研 究

電解による切削抵抗低減効果を利用した微細切削*

永田真生** 若林公宏** 山田真樹** 増沢隆久***

MICROCUTTING WITH REDUCED CUTTING FORCE BY ELECTROLYSIS

M. Nagata, K. Wakabayashi, M. Yamada and T. Masuzawa

Abstract

In this paper, we propose a microcutting method with a reduced machining force by applying an electrolytic passive film formation on the workpiece surface. This process realizes the machining of microstructure such as $10\mu\text{m}$ wide micro grooves which has been difficult to be machined by conventional cutting. A mirror surface which has the roughness 30nm Ry is also obtained by this method.

Key Word: micro machining, machining force, electrolysis, passive film, mirror machining

1. 結論

近年、機器の高度化に伴い、微細加工に対する要求が高度化しつつある。特にインクジェットプリンタノズルやインク流路、マイクロレンズアレイなどの微小光学素子では横方向および厚さともに数ミクロンから数百ミクロン程度の立体形状を高精度に加工する技術が求められている。

本来2次元的な加工法であるフォトリソグラフィにおいて、露光にシンクロトロン放射X線を用いたLIGAプロセスは極めてアスペクト比の高い形状の加工を可能とした¹⁾が、厚さ方向に形状分布が無い2.5次元加工にとどまり、実現できる形状に制限が生じる。これに対して、切削や放電加工などは工具を位置決めして加工を行うことにより3次元加工を実現できる。

特に、マイクロ放電加工ではWEDGにより直径数ミクロン程度の工具を高精度に作製でき²⁾、加工反力が小さいため、微細な3次元加工を実現で

きる³⁾。しかし、加工に伴わずかに電極が消耗するため、加工形状に精度の低下が生じる。

一方、WEDGによりオンマシンで微細な工具を創成して切削加工を行う方法は工具のチャッキングに伴う芯振れの問題を解決し、切削加工が微細加工へ適用可能であることを示した⁴⁾。しかし、微小工具は直径の2乗に反比例して折れやすくなり、これを微細加工に適用するためには工具折損に対する対策が不可欠となる。

一般には、工具の心材に靱性材料を、外周部に硬質材料を用いて折れにくくするなど工具の強度を向上させる工夫がなされるが、数 μm レベルの微小工具に適用することは困難である。

そこで、工作物の被削性を向上させるため、一般に軟化あるいは脆化と言われる金属の酸化膜を電解により積極的に生じさせ、この部分のみを加工することにより、微細加工を行う方式を提案する。本報告で提案する加工方式は電解条件としてはいわゆる不動態化領域⁵⁾を用いて金属内部に酸化が進展することを防ぎながら連続的に酸化膜の生成と切削を行うものである。

*電気加工学会全国大会(1998)にて発表

**富士ゼロックス(株)生産技術部

***東京大学生産技術研究所

2. 加工原理

図1に本加工方法の加工原理を示す。

工作物である金属表面（陽極）に対して、別途設けた電極（陰極）との間に電解液を介して電解電圧を印加する。金属材料の種類に応じて、加工面に不働態膜が生成する電解液の pH と電位を保持することにより表面が不働態膜に覆われ、それ以上の酸化や溶出が発生しなくなる。図2に示す鉄の電位 pH 図においては、斜線部分が不働態化領域となる。

電解液中での測定により、純鉄で2～7nm（中性硼酸塩溶液中）⁶⁾、SUS304で20～550nm、S45Cで320～1180nm（中性硝酸ナトリウム溶液中）⁷⁾の厚さを持つ不働態膜が形成されることが報告されている。

生成させた不働態膜は切削工具に対する抵抗が小さく、極めて直径の小さい工具を使用しても、折損が発生する可能性を低減させることを可能とする。不働態膜を除去した直後は、電解溶出を防ぐ膜が失われた状態となり、再不働態化するまでの間にわずかな電解溶出が起こって、さらに加工を促進する。

また、微細形状の加工を行う際には、工具取り付けの際の芯振れ誤差が加工精度に大きな影響を与える。本加工方法では、切削工具の作製をWEDGによりオンマシンの状態で行うために、工具取り付けによる誤差は発生せず、機械の持つ回転軸の振れのみが誤差要因となる。したがって、高精度な微細形状加工を行うことが可能となる。

