

# 金型鋼における高品質表面創成に関する研究（第3報）

高尾 清利・萩原 義人・石黒 輝雄・鈴木 大介・坂本 智明・佐野 正明

## Study on Generating High Quality Surface for Die Steel (3rd report)

Kiyotoshi TAKAO, Yoshihito HAGIHARA, Teruo ISHIGURO,  
Daisuke SUZUKI, Chiaki SAKAMOTO and Masaaki SANO

### 要 約

金型作製における電子ビーム加工，切削工具の傾斜加工の適用性を検討するため，放電加工（以下 EDM）面への電子ビーム（以下 EB）照射およびガス窒化処理（以下 GN）を施した加工面の各種評価，回転工具の傾斜加工時における切削抵抗・加工面粗さの検証を行った結果，以下のことが確認できた。

- (1) EDM面にEBを照射した場合，表面粗さは向上する。
- (2) EDM+EB面にGNを施すことで，表面応力は圧縮になる。
- (3) 断面の観察結果より，EBによる均一な溶融層の形成とGNによる窒素の拡散層の形成。
- (4) 熱疲労試験片の応力測定結果より，EDM+EB面にGNを施すことによる応力変化の抑制効果。
- (5) 傾斜切削加工における切削抵抗値は，30～80度でほぼ同様の最小値をとる。
- (6) 傾斜切削加工における表面粗さは，傾斜角30度，切込量0.5mmの条件で最小値を示す。

### 1. 緒 言

各種金型の製作において，放電加工，切削加工および研削加工は一般的に広く用いられている加工方法である。しかし，切削加工においては工具経路の影響による切削残しや加工ムラ等，また放電加工においては加工変質層の生成や引張残留応力の存在が金型の品質を損ねている。従って，現状ではこれらの加工面に対し，表面粗さの低減や加工影響層等の表面欠陥除去および残留ひずみ除去のために手磨き等の手仕上げ作業，使用用途に応じた各種表面処理が施されている。しかし，手磨きによる仕上げ工程は，熟練者の技能に頼る場合が多く，また長時間を要することからその高能率化が要求され，そのためには最初に機械加工面の高精度化が不可欠である。

本研究は，放電加工や研削加工，切削加工等各種加工方法により生成された金型鋼表面に対し，電子ビーム照射加工および鏡面ブラスト加工を施した場合の金型鋼表面への影響について，表面粗さ，残留応力の測定などの観点からの検討，また，ボールエンドミル切削加工時の加工形態による加工面品質の向上および工具の発熱・振れ・たわみなどの定量的解析を実施し，高精度加工の実現および金型への効果的な適用を図ることを目的に実施している。

第1報では，金型鋼のボールエンドミルの傾斜加工時における各種評価，切削加工面へ鏡面ブラスト加工を施

した際の加工面の評価を行い，手磨き工程の短縮化へ寄与する結果を得ることができたが，工具傾斜加工時における工具傾斜角50～90度に関する検証が不十分であった<sup>1)</sup>。

また，第2報では金型作製における電子ビーム加工の適用性について検討し，加工面粗さ向上への有効性は認められたが，引張応力増大による加工面品質の低下が課題となった<sup>2)</sup>。

### 2. 電子ビーム加工面の特性

近年注目されている金型の新たな鏡面加工技術として，電子ビームによる表面改質技術がある。電子ビーム照射技術は，真空中で発生させた電子を数十kVで加速し，金属表面に照射することで溶融，再凝固により表面を鏡面化および改質する技術である。この方法を金型表面等に適用した場合，表面粗さの低減や表面欠陥の除去において効果的な処理となることが期待される。しかし，複合層となる加工表面に存在する残留応力のコントロールや加熱—冷却の熱サイクルが付加された場合，表面層の熱疲労に伴う熱的および金属学的な解明は未だ行われていない。

そこで今年度は，第2報で課題となった引張応力の低下を目的として，電子ビームを照射した放電加工面に対しガス窒化処理を施し，得られた加工面についての評価，

また、その加工試験片へ熱疲労試験を実施することで、金型としての実用性についても検討を行った。

2-1 試験片形状および実験方法

実験に用いた素材は、直径 58mm、厚さ 20mm の円筒形状をもつ SKD61 で、焼入れ-焼戻し処理により、硬さ 50HRC とした。図 1 に評価試験片、図 2 に熱疲労試験片を示すが、表 1 に示す放電加工、表 2 に示す電子ビーム加工後、ガス窒化処理を施し各試験片とした。実験に用いた形彫放電加工機は、三菱電機㈱製 V25F-G35、電子ビーム加工機は、㈱ソディック製 EB300 である。また、熱疲労試験はダイカスト操業条件を想定し、試験片の表面を加熱したブロックに接触させて加熱（570℃、160s 保持）後、水槽中へ投入し冷却（100℃、15s 保持）させる接触加熱方式にて行った。

