

マイクロ加工に関する研究

—微小形状の創成加工に関する研究—

山田 博之・勝又 信行・宮本 博永・佐野 正明・橋田 鉄雄

Study on Micro Fabrication Technology

— Study on Micro Fabrication by micro-EDM —

Hiroyuki YAMADA, Nobuyuki KATSUMATA, Hironaga MIYAMOTO, Masaaki SANO and Tetsuo KITTA

要 約

本研究では、はじめに放電加工機の電気条件の違いによる加工表面粗さへの影響を調べ、次に超音波振動を加工液と加工物の両方に付加することによる加工状態への影響について調べた。その結果、超音波振動を付加した放電加工では通常加工に比べ加工表面粗さの測定値に大きな違いはなかったが、クラックなどの加工表面の小さな凹凸がない放電痕のみの加工面が得られた。一方、微小形状の仕上げ方法として電解研磨や化学研磨について検討した。その結果、電解研磨では短時間で滑らかな面を得ることができたが、表面にうねりが生じた。一方化学研磨では、微小な凹部の処理も可能であった。また、微小電極を用いた創成放電加工による加工条件を検討し、実際に微小形状を作製し、上記仕上げ方法の適用を試みた。

1. 緒 言

現在、様々な分野において、各種材料を対象にした微小・微細形状のマイクロ加工が求められている。特に、今後需要の増加が予想される利用分野の一例として、電気電子部品や通信機器など小型精密機器向けの微小部品が考えられる。具体的にはコネクタ部品や微小ノズル、マイクロ分析チップ、微小ギヤ等の微小機構部品などが挙げられる。これらの加工における特徴として、第一に、加工寸法が従来の切削加工の分野よりも小さいが、エッチング加工や微細用レーザ加工による加工寸法よりは大きく比較的大面積を加工しなければならないことである。第二に、成形金型やプレス金型を用い量産化することが望まれていることである。

このような加工に適した加工方法として、微細放電加工機による微小形状の加工が考えられる。しかし、通常の形彫放電加工とは加工条件や加工状態が異なることや、放電加工による微細な穴加工においては気泡や加工屑の排出が悪くなり、それらが滞留することによって加工時間が長くなるとともに加工面粗さが悪化するなどの問題がある¹⁾。これまでに電極や加工物または加工液に超音波振動を付加する方法が報告されている^{2)~4)}。しかし、装置に複雑な機構が必要なこと、加工時間への効果はあるが加工表面粗さへの効果が小さい場合や、むしろ悪化してしまうなどの問題がある。

そこで本研究では、はじめに放電加工機の電気条件の違いによる表面粗さへの影響を調べ、次に超音波振動を電極や加工物または加工液に単独に与えるのではなく、加工液と加工物の両方に弱い超音波振動を付加することによる加工状態への影響について調べた。

一方、金型の加工では仕上げ加工が必要となるが、対象とする加工面が微小形状であるため自動化が困難であり、加工能率が悪く品質の安定性に乏しいなどの問題がある。

そこで本研究では、微小形状の仕上げ方法として電解研磨仕上げや化学研磨仕上げについて検討した。また、微小電極を用いた創成放電加工による加工条件を検討するとともに微小形状を作製し、上記仕上げ方法の適用を試みた。

2. 実験方法

2-1 放電加工の検討

本実験では三菱電機製の微細放電加工機EDSCAN8Eを用いた。使用した放電加工機には、ワイヤ放電研削加工(WEDG)が装備されており、これにより電極の端面成形加工を行い、電極端面の表面粗さを同一にして、各加工実験を行った。電気条件E852で端面成形加工を行った場合の電極端面の表面粗さ測定結果はおよそ $Ry6\sim 7\mu m$ 、 $Ra1\mu m$ である。