3. 切削抵抗低減効果検証実験

はじめに、金属表面を不働態化することにより切削抵抗を低減する効果を確認する検証実験を行った。

3.1 実験装置および実験方法

図3に実験に用いた装置を示す。

工作物（SUS304）に溝を形成し、その溝に電解

Fig.1 Principle of machining

Fig.2 Pourbaix diagram of Fe

Fig.3 Schematic diagram of experimental apparatus

液（1規定硝酸ナトリウム水溶液）を満たす。電解液中には電極（Cu）が工作物と絶縁層を介して設置されている。

切削工具にかかる切削抵抗は、工作物下の三分

力動力計（日章電機製 LMC-3824）により常時測定されており、切削抵抗の閾値（0.02N）を超えた場合には、切削工具位置制御装置へと信号が送られ、折損防止のため切削工具を退避させる動作を行う。

切削工具は WEDG により作製した超硬合金のものをを用いた。

実験手順を図 4 に示す。

はじめに、切削工具を電解液中から退避させた状態で、工作物と電極間に電解電圧（1V）を 5 秒間印加する。（図 4(a)）

印加電圧を解除した後、切削工具（超硬、 $\phi 100 \mu\text{m}$ 、D 形断面）を移動させ、工作物表面に形成された不働態膜を切削加工する。（図 4(b)）。

切削工具と工作物間の切削抵抗が 0.02N を超えたら加工を中断し、切削工具を電解液中から退避させる。（図 4(c) (d)）

以上の電解電圧の印加から切削工具の退避までを繰り返した場合と、電解電圧を印加せず、単に所定の切削抵抗に至るまでの切削のみを繰り返した場合との差を見ることで、金属表面を不働態化することによる切削抵抗の低減効果を検証した。

3.2 実験結果

電解電圧の印加の有無による切削加工量の差を図 5 に示す。

切削、退避の操作を 15 回繰り返した状態で、電解電圧を印加した場合には、電解電圧を印加しない場合と比較して、約 7 倍の累積加工量が得られた。

電解電圧を印加しない場合には、ほとんど加工量が得られていないのに対して、電解電圧を印加した場合には各サイクルごとに一定の加工量が得られており、累積加工量が比例的に増加している。

これは、工作物表面に不働態膜が形成されるこ

Fig. 4 Machining process

Fig. 5 Relationship between cycle number and machined depth

とにより切削抵抗が低減したために、加工量が得られたものと考えられる。このことから、金属表面を不働態化することによる切削抵抗の低減効果が検証された。

加工形状の模式図を図 6 に示す。また、切削加工後の表面状態の電子顕微鏡写真を図 7、図 8 に示す。電解電圧の印加無しの場合が図 7 であり、

電解電圧を印加した場合が図 8 である。

図 7 および図 8 から、加工面の表面状態に差は見られないが、電解電圧を印加しない場合と印加した場合とで、加工量に差が生じていることが分かる。

加工後の表面状態も良好であり、通常の切削加工の約 7 倍の切削量が得られていることから、微細形状の切削加工への適用が期待できる。

4. 微細形状加工実験

加工面に不働態膜を形成することで、加工反力低減効果が得られることが分かった。次に、この効果を利用して、微細形状加工、および表面粗さを評価する実験を行った。

4.1 実験装置および実験方法

4.1.1 加工条件抽出実験

加工状態が良好で、最大加工量が得られる加工条件を抽出するために、実験計画法⁸⁾を用い、不働態膜を生成するための重要な電解条件の中で、電解電圧、電解液濃度、電圧印加時間、電解ギャップの 4 つのパラメータに対して L9 直交実験を行った。

ここでは、電解ギャップの影響を知るために、切削工具を陰極として用い、その位置を制御することで電解ギャップを設定することとした。

実験手順を図 9 に示す。

陰極である切削工具を、工作物の加工面との間に電解ギャップを介して電解液中に静止させた状態で、電解電圧を印加した。(図 9 (a))

電解電圧の印加を止め、工作物の壁面に対して、水平方向に切削加工を行った。切り込み深さは $25\ \mu\text{m}$ 、工具回転数は 3000rpm、送り速度は $0.1\ \mu\text{m}/\text{sec}$ とした。(図 9 (b))

