

バニシ加工による射出成形金型の自動仕上げ

福井大学 学術研究院 岡田 将人

1. はじめに

一般的に射出成形用金型(以後、金型)の形状創成には、放電加工や切削加工が適用されているが、それらにより得られた仕上げ面性状では金型に求められる要求を満足できない場合が多い。そのため、後工程として熟練工による手仕上げが行われているのが現状である。しかしながら、手仕上げは、仕上げに要する時間が長く、熟練工の経験に頼るために仕上げ面の品質にばらつきが生じやすい。一方、金型の表面性状は、金型性能の良否を決定する重要な因子である。そのため、これまでに関連した多くの研究が取り組まれているが、手仕上げに代わる方法が一般化されていない。また、金型の耐摩耗性を向上させるためには、高い表面硬さが必要となる。金型の高硬度化には主に熱処理が用いられるが、熱処理による高硬度化は工程の複雑化、金型全体の靱性の低下、酸化皮膜の除去処理の必要性などを招く。加えて、金型の表面割れに対する耐久性の向上には、表層への圧縮残留応力の付与が効果的であるが、一般的に放電加工や切削加工は、その仕上げ面に引張側の残留応力が生じ易いとされている。これらのことから、平滑化と併せて、表層の高硬度化と圧縮残留応力の付与を自動的かつ切削加工からのワンプロセスで実現可能な金型の表面処理法が求められている。

金属の表面処理法の一つにバニシング加工(以後、バニシ加工)がある。バニシ加工とは、工具を対象面上に押付けながらしゅう動させることで、対象面上の微小凹凸を押しならす加工法である。対象面の表層に塑性変形を付与するため、平滑化と同時に表層のみに選択的に加工硬化による耐摩耗性と圧縮残留応力による疲労強度の向上効果を発現させることができる。現在は主に油圧機器や輸送用機器の軸形状製品の表面仕上げ法として、旋削と同様の加工形態で適用されている場合が多い。

2. 目的

本研究では、金型の仕上げ工程として、著者らが開発したバニシ加工を適用することを目的とする。著者らは、半球状の先端を有するダイヤモンド工具と力センサを内蔵した加工機を用い、バニシ工具の工作物への押付力を一定に制御することで、曲面を有する工作物でも良好な表面性状を得ることを明らかにしている¹⁾。また同様の工具を、加工対象面の法線方向から傾けて高速回転させることで、工具と工作物間の接点における相対速度を高速化させ、表層の材料流動を促進させることで、より効率的に良好な表面性状が得られるバニシ加工法を提案している²⁾。加えて、ダイヤモンドより安価で、脱膜と再コーティングによる母材の再利用が可能な優位性を有するバニシ加工用コーテッド超硬工具について、種々のコーティング材質を検討し、**diamond-like-carbon**(以後、DLC)コーティングが適していることを明らかにしている³⁾。一方、射出成形に用いられる金型には、被削性、耐食性、比重、熱伝導性の観点からアルミニウム合金製金型(以後、アルミ金型)の適用が試みられている⁴⁾。これらの成果ならびに背景を踏まえて本研究では、アルミ合金に対するバニシ加工において、バニシ加工条件が仕上げ面性状に及ぼす影響を明らかにする。加えて、本加工法の実用性を検証するために、5軸マシニングセンタを用い、アルミ金型を切削加工からバニシ加工まで自動連続運転により製作し、得られたアルミ金型の仕上げ面を評価した。さらに、同形状の切削ままならびに手磨きで仕上げたアルミ金型とともに樹脂射出成形に供し、それより得られた成形品の表面性状を比較評価した。

3. 実用的な価値、実用化の見込など

本研究で取り扱うバニシ加工は、先端が半球形状を呈するピン状の工具を用いたチップバニシ加工で

あり、その加工形態はボールエンドミル加工を用いた切削加工と同様である。そのため本バニシ加工は、一般に金型の形状創成に用いられる自動工具交換装置を用いたマシニングセンタを活用することで、切削加工からバニシ加工までを連続して1台の加工機上で実施できる。加えて、本バニシ加工はボールエンドミルと同様の工具経路により実施可能であるため、切削加工と同様の機械操作で実現でき、オペレータへの負担も強いがない。これらの本バニシ加工の特徴は、高い実用性と実現性を有する。

