両極性パルスによる超硬合金微細軸の電解加工時の 工作物表面状態の観察*

倉畑大輝*, 夏 恒*

Observation of Workpiece Surface in ECM Process of WC Alloy Micro-pin with Bipolar Pulses

Daiki KURAHATA and Wataru NATSU

Abstract

In this study, WC alloy micro-pins were fabricated by electrochemical machining using a NaNO_3 aqueous solution and bipolar pulse supply. Since the influence of the pulse conditions on micro-pin formation is still unknown, the micro-pin fabrication was carried out by changing the pulse period, the pulse width, and the power supply system. In order to understand the mechanism of machining using bipolar pulses, observations of the micro-pin surface during the process were carried out using a high-speed camera. As a result, it was found that the colour of pin surface becomes blue momentarily when the pulse voltage falls in the case of using a bipolar pulse power supply. In addition, the relationship between the pulse waveform and the blue appearance period was investigated and discussed.

Key words: ECM, WC Alloy, Micro-Pin, Bipolar Pulse

1 緒論

タングステンカーバイド (WC) に代表される超硬合金は硬度が高く、特に高温時の硬度低下が少ないため、金型部品や各種切削工具に使用されている。また、比強度が高く、細くても曲がりにくいため、超硬合金微細軸は、放電加工や電解加工による高アスペクト比の微細穴、または微細3次元形状の加工工具として使用されている¹⁾。この超硬合金微細軸の成形方法として、成形速度や工具消耗などの点において、研削や放電加工よりも優れている電解加工の利用が期待されている¹⁾²⁾。一方、電解液の種類によって、加工表面に不動態皮膜が発生するため、超硬合金は電解加工にとっても難加工材であることが知られている。従来、

NaOHを含む電解液は超硬合金の電解加工に用いられており³⁾⁴⁾、また微細軸の形成においても、実際に酸性やアルカリ性の電解液を用いることで短時間に微細軸が得られている⁵⁾⁶⁾。しかし、酸性やアルカリ性の電解液は劇物であり、作業者への危険、および廃液による環境問題を伴う。これらの問題を解決するために、筆者らは中性電解液 NaNO_3 水溶液⁷⁾やミネラルウォーター⁸⁾の使用を試みた。その結果、超硬合金微細軸の形成において、電解液として NaNO_3 水溶液を用いることで、短時間にアスペクト比の高い微細軸が得られることを報告している。しかし、加工中の軸表面には付着物がまだ多く、表面粗さや加工精度のさらなる向上が求められている。一方、両極性パルス電源を用いることで、負の電流が流れる際に発生する

*東京農工大学工学・大学院工学府機械システム工学専攻
(〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16)

NaOH が超合金表面の不動態皮膜の除去に効果があると報告されている⁹⁾。しかし、両極性パルスによる超合金加工において、加工中の様子を直接観察した報告がなく、特に極性が切り替わった際極間に何が起きているかは分かっていない。

そこで、本研究では、両極性パルスを用いて、安全性が高く、環境にやさしい中性電解液の NaNO_3 水溶液において、表面粗さがよい超合金微細軸を形成できることを確認すると同時に、ハイスピードカメラを用いて加工中の微細軸の表面状態を直接観察した。その結果、パルス立下り時に軸表面が一瞬青くなる現象を確認した。この現象は、両極性パルスによる超合金の加工メカニズムに関連していると考えられる。そのため、パルス条件を変化させた場合の軸形成時の軸表面状態の変化を観察し、超合金の電解加工におけるパルス波形の影響を実験的に調査した。本報では、これらの結果を報告する。

2 微細軸加工と観察装置

微細軸加工装置と極間観察装置の概略図を Fig. 1 に示す。軸径 $300\ \mu\text{m}$ の超合金の軸を XYZ 変位テーブルに固定されているマンドレルに取り付ける。ステージの変位により、工具として使用するステンレス板に対して XYZ 方向への位置決めが可能となる。軸先端部のみを加工するため、工具と工作物を対向させ、工具下面と工作物先端面が同一面上となるように配置する。観察にはハイスピードカメラ(キーエンス社製、VW-9000)を使用した。電源方式の違いにより形成した微細軸を比較する 3 章の実験では、極間の生成物を速

