

# 金型鋼における高品質表面創成に関する研究

高尾 清利・萩原 義人・石黒 輝雄・米山 陽

## Study on Generating High Quality Surface for Die Steel

Kiyotoshi TAKAO, Yoshihito HAGIHARA, Teruo ISHIGURO and Akira YONEYAMA

### 要 約

金型鋼の切削加工において、ボールエンドミルによる工具傾斜加工を行い、以下のような結果を得た。また、切削加工面に対し鏡面ブラスト加工を施し、手磨き工程の短縮化に寄与する結果が得られた。

- (1) 工具傾斜加工によるボールエンドミル (R3mm) 刃面の切削速度は、0 から 245m/min まで連続的に変化するとともに、加工形態は表面粗さや残留応力値からそれぞれ異なることが分かった。
- (2) 残留応力は、傾斜角 0°が最も大きく傾斜角が大きくなるにつれ減少する。傾斜角 0°の場合には、切削速度の低い刃面が押しつぶすように加工するため、残留応力値が高くなると考えられる。また、切削動力についても同様と考えられる。
- (3) 傾斜角 0°では加工形態が複雑なため、切削面の顕微鏡観察結果では他に比べて粗く見える。また、傾斜加工時の加工面は工具送りと工具刃面形状に起因した表面粗さとなる。
- (4) 傾斜加工により作製した表面粗さ 2 $\mu$ mRz 程度のサンプルを、荒加工用及び仕上用メディアにより鏡面ブラスト加工し、荒加工で 1 $\mu$ mRz 程度、仕上加工で 0.5 $\mu$ mRz 程度の加工面となった。

### 1. 緒 言

各種金型の製作において、放電加工、切削加工及び研削加工は広く用いられる加工方法である。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。しかしながら、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、そのためには機械加工面の高精度化が不可欠である。また、最終製品として金型を製作する際には、金型の表面粗さの向上をはじめ、耐食性および離型性等の向上も必要不可欠である。

これらの対策として、ボールエンドミルによる切削加工では工具を加工面に対して傾斜させて進行させ、工具寿命の向上や加工面の高品質化を図ることについて検討がなされているが、未だ確立された技術に至っていない。また、加工時における工具の発熱・たわみ・振れ等の抑制も重要ではあるが、これらの定量的解析は充分ではない。

さらに、近年注目されている金型の新たな鏡面加工技

術として、鏡面ブラスト加工技術と電子ビームによる表面改質技術がある。鏡面ブラスト加工技術は、弾性研磨材による擦過現象によって表面を鏡面加工するものである。また、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、金属表面に大面積のまま照射し、熔融、再凝固により表面を鏡面化及び改質する技術である。複雑形状においても均一加工面が得られることから有効的な方法であり、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等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。

本研究では、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に基づく高精度加工の実現、また、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及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検討し、金型への効果的な適用を図ることを目的に実施する。

今年度は、ボールエンドミル加工において、加工時の

切削抵抗, 加工面の残留応力及び表面粗さ等から, 工具傾斜加工が加工精度に影響を及ぼす要因について解明し, 高精度加工面生成技術について検討を行う. また, 鏡面ブラスト加工技術の金型仕上げ工程への適用性について検討する.

## 2. 工具傾斜による加工

金型の加工に使用されるボールエンドミルは, 形状的に特徴のある工具であり, 刃先速度が最先端の 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性質を有する. 通常の加工では, 最先端の切削速度 0m/min 位置近辺を使用した加工が多く, 加工面品質を損ねる原因となっている.

そこで, 工具の中心軸と加工面に一定の傾斜角を与えて加工することで切削点における周速が上がることから, 工具傾斜加工による加工面の高品質化や工具寿命の向上について検討した. 図 1 に工具傾斜加工の概念図を, 図 2 に R3mm ボールエンドミルにおける工具傾斜角と刃先速度 (主軸回転数 13,000rpm の場合) の関係を示す.