4. 研究内容の詳細

4.1 実験方法

図1にバニシ加工条件が仕上げ面性状に及ぼす影響を検討するための実験装置外観を示す。本装置は、精密卓上型3軸ロボットに高速モータスピンドルが、回転中心を傾斜した状態で固定されている。工作物は、ばねを介して3軸ロボットのテーブル上に固定されており、工具を工作物に押し付けることで、ばねの縮み量に応じた押付力を付与できる。なお、本実験では仕上げ面性状の評価を容易とするために、平面を対象とした。図2にバニシ工具の外観を示す。本工具は先端半径 $R = 1.5 \text{ mm}$ のピン状工具であり、超合金母材にDLCをコーティングしている。工作物はアルミニウム合金 JIS A7075 とし、その前加工面は正面フライスで仕上げており、表面粗さは $Ra = 0.25\text{-}0.35 \text{ }\mu\text{m}$ で揃えた。

図3にバニシ加工の概略図、表1に実験条件を示す。工具は加工対象面の法線方向からYZ平面上に α° 傾けられた状態で、所定の押付力のもとでX方向に送られる。加工条件のしゅう動速度 V_s は、理論的な工具と工作物との接触点における工具回転による周速度と定義した。加工中、加工点付近には塑性加工用油を滴下した。

バニシ加工を適用した金型を用いた射出成形実験では、加工機として一般的に用いられている5軸マシニングセンタ(LX-05AX, 株式会社松浦機械製作所)を用いた。工具は、前述の実験と同一であり、加工条件も表1に揃えた。なお、マシニングセンタの加工では、前述の実験のような力制御が困難である。その

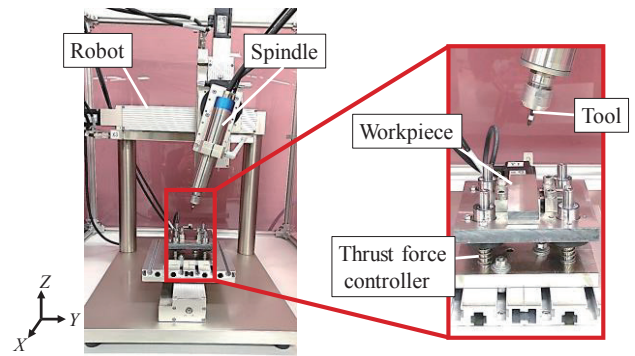


図1 実験装置外観

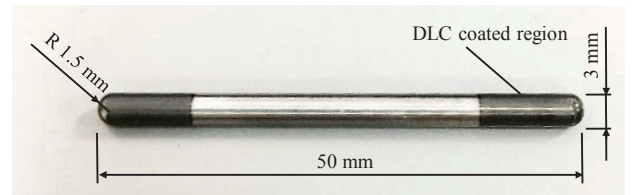


図2 バニシング工具外観

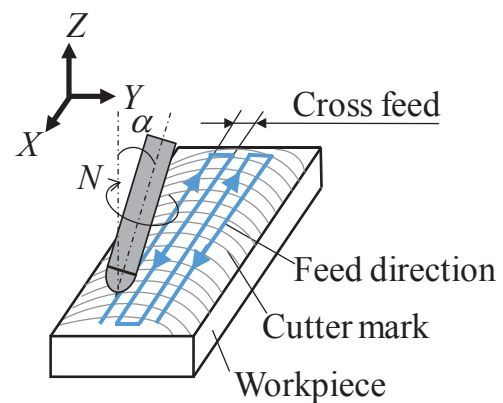


図3 バニシング加工概略

表1 バニシング加工条件

Sliding speed	$V_s = 0.82, 6.6 \text{ m/min}$
Thrust force	$F_t = 20\text{-}100 \text{ N}$
Cross feed	$C_f = 30 \text{ }\mu\text{m}$
Feed rate	$f = 5 \text{ mm/s}$
Lubrication	BP-3000, Star Cut Industrial Company

ため本実験では、形状創成時のエンドミル加工時の定義形状に対し、 $1 \text{ }\mu\text{m}$ の押し込み量によりバニシ加工を実施した。

4.2 実験結果と考察

4.2.1 押付力が仕上げ面性状に及ぼす影響

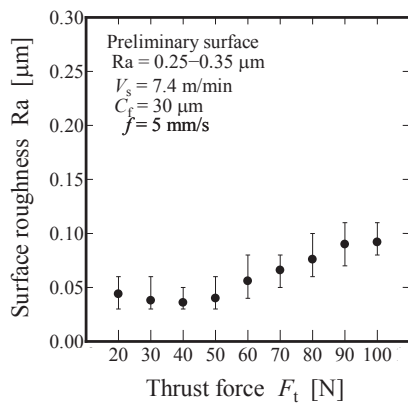
図4(a), (b)に押付力を変化させた場合の仕上げ面の算術平均粗さを工具送り方向とクロスフィード方向