加工機の電気条件の違いによる加工表面粗さの検討を行った実験条件をTable 1に示す。

また、超音波振動を付加することによる加工時間および表面粗さの検討を行った実験条件をTable 2 に、実験装置の構成図をFig. 1 にそれぞれ示す。加工槽として超音波洗浄機を用い、加工液に超音波振動を付加することによって、安価に装置改造を可能にした。さらに、加工槽底部に治具を装備して加工物を固定することによって、加工物に超音波振動を付加した。

加工面の評価には、表面粗さ測定機による表面粗さ測定結果と電子顕微鏡による表面観察結果を用いた。

Table 1 電気条件検討の実験条件

放電加工機	三菱電機EDSCAN8E
加工液	DIAMOND EDF-K
電極材質	タングステン
電極直径	φ 1 mm
被加工物	SUS304
ジャンプ	あり
表面粗さ設定値	①10~11 μm
	②5~6 μm
	③微細用電気条件

Table 2 超音波振動付加放電加工の実験条件

放電加工機	三菱電機EDSCAN8E
加工液	DIAMOND EDF-K
電極材質	タングステン
電極直径	φ 0.3, 長さ 1 mm
被加工物	SCM鋼
ジャンプ	あり
超音波振動 (超音波洗浄機仕様)	周波数: 38kHz
	出力: 120W

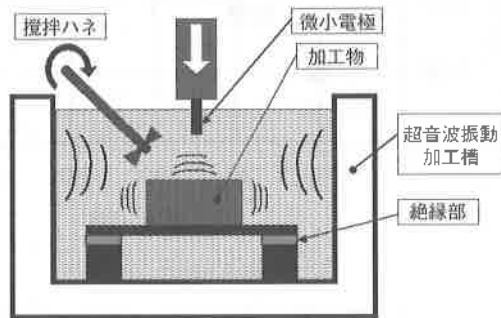


Fig. 1 超音波振動付加放電加工の実験装置

2-2 電解加工の検討

電解加工はFig. 2 に示すような実験装置を用い、Table 3

に示す条件で加工を行った。

試料は、市販のSUS304を用い、表面状態が観察しやすいようにあらかじめエメリーペーパー (#320) で研磨したものをを用いた。また陰極は、電極の面積を一定にするため、熱収縮チューブで被覆を行い、電極面積を約 4 mm²にした。

加工面の評価は、走査型電子顕微鏡と表面粗さ計を用いた。

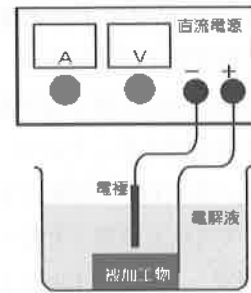


Fig. 2 電解加工実験模式図

Table 3 電解加工条件

被加工物	SUS304
電 極	タングステン電極 (φ 1 mm)
電極間距離	0.5, 1.0mm
電 解 液	硝酸ナトリウム: 31 g
	塩 酸: 8 g
	水: 500ml
電 圧	7, 10, 13 (V)
攪拌方法	無攪拌, 超音波加振, 電極回転

2-3 化学研磨仕上げの検討

化学研磨は、市販のステンレス用化学研磨処理液 (横浜ネブロス製, ネブロス#507) を用いた。試料は市販のステンレス材SUS304に、Fig. 3 に示す切削加工を施したものをを用い、所定時間処理後の表面状態を走査型電子顕微鏡ならびに走査型プローブ顕微鏡を用いて観察した。

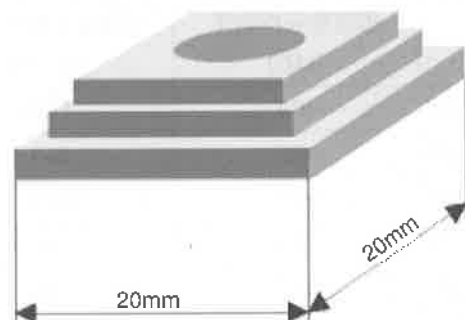


Fig. 3 化学研磨用試料

Table 4 放電加工条件と実験結果

加工条件		実験結果		
表面粗さ設定値 [μm]	加工深さ設定値 [mm]	粗さ測定値Ry [μm]	粗さ測定値Ra [μm]	加工時間
10~11 μm	0.2	12.60	2.07	1 : 20
5 ~ 6 μm	0.2	6.15	0.97	8 : 30
微細用電気条件	0.1	2.57	0.37	16 : 00

