

平成23年3月31日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360069

研究課題名(和文) 大面積短パルス電子ビームによる金型の手磨きレス仕上げと表面改質に関する研究

研究課題名(英文) Study on Surface Finishing and Surface Modification of Metal Mold by Large-area Short-pulse Electron Beam

研究代表者

宇野 義幸 (UNO YOSHIYUKI)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：20029341

研究成果の概要(和文)：大面積短パルス電子ビーム照射によって鉄鋼系金型材料の表面仕上げと表面改質を同時に行う技術の確立することを目的とする。そのため、電子ビーム照射条件が表面の組織変化、表面特性に及ぼす影響を体系的に検討した。TEM観察やEDX分析の結果、照射表面には母材組織と異なる緻密な組織の薄い再凝固層が形成されることが判明した。また組織変化により、表面の撥水性や耐食性が向上すること、さらに照射条件によってそれらが変化することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop a new process for surface finishing and surface modification of metal mold by large-area short-pulse EB irradiation. Effects of EB conditions on the surface structure and the surface characteristics were experimentally discussed. TEM observation and EDX analysis clarified that a thin resolidified layer with the different micro structure from the matrix was formed on the surface. The water repellency and the resistance to corrosion could be improved by large-area short-pulse EB irradiation and also they could be controlled by the EB conditions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	15,400,000	4,620,000	20,020,000

研究分野：特殊加工学

科研費の分科・細目：生産工学・加工学

キーワード：電子ビーム，金型，表面改質，撥水性，耐食性

## 1. 研究開始当初の背景

従来、金型の加工は、多軸のマシニングセンタ、あるいは複雑な微細形状の場合には放電加工により形状加工がなされ、その後、表面粗さの低減、表面欠陥層の除去のために最終的には手磨き仕上げが行われる。この手磨き工程は熟練者の技能に頼るところが多く、またかなりの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。

我々は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ており、これまでに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が実現できることを明らかにしている。また、照射最表面には母材組織とは構造の異なる再凝固層が形成され、耐食性などの表面特性が変化する現象を把握している。従って表面に形成される再凝固層の厚さや構造と照射条件の相関を明らかにし、また表面特性、特に金型の長寿命化に影響すると考えられる撥水性、耐食性、耐摩耗性等との相関を明らかにし制御できれば、平滑化と同時に表面改質を行う革新的金型仕上げプロセスを確立できるという着想に至った。

## 2. 研究の目的

本研究では面積短パルス電子ビーム照射によって、金型の平滑化と同時に表面改質を行う新しい技術を確立することを目的とする。すなわちまず、面積電子ビーム照射によって形成される表面の組織・構造を各種分析によって明らかにし、次に、撥水性、耐食性などの表面特性を評価する。そして、照射条件によるそれらの制御の可能性を明らかにする。さらに、材質の違いによるクレータ発生状況を調査し、発生メカニズムと抑制法を検討する。

## 3. 研究の方法

- (1)面積電子ビーム照射によって形成される表面の組織・構造を各種分析によって解明する。
- (2)金型の寿命に影響する、硬度、撥水性、離型性、耐食性などの表面特性評価と電子ビーム照射条件との相関を解明し、照射条件による制御の可能性を明らかにする。
- (3)表面平滑化と同時に表面改質を行うためのビーム照射条件の最適化を行う。
- (4)材質の違いによるクレータ発生状況を調査し、その発生メカニズムを解明する。
- (5)クレータの抑制法を検討し、その効果を検証する。

## 4. 研究成果

### (1)照射面の組織・構造

面積短パルス電子ビーム照射による表面性状の変化を解明するために、FE-TEMを用いて観察を行った。その結果を図1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。照射前後を比較すると、面積電子ビーム照射を行うことにより組織が変化していることが分かる。極表面の熔融後に急速に冷却されることによって結晶粒の小さい柱状組織が形成されたと考えられる。

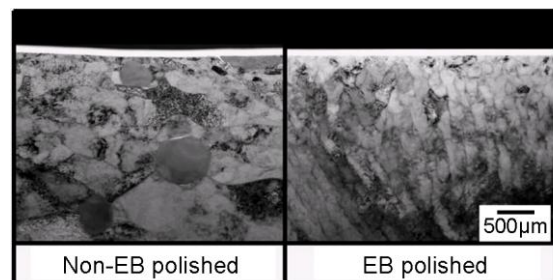


図1 EB照射前後の表面のTEM観察像

また、図2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のピークが高くなっていることが確認できる。SKD11には、ある程度の大きさのCr炭化物分散しており、これが電子ビーム照射によって表面で均一に再分布されると考えられる。