2-2 評価方法

加工面の評価は、表面粗さ、残留応力、硬さの測定および X 線回折による分析、表面・断面観察により行った。残留応力、X 線回折の測定条件および測定箇所は前報と同様である。<sup>2)</sup>

表 1 放電加工条件

加工条件	EDM1	EDM2	EDM3	EDM4
ie (A)	8.0	5.5	3.5	2.5
te (μs)	100.0	64.0	20.0	5.4
to (μs)	32.0	20.0	20.0	5.4

表 2 電子ビーム加工条件

加工条件	EB1	EB2	EB3	EB4
熱量 (J/cm <sup>2</sup> )	3.0	7.0	10.0	7.0
照射回数	30	30	30	10

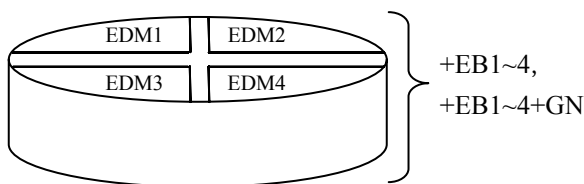


図 1 評価試験片

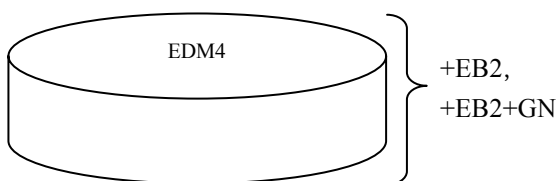


図 2 熱疲労試験片

2-3 実験結果および考察

2-3-1 表面粗さ測定

図 3 に EB 照射による表面粗さへの影響を、図 4 に GN 処理による表面粗さへの影響を示す。

図 3 より、各 EDM 面に EB を照射した場合、EB の熱量が増すごとに表面粗さが向上する傾向を示し、また、照射回数を多くすることでも表面粗さは向上するという傾向を示した。さらに、Cut 面に EB2 を照射した場合でも、表面粗さが向上する傾向を認めることができたが、EDM3 および EDM4 面に EB2 を照射した場合、さらに高い表面粗さの向上に繋がったことから、より微細な凹凸形状の EDM 面に対する電子ビームの有効性を確認することができた。

