 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とその抑制について実験的検討を行った。また、EB ポリッシング面の表面特性についても考察を行った。得られた結論は以下の通りである。

- (1) EB ポリッシングによって加工面に生じる微小なクレータは発生、成長、消滅を繰り返す。
- (2) 材料中に含まれる非金属介物や不純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。
- (3) 非金属介在物や不純物を含まない鉄鋼系金型材ではクレータの発生を抑制することができる。
- (4) EB ポリッシングによって SKD11 表面では母材と異なる緻密な組織の再凝固層が形成され、その層では Cr 化合物が均一に分布している。
- (5) EB ポリッシングによって SKD11 表面の耐食性、撥水性、離型性が向上する。

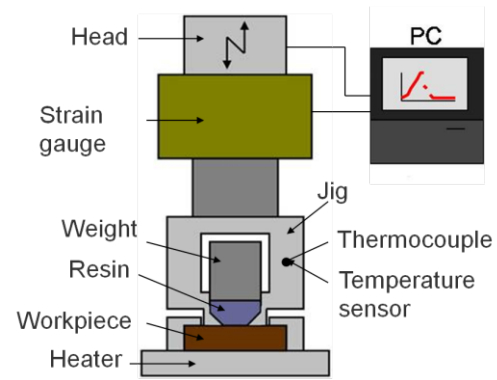


図 17 金型表面と成形樹脂の接着力測定方法

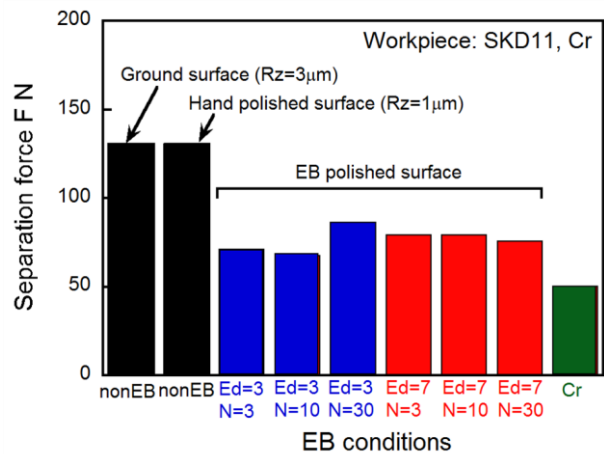


図 18 成形樹脂接着力の違い

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の一般研究開発助成により実施されました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) G.A.Mesyats, Explosive Electron Emission, URO-Press, (1998).
- 2) A.Okada et.al., Precision Engineering, 29-4 (2005), pp.449-455.
- 3) A.Okada et al., Materials Processing Technology, 149, 1-3 (2004) 506-511.
- 4) A. Okada et al., CIRP Annals, 57, 1 (2008) 223-226.
- 5) 北田良二ら, 精密工学会誌, 76, 12 (2010) 1393-1397.
- 6) D.I.Proskurovsky, et.al., Surface and Coating Technology, 96-1 (1997), pp.117-122.
- 7) A.B.D.Cassie et al., Tans. Faraday Society, 40, (1944) 546-551.
- 8) H.Hioki et al, Proc. of the 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, JSME (2009) 815-818.