3. 実験結果および考察

3-1 微小形状放電加工の電気条件

本実験で用いた微細放電加工機は電気条件プログラムで加工面の表面粗さを指定できる。そこで、表面粗さの設定値を3種類に設定し、表面粗さが測定できるように直径 ϕ 1 mmの電極を使用して穴仕上げ加工を行った。加工条件と加工表面の粗さを測定した結果をTable 4 に示す。電気条件プログラムの表面粗さ設定値とほぼ同じ粗さの加工面が得られた。しかし、微細用電気条件では、表面粗さはRy2.57 μm 、Ra0.37 μm と良好な加工面が得られたが、0.1mmの穴明け加工に約16時間要した。したがって、微細用電気条件では表面粗さを小さくできるが、加工時間が非常に長くなり、加工効率が悪いことが問題である。

3-2 超音波振動付加放電加工

微細放電加工における加工効率と加工表面粗さの向上を目的として、加工液および加工物に超音波振動を付加することによる加工時間と加工表面粗さへの影響を調べた。

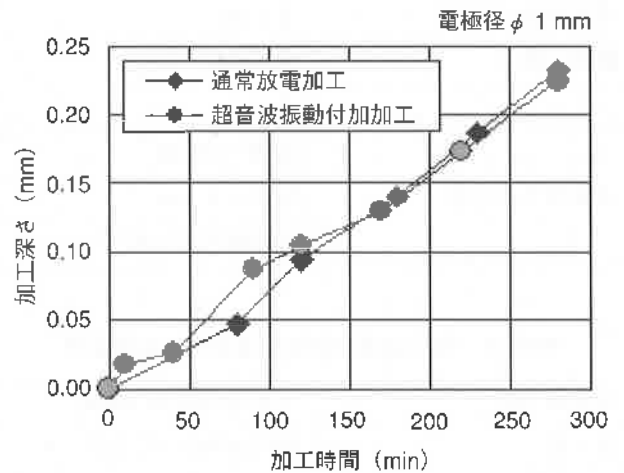
まず加振状態を調べるため、加工槽内壁と加工物に加速度センサを取り付けて振動加速度を測定した。測定した加速度波形の最大片振幅と周波数分析を行った結果をTable 5 に示す。加工槽の内壁は主に約41kHzで3方向に振動しており、内壁面の面積が大きいため振幅が大きく、加工液に十分に振動を伝達できると考えられる。また、加工物も主に約40kHzで3方向に振動しており、振動加速度は50~150 m/s^2 であった。

Table 5 超音波振動の測定結果

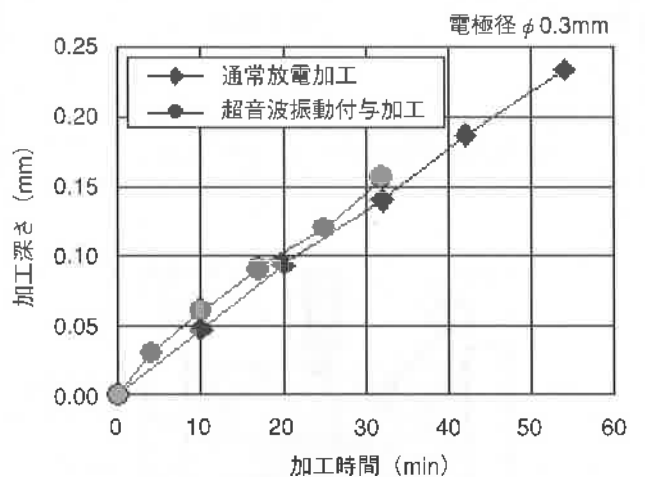
		周波数分析結果	実波形の最大振幅
		[kHz]	[m/s^2]
加工槽	X方向	40.8	1470
	Y方向	40.5	819
	Z方向	42.0	1313
加工物	X方向	40.3	49
	Y方向	39.7	74
	Z方向	40.8	144