また図 4 より、各 EDM+EB 面に GN を施した場合、表面粗さの大きな変化は認められなかった。

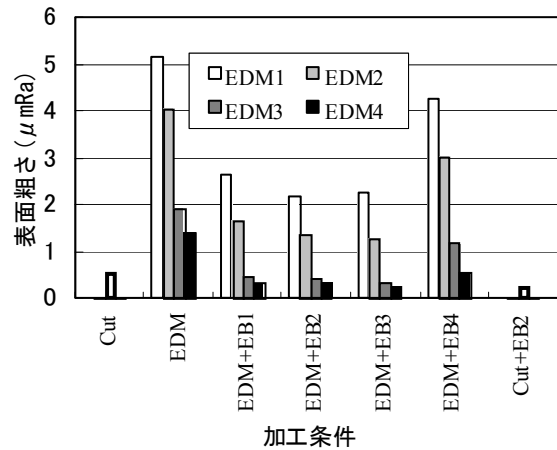


図 3 各加工面の表面粗さ

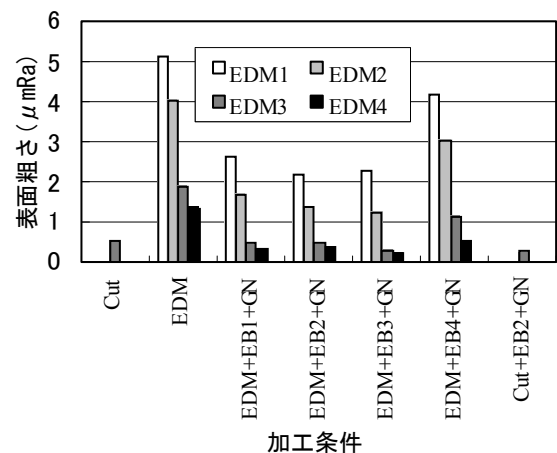


図 4 各加工面の表面粗さ

2-3-2 残留応力測定

図 5 に EB 照射による残留応力への影響と図 6 に GN 処理による残留応力への影響を示す。

図 5 より、各 EDM 面に EB1~4 を照射した場合、全

的に引張応力が増加する傾向を示した。EB の熱量および照射回数に伴う応力値の変化は認められなかったが、EB 照射による応力値増加の要因としては、照射過程における急速な加熱・冷却によるものと考えられる<sup>3)</sup>。Cut 面および EDM 面に EB を照射した場合、いずれも引張応力の増加が認められたが、数値的には Cut+EB2 面より EDM+EB 面の方が全体的に大きい値を示しており、EDM 時に生じる引張応力の残存が影響することも確認できた。

また図6より、各 EDM+EB 面に GN を施した場合、全条件において応力値が圧縮応力に変化することが認められた。これは GN により Fe 中に窒素が固溶し、圧縮応力を生じさせたものである<sup>4)</sup>。

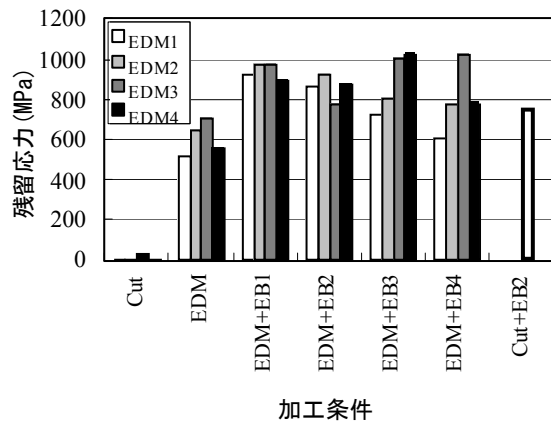


図5 各加工面の残留応力値

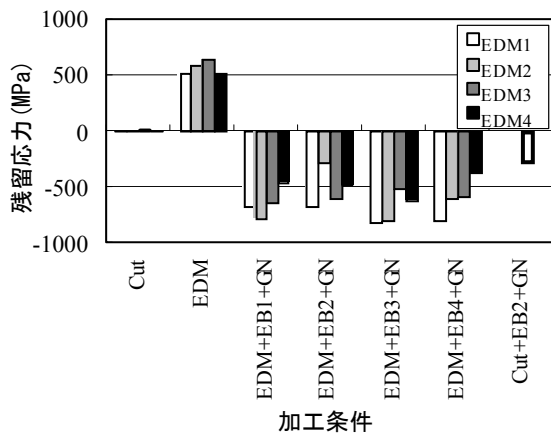


図6 各加工面の残留応力値

### 2-3-3 X線回折測定

図7に各加工面のX線回折の測定結果を示す。Cut面およびEDM面にEB2を照射した場合、 $\gamma\text{Fe}$ の生成が確認されたが、GNを施すことで $\gamma\text{Fe}$ は消失した。

### 2-3-4 各加工面の電子顕微鏡観察結果

図8に図7と同一試験片表面の電子顕微鏡観察結果を示す。Cut面およびEDM4面のいずれにおいても、EB2

を照射することで加工痕が減少し平滑な表面状態に変化することが確認できた。また、GNを施した場合、表面状態に若干変化は見られたものの、表面粗さの結果と同様、大きな凹凸の変化は認められなかった。