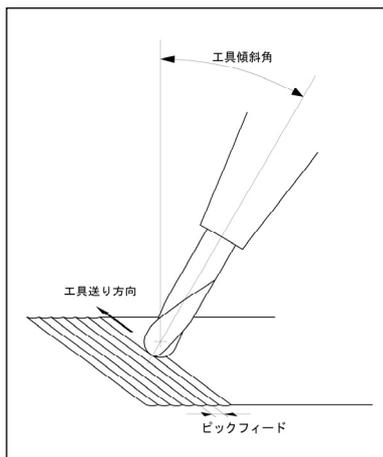


図 1 ボールエンドミル傾斜加工の概念図

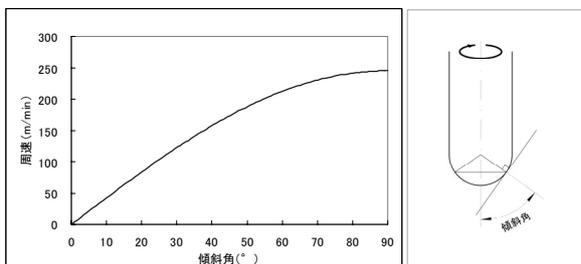


図 2 R3mm ボールエンドミルの工具傾斜角と周速度

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, 刃先速度は一刃毎の加工面内でも速度帯が生じる. 図 3 に R3mm ボールエンドミルで切り込み 0.1mm の工具傾斜加工を行う際の刃先の速度帯を示す.

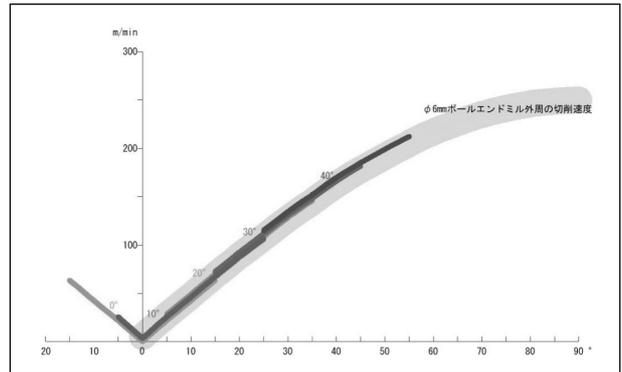


図 3 工具刃先の速度帯

また, 超硬合金工具は粉末焼結で作製されているため, 図 4 に示すように刃先にも 1~2 $\mu$ m 程度の表面粗さを持っており, 加工面の精度に影響をおよぼすと考えられる.

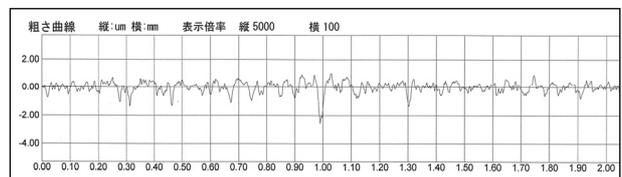


図 4 工具刃先の表面粗さ

### 2-1 工具傾斜による加工実験

ボールエンドミル傾斜加工時の加工面品質 (残留応力及び表面粗さ) や切削抵抗の相関関係を定量的に把握するために, 表 1 に示す 3 種類の代表的な金型素材 (50×50×30mm) に対し, 表 2 に示す工具及び加工条件により傾斜加工を行った. 被加工物の天面を傾斜角 0°とし, 4 端部をそれぞれ 10・20・30・40°となるよう加工した. 加工条件は, 理論表面粗さ ( $=f^2/8R$ ) が 0.8 $\mu$ mRz となる切削条件である. 使用した工具はもともと 2 枚刃であるが, 工具そのものの形状精度が加工精度に影響を与えることを避けるため, 片刃を落とし 1 枚刃とした. 使用した加工機は, 三井精機工業株式会社製 VU-50A である.

