電解セカンドカットによるワイヤ放電 加工面の仕上加工*

酒 井 茂 紀** 増 沢 隆 久***

ECM Second Cut for Finishing the Surface Produced by Wire EDM

Shigenori SAKAI and Takahisa MASUZAWA

One of the problems of using NC-wire EDM is that in some cases the quality of the machined surface is not sufficient. When a very smooth surface is required, a further finishing process is necessary. However, this takes time and man power. In this paper an application of wire ECM is proposed for this finishing purpose. The final 'second cut' operation of wire EDM process is changed to pulsed wire ECM. Sodium nitrate solution is used as the electrolyte. The results of the experiments show the applicability of this method in practical use. It will lead the wire EDM process to a full automatic process including the final surface smoothing.

Key words: electro-chemical machining, electro-discharge machining, second cut, surface roughness, heat-affected layer, wire EDM, wire ECM

1. 結 言

ワイヤ放電加工を用いると、抜型等の複雑な輪郭加工を比較的容易に行うことができる。しかし一般に加工後の表面には軟化した変質層が生ずるとされ、また加工面はクレータの集積であるために、ある限度以下の面粗さを得ることは困難である。そこで実際に型として使用する場合、表面変質層の除去や、より滑らかな仕上面を必要とする時はワイヤカットによる加工後さらに仕上工程が必要となる。すなわちダイヤモンド砥粒を用いたやすり、またはラップなどの手仕上等が行われることが多い。こうした工程は熟練と長い処理時間を必要とするので、できれば何らかの自動化可能な方法に置き換えることが望ましい。

この問題を解決する一つの方法として電解加工を採用することが考えられる。一般の成形した電極を用いる電解加工によって上記のような仕上を行うことはかなり困難と思われるが、ワイヤ電極による電解加工をワイヤ放電加工に組み合わせることは可能である。すなわちワイヤ放電加工機で放電加工の後、そのままの電極セッティングで加工液のみ交換し電解加工による仕上を行う方法である。この方法によれば一度のセッ

ティングで、荒加工から従来手作業に依存していた仕上加工まで容易に、かつ自動的に完了する。

本研究では上述の方法（以下電解セカンドカットと呼称する）を提案すると共に、その基礎的な加工特性ならびに加工面の性状について実験、検討を行った。

2. 実験方法および装置

実験に使用した装置はワイヤ放電加工機（三菱電機社製 DWC-110 形）で一般に生産工場等で用いられているものである。本装置はトランジスタ制御付きコンデンサ放電回路を使用している。これに電解セカンドカットを可能にするため、電解加工用電源と電解液循環回路を付加した。加工電源の構成と加工液の循環系統図を図 1、図 2 に示す。図における各部の操作は次の通りである。

加工電源はスイッチ SW によりそれぞれ目的に応じて切り換える。加工液は放電加工時にはポンプ P1 により供給され、弁 4, 8, 9, 5 を開き循環する。また電解セカンドカット時はポンプ P2 により供給され、弁 3・8・6 を経て循環される。なお弁 8, 9 は流量調節弁である。電解セカンドカット後、加工槽とノズル内部に残留した電解液は図 2 の弁 1, 2 を開くことにより洗浄され、弁 7 を経て排出される。

図 3 に実験方法の概略を示す。実験に使用した試料は厚さ 10 mm の SKD 11 材で、焼入れ、焼戻し処理を施した。またワイヤ電極は直径 0.2 mm の黄銅線で、一般に使用されているものである。実験順序は放電

* 原稿受付 昭和 59 年 2 月 16 日、昭和 56 年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和 56 年 11 月 5 日）にて発表

** 正 会 員 日本工業大学（埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1）

*** 正 会 員 東京大学生産技術研究所（東京都港区六本木 7-22-1）

Fig. 1 Basic construction of the test equipment

Fig. 2 Flow circuit of working fluid

Fig. 3 View of a machined workpiece

ファーストカットで試料を切断した後、ワイヤ電極の位置を試料側に $15\mu\text{m}$ ずつオフセットさせて放電セカンドカットを2回(図3の2nd cut, 3rd cut)行い、その後目的とする電解セカンドカットをオフセット量0にして行った。放電セカンドカットを2回にしたのは、1回では放電ファーストカット面の除去が不可能であったためである。いずれの場合も定速加工とした。

各々の加工条件を表1に、また前加工としてのワイヤ放電加工のファーストカットとセカンドカットの相対位置関係を表2に示す。表2において、加工量(removal depth)とは前カット面との段差量であり、測長器により測定した平均値を示す。1st cutの間隙は電気接触法で求めたが、2nd cut, 3rd cutの間隙はオフセット量と加工量より計算した値である。