直径 ϕ 1 mmの電極を使用して ϕ 1.05mmの穴加工を行った場合と直径 ϕ 0.3mmの電極を使用して ϕ 0.35mmの穴加工を行った場合の加工深さと加工時間との関係をFig. 4 に示す。

Fig. 4 のように本加工条件の場合、加工時間は超音波振動を付加しても大きな変化は見られなかった。



(a) 電極直径 1 mm の場合



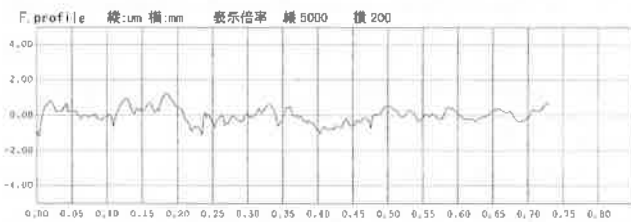
(b) 電極直径 0.3 mm の場合

Fig. 4 加工深さと加工時間との関係

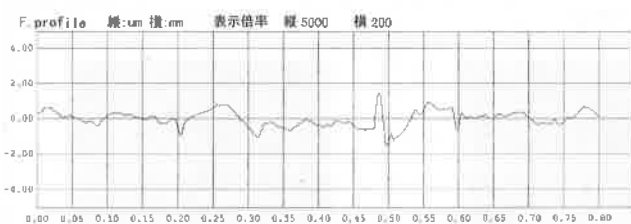
次に、超音波振動を付加した場合の表面粗さへの影響について調べた。直径 ϕ 1 mmの電極を使用して ϕ 1.05mm深さ0.3mmの穴加工を行った時の表面粗さの測定結果をTable 6に、その粗さ波形をFig. 5に示す。通常加工、超音波振動付加加工ともに表面粗さはほとんど同じ値であったが、粗さの測定波形を比較すると通常加工の加工面には小さな凹凸があることがわかる。そこで、電子顕微鏡により加工表面の観察を行った結果をFig. 6に示す。通常加工による加工表面には小さなクラックが全面に分布しているが、超音波振動付加加工による加工表面ではクラックの発生はわずかであった。

Table 6 表面粗さ測定結果

表面粗さ	通常放電加工	超音波振動付加放電加工
Ra	0.33 μ m	0.36 μ m
Ry	2.45 μ m	3.03 μ m
Rz	1.72 μ m	1.82 μ m
Rmax	7.53 μ m	8.82 μ m