表 1 加工材種

JIS分類	名称	メーカー	硬度
SKD61	DAC	日立金属	HRC48
プリハードン鋼	NAK55	大同特殊鋼	HRC40
プリハードン鋼	STAVAX	ウツデホルム	HRC33

表 2 使用工具及び切削条件

使用工具	
形状	ボールエンドミル(日立ツール製エポック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	1枚(2枚刃のうち1枚を除去)
切削条件	
主軸回転数	13,000rpm
送り速度	1820m/min
軸方向切込	0.1mm
径方向切込	0.14mm
1刃あたり送り量	0.14mm/tooth
切削方向	アップカット・ダウンカット
切削油	ミスト(ブルーベ #LB-10)

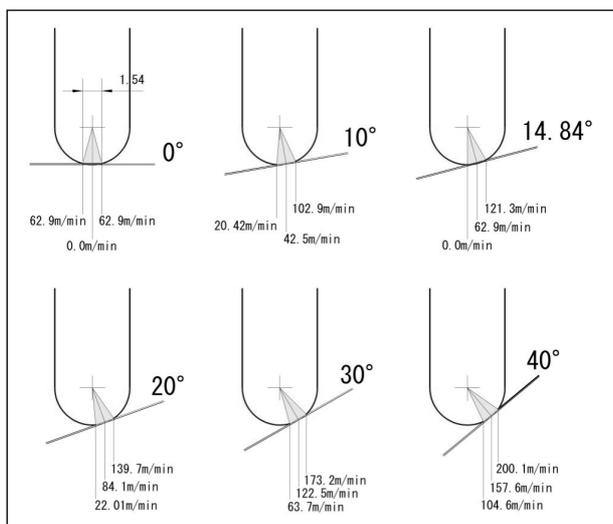


図 5 R3mm ボールエンドミル, 切込み 0.1mm 時の工具傾斜角と切削点における刃先速度

R3mm ボールエンドミル, 切込み 0.1mm 時の工具傾斜角と刃先の切削速度を図 5 に示す. 傾斜角 14.84°において, 切り込みの端部に工具最先端が位置する. 従って, これ以上の角度であれば, 加工面全体が刃先速度のある刃面で加工することができる.

### 2-2 工具傾斜加工実験結果および考察

工具傾斜加工したサンプルの外観を図 6 に, その加工面の顕微鏡観察結果を図 7 に示す. 傾斜角 0°の場合は加工形態が複雑であり, いずれの材種でも扇形のような複雑な加工面となっており, 切削面の観察結果では他に比べて粗く見える. また, 切削速度 0m/min である最下点を使った加工のため, 押しつぶすような加工面となっており, 工具への負荷が予想される.

工具傾斜角 10°~40°では, 一刃当たりの送り 0.14mm と径方向送り 0.14mm の相関関係より, きれいに揃ったディンプル形状が見られる. 傾斜角 10°でも最下点を含んだ加工であるが, 傾斜角 20°~40°の加工面に似ている.

また, 工具送り方向には, 工具刃面形状に起因する縞模様が生成される要因となるが, カスプハイトに比べ小さなものである.