電解加工(電解セカンドカット)用電源としては、

Table 1 Conditions of wire EDM and wire ECM

Wire EDM			Wire ECM	
	1st cut	2nd cut		
Open-circuit voltage V	130	130	Gap voltage V	20
Pulse duration μs	2.5	0.4	Pulse duration	$5\mu\text{s}$ -5ms
Peak current A	75	20	Duty factor	1/1-1/40
Discharge capacitor	$1.2\mu\text{F}$	10nF		
Table speed mm/min	2	10		10-80
Wire travelling speed m/min	3	3		3
Wire tension N	7	7		7
Resistivity of dielectric Ωcm	4×10^4	4×10^4	5%(wt) NaNO_3 solution	

Table 2 Dimensions in wire EDM operations
Unit ; μm

	1st cut	2nd cut	3rd cut
Offset*	—	15	15
Removal depth*	—	12	8
Gap μm	33*	30	23

* Measured value

電界効果型トランジスタのスイッチングによるパルス電源を用いた。パルス幅変化範囲は表1の通りであるが、比較のため、直流による実験もあわせて行った。

3. 実験結果および考察

前述の表2のように放電3rd cut終了後、ワイヤ電極と試料との間隙は $23\mu\text{m}$ の値である。電解セカンドカットの実験に際し、初期間隙がこの値となるため加工中の短絡は皆無であった。加工時のパルスピーク電流は $4\sim 6\text{A}$ で、前加工の放電3rd cut面のうねりに影響され加工中において若干の電流変動が生ずる様子を示すが、パルス幅、衝撃係数の変化による影響は判別できなかった。以下、電解セカンドカット時において加工電流のパルス幅、衝撃係数、さらにテーブル送り速度が加工量、面粗さ、エッジ部のだれ等、試料の表面性状に与える影響について検討する。

3.1 加工量と表面変質層の除去

図4にパルス幅が加工量に及ぼす影響について衝撃係数別に示した。加工量は衝撃係数 $1/4$ で、またパルス幅 $0.02\sim 0.5\text{ms}$ の間で最大となる。特に衝撃係数 $1/12$ 以上のパルス電流では直流の場合より加工量が多くなる傾向になる。このようにパルス幅および衝撃係数により加工に差異が生ずるのは、ワイヤ電極による電解スリット加工においても見られ、主として電解生成物濃度による影響と考えられている¹⁾。本実験では加工液を流しかけているが、実際に加工の行われている狭い間隙においては一般の電解加工と同様の液流が

Fig. 4 Effects of pulse duration and duty factor on the removal depth
Table speed; 10 mm/min

Fig. 6 Effects of table speed and duty factor on the removal depth

(a) Wire EDM (3rd cut) (b) Wire ECM

Fig. 5 Comparison of the surface layers before and after wire ECM
Pulse duration; 0.1 ms, Duty factor; 1/2, Table speed; 10 mm/min

得られているとは考えられない。その結果、静止液中での加工におけるパルス電流の効果²⁾に近い状況であると思われる。

図5は試料の加工面を上にして、その加工面と直角方向に切断したもので、放電3rd cut面に形成された表面変質層と、電解セカンドカットにより表面変質層が除去された様子を示している。(a)の放電3rd cut面に生じた表面変質層の深さは5 μm程度であるが、その量を除去するためには少なくとも同量以上の加工量が得られる条件で加工されねばならない。この除去条件を考慮すると、図5に見られたように衝撃係数の小さいパルス電流では表面変質層の除去が不可能となる場合がある。一方、加工量の多いパルス幅では、テーブル送り速度を上昇させてもその除去が期待できる。

加工量が最大であった、パルス幅0.1 msにおけるテーブル送り速度を変えた場合の加工量を図6に示す。テーブル送り速度の上昇に伴い加工量は減少する。単に表面変質層の除去を目的とする場合、パルス電流を用い適当な衝撃係数の選択により80 mm/minのテーブル送り速度でも、その除去が可能であると考えられる。

Fig. 7 Surface roughness records for various duty factors
Pulse duration; 0.01 ms, Table speed; 10 mm/min

3.2 加工面粗さと表面の状態

図7に放電3rd cut面、パルス幅およびテーブル送り速度を一定にした場合の加工面の粗さ曲線の実例を衝撃係数別に列挙した。図により前加工の放電3rd cut面は(a)に示す通り突起の多い加工面である。(b)以下の電解セカンドカットによりその突起は除去され、加工面の平滑化がなされる。

一方、衝撃係数の大きい1/2, 1/4ではところどころ大きなくぼみを生ずる。そのくぼみは衝撃係数が1/8より小さくなるに従い現れなくなるが、衝撃係数が小

Fig. 8 Comparison of the surfaces before and after wire ECM for various duty factors
Pulse duration; 0.2 ms, Table speed; 10 mm/min

さくなればなるほど前加工の放電3rd cut面の突起が残留する傾向を示している。

これらの加工面をSEMで観測したものが図8である。図により加工状況は次のように説明される。電解セカンドカットは前加工の放電3rd cut面の突起を除去し、面の平滑化を行う。しかし試料のSKD 11材を構成するCr, Mo, V等の析出した共晶粒の選択溶解が起こることにより、図8(b)あるいは図7(c), (d)に見られたようなくぼみが形成される。