やかに排出するために、発振周波数は $42\ \text{kHz}$ の超音波洗浄機(アズワン株式会社: USM)を加工槽として利用し、電極と工作物を電解液に浸漬して加工を行った。4 章と 5 章関連の実験では、加工中の軸表面を高速ビデオカメラで直接観察するため、超音波洗浄機の代わりに透明のアクリル製タンクを加工槽として使用した。動画撮影時には、流量 $100\ \text{ml/min}$ 、最大吐出圧力 $30\ \text{kPa}$ のミニウォーターポンプ(アズワン社製 EWP-01)を用いて電解液をノズルから噴射する噴流法を用いた。照明には光ファイバー用光源装置(REVOX 社製 SLG-150V)を用いた。電解液の流量が多い場合には軸の観察が困難なため、ノズルから噴射した電解液を工作物上面に当て、側面をつたわせることで電解液を供給し、加工を行った。

3 電源方式の違いによる微細軸の比較

直流電源、単極性パルス電源、両極性パルス電源を用いて加工した微細軸の比較をするため、Table 1 に示す条件で加工実験を行った。加工電源はバイポーラ電源(高砂製作所製 BWS120-2.5)を用い、定電流モードを使用して、最大電流値を $500\ \text{mA}$ に固定した。なお、本研究では、電源方式について次のように呼称する。最小電流値が $300\ \text{mA}$ の場合を両極性パルス、 $0\ \text{mA}$ の場合を単極性パルス、 $500\ \text{mA}$ の場合を直流とする。なお、加工中は加工槽の超音波洗浄機能を利用し、常に超音波洗浄を行う。また、加工後も 5 分間程度超音波洗浄を行い、洗浄前と洗浄後の軸を比較することで軸表面への生成物の付着状況を観察した。直流、単極性パルスおよび両極性パルスのそれぞれの場合の加工後の軸表面の光学顕微鏡写真を

Fig. 1 Schematic of experimental device

Table 1 Machining conditions

Electrolyte	10% NaNO_3aq
Maximum current [mA]	500
Minimum current [mA]	-300, 0, 500
Pulse period [ms]	100
Duty ratio [%]	50
Gap-width [μm]	350
Workpiece material	WC alloy
Workpiece diameter [μm]	300
Tool material	SUS304
Tool thickness [mm]	2

Fig. 2, 3, 4 に示す。

これらの結果より、直流と単極性パルスでは生成物の付着が観察されたが、両極性パルスでは生成物はほとんど付着していないことがわかった。

また、それぞれの電源方式による微細軸の表面を比較するため、同条件で微細軸最先端の直径が $50\text{ }\mu\text{m}$ 程度になるように加工時間を調節して加工した。加工後の軸の先端部を電子顕微鏡(エリオックス社製 ESA-2000)により観察した結果を Fig. 5 に示す。また、Fig. 5 の破線部のプロファイル電子顕微鏡により測定したものを Fig. 6 に示す。Fig. 5 より、直流と単極性パルスよりも両極性パルスで加工した微細軸の方が表面の凹凸が少ないことがわかり、Fig. 6 のプロファイル測定結果からも両極性パルスの表面が他の電源方式に比べて滑らかなことがわかる。

以上より、両極性パルスを用いることで、生成物の付着が少なく、微細軸の表面の凹凸が少なくなることがわかった。

4 ハイスピードカメラによる加工中の軸表面状態の観察

電源方式によって、加工中どのような現象が起こっているかは不明である。そこで、ハイスピードカメラを用いて加工中の極間と軸表面の状態を観察した。

4.1 電源方式の違いによる加工中の比較

両極性パルス電源と単極性パルス電源での加工状態を観察した。実験は単極性パルスと両極性パルスの 2 条件で行い、両極性パルスの最大電流値は 100 mA 、最小電流値は 60 mA とし、それ以外の加工条件は Table 1 と同様とする。ハイスピードカメラのフレームレートは 125 fps とした。単極性パルスの観察結果を Fig. 7 に、両極性パルスの観察結果を Fig. 8 に示す。ここで、 0 s は加工を開始し、1 発目のパルスを印加した時刻である。

Fig. 7, 8 より、単極性パルスでは軸の周りに白い生成物が多く発生し、表面に付着している様子が観察されたが、両極性パルスでは白い生成物の発生および付着はあまり観察されなかった。また、Fig. 7 では生成物が剥離する様子も観察することができた。