以上のことから大面積電子ビーム照射されたSKD11表面では結晶が微細化し、またCr成分が均一に分布することが判明した。

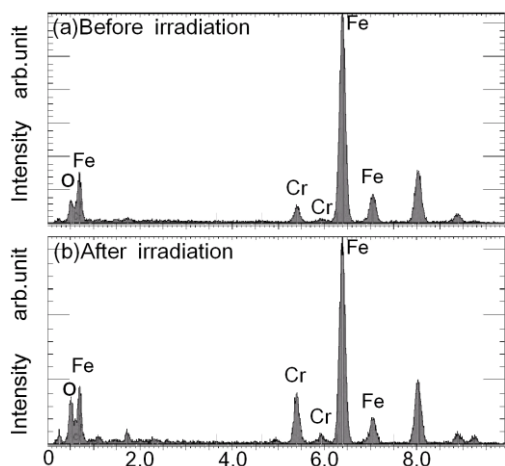


図2 電子ビーム照射表面EDX分析結果

さらに、異なるビームのエネルギー密度や照射回数の条件でも照射表面の組織変化はほぼ同様であった。また、Cr成分は図3に示すように、エネルギー密度や照射回数の増加に伴い増加する傾向にあった。またビーム

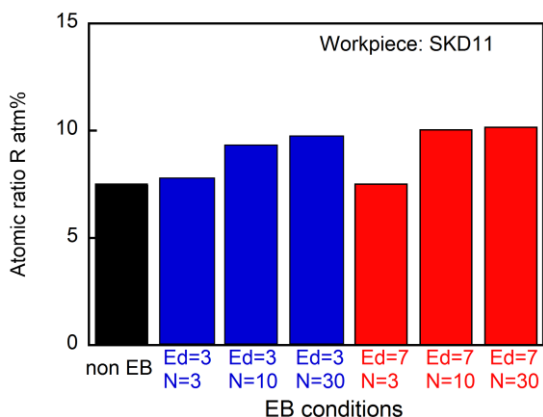


図3 XpsによるCr成分の定量分析結果

のエネルギー密度の増加に伴って再凝固層厚さは増加することを確認した。

## (2)表面特性評価と照射条件との相関

焼入れしたSKD11に対するエネルギー密度7J/cm<sup>2</sup>の場合の硬度分布の測定結果を図4に示す。照射表面は500Hv程度まで硬度は低下するが、照射面から約40μmまでで母材の硬度に回復する。大面積短パルス電子ビーム照射を行うと表面近傍が高温に保持され、焼きなまされると考えられる。

次に、耐摩耗性を摩擦摩耗試験機を用いて未照射面と比較した。図5、および図6は摩擦係数および試験後の摩耗痕深さを示す。図より、摩擦係数、摩耗量に殆ど差異なく、電子ビームに照射に耐摩耗性の変化は認められなかった。