このように、放電加工面のピッチの細かい突起の除去と選択溶解によると思われるくぼみの形成抑制とはやや相反した要求となっており、加工条件設定もそれだけ慎重さを要求される。

図9, 10に加工量の最も多い実験条件、すなわちパルス幅0.1 ms, 衝撃係数1/4でテーブル送り速度を変化させて電解セカンドカットを行った場合の、表面の粗さ曲線および表面の状態を示す。両図により、テーブル送り速度10~20 mm/minでは結晶粒の選択溶出が認められる。しかし40 mm/minより溶出の抑制が見られるようになり、60~80 mm/minではさらにそれが

顕著となる。他方、表面粗さの点では図7(a)の放電3rd cut面と比較し、いずれも減少し、テーブル送り速度80 mm/minでも3 μm以下の粗さ曲線を呈する。

以上のことから、前加工の放電3rd cutの面粗さ程度の加工量となるように加工条件を設定することで、結晶粒の選択溶出を抑制し、同時に最良の仕上面が一応達成できることがわかる。

本実験では最良放電加工面粗さが6 μmであったた

Fig. 9 Surface roughness records for various table speeds
Pulse duration; 0.1 ms, Duty factor; 1/4

Fig. 10 Comparison of the surfaces after wire ECM for various table speeds
Pulse duration; 0.1 ms, Duty factor; 1/4

Fig. 11 Effects of pulse duration and duty factor on the sharpness of the machined edge

Fig. 12 Effects of table speed and duty factor on the sharpness of the machined edge

め得られた最良の面粗さは $3\mu\text{m}$ であったが、ピッチの細かい突起の除去に対する電解の効果を検討すると、より良い加工面に対してさらに良い仕上面が期待できる。

3.3 エッジ部の形状精度

一般に電解加工は、絶縁液を加工液として使用する放電加工と異なり、電解液であることの因子が形状精度に影響を及ぼすと考えられている。本研究の場合、電解液がワイヤ電極と試料のセカンドカットする面との、いわゆる極間部以外の試料各部に付着する。そのため二次電解による除去作用が試料のエッジ部に与える影響が問題となる可能性がある。

図 11, 12 にパルス幅、テーブル送り速度に対するだれ寸法を示す。ここで言うだれ寸法とは、セカンドカット面および試料上面との各延長線の交点からエッジ R 部表面までの最短距離である。また図示しただれ寸

法の値は、測定に使用した触針式形状測定器の触針ノーズ R の寸法が補正されている。

図 11 においては、衝撃係数にかかわらずパルス幅が長くなるに従いだれ寸法が増加する傾向が見られる。しかしその変化量は少なく最大で $10\mu\text{m}$ 程度である。一方、図 12 に示すように、テーブル送り速度がだれ寸法に与える影響は大きく、テーブル送り速度の増加とともにだれ寸法は減少する。特に衝撃係数が大きい程その影響を受けやすい。さらに両図から衝撃係数もだれ寸法に与える影響が大きく、衝撃係数が小さくなるにつれてだれ寸法が減少する。従ってだれ寸法の抑制の面からは、仕上面粗さ改善および表面変質層除去の目的が達成できる範囲で、できるだけ小さい衝撃係数と大きなテーブル送り速度とすることが望ましい。

4. 結 言

ワイヤ放電加工面の粗さ改善の方法として電解セカンドカット法を提案し、その特性について実験、検討を行った。試料として SKD 11 材、電解液として NaNO_3 水溶液を用い、放電 3rd cut 後に電解セカンドカットを実施することにより得た結果は次の通りである。

- (1) $6\mu\text{m} R_{\text{max}}$ の面粗さは、1 回の電解セカンドカット工程で $3\mu\text{m} R_{\text{max}}$ に改善される。
- (2) テーブル送り速度の高い条件で放電加工変質層除去が十分行えるので、処理時間は短く、実用性が高い。例えば、パルス幅 0.1ms 、 $1/8$ の衝撃係数では、 80mm/min のテーブル送り速度で良い結果を得ることができた。
- (3) 結晶粒の選択溶出が加工面に観察される。この現象は衝撃係数を小さくするか、テーブル送り速度の増加により抑制される。
- (4) パルス電流を用いることにより、電解セカンドカットのだれの発生は実用上十分な程度に小さくすることができる。だれ量は衝撃係数の小さい程またテーブル送り速度が大きい程小さくなる傾向がある。

参 考 文 献

- 1) 前田龍太郎, 近森邦夫, 山本秀夫: パルス電流を用いたワイヤカット電解加工法の加工速度, 精密機械, 49, 6(1983) 709.
- 2) 近森邦夫, 木下茂人: パルス電流による電解ワイヤカット, 昭和 53 年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1978) 407.