Fig. 2 Micro-pin fabricated with direct current for 40 s

Fig. 3 Micro-pin fabricated with unipolar pulse for 50 s

Fig. 4 Micro-pin fabricated with bipolar pulse for 50 s

Fig. 5 SEM photo of micro-pin under different power supply

Fig. 6 Micro-pin profiles under different power supply

4.2 軸表面が青くなる現象の観察

両極性パルスによる加工状態の観察の際、電圧が立ち下がる瞬間、軸表面が一瞬青くなる現象を確認した。そこで、軸表面が青くなるタイミングと電圧波形との関係を調べるため、ビデオ撮影の

Fig. 7 Observation result of micro-pin with unipolar pulse

Fig. 8 Observation result of micro-pin with bipolar

(a) Observation result of micro-pin

(b) Change in voltage during machining

Fig. 9 Results of pin observation and voltage

フレームレートを 1000 fps に変更し、4.1 節と同条件の両極性パルスで加工実験を行い、軸表面を観察した。観察結果を Fig. 9(a) に示し、同期して測定した電圧波形を Fig. 9(b) に示す。

Fig. 9 より、パルスの立下り後の 0.62 s のときに軸が青くなっていることがわかり、0.63 s ではかすかに青いが、0.64 s にはほぼ元の銀色に戻っていることがわかる。また、電圧波形より、0.62 s から 0.64 s までは電圧の絶対値が増加していることがわかるため、軸が青い時よりも元の色の方が極間の電気抵抗は大きいことが推測できる。この軸が青くなる現象は直流電源や単極性パルス電源の場合には観察できなかったため、両極性パルス電源による生成物の付着の減少や表面性状の向上に関係していると考えられる。

4.3 HSV 値を用いた青色の数値化

軸が青い現象を客観的に判定するため、RGB 値から変換することができる HSV 値を用いて軸の青色の数値化を行う。HSV 値の H は色相(Hue), S は彩度(Saturation), V は明度(Value)を表している。色相とは、色の種類(例えば赤, 青, 黄色)を表し、0~360 の範囲で数値化し、つまり、色の種類は色相 H の値によって決定することができる。そこで、本研究では、動画の青くなっていると思われる画像から、式(1)で示す変換式¹⁰⁾で色相 H の値を求め、色の数値化を行う。なお、本研究では H が 160~280 程度を青と判断することとする。

$$H = \begin{cases} \text{Undefined,} & \text{if MIN=MAX} \\ 60 \times \frac{G-R}{\text{MAX}-\text{MIN}} + 60, & \text{if MIN=B} \\ 60 \times \frac{B-G}{\text{MAX}-\text{MIN}} + 180, & \text{if MIN=R} \\ 60 \times \frac{R-B}{\text{MAX}-\text{MIN}} + 300, & \text{if MIN=G} \end{cases} \quad (1)$$

Fig. 9 と同様の条件で両極性パルス電源を用いて加工し撮影した動画から、青くなっていると思われる瞬間と青くなっていない瞬間を Fig. 10 に示す。Fig. 10 のそれぞれ 3 点の RGB 値から式(1)を用いて求めた結果、(a) の場合は H=179, 170,

167 で、平均は 172 となり、青と判断できる。一方、(b) の場合は $H=113, 117, 115$ で、平均は 115 となり、緑と判断できる。このように、数値的に軸が青くなることを判定できることがわかった。

以上の実験結果より、両極性パルスによる超硬合金の電解加工において、電圧が立ち下がる瞬間、工作物表面の色は変化することが分かったが、その原因は物質の変化によるものか、発光温度によるものかは現段階では分かっていないので、今後分光分析や表面分析によりさらに調査する必要がある。

Fig. 10 Measurement results of the RGB values

5 パルス波形と軸表面が青い時間との関係

本章では、両極性パルス電源において軸表面が青くなっている時間に着目し、パルス周期やパルス幅、電流値等のパラメータを変化させることで、軸表面が青くなっている時間の変化及び加工への影響を調査した結果を述べる。