でそれぞれ示す。図より、両方向ともに押付力 $F_t = 40$ N までは $Ra = 0.05 \mu\text{m}$ 以下で良好な仕上げ面粗さを示しているが、 $F_t = 50$ N 以上では両方向ともに明確に悪化している。この傾向は特にクロスフィード方向で顕著であり、 $F_t = 100$ N の場合、前加工面の表面粗さに近い値にまで悪化している。このことから、押付力は仕上げ面粗さを決定する重要な加工条件であり、特にクロスフィード方向に対し顕著な影響を有する。図 5(a)-(c)に前加工面、押付力 $F_t = 20$ N、 100 N により得られた仕上げ面の 3 次元プロファイルを示す。図より、前加工面はバニシ工具の送り方向に対し、正面フライスによる一定間隔の切削痕が認められる。これに対し、 $F_t = 20$ N においては、その切削痕が大幅に低減されている。一方、 $F_t = 100$ N では、バニシ工具の送り方向に沿った周期的な凹凸が発現しており、これが図 4(b)の仕上げ面粗さの悪化傾向に起因していることがわかる。表層材料を流動させることで微小凹凸を平滑化させるバニシ加工においては、過剰な押付力により、仕上げ面に加工

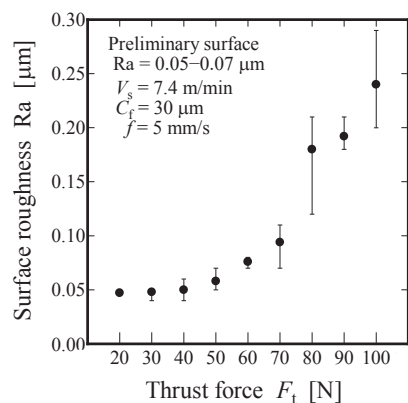
痕を発現させることがあり、工具送り方向とクロスフィード方向の両者を鑑みて、押付力を検討する必要があることがわかる。

4. 2. 2 しゅう動速度が仕上げ面性状に及ぼす影響

図 6, 図 7(a), (b)にそれぞれしゅう動速度 $V_s = 0.82$ m/min, 6.6 m/min とした場合の仕上げ面の光学顕微鏡による拡大画像と SEM による凹凸像を示す。押付力は $F_t = 20$ N で揃えた。また、図 7(a), (b)は微小硬度計による圧痕により撮影領域を同定した。両図より、しゅう動速度の高い $V_s = 6.4$ m/min の場合に