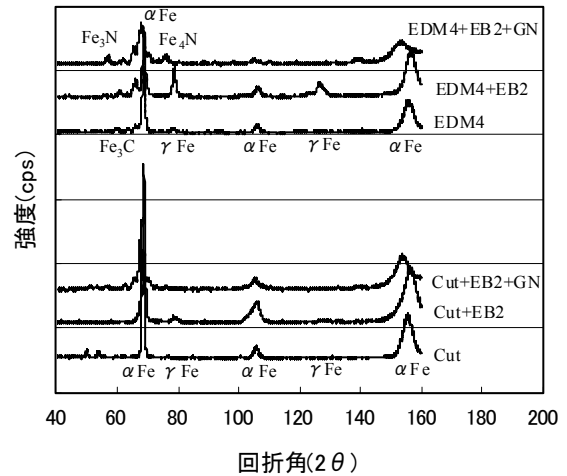


図7 各加工面のX線回折

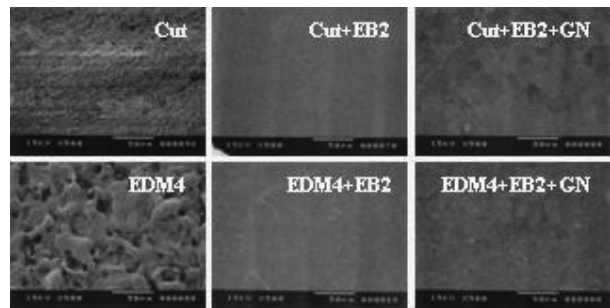


図8 各加工面の電子顕微鏡観察画像

### 2-3-5 断面観察

図9に図7と同一試験片の各加工断面の観察結果を示す。Cut面にEB2を照射した場合、EB照射に伴う3~4 $\mu\text{m}$ 程度の均一な溶融再凝固層（以下溶融層）が確認できたことから、EB2によるCut面への溶融深さは3~4 $\mu\text{m}$ 程度と推測される。また、EDM4面にEB2を照射した場合、EDMで生じた1~6 $\mu\text{m}$ の不均一な溶融層がEB照射に伴い5 $\mu\text{m}$ 程度のほぼ均一な溶融層に変化したことから、EB2によるEDM4面への溶融深さは約5 $\mu\text{m}$ 程度と推測される。この僅かな溶融深さの違いは、EDM4面の凸部が効率良く溶融されたためと考えらる。

また、Cut+EB2面、EDM4+EB2面にGNを施すことで溶融層およびその直下を含め最大で約40 $\mu\text{m}$ の窒素の拡散層（黒色部）を確認することができた。

### 2-3-6 断面硬度測定

図10に各加工断面の硬度測定結果を示す。Cut面にEB2を照射した場合、断面硬度に変化は見られなかったが、GNを施すことで表面近傍の硬度は増大した。表

面から深くなるに従い、徐々に硬度は低下するが、断面観察で確認された窒素拡散層と同じ深さの 40 $\mu\text{m}$  程度まで母材より高い硬度値を示した。また、EDM 面に EB2 を照射した場合、表面近傍の硬度が低下したが、GN を施すことで、Cut 面と同様に増大した。

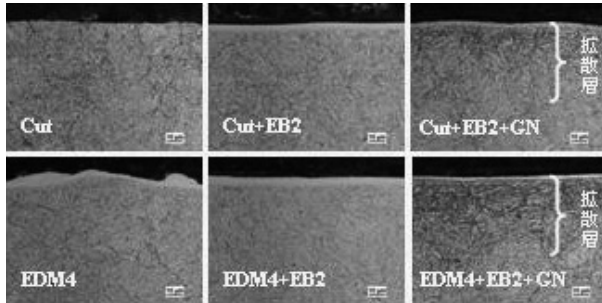


図9 各加工面の断面観察画像

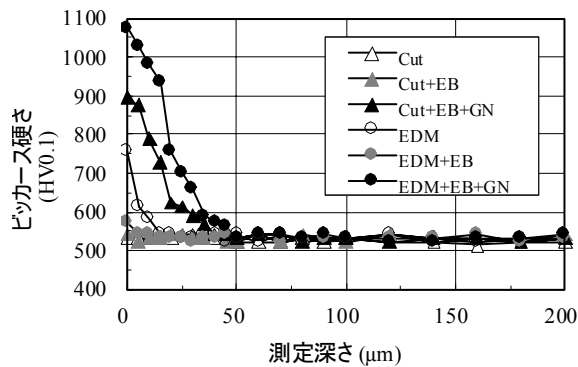


図10 各加工断面の硬度

### 2-3-7 熱疲労試験片の残留応力測定

図 11 に EDM4+EB2 および EDM4+EB2+GN の熱疲労試験片のサイクルごとの残留応力測定結果を示す。EDM4+EB2 では、試験前には 800MPa 程度の高い引張残留応力であったが、試験開始後 10 サイクルで引張応力値が大幅に低下し、50 サイクルで引張応力がほぼ解放される結果となった。初期サイクルにおける残留応力値の低下は、試験片表面に微細なクラックが発生したことによる応力値の解放によるものと考えられる。

また、EDM4+EB2+GN では、試験前には 700MPa 程度の圧縮応力であったが、50 サイクルでほぼ半減した。それ以降 500 サイクルまでは大きな応力値の変化はなかったが、5000 サイクルを超えると圧縮応力は減少し、15000 サイクルでは約 150MPa 低下した。50 サイクルまでの応力解放は熱応力に起因した塑性ひずみが主な原因と考えられるが、以降 500 サイクルにかけて応力値の変化が認められなかったのは、窒化処理に伴い生成された拡散層が熱疲労過程において応力開放を抑制することから、クラックの発生・成長を防止する効果があるためと