5.1 軸表面が青くなっている時間の定義

両極性パルス電源を用いて軸を加工した場合のパルス立下り時に軸が青くなっている時間を定義する。軸が青くなり始めた瞬間と軸が青なくなった瞬間の軸観察の一例を Fig. 11 (a) (b) に示し、その際の極間電圧の測定結果を Fig. 11 (c) に示す。Fig. 11 より、軸が青くなり始めた時刻は 0.504 s、軸が青なくなった時刻は 0.534 s だったため、軸が青くなっている時間は 30 ms となる。本研究では、このように、軸が青くなり始めた時刻から

軸が青くなくなった時刻までの時間を軸が青くなっている時間と定義する。

5.2 パルス周期の影響

両極性パルス電源のパルス周期の変化が、軸が青くなっている時間に与える影響を調査した。パルス周期を 25, 50, 100, 200, 400 ms と変化させ、それぞれの加工開始後の 2 発目のパルス立下り後の青くなっている時間を測定した。パルス周期以外の加工条件は Table 1 と同様とした。代表としてパルス周期 25, 100 ms の観察結果を Fig. 12, 13 に示す。ただし、各図の (a) はパルス立下り後に軸が青くなり始めた瞬間、(b) は軸が青くなくなった瞬間を示し、(c) は加工 30 s 後の正のパルス時の軸の観察結果を示している。加工開始から 30 s 後の軸を観察した理由は、加工開始から数十秒後も軸表面が周期的に青くなる場合、最終的に表面

(c) Relationship between voltage and machining time

Fig. 11 Change in micro-pin appearance corresponding to voltage waveform

状態のよい軸が得られ、周期的に青くならず軸が常に黒くなっている場合は、加工がうまく進行しないことが実験よりわかったためである。本研究では、前者の場合を良加工状態、後者の場合を不良加工状態と呼ぶことにする。各パルス周期の軸が青くなっている時間と加工状態をまとめたものを Fig. 14 に示す。Fig. 12 と 14 より、パルス周期 25 ms の場合、30 s 後の軸は黒く、不良加工となっており、その際の加工開始 2 発目のパルスで

Fig. 12 Pin fabricated with pulse cycle time 25 ms

Fig. 13 Pin fabricated with pulse cycle time 100 ms

Fig. 14 Relationship between blue appearance period and pulse cycle time

の青くなっている時間は 14 ms であった。また、Fig. 13 と 14 より、パルス周期 100 ms の場合では 30 s 後の軸は周期的に軸が青くなる良加工だった。それ以外のパルス周期では、Fig. 14 に示すように青くなっている時間が 24 ms 以上で良加工となっていたため、良加工となるにはパルス周期が 50 ms 以上である必要があることがわかった。

5.3 パルス幅の影響

両極性パルス電源のパルス幅が、軸が青くなっている時間に与える影響を調査した。負のパルス幅を 50 ms に固定して正のパルス幅を 10, 25, 50, 100 ms と変化させた場合と、正のパルス幅を 50 ms に固定して負のパルス幅を 10, 25, 50, 100 ms と変化させた場合の 8 つの実験を行った。各パルス幅の軸が青くなっている時間と加工状態をまとめたものを Fig. 15, 16 に示す。ただし、正のパルス幅 10 ms の青い時間が 0 ms となっているのは、動画を観察した結果、軸が青くならなかったためである。Fig. 15 より、正のパルス幅が 25 ms 以下の青くなっている時間が 0 ms と 18 ms の場合には不良加工となっている。したがって、

Fig. 15 Relationship between blue appearance period and positive pulse duration

Fig. 16 Relationship between blue appearance period and negative pulse duration

良加工となるには正のパルス幅は50 ms以上である必要があることがわかった。また、Fig. 16より、負のパルス幅10, 25, 100 msでは青くなっている時間が42 ms以上と長く、いずれも不良加工となっているため、青くなっている時間が長すぎる場合においても不良加工となることがわかった。したがって、負のパルス幅は50 msにすることで良加工となることがわかった。

