走行ワイヤ工具の放電表面処理と複合加工への応用*

小菅 守** 毛利尚武*** 武沢英樹† 古谷克司††

Surface Treatment of Feeding Wire and Its Application to Combined Machining

Mamoru KOSUGE, Naotake MOHRI, Hideki TAKEZAWA and Katsushi FURUTANI

Abstract

As industrial products become more diverse and higher in performance, more flexible machining systems are required. The purpose of this study is to develop a multifunctional system whose operation is based on the WEDM (wire electrical discharge machining) method. Since wires have long feeding paths that can readily be available for machining, wire characteristics can be manipulated by surface treatment on the paths. Therefore, by developing a multifunctional system using a wire with additional properties improved surface finishes in WEDM can be achieved. In this study, the basic machining method is WEDM as already mentioned. Grinding and surface treatment by EDM are additional methods that can make the system multifunctional. The following procedure was used: First, for the modification of a WED-machined surface, a wire coated with slurry containing titanium carbide powder suspended in glycerol was used to avoid mixing in hydrocarbon oil. Secondly, for grinding the WED-machined surface, the wire was surface-treated by accretion EDM with titanium green compact in hydrocarbon oil so that titanium carbide would be accreted on the surface. Therefore, it is possible to use different machining methods with the treated wire to improved WED-machined surfaces.

Key words: tool wire, combined machining process, electrical discharge machining, surface treatment, grinding

1. はじめに

製品の小型化、高精度化に伴い精密で複雑な形状部品の加工が求められている。また形状精度のみならず、加工中に各種表面処理や表面性状の制御を同時に付与できる複合加工法の開発が望まれる。

筆者らは、形状加工と表面処理を同一機械上で実現する方法として、液中放電表面処理法を開発し報告してきた^{1) 2) 3)}。これは、形彫放電加工の電極として粉末を圧縮成型した電極を使用し、消耗した電極材料が工作物表面に移行堆積する加工法である。また、粉末を加工液に混入した粉末混入放電加工によっても、加工液中の粉末材料が工

作物表面に堆積することが確かめられている^{4) 5)}。一方ワイヤ放電加工では、放電が常にワイヤ電極の新しい部位で発生するため、電極消耗の影響を受けず精度の高い加工が達成できる。このワイヤ放電加工においても、形状加工に伴って電極材料の銅が工作物表面に付着したり、あるいは電解作用により工作物表面が腐食する現象が知られている^{6) 7)}。最近ではこの電解作用を応用し、チタン合金の装飾にワイヤ放電加工が利用された例も報告されている⁸⁾。また、表面処理されたワイヤが加工電極に応用された例もある。亜鉛メッキでワイヤを被覆し放電特性を改善することで、加工が安定し結果として加工速度の向上が確かめられている⁹⁾。しかしながら、ワイヤ放電加工では形彫放電加工において提案された、圧粉体電極のような機能性電極による表面改質加工は実現されていない。これは、ワイヤ電極の表面に放電表面改質が可能な材料を付与することができていないため

*電気加工学会全国大会(1999)にて発表

**非会員 小糸製作所(静岡県清水北脇500番地)

***正会員 東京大学(東京都文京区本郷7-3-1)

†正会員 工学院大学(八王子市中野町2665-1)

††正会員 豊田工業大学(名古屋市天白区久方2-12-1)

Fig.1 Machining processes using in-process treated wire

である。

ワイヤを工具として用いる他の加工として、ワイヤソーによるシリコンインゴットの切断がある。従来は遊離砥粒方式が用いられてきたが、最近では電着ダイヤモンドワイヤによる固定砥粒方式が用いられている¹⁰⁾。また、ガイドに沿って走行するワイヤ電極を用いたワイヤ放電研削法は、マイクロ放電加工用の微細電極の成形などにおいて実用化されている¹¹⁾。

以上のように、走行ワイヤを工具とする加工は多くの分野に適用されているが、形状加工や硬質皮膜の表面処理を同一機械上で複合的に処理する加工法はこれまで提案されていない。本研究では走行ワイヤ工具を用いた同一機械上での複合加工を目的として、走行ワイヤ表面に対して2通りのインプロセス処理を試みた。すなわち、放電表面処理を前処理とした硬質ワイヤによる研削加工(図1(a))とスラリー塗布ワイヤによる放電表面処理(図1(b))を実行し、それぞれの加工特性を検討した。