切削加工を行っている間、工作物下に設置した三分力動力計により切削抵抗を測定し、切削抵抗が 0.01N を超えた場合に切削工具を退避させた。

(図 9 (c) (d))

Fig. 6 Scheme of machined shape

Fig. 7 Machined surface with no electrolysis

Fig. 8 Machined surface with electrolysis

切削工具により工作物が加工されている間の切削抵抗の測定例を図 10 に示す。

不働態膜が十分に形成されていれば、不働態膜を切削している間、切削抵抗の上昇は抑制される。つまり、不働態膜を切削している状態より、金属部分を切削している状態の方が、切削抵抗は大きくなると考えられる。

SUS304 では最大約 500nm の不働態膜の形成が予想される⁷⁾ことから、切削開始後 5 秒間の切削抵抗の上昇率(図 10 に示す曲線の微分値)を評価の基準に用いた。

また、各パラメータの各水準値は表 1 に示すものを用いた。

4. 1. 2 微細形状加工実験

求められた加工条件での、数 μm オーダの微細工具による加工可能性の検証を行うために、 $\phi 10\ \mu\text{m}$ の微細工具を用いた微細溝形状加工を行った。また、本加工法による加工形状精度を検証するため三段形状加工を行った。加工装置は切削抵抗低減効果検証実験で使用したもの（図 3）を用いた。

ただし、電解ギャップは加工条件抽出実験の結果から切削抵抗上昇率には影響の少ない要因であることが示されたことと、切削工具とは別に電極を設けた装置上の制約から、加工条件の電解ギャップは 1mm とした。

形状精度に関しては、加工した三段形状から、工具の移動距離の設定値に対して、加工後の形状がどのようになっているのかを、階段部分の水平方向と垂直方向について測定した。これにより、本加工法における形状精度を求めた。

4. 1. 3 表面粗さの測定

微細領域への鏡面加工の可能性を検証するために、切削抵抗低減効果検証実験で使用した加工装置（図 3）と加工手順（図 4）により、加工面の表面粗さを測定するサンプルを作製した。

作製したサンプル形状は、深さ $10\ \mu\text{m}$ 、幅 $200\ \mu\text{m}$ の溝形状である。

4. 2 実験結果

4. 2. 1 加工条件抽出実験

図 11(a)、および図 11(b)に L9 直交実験により得られた、各パラメータの要因効果図を示す。

本実験にて用いた各パラメータの水準値の範囲内においては、切削抵抗の上昇に対しては電解液濃度と電解時間が大きな影響を持つことが分かった。

Fig. 9 Process of experiment

Fig. 10 Relationship between cutting force and time

Table 1 Parameters of experiment

Parameter	Values
Applied voltage	1V, 3V, 5V
Concentration	1N, 0.1N, 0.01N
Applied time	5sec, 10sec, 20sec
Gap	$1\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m}$

各パラメータの要因効果図から求めた、切削抵抗低減効果を最も有する電解条件すなわち切削抵抗上昇率が最小となる電解条件として、電解電圧 3V、電解液濃度 0.01N、電解印加時間 5sec、電解ギャップ $1\mu\text{m}$ の条件で加工を行ったところ、図 12 に示す加工状態となった。

加工後の表面状態は粒界腐食により荒れた状態となった。これは、電位を+側に高くしたために生じる、いわゆる過不働態化状態となっているためだと考えられる。

そこで、あらためて電解電圧を 2V とし、その他は同一条件で加工を行った。

このときの加工後の表面状態は図 13 に示すように良好であることから、加工条件として、表 2 の条件を得た。

Table 2 Machining conditions

Applied voltage	2V
Concentration	0.01N
Applied time	5sec
Gap	$1\mu\text{m}$

4. 2. 2 微細形状加工実験

加工後の微細溝形状を図 14 に、三段形状を図 15 に示す。

図 14 に示すように、従来の切削加工では加工が困難である $\phi 10\mu\text{m}$ 工具による加工を実現した。

切削加工は 3 次元の加工の自由度を持つために、レーザやフォトリソグラフィーといった、従来のいわゆる 2.5 次元加工では困難である微細形状の加工を実現する手段として、本方式の有用性を検証することができた。