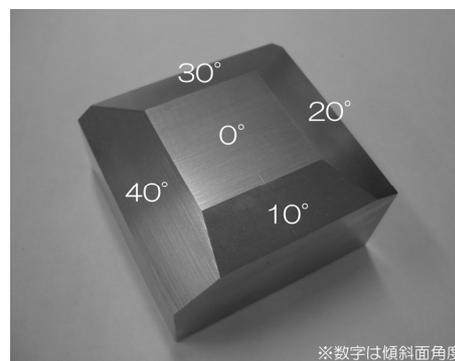


図 6 加工サンプル形状

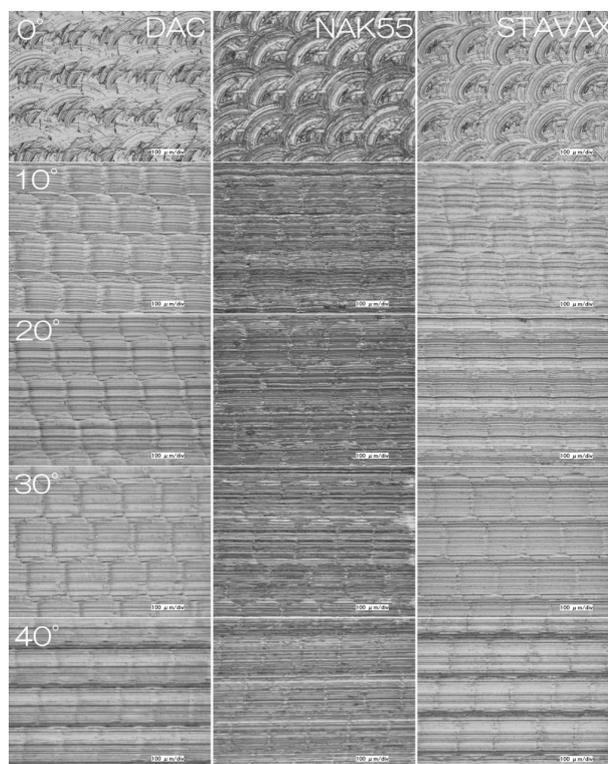


図 7 工具傾斜加工した加工面の観察

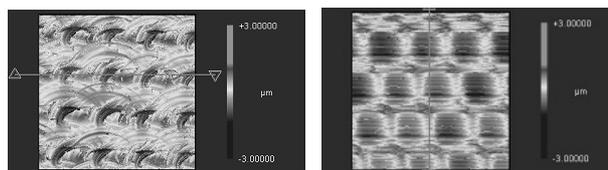


図 8 加工面の三次元表面粗さ測定例

図 8 に傾斜角 0° (左) および 30° (右) における加工面の 3 次元表面粗さ測定結果を示す. 測定機は, ZYGO 社製 NewView6300 である. 0°の場合, 部分的に深い形状を示しているが, 比較的平坦な形状である. 30°の場合は, 加工条件によるディンプル形状の生成がはっきりと

分かる。表面粗さは 0.3 $\mu$ mRa 程度で、どちらも相違ない結果となっている。

図 9 に、触針式表面粗さ計（小坂研究所製 サーフコーダ DSF-10000）による測定結果を示す。傾斜角が小さい場合、ほぼ同様な表面粗さを示しているが、40°において大きな値を示している。これは、工具の振れに起因するものと考えられ、次年度以降の工具振れ計測により検討する。

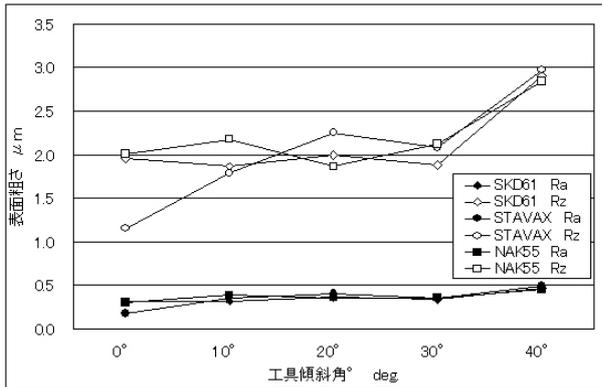


図 9 工具傾斜角と表面粗さ (Ra・Rz)

次に、切削加工面の残留応力の変化をリガク製微小部 X 線測定装置 AutoMate で調べた。図 10 に、工具傾斜角と加工面の残留応力値の関係について示す。測定条件は、表 3 のとおりである。

表 3 X 線回折による分析条件

回折角度	$\alpha$ Fe(211)
管球	Cr-K $\alpha$
測定方法	$\psi$ 一定法
管電圧	30kV
管電流	30mA
応力定数	-297MPa/°