2. 基本構想と実験装置

2.1 基本構想

ワイヤ放電加工において、形状加工と表面改質加工を同一機械上で行うためには、走行ワイヤ工具に対する前処理をインプロセスで施す必要がある。処理方法や処理条件を変えることにより、走行ワイヤに様々な異なる機能を付与し、処理ワイ

Fig.2 Experimental system

ヤにより最終的な対象である工作物表面への加工を行う。走行ワイヤを用いれば、常に新しい部位で加工が行われるため、高精度加工において工具ワイヤの消耗を考慮する必要がない。本研究では、次の二つのシステムを構築し、それぞれの可能性について検討した。図1に本研究で試みた2通りのワイヤ処理方法とそれによる最終工作物への加工プロセスを示す。第一は、走行ワイヤに対して放電表面改質加工を施し表面に硬質皮膜を形成させ、その硬質皮膜を用いて工作物への研削加工を行う。工作物表面の仕上げ面粗さの向上や形状修正加工を目的とする。第二は、スラリーを走行ワイヤに塗布し、スラリー塗布ワイヤにより工作物へ放電表面改質加工を行う。これは、形状加工を行った工作物表面の表面改質を目的とする。

2.2 実験装置

走行ワイヤを用いた複合加工実験は、試作したワイヤ走行系を形彫放電加工機の加工槽に取り付けて行った。実験装置の概略を図2に示す。ワイヤはプーリを介して配置し、直流モータにより巻き取る。ワイヤテンションは、パウダーブレーキにより調整した。形彫放電加工機の主軸直下に黄銅製ワイヤガイドを2個配置し(G_A - G_B)、この間で形状加工や走行ワイヤへの処理を行う。試作した走行系では、最大10m/minのワイヤ送り速度と20Nのワイヤ張力が得られた。通常のワイヤ放電加工は脱イオン水中で行われるが、本研究では、放電表面処理を行う必要があることから油中にて放電加工を行った¹⁾。

Table 1 Accretion machining conditions to feeding wire

Applied voltage	80 V
Discharge current	15 A
Pulse duration	2 μ s
Pulse interval time	4096 μ s
Wire feed rate	0.5 m/min
Tension of wire	20 N
Electrode (polarity)	TiH ₂ + VC + Gr (-)
Steel wire (polarity)	(+), ϕ 0.12

3. 走行ワイヤへの放電表面処理と処理ワイヤによる研削加工

3. 1 走行ワイヤへの放電表面処理

本節では、走行ワイヤへの放電表面処理条件について述べる。筆者らは、圧粉体電極や半焼結体電極を用いた形彫放電加工により、工作物表面をWCやTiCを含んだ硬質膜で被覆できることを確かめている^{1) 2) 3)}。走行するワイヤの表面を硬質膜で処理することができれば、硬質処理したワイヤを工作物に押しつけることにより研削作用が期待できる。工作物への研削部位には、インプロセスで皮膜処理した走行ワイヤが送り続けられるため、ワイヤ工具の摩耗を考慮する必要がない。本研究では、圧粉体電極を用いて硬質皮膜処理したワイヤ工具による鋼製ノックピンへの溝加工を試みた。走行ワイヤへの放電表面処理は、図2中のワイヤガイド間 (G_A - G_B) で行い、研削加工するピンは、図2中のプーリ P_D 手前に配置して溝加工を行った。走行ワイヤによる研削加工を目的としたため、高張力が設定できる直径0.12mmの鋼製ワイヤを用いた。

走行する鋼製ワイヤへの放電表面処理条件を表1に示す。ワイヤ表面へのTiC硬質皮膜の形成を目指してTiH₂を主成分とした幅2mm、長手方向10mm、厚さ10mmの矩形圧粉体電極を用いた³⁾。圧粉体電極の長手方向をワイヤ走行方向に一致させた。表1に示すように、ワイヤへの放電表面処理では、放電によるワイヤ断線を防止するためパルス幅を設定可能な最小幅にし、休止時間を比較的に長く設定した。これらの条件で処理されたワイ