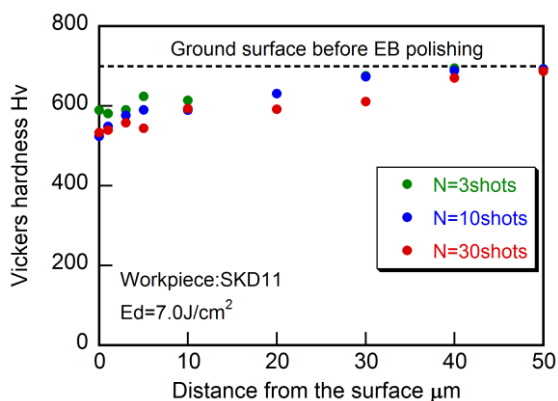


図4 硬度分布

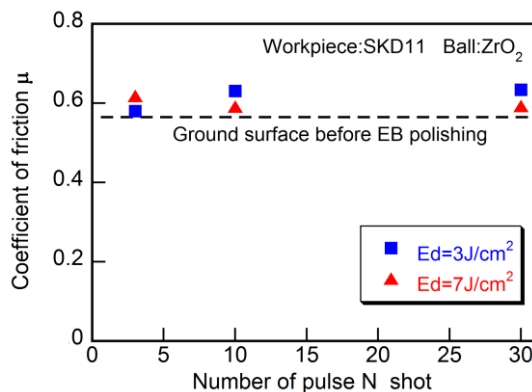


図5 摩擦係数の比較

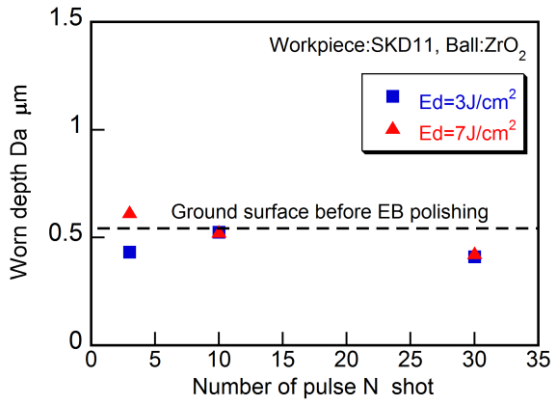


図6 摩耗痕深さの違い

次に撥水性を評価するために純水滴の接触角を測定した。その結果を図7に示す。比較ために、照射前の研削加工面と手磨き面の測定結果も示している。また、図中の上部の破線は、接触角が90°の値を示している。図より、すべての電子ビーム照射条件で未照射の試料よりも電子ビーム照射面のほうが優れた接触角を得られることが分かる。また、接触角は電子ビームのエネルギー密度ではほとんど変化しないが、照射回数の増加とともに高くなることがわかる。この結果から大面積電子ビームを照射することにより、接触角が向上し、最適な条件下では接触角が90°以上の撥水的な面を得られることが明らかとなった。また照射条件によって撥水性をある程度制御できることも分かった。

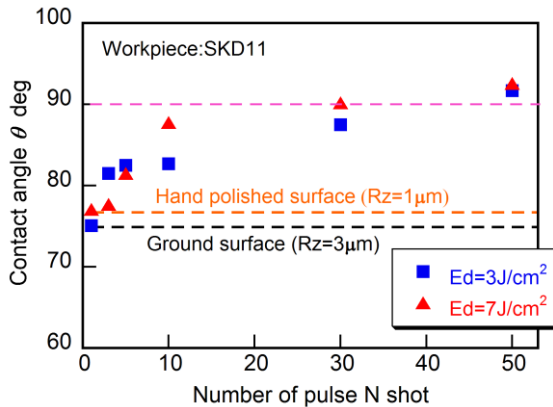


図7 接触角の変化

続いて照射面の耐食性を評価した。図8および図9は、エネルギー密度をそれぞれ3, 7J/cm²に固定し、照射回数を変化させたときのアノード分極電流密度曲線を示す。図から明らかなように、いずれの条件においても、電子ビーム未照射面より照射面の方が自然電位は高く、同電位で比較すると電解電流密度は小さい。また、照射条件の違いによる比較を行うといずれ条件でも、照射回数の増加、およびエネルギー密度の増加にともない耐食性が向上することが明らかである。このことから、SKD11に大面積電子ビームを照射することにより耐食性を向上させることが可能であることが明らかである。また照射条件による耐食性の変化は、大面積短パルス電子ビーム照射によって、結晶粒が小さくなること、表面に耐食性の高いCrが増加、そして

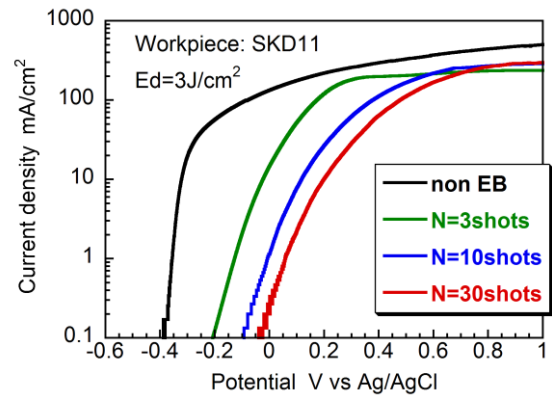


図8 アノード分極電流密度(Ed=3J/cm²)

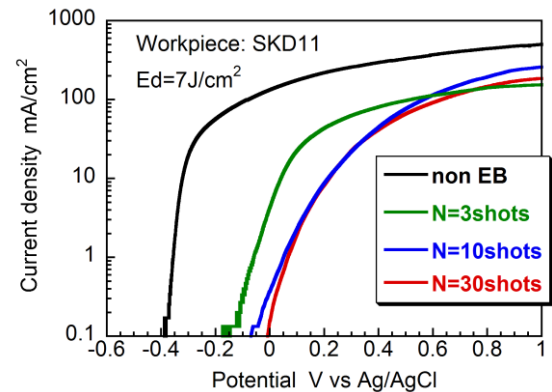


図9 アノード分極電流密度(Ed=7J/cm²)