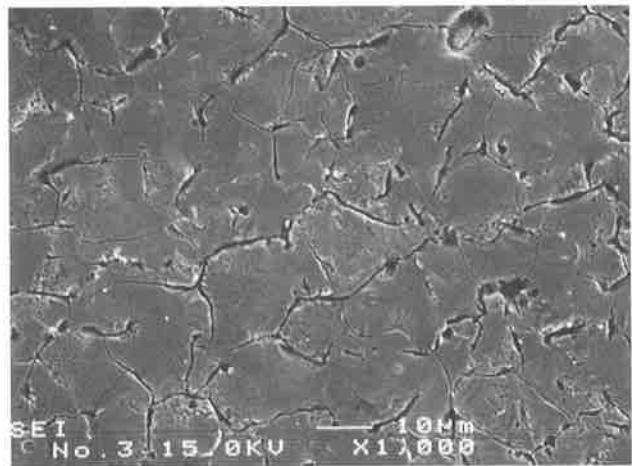


(a) 通常放電加工

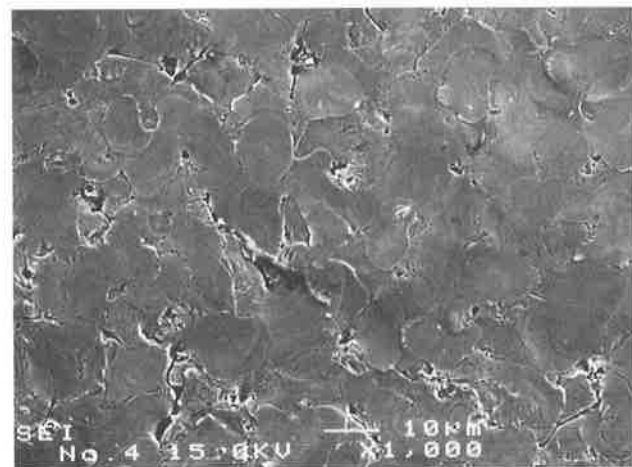


(b) 超音波振動付加放電加工

Fig. 5 表面粗さ測定波形



(a) 通常放電加工面



(b) 超音波振動付加工面

(電極直径1 mm, 電極送り量0.3mm)

Fig. 6 放電加工面の観察結果

また、直径 ϕ 0.3mmの電極を使用して ϕ 0.35mm、深さ0.3mmの穴加工を行った。穴直径が小さく、表面粗さ測定は難しいため、電子顕微鏡による加工表面の観察を行い比較評価した。観察結果をFig. 7に示す。通常加工による加工表面には小さな粒状の凹凸が全面に分布しているが、超音波振動付加加工では、通常加工に比べ加工表面の小さな凹凸がなく放電痕のみの加工面が得られている。

これらは、超音波振動やキャピテーションによる気泡の発生などが、溶着や加工屑の排出の状態に影響することが原因であると推測される。そして、本実験の電気条件は加工時間を考慮して、最も微細な条件よりもややエネルギーが大きく、加工部分における超音波振動付加状態も小さいため、加工時間を促進させるよりも加工表面状態への効果が大きくなったためと推測される。

3-3 電解加工

Fig. 8 に電極間距離を 1 mm に設定したときの、電圧-電流密度曲線を示す。この電圧範囲では、極間電圧の上昇に伴い、電流密度も緩やかに上昇し、この曲線に明確な平坦部分や突出部分は認められなかった。

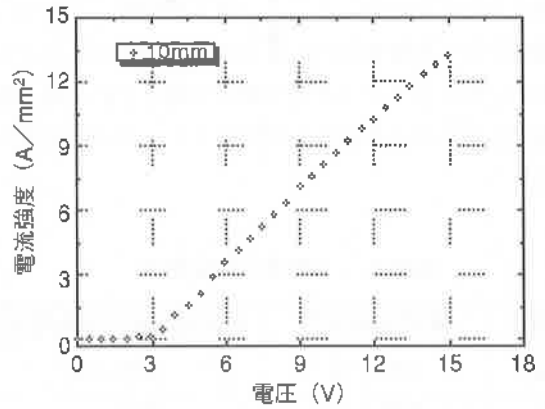
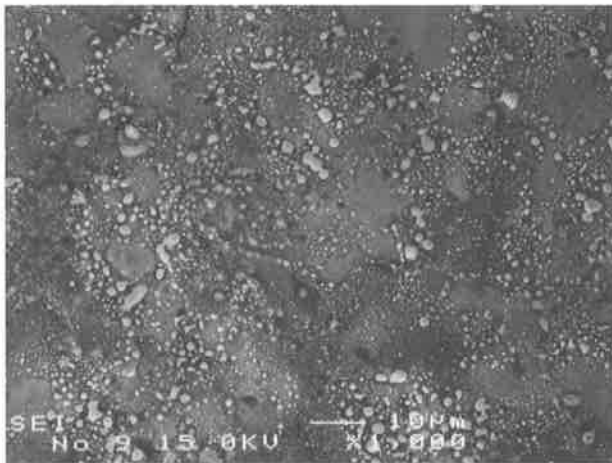