5.4 電流値の影響

両極性パルス電源の電流値が、軸が青くなっている時間に与える影響を調査した。負の電流値を30 mAに固定して正の電流値を50, 100, 150 mAと変化させた場合と、正の電流値を100 mAに固定して負のパルス幅を10, 30, 60 mAと変化させた場合の6つの実験を行った。各電流値の軸が青くなっている時間と加工状態をまとめたものをFig. 17, 18に示す。Fig. 17より、正の電流値50 mAの場合の青くなっている時間38 msにおいて不良加工となっている。正の電流値100 mA以上では良加工となり、青くなっている時間は32 ms以下である。また、Fig. 18より、負の電流値10 mAの場合の青くなっている時間60 msにおいて不良加工となっている。負の電流値30 mA以上では良加工となり、青くなっている時間は34 ms以下である。

5.5 超硬合金の電解加工に適したパルス条件のまとめ

以上より、パルス周期、パルス幅、電流値のパラメータと青くなっている時間の関係を全てまとめたものをFig. 19に示す。図より、青くなっている時間が18ms以下の短すぎる場合と38ms以上の長すぎる場合では不良加工となることがわかった。軸が加工中に周期的に青くなる良加工となるには、青くなっている時間が約20 ms以上35 ms以下であればよいということがわかった。したがって、両極性パルスを用いることでパルス立下り時に軸が青くなり、その青くなっている時間によって加工状態の判断が可能といえる。

6 結論

本研究は、パルス波形が超硬合金微細軸の電解加工に及ぼす影響を調べるため、異なるパルス波

Fig. 17 Relationship between blue appearance period and positive current

Fig. 18 Relationship between blue appearance period and negative current

A: Pulse cycle time [ms], B: Positive pulse duration [ms], C: Negative pulse duration [ms], D: Positive current [mA], E: Negative current [mA]

Fig. 19 Summary of relationships between blue appearance period and bipolar pulse parameters

形で形成した微細軸および加工中の軸表面の状態を観察した。その結果、 NaNO_3 電解液による超硬合金微細軸の加工に関して、以下の知見を得た。

- (1) 両極性パルスを用いることで、生成物の付着が少なく、表面性状の良い軸を得ることができた。
- (2) ハイスピードカメラを用いて加工中の軸の観

察を行うことで、生成物の付着と剥離の様子を観察することができた。

- (3) 両極性パルスによる微細軸の加工において軸表面が青くなる現象が観察され、この現象は両極性パルスによる超硬合金の加工メカニズムに関連していると推測される。
- (4) 軸が青くなっている時間が18 ms以下の短い場合と38 ms以上の長い場合には不良加工となり、良加工となるには軸が青くなっている時間が約20 ms以上35 ms以下であることがわかった。

謝辞

本研究の一部は、SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「革新的設計生産技術」によって実施されました。

参考文献

- 1) K.P. Rajurkar, M.M. Sundaram, A.P. Malshe: Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining, *Procedia CIRP*, Vol.6(2013), pp.13–26.
- 2) R. Mathew, M. M. Sundaram: Modeling and fabrication of micro tools by pulsed electrochemical machining, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.212 (2012), pp.1567-1572.
- 3) 佐藤敏一：電解加工と化学加工，朝倉書店，(1970).
- 4) J.F. Wilson: Practice and Theory of Electrochemical Machining, John Wiley & Sons, Inc. (1971).
- 5) Y. M. Lim, S. H. Kim: An electrochemical fabrication method for extremely thin cylindrical micropin, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.41(2001), pp.2287-2296.
- 6) S. H. Choi, S. H. Ryu, D. K. Choi, C. N. Chu: Fabrication of WC micro-shaft by using electrochemical etching, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.31, No.7 (2007), pp.682-687.
- 7) N. Shibuya, Y. Ito, W. Natsu: Electrochemical Machining of Tungsten Carbide Alloy Micro-pin with NaNO_3 Solution, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol.13, No.11 (2012), pp.2075-2078.
- 8) Y. Yang, W. Natsu, W. Zhao: Realization of eco-friendly electrochemical micromachining using mineral water as an electrolyte, *Precision Engineering*, Vol.35, No.2(2011), pp.204-213.
- 9) T. Masuzawa, M. Kimura: Electrochemical Surface Finishing of Tungsten Carbide Alloy, *Annals of the CIRP*, Vol.40, No.1(1991), pp.199-202.
- 10) <http://www.technotype.net/tutorial/tutorial.php?fileId=%7BImage%20processing%7D§ionId=%7B-converting-between-rgb-and-hsv-color-space%7D>
(2015年4月1日受付)