考えられる<sup>5)</sup>。

### 2-3-8 熱疲労試験片の X 線回折測定

図 12~13 に EDM4+EB2 および EDM4+EB2+GN の各サイクルごとにおける表面の X 線回折測定結果を示す。いずれの加工面も熱疲労試験 10 サイクル以降、徐々に Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 回折線の発生、またそのピーク強度の上昇が認められた。このことから、熱疲労サイクルの増加に伴い、試験片表面に酸化物が形成・蓄積されていくことが確認できた。

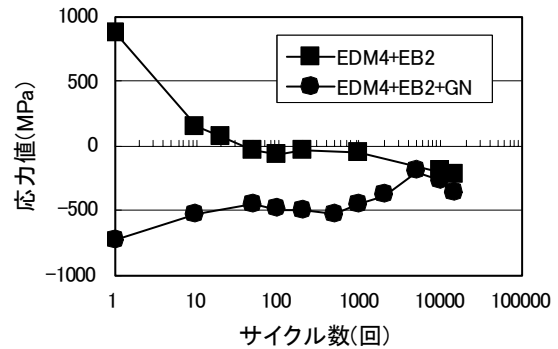


図11 熱疲労試験片の残留応力値

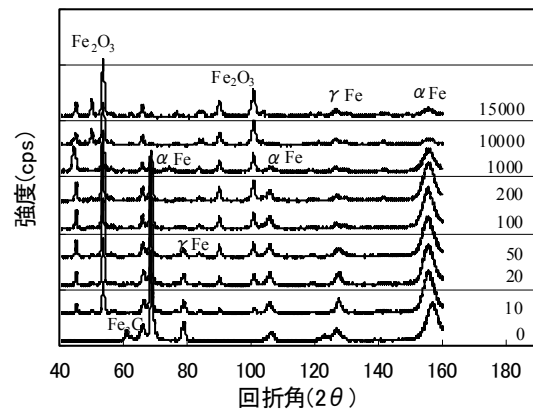


図12 EDM4+EB2のX線回折

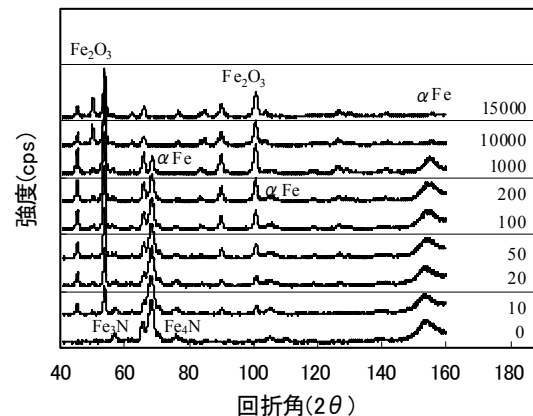


図13 EDM4+EB2+GNのX線回折

### 2-3-9 熱疲労試験片の表面観察

図 14~15 に EDM4+EB2 および EDM4+EB2+GN の各サイクルごとの SEM 観察結果を示す。EDM4+EB2 は、10 サイクルで試験片表面に筋状の大きなクラックが発生し、それ以降、サイクル数の増加に伴い表面凹凸の増大が認められた。また EDM4+EB2+GN は、初期段階において明確なクラックは認められなかったが、EDM4+EB2 と同様にサイクル数の増加に伴い、表面凹凸の増大を確認することができた。