Fig.3 Wire surface profile after accretion machining **Fig.4** Surface analysis of accreted steel wire

ヤ表面の、ワイヤ走行方向の表面プロファイルを図3に示す。ワイヤ表面には5~8 μ m程度の突起がランダムに付着していることがわかる。また、表面処理ワイヤの断面元素分析結果を図4に示す。走行ワイヤの電極対向面にTi元素の付着が確認できる。別途、停止させたワイヤ表面に同様の圧粉体電極を用いた厚膜放電表面処理を行いX線回折分析を行ったところ、TiCの生成を確認した。これより、走行するワイヤに対しても、TiH₂圧粉体電極を用いた放電表面処理によりTiC膜が形成されていると考えられる。

3. 2 処理ワイヤによる研削加工結果

本節では、放電表面処理ワイヤの研削機能を確認するためにインプロセス研削加工を実施した内容について述べる。研削加工の対象物として直径3mmの鋼製ノックピン（硬度：HRC50）を用いた。ピンはマイクロスピンドルに保持されて回転

Fig.5 Grinding system using wire treated by EDM

する。マイクロスピンドル本体は制御モータ付きのX-Yステージ（パルスステージ）に固定され、切り込みと送りの制御を可能にしている。図5に研削部の装置を示す。ワイヤに形成される硬質突起物は放電表面処理用電極の対向面にしか形成されないため、工作物にはこの面方向から加工を行った。また、ワイヤの振動が研削加工に影響しないように、ベアリングをワイヤのガイドとして用い、ガイド部で研削加工が行われるよう位置設定を行った。ノックピンへの研削加工は、パルスステージを操作して幅2mmの往復運動と1 μ mの切り込みを10回繰り返して、合計10 μ mの切り込みを与えた。ノックピンの回転数と往復運動の送り速度は、それぞれ900rpmと200 μ m/sである。図6に、ノックピン研削加工部の断面プロファイルを示す。10 μ mの切り込みに対して、深さ7 μ m程度の溝が加工されている。設定溝深さが得られていないのは、本方式が圧力転写加工になっているためである。溝底部の面粗さは $R_a:0.16\mu$ mであった。ワイヤ表面の放電表面処理条件や研削加工条件を検討すれば面粗さをさらに改善できると思われる。

4. スラリ塗布ワイヤによる表面処理

4. 1 走行ワイヤへのスラリ塗布と工作物への表面処理

本章では、スラリを塗布した走行ワイヤを用いた工作物表面への放電表面処理結果について述べる。これまでに粉末混入加工液を用いた形彫放電

Fig.6 Ground profile of workpiece (steel pin)

Fig.7 Coating on wire surface with slurry

加工において、工作物表面が表面改質されることが確認されている^{1,2)}。したがって、スラリを介してワイヤと工作物の間で放電が発生すれば、スラリ中の粉末成分が工作物表面に移行堆積して、工作物表面の表面改質が期待できる。本実験では、形彫放電加工機に走行ワイヤ系を取り付け、油中にて放電加工を行っている。このため、使用するスラリは油に溶けにくいグリセリンを選定した。また、グリセリンの粘性を高めるために少量のグラファイト粉末を混入した。このグラファイト混入スラリを用いれば、走行ワイヤに塗布しても垂れ落ちることなく放電部までスラリがワイヤ表面上に保持される。

ベースとなるスラリ材には、硬質皮膜の形成を目的として、TiCの粉末を用いた。TiC、グラファイト、グリセリンの重量比は20:1:10とした。具体的にはTiCとグリセリンの配合比を固定し、粘度調整用のグラファイトの微粉末を少量ずつ添加していき、走行ワイヤ表面にスラリが保持されるよう、グラファイト粉末量を選定した。走行ワイ