また、図 15 の三段形状から、形状精度として、水平方向、垂直方向ともに $0.3\mu\text{m}$ が得られた。この値は、微細形状加工を行う上では十分なものではないが、今後、工具の形状や材質を工夫することで改善可能であると考えている。

Fig. 11(a) Factorial effects diagram

Fig. 11(b) Factorial effects diagram

Fig. 12 Machined surface of selected condition by L9-experiment

Fig. 13 Machined surface of 2V applied voltage condition

4.2.3 表面粗さの測定

作製した表面粗さ測定用のサンプルの加工状態を図 16 に示す。

加工形状の電子顕微鏡写真から、切削工具の加工痕や電解による腐食がなく、良好な加工面であることが分かる。

図 16 の斜線部の表面形状を白色干渉顕微鏡にて測定した結果を図 17 に示す。

得られた加工面の表面粗さは、 $R_y=29\text{nm}$ となった。このことから、加工面は鏡面加工がなされており、研磨技術として十分に使用可能な技術であることが分かる。

また、図 18 に、図 16 の黒枠内加工面（左側）と、 $\phi 200\mu\text{m}$ の超硬電極による SUS304 の放電加工面（右側）との比較を示す。

放電加工条件が 100V 、 1000pF 、表面粗さ $R_y=1.6\mu\text{m}$ の表面と比較して、良好な加工面が得られていることが分かる。

このことから、放電加工後の表面に、鏡面仕上げを行う技術として利用可能であることが示された。

また、切削加工技術として用いることができるために、加工後に研磨工程を要しない微小領域の鏡面切削加工技術として、さまざまな領域への展開が期待できる。

Fig.14 Machined micro groove

Photo with SEM

Scheme of machined shape

Fig.15 Machined shape of 3-steps

Fig.16 Appearance of machined shape

Fig.17 Shape of machined surface

New method

EDM

(Working condition of EDM:100V,1000pF)

Fig.18 Comparison with EDMed surface

5. 結論

工作物である金属表面に電解電圧を印加することにより、金属表面に不働態膜を形成し工作物の機械的性質を弱化させ、この不働態膜を除去加工することにより低切削抵抗での加工を行う方法を提案し、実験的検証を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 電解電圧の印加により工作物表面に不働態膜を形成することで、切削抵抗を低減する効果がある。
- (2) 切削抵抗低減効果には、電解液濃度と電解印加時間が大きな影響を与える。
- (3) 基礎実験から得たデータをもとに加工条件設定を行った結果、従来の切削加工では困難であった $10\mu\text{m}$ 幅の溝加工を実現し、3次元微細形状加工への適用が可能であることを示した。
- (4) 加工面の表面粗さとして、 $R_y=29\text{nm}$ の加工が可能であり、微小領域の鏡面加工技術として適用可能であることを示した。

謝辞

本研究に際し、表面粗さ測定にご協力頂きました、長岡技術科学大学 柳教授、原助手、東京工業大学 塚田・笹島研究室の皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) E. W. Becker, W. Herfeld, P. Hagmann, A. Maner and D. Munchmeyer: Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanoforming, and plastic molding (LIGA process), *Microelectronic Engineering* 4(1986)35-56
- 2) 増沢隆久, 藤野正俊: 高精度微細軸加工の研究(第1報) - ワイヤ放電研削法の開発 -, 電気加工学会誌, Vol.24, No.48, 14-28
- 3) 増沢隆久, 河田耕一, 佐藤健夫: 微小穴の放電加工について, 電気加工技術, Vol. 4, No. 7(1981) 18-23
- 4) 佐藤達志, 増沢隆久, 藤野正俊, 大西幸夫: WEDGのマイクロドリル・エンドミルへの応用, 1989年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 1091-1092
- 5) M. Pourbaix: "Atlas of Electrochemical Equilibria in aqueous solutions", Pergamon Press
- 6) 佐藤教男: 金属の不働態化と表面不働態皮膜, *DENKI KAGAKU*, Vol.46, No. 11 (1978), p585
- 7) 杉江他曾宏ら: 電解加工における電極表面の酸化物皮膜の役割, 金属表面技術, Vol. 32, No. 8, 1981, p403
- 8) 田口玄一: 開発・設計段階の品質工学、(財)日本規格協会

(1999年7月5日受付)