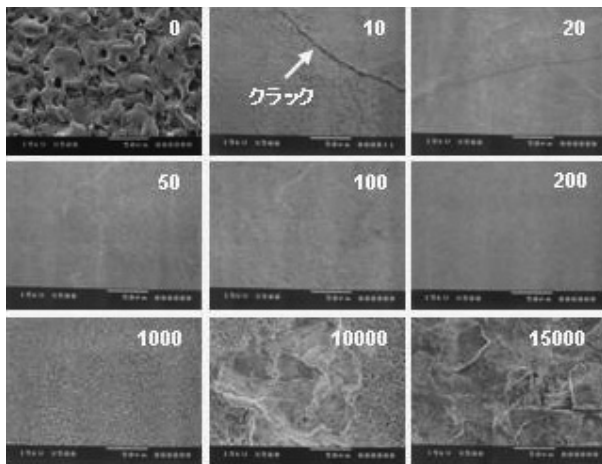


図14 熱疲労試験片 (EDM4+EB2) の観察画像

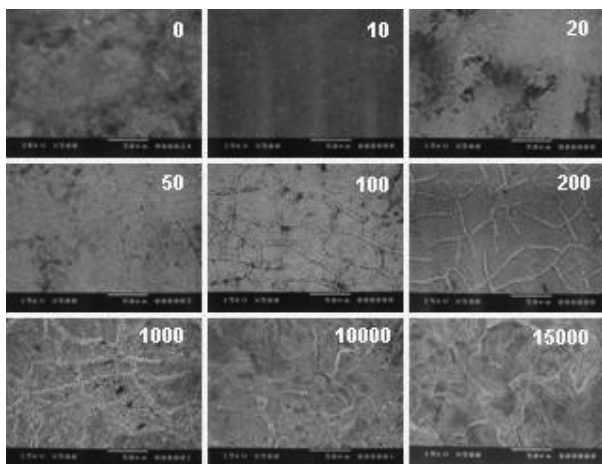


図15 熱疲労試験片 (EDM4+EB2+GN) の観察画像

### 3. 工具傾斜による加工特性について

5 軸マシニングセンタでは、5 軸を同時に制御して加工を行うことができ、任意の点に任意の角度で工具をアプローチすることができることから、ボールエンドミルによる複雑な輪郭加工等に使用されている。また、ボールエンドミルは、同一回転数において、刃先速度が中心部最先端の 0m/min から最外周における最大速度まで連続的に変化するという性質を有する工具である。したがって、一定の切り込み、工具送りで加工していても、一

刃あたりの加工面内に加工速度の異なる面が生成される。通常の加工において、最先端の切削速度 0m/min 位置近辺を使用する場合もあり、加工性が悪く加工面に大きな切削抵抗が生じ、加工面品質を損ねる原因となっている。<sup>1)</sup>

加工面品質向上（表面粗さの低減や加工影響層等の除去）の対策法として、ボールエンドミルによる傾斜加工があり、これまで多くの研究<sup>6) -10)</sup> がなされているが、多軸加工における工具傾斜時の加工特性については、まだ十分には解明されていない。

そこで、第 1 報で課題となったボールエンドミルの工具傾斜加工時における傾斜角と加工時の切削抵抗値、加工面の表面粗さとの関連について検討を行った。

#### 3-1 実験方法および評価方法

多軸加工機によるボールエンドミル傾斜加工時の工具のたわみや切削抵抗値と加工面精度との相関関係を定量的に把握するために、表 3 に示す工具および加工条件により工具傾斜加工を行った。使用した加工機は、三井精機工業(株)製立型 3 軸マシニングセンタ VU-50A で、工具傾斜角は図 16 に示すように、加工面の垂線方向と工具中心軸がなす角度とし、加工物の天面（工具傾斜角 0 度）から 90 度まで、幅 5mm の加工面を 10 度ピッチで加工した。

表 3 使用工具および切削条件

使用工具	
形状	ボールエンドミル(日立ツール製エボックTHハードボール)
工具径	R3mm
材質	超硬合金コーティッド
刃数	2枚刃
切削条件	
主軸回転数	13,000rpm
送り速度	2740mm/min
軸方向切込	0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.5mm
径方向切込	0.14mm
1刃あたり送り量	0.10mm/tooth
切削方向	ダウンカット
切削油	ミスト(ブルーベ #LB-10)

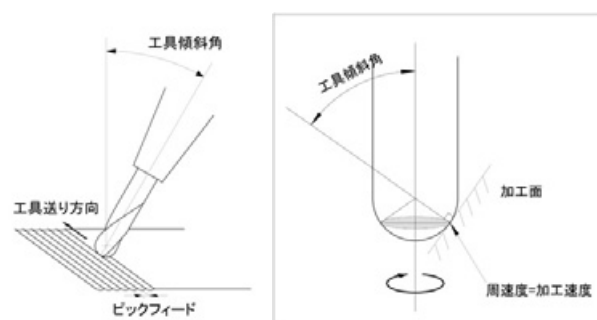


図16 工具傾斜角

R3mm ボールエンドミル刃面の切削点における周速度は、傾斜角に応じて 0~245m/min まで連続的に変化する。また、切り込み量によって、使用される刃先の範囲が変化し、刃先速度は一刃ごとの加工面内でも速度帯が異なる加工形態となる。図 17 に R3mm ボールエンドミルで切込 0.1mm の工具傾斜加工を行う際の刃先の速度帯を示す。