Fig.8 Machining shape and measurement points

Fig.9 Machined workpiece

ヤへのスラリ塗布は、図7中のプーリ P_A へスラリを供給しプーリを通過することで走行ワイヤの表面にスラリが塗布される。スラリが塗布された走行ワイヤが主軸下部のガイド(G_A - G_B)に到達し、主軸に取り付けられた工作物との間で放電が発生して放電表面処理が行われる。

4. 2 実験手順

一連の加工プロセスを述べる。はじめに、加工機主軸側に取り付けた工作物に対して、未処理の走行ワイヤを用いたワイヤ放電加工により所定の形状加工を行う。次に、スラリを走行ワイヤに塗布し、スラリ塗布ワイヤにより、工作物の形状加工面に対して放電表面処理を行う。工作物の加工形状は半径3mmの半円形とした。図8(a)に加工形状を、スラリ塗布ワイヤによる表面処理部を図8(b)に示す。図8(a)のハッチング部分

Table 2 Accretion machining conditions by slurry

Applied voltage	320 V
Discharge current	5A
Pulse duration	2 μ s
Pulse interval time	2 μ s
Workpiece feed rate	0.3mm/min
Wire feed rate	1.1m/min
Tension of wire	10 N
Wire(polarity)	Brass(-), ϕ 0.2
Workpiece (polarity)	SKD61(+), t=5mm
Slurry(mixing ratio)	TiC:Gr:Glycerol (20:1:10)

Fig.10 Surface analysis of cross-section

は、ワイヤ放電加工により切り落とされた形状である。スラリ塗布ワイヤによる放電条件を表2に示す。走行ワイヤは通常のワイヤ放電加工に用いられる直径0.2mmの黄銅ワイヤを用い、工作物には厚さ5mmの熱間ダイス鋼(SKD61)を用いた。放電表面処理を行う際の工作物とスラリ塗布ワイヤとの極間距離を50 μ mに設定し、スラリを介して放電が発生するように考慮した。ワイヤの走行速度は1.1m/min、工作物の走査速度は0.3mm/minで行った。

4. 3 放電表面処理面の面性状

スラリ塗布ワイヤにより放電表面処理された工作物表面の評価結果について述べる。表面処理後の工作物の外観を図9に示す。表面処理面及びスラリに混入したTiC粉末に対してX線回折測定を行い、X線プロファイルを比較した結果、加工面

にTiCが付着していることを確認した。さらに、加工面に形成されているTiC層の厚さを調べるために、表面処理断面の面分析を行った。図10に、表面処理断面のSEM写真(a)及びTiの面分析結果(b)を合わせて示す。図より、Tiは処理面全面に分布し、さらに工作物上面(図10(b)上部)にも達している。この上面はワイヤの進入面であるため、ワイヤに付着していたスラリがしごかれて付着し、放電が角部で発生することで堆積したと考えられる。Tiが厚さ10 μ m程度に分布していることから、工作物表面の改質膜厚さは10 μ m程度と推察される。表面処理面の硬度をマイクロビッカース硬度計で測定したところ、1400~2400HV(荷重98.07mN)の範囲であった。母材のSKD61の硬度を同様に測定したところ400HV程度であり、表面処理後は3倍以上の硬度を示している。加工面の面粗さは、未処理ワイヤによる形状加工後でRy:15 μ m、スラリ塗布ワイヤによる表面処理後はRy:8 μ mであった。これより、スラリ塗布ワイヤを用いることでワイヤ放電加工による形状加工と形状加工面に対する放電表面処理加工が同一機械上で連続処理できることが確かめられた。

5. ま と め

走行ワイヤを工具として用い、放電加工による形状加工と表面改質加工および研削加工を同一機械上で行うことができる複合加工システムの開発を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 試作したワイヤ走行系を形彫放電加工機の加工槽に設置し、ワイヤ放電加工の要領で加工電源等改造することなく形状加工が可能であることを確認した。
- 2) 圧粉体電極を用いて走行ワイヤに対して放電表面処理を行い、硬質膜が付着したワイヤ工具を成形できた。さらに、同一機械上で硬質処理ワイヤを用いた研削加工を実施し、鋼製ノックピンに対しての溝加工を実現した。
- 3) スラリ塗布ワイヤを用いて放電加工機主軸側に取り付けた工作物表面に対して放電表面処理を行い、処理面にTiCを含んだ硬質皮膜の形成を行った。