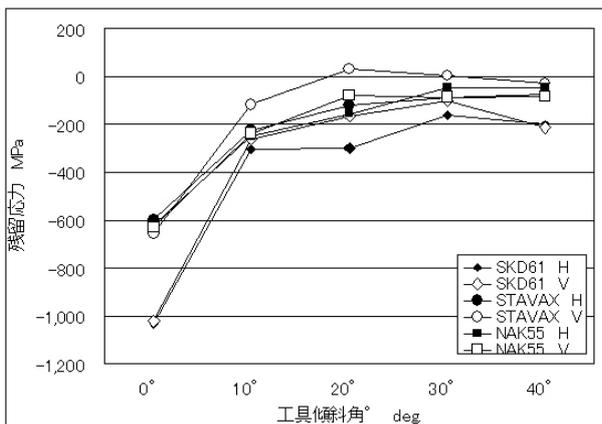


図 10 工具傾斜角と残留応力

残留応力は、傾斜角 0°が最も大きく、傾斜角が大きくなるにつれ減少する。傾斜角 0°の場合には、切削速度の低い刃面部分が押しつぶすように加工するため、残留応力が高くなると考えられる。

図 11 に工具傾斜角と加工時の切削動力値の関係について示す。切削動力計は、キスラー社製 9257B で 3 分力測定により行った。その結果、残留応力と同様に、傾斜角 0°が最も大きく、傾斜角が大きくなるにつれ減少する。また、工具傾斜角 20°以上では、切削抵抗の小さい良好な加工状態である。

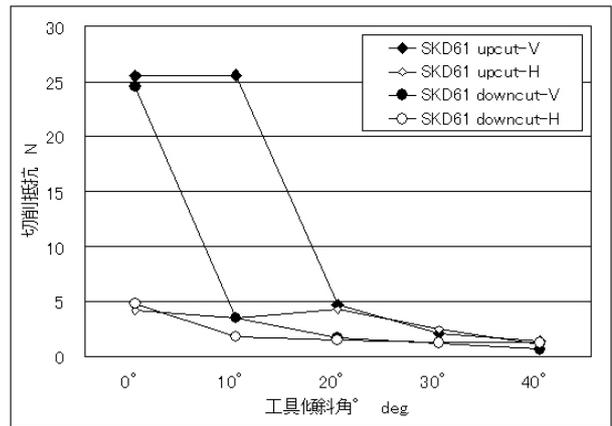


図 11 工具傾斜角と切削動力 (DAC)

### 3. 鏡面ブラスト加工

鏡面ブラスト加工機は、核（コア径 0.2~0.5mm）となる弾性体の表面に研磨微粉を附着させた表面積層型の弾性研磨材を用い、加工物表面を効率よく、かつ加工硬化層を生成することなく乾式の擦過現象によって鏡面加工することができる装置である。加工面の仕上げ状態に応じた研磨材（荒加工・中仕上げ・仕上げ等）があり、段階的に加工することで加工面精度を向上させることができる。

加工機本体および加工の概念図を図 12 に示す。

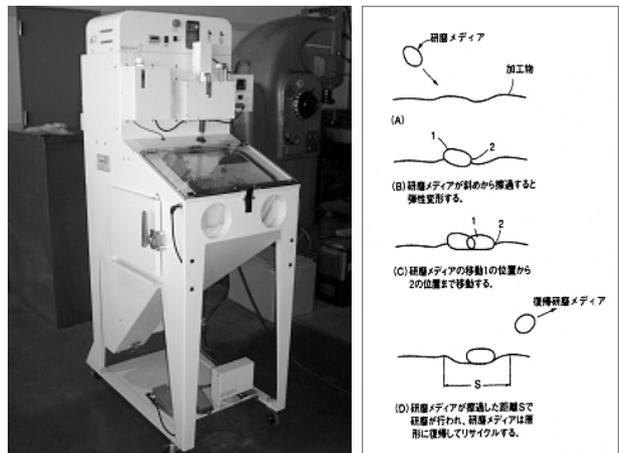


図 12 鏡面ブラスト加工機と加工の概念図

### 3-1 鏡面ブラスト加工実験

傾斜加工により作製した表面粗さ  $2\mu\text{mRz}$  程度のサンプルに対し、荒加工用及び仕上用メディアにより鏡面ブラスト加工を施した。加工条件は以下のとおりである。