切削抵抗値の計測には切削動力計（日本キスラー株、9257B），加工面の粗さ測定には表面粗さ計（株小坂研究所，DSF-1000）を用いた。切削抵抗値の計測に関しては、加工物の下に切削動力計を配置し、図 18 のように、加工時に加工物に加わる水平分力と垂直分力の合力を切削抵抗値 F とした。

3-2 結果および考察

0~90 度の傾斜加工に対し、切込値 (ap) を変化させ実験した。傾斜面加工したサンプルの外観を図 19 に示す。

加工時の工具傾斜角に対する切削抵抗値 F と加工面の表面粗さ（最大高さ Rz）の相関について図 20 に示す。実験の結果、どの切込値においても、傾斜角 0 度の切削抵抗値は非常に大きく、10 度において急激に減少し、30~80 度では大きな変化は認められなかったが、80~90 度において再び増加傾向にあった。傾斜角 0 度では、工具回転中心付近による低速回転加工による摩擦、傾斜角 90 度では、工具側面の外周刃の接触幅の増大による影響で切削抵抗値が上昇したものと考えられる。

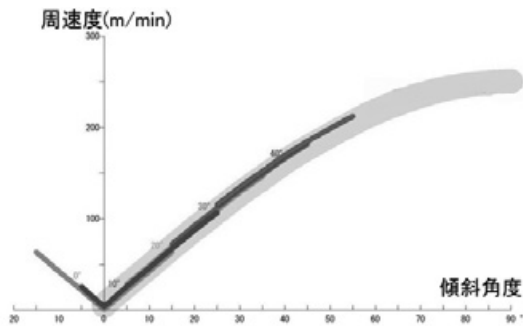


図17 R3mmボールエンドミル刃先の速度

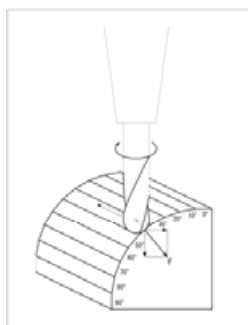


図18 切削抵抗値F

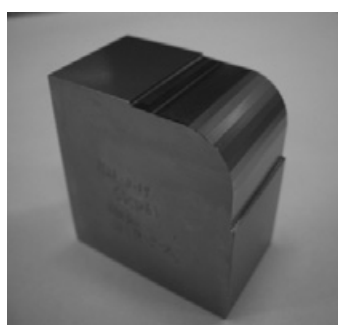


図19 加工サンプル形状

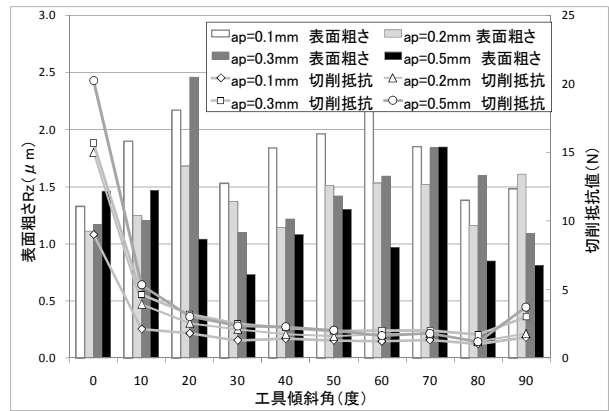
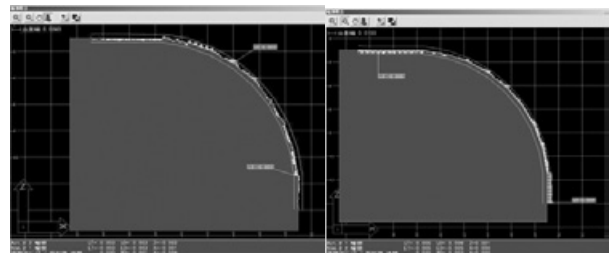


図20 工具傾斜角と加工面粗さ・切削抵抗値の相関



(a) 切込0.1mm-0.3mm (b) 切込0.1mm-0.5mm

図 21 加工物の輪郭形状比較

加工面の表面粗さは、工具傾斜角 0 度から 20 度まで角度が増すごとに大きくなるが、傾斜角 30 度、切込値 0.5mm において最小値をとり、その後角度が増すごとに再び大きくなる傾向を示した。