再凝固層の厚みが増加することとよく対応している。

さらに、成形樹脂との離型性の基礎データとして成形樹脂との接着力を測定した。引張り試験機上で熱硬化性エポキシ樹脂を硬化させ、硬化後接着面垂直方向に引張り荷重を付加し、成形樹脂が剥離するときの荷重を測定し、比較した。図 10 は、SKD11 の大面積電子ビーム照射面および SKD11, Cr の手磨き面の離型性試験の結果を示す。各照射条件につき 2 回測定を行い、その平均を示している。図より明らかなように、未照射面と比較すると大面積短パルス電子ビーム照射面の剥離荷重が半分以下に大きく低下していることがわかる。しかし照射条件による大きな違いはない。また、Cr との比較を行うと、Cr は最も剥離荷重が低く、離型性に優れていることがわかる。以上の結果から大面積電子ビーム照射により成形樹脂との剥離も容易になることが明らかとなった。

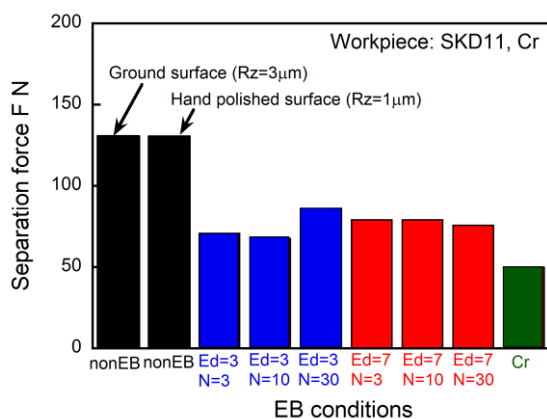


図 10 成形樹脂との剥離力の比較

### (3) クレータ発生メカニズムとその抑制法

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になると予測される。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) を用いて表面観察、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。

その結果、これらの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。

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 11 にクレータの発生状況を示す。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。

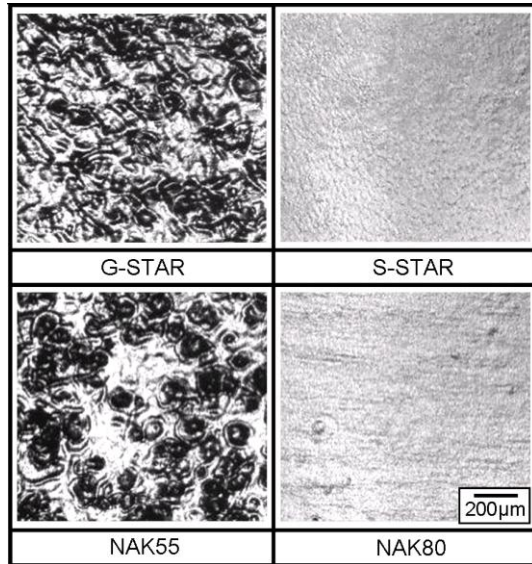


図 10 MnS がクレータ発生に及ぼす影響

また、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た。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。すなわち、大気溶解材 (A-type) と真空溶解材 (S-type) の 2 種類の SUS316 を比較した。その結果、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た。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なかった。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. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① 北田良二、岡田 晃、宇野義幸、郭 洪閣、大面積電子ビームによる超微粒子超硬合金の表面処理、精密工学会誌、査読有、Vol.76、No.12、2010、pp.1393-1397
- ② 岡田 晃、虞 戦波、近藤 温、宇野義幸、佐野定男、植村賢介、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)、精密工学会誌、査読有、Vol.74、No. 4、2008、pp.385-389

[学会発表] (計9件)

- ① 藤田智弘、大面積電子ビーム表面仕上げにおけるセラミックス・超硬合金の表面温度解析、2010年度精密工学会徳島地方学術講演会、2010.11.12、徳島県徳島市
- ② 東山泰子、EBポリッシングにおける照射面温度の熱伝導解析、2009年度精密工学会山口地方学術講演会、2009.11.21、山口県下関市
- ③ 岡田 晃、大面積電子ビーム照射による金型加工面の表面改質効果と医療器具等への応用、2009年度電気加工学会西日本支部技術講演会、2009.10.7、大阪府大阪市
- ④ 馬場晴久、EBポリッシングによる金型表面の撥水性および耐食性の向上、型技術者会議2009、2009.6.16、東京都大田区
- ⑤ 馬場晴久、大面積電子ビーム照射面の表面特性評価、2008年度精密工学会愛媛県地方学術講演会、2008.11.15、愛媛県松山市

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

宇野 義幸 (UNO YOSHIYUKI)  
岡山大学・大学院自然科学研究科・教授  
研究者番号：20029341

### (2)研究分担者

岡田 晃 (OKADA AKIRA)  
岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授  
研究者番号：60263612  
岡本 康寛 (OKAMOTO YASUHIRO)  
岡山大学・大学院自然科学研究科・助教  
研究者番号：40304331

### (3)連携研究者

該当なし