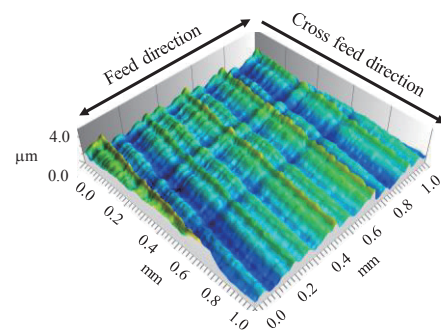


(a) 工具送り(X)方向

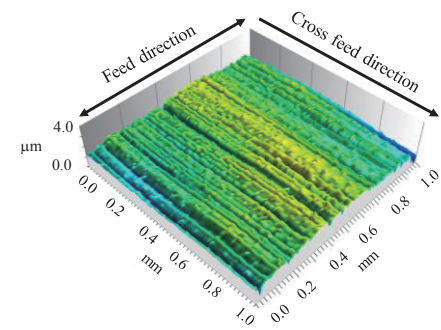


(b) クロスフィード(Y)方向

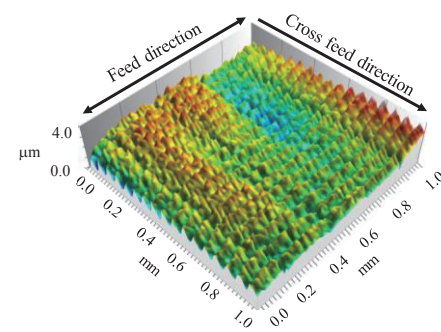
図 4 押付力が仕上げ面性状に及ぼす影響



(a) 前加工面

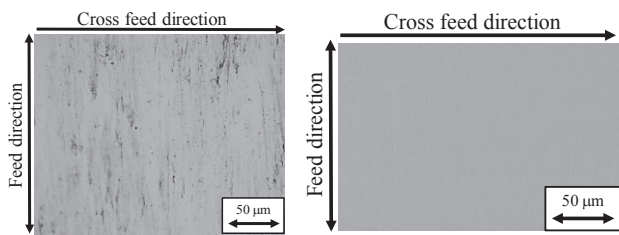


(b) $F_t = 20$ N



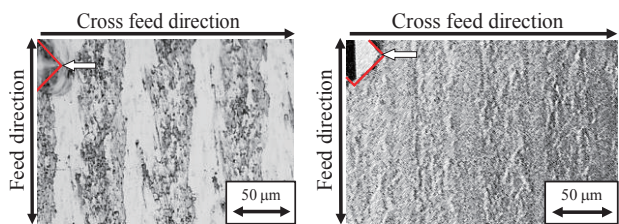
(c) $F_t = 100$ N

図 5 加工前後の表面プロファイル



(a) 顕微鏡画像 (b) 凹凸像

図 6 $V_s = 0.82 \text{ m/min}$ における仕上げ面



(a) 顕微鏡画像 (b) 凹凸像

図 7 $V_s = 6.6 \text{ m/min}$ における仕上げ面

一定周期で変色部が認められることが顕微鏡像よりわかる。また、凹凸像より、その変色部に相当する領域に微細な表面荒れが生じていることがわかる。これらのことから、しゅう動速度は、過剰に高速化させると表面荒れを生じることがわかる。これらの結果より、表層の塑性流動を積極活用したバニシ加工では、工具の工作物への押付力ならびに相対速度を最適化することで、良好な仕上げ面性状が得られることがわかる。

4. 2. 3 射出成形実験によるアルミ金型へのバニシ加工の適用効果の検証

本節では、マシニングセンタを用いて切削加工による形状創成からバニシ加工による仕上げまでを連続的に実施して得られた金型の品質評価について検討した。図 8 に評価に用いた金型により得られる成形品の形状を示す。本評価では、単純な容器状の成形品形状とし、本成形品の容器内面形状を得るための金型のコア側部品に対してバニシ加工を適用した。図 9(a)-(c)に切削加工まま、バニシ加工、手磨き処理により得られた金型部品の外観をそれぞれ示す。ここで、手磨き処理による金型部品は切削加工により得られた金型部品に対し、3000 番までの耐水ペーパーにより手磨き処理したものである。図より

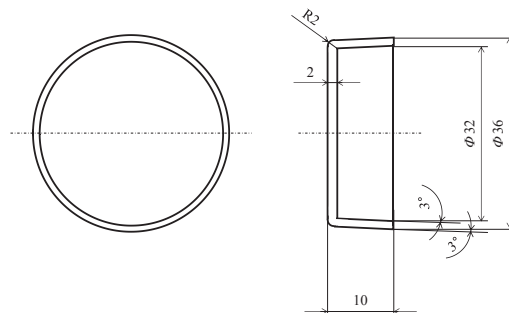
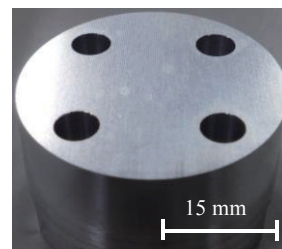
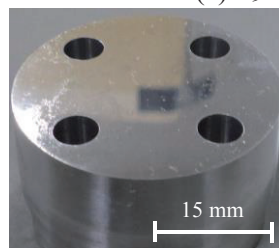


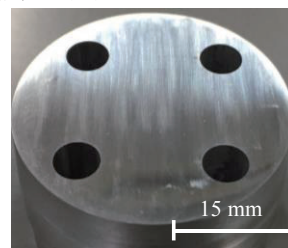
図 8 アルミ金型による射出成形品形状



(a) 切削加工まま



(b) バニシ加工



(c) 手磨き処理

図 9 各加工法により得られた金型部品の外観比較

表 2 金型部品表面の光沢度の比較

Sample	Glossiness
Machined surface	387
Burnished surface	762
Polished surface	620