さらに、加工物の輪郭形状について三次元座標測定機（株ミットヨ，Crysta-Apex C7106）によるスキャニング測定を行い、切り込み 0.1mm の加工形状を基準とした場合の切り込み 0.3mm と 0.5mm の形状を比較した結果を図 21 に示す。その結果、0.3mm の場合では大きな差は認められなかったが、0.5mm の場合、0 度において 5μm 程度深く切り込まれているのに対し、90 度では 10μm 程度削り残す結果となった。

切削抵抗値と表面粗さとの相関や工具たわみの状況、加工物の輪郭形状などの結果より、工具傾斜角 30 度付近において良好な加工形態であることが分かった。

4. 結 言

金型作製における電子ビーム加工および切削工具の傾斜加工の適用性を検討するため、各種評価を行い、以下の結果が得られた。

- (1) 各 EDM 面に EB を照射した場合、大幅な表面粗さの向上を確認することができ、GN を施しても表面粗さの大きな悪化は認められなかった。
- (2) 各 EDM 面に EB を照射した場合、いずれの条件においても引張残留応力値が増加する傾向を示したが、

GN を施すことで圧縮残留応力へ変化することが確認できた。

- (3) 各加工断面の観察結果より、EB による均一な溶融層の形成と GN による窒素の拡散層の形成が確認できた。
- (4) 各加工断面の硬度測定結果より、GN による表面近傍の硬度上昇が認められた。
- (5) 熱疲労試験片の残留応力測定結果より、EDM+EB 面に GN を施すことで残留応力変化の抑制効果が認められた。
- (6) 熱疲労試験片の X 線回折および表面観察により、サイクル増加に伴い表面への酸化物の生成・蓄積が認められた。
- (7) 工具傾斜角ごとの切削抵抗値の測定結果より、30～80 度で、ほぼ同様の最小値をとることが確認できた。
- (8) 工具傾斜角ごとの加工面の表面粗さ測定結果より、30 度、切込量 0.5mm の条件における加工面の表面粗さが最も低い値を示した。
- (9) 加工面の輪郭形状測定結果から、10～80 度では、殆ど差異は認められなかった。

## 参考文献

- 1) 高尾 清利, 萩原 義人, 石黒 輝雄, 米山 陽: 金型鋼の高品質加工面創成に関する研究 (第一報), 山梨県工業技術センター研究報告, No.23, p.108 (2009)
- 2) 高尾 清利, 萩原 義人, 石黒 輝雄, 米山 陽, 佐野 正明: 金型鋼の高品質加工面創成に関する研究 (第二報), 山梨県工業技術センター研究報告, No.24, p.25 (2009)
- 3) 米谷 茂: 残留応力の発生と対策, (株)養賢堂, p.10-11 (1981)
- 4) 日原 政彦, 向山 芳世: ダイカスト金型鋼に関する研究 (第五報), 精密工学会誌, Vol.57, No. 6, p.1005 (1991)
- 5) 日原 政彦, 向山 芳世: ダイカスト金型鋼に関する研究 (第五報), 精密工学会誌, Vol. 57, No.6, p.1007 (1991)
- 6) 高津戸光雄, 古沢 利明, 高田 昇, 貴志 浩三: 傾斜最適送りによるボールエンドミル加工に関する研究, 精密工学会誌, Vol.56, No.2, p.299 (1990)
- 7) 趙 曉明, 堤 正臣, 是田 規之, 葛 東方, 陳 亮: 5 軸制御加工におけるボールエンドミルの最適傾斜角決定方法—仕上げ面粗さを基準にし

た決定方法とニューラルネットワークの応用—, 精密工学会誌, Vol. 62, No. 7, p.1019 (1996)

- 8) 田中 久隆, 小幡 文雄, 足森 雅己, 森脇 栄輔, 浅沼 拓也: ボールエンドミル加工の再生びり振動に関する研究 (第二報), 精密工学会誌, Vol. 65, No.8, p.1179 (1999)
- 9) 吉川 浩一, 水垣 善夫, 郝 明暉, 寺井 久宜: 球面のボールエンドミル加工における加工面創成機構の理論解析 (第三報), 精密工学会誌, Vol. 69, No.3, p.407 (2003)
- 10) 山田 誠, 田中 文基, 近藤 司, 岸波 建史: 5 軸 NC 工作機械による主軸傾斜曲面加工法に関する研究 (第三報), 精密工学会誌, Vol. 73, No. 5, p.563 (2007)