本研究において走行ワイヤの表面をインプロセスで処理し、さらに同一機械上で複合加工を実施したことにより、ワイヤ放電加工の適用分野が拡大することが期待できる。ワイヤ放電加工においては加工後の工作物形状を、ワイヤを傾けたり凸部を設けるなどの工夫を施して計測プローブとして計測する手法がこれまで試みられており、この機能を装備した工作機械もすでに市販されている¹³⁾¹⁴⁾。本論文で提案した走行ワイヤ工具を用いた複合加工システムに、上記のような机上計測技術及び形状フィードバック技術¹⁵⁾を組み合わせることで自己完結型の複合加工機が実現できると考えられる。

謝 辞

本研究は元豊田工業大学助手 太田勝氏、名古屋工業大学(現:トクヨー工業) 角田隆太氏にご協力いただきました。また、本研究の一部には文部省科学研究費補助金(基盤研究10555044)を用いました。記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 毛利尚武, 齋藤長男, 恒川好樹, 初山英教, 宮川昭彦: 放電加工による表面処理—複合構造体電極法—, 精密工学会誌, **59**,4(1993)625.
- 2) N. Mohri, N. Saito and Y. Tsunekawa: Metal Surface Modification by Electrical Discharge Machining with Composite Electrode, Ann. CIRP, **42**/1(1993)219.
- 3) 毛呂俊夫, 後藤昭弘, 毛利尚武, 齋藤長男, 三宅英孝, 秋吉雅夫: TiH₂圧粉体電極による放電表面改質の研究, 電氣加工学会誌, **35**,78(2001)26.
- 4) Furutani, K., Saneto, A., Takezawa, H., Mohri, N., Miyake, H.: Accretion of Titanium Carbide by Electrical Discharge Machining with Powder Suspended in Working Fluid, Precision Engineering, Vol. 25, No. 2(2001)128.
- 5) 古谷克司, 白木勝己, 太田勝: 粉末放電加工による仕上げ面および潤滑面の同時形成, 精密工学会誌, **67**,12(2001)2042.
- 6) 福井雅彦, 木下夏夫: ワイヤ放電加工におけるワイヤ電極の開発(第1報), 電氣加工学会誌, **16**,32(1983)25.

- 7) 真柄卓司, 山田久, 佐藤清侍, 弥富剛, 小林和彦: 非電解ワイヤ放電加工による加工面の高品質化, 精密工学会誌, **59**,7(1993)1157.
- 8) 南 久, 増井清徳, 北口嘉亮, 大山博, 塚原秀和: 放電加工によるチタン合金の着色仕上げ, 電気加工学会誌, **32**,70(1998)32.
- 9) 福井雅彦, 高橋俊治, 木下夏夫, 折茂尚夫: ワイヤ放電加工の研究－表面処理ワイヤ電極線と放電特性－, 電気加工学会誌, **21**,42(1988)25.
- 10) 中山卓, 吉川昌範, 戸倉和, 佐藤純一: ダイヤモンド粒被覆ワイヤ工具の製作, 精密工学会誌, **53**,7(1987)1045.
- 11) Masuzawa, T., Fujino, M., Kobayasi, K., Suzuki, T.: Wire Electro-discharge Grinding for Micro Machining, Annals of the CIRP, **34**,1(1985)431.
- 12) 鈴木正彦, 毛利尚武, 齋藤長男: 放電加工による金属表面の表面処理, 精密工学会誌, **53**,2(1987)243.
- 13) 毛利尚武: 放電加工機と加工技術, 機械と工具, **47**,1(2003)32.
- 14) 小原治樹, 辻晶樹, 大住剛, 羽田野正俊: ワイヤプローブを用いた微細貫通形状計測装置の開発, 精密工学会誌, **67**,4(2001)633.
- 15) 武沢英樹, 古谷克司, 毛利尚武: 形状フィードバック型精密加工システムの開発 (第1報), 精密工学会誌, **65**,3(1999)406.

(2004 年 7 月 13 日受付)