切削加工ままの金型部品表面に鏡面性は認められないのに対し、バニシ加工は手磨き処理以上に良好な鏡面性が認められる。鏡面性の違いを定量的に評価するために光沢度による比較を行った。表 2 に図 9 に示した金型部品の平面部より求められた光沢度をそれぞれ示す。光沢度からも、図 9 の外観による鏡面性と整合の取れた傾向が認められた。これらのことから、バニシ加工により手磨き処理と同程度もしくはそれ以上の鏡面性を有する金型を実現できた。

図 10 に図 9 に示したバニシ加工を施した金型部品を用いた射出成形実験より得られた樹脂成形品の外観写真を示す。樹脂材料には ABS 樹脂を用い

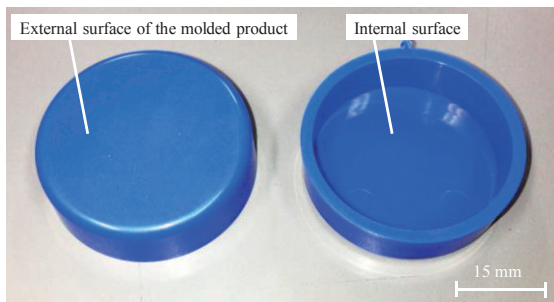


図 10 バニシ金型より得られた成形品外観

表 3 射出成形品の光沢度の比較

Sample	Glossiness
Machined core part	69
Burnished core part	90
Polished core part	77

射出成形機(NEX110IV, 日精樹脂工業(株))により成形した。図より, 一般的な光沢感を有する成形品が得られていることがわかる。なお, 他の加工法により仕上げられた金型より得られた成形品も, 目視による外観観察では同様の光沢感であった。そこで, これらの違いを定量的に評価するために, 金型部品表面同様に光沢度測定を実施した。表3に, 成形時に金型部品平面部と接していた容器状成形品の内面平面部に対し光沢度測定を実施した結果を, それぞれの金型部品で示す。表, 成形品の光沢度の傾向が, 金型部品の光沢度の傾向と一致していることがわかる。これらのことから, 本バニシ加工をアルミ金型の仕上げ工程に適用することで, マシニングセンタによる形状創成から表面仕上げまでの工程を集約化, 自動化できることがわかった。

5. まとめ

著者らが開発した新たなバニシ加工法を, 射出成形に用いられるアルミニウム合金製の金型部品の仕上げ工程に適用した場合の適用効果について検証した。アルミニウム合金にバニシ加工を適用する場合, 工具の工作物に対する押付力ならびにしゅう動速度が仕上げ面に対し明確に影響を及ぼした。押

付力は, 増加に伴い, 対象面表層の過剰な材料流動により, バニシ工具のクロスフィード方向に周期的凹凸が発現し仕上げ面粗さが低下した。しゅう動速度の増加に対しても同様に, 高速化することで仕上げ面粗さの低下が認められた。バニシ加工を適用した金型部品は, 切削加工ならびに, それに手磨き処理を施したものよりも良好な鏡面性を示した。加えて, それにより得られた成形品も同様の傾向が得られた。これらのことから, 本バニシ加工は樹脂射出成形用アルミニウム金型の自動仕上げ工程として有用であることがわかった。

6. 参考文献等

- 1) M. Okada, H. Kozuka, H. Tachiya, T. Iwasaki, Y. Yamashita, Burnishing process by the spherical 5-degrees hybrid type parallel mechanism with force control, International Journal of Automation Technology, 8, 2, pp. 243-252, 2014.
- 2) M. Okada, M. Shinya, H. Matsubara, H. Kozuka, H. Tachiya, N. Asakawa, M. Otsu, Development and characterization of diamond tip burnishing with a rotary tool, Journal of Materials Processing and Technology, 244, pp. 106-115, 2017.
- 3) 岡田将人, 新谷正義, 高杉敬吾, 立矢宏, 佐々木敏彦, 大津雅亮, コーテッド超硬工具による工具回転型バニシング加工—工具表面特性が仕上げ面性状に及ぼす影響と工具摩耗形態の解明—, 精密工学会誌, Vol. 83, No. 7, pp. 694-700, 2017.
- 4) 山縣裕, 高井信次, 新川真人, 及川渉, アルミニウム合金金型を活用した射出成形におけるサイクルタイム短縮の可能性, 塑性と加工, Vol. 53, No. 613, pp. 125-129.