表4 ブラスト加工条件

荒加工メディア	SP-20AZ(#2000シリコニア砥粒)
仕上加工メディア	SP-F100D(#10000ダイヤモンド砥粒)
加工時間	10s/cm <sup>2</sup>

### 3-2 加工実験結果および考察

工具傾斜加工により作製した表面粗さ  $2\mu\text{mRz}$  程度の加工サンプルを、荒加工用及び仕上用弾性研磨メディアにより鏡面ブラスト加工した(図13)。その結果、荒加工で  $1\mu\text{mRz}$  程度、仕上加工で  $0.5\mu\text{mRz}$  程度の加工面となった(図14)。この結果より、切削加工面に対し鏡面ブラスト加工を施すことで、磨き工程の短縮化に寄与すると考えられる。次年度は、加工面のさらなる高精度化と残留応力についても検討する。



図13 ブラスト加工サンプル

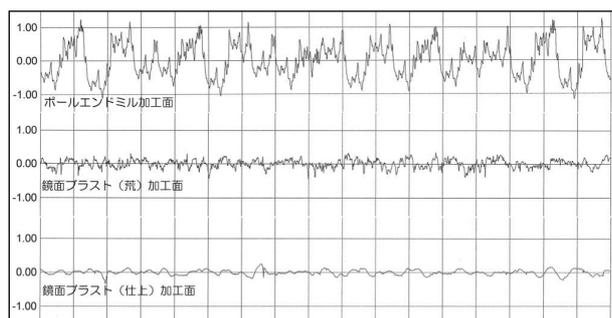


図14 機機械加工面の鏡面ブラスト加工 (STAVAX)

## 4. 結 言

金型鋼の切削加工面の高品質化のため、ボールエンドミルによる工具傾斜加工を行い、以下のような結果を得た。また、切削加工面に対し鏡面ブラスト加工を施し、磨き工程の短縮化に寄与する結果を得た。

- (1) R3mm ボールエンドミル刃面の切削速度は、0 から  $245\text{m/min}$  まで連続的に変化するため、傾斜角

による加工形態はそれぞれ異なることが表面粗さや残留応力値から分かった。

- (2) 加工面の残留応力は、傾斜角  $0^\circ$  が最も大きく、傾斜角が大きくなるにつれ減少する。傾斜角  $0^\circ$  の場合には、切削速度の低い刃面部分が押しつぶすように加工するため、残留応力が高くなると考えられる。
- (3) 傾斜角  $0^\circ$  では加工形態が複雑なため、切削面の顕微鏡観察結果では他に比べて粗く見える。また、傾斜加工時の加工面は径方向送りと工具刃面形状に起因する表面粗さとなる。
- (4) 傾斜加工により作製した表面粗さ  $2\mu\text{mRz}$  程度のサンプルを、荒加工用及び仕上用メディアにより鏡面ブラスト加工した結果、荒加工で  $1\mu\text{mRz}$  程度、仕上加工で  $0.5\mu\text{mRz}$  程度の仕上げ面となった。

次年度は、工具傾斜加工における工具のたわみ・発熱等も検討材料に入れた加工実験を実施するとともに、放電加工面への電子ビーム照射の適用についても検討する。

### 参考文献

- 1) 柴原ほか：砥粒加工学会誌, Vol.53 No.4 P.230 (2009)
- 2) 墨田ほか：三菱重工技報, Vol.33 No.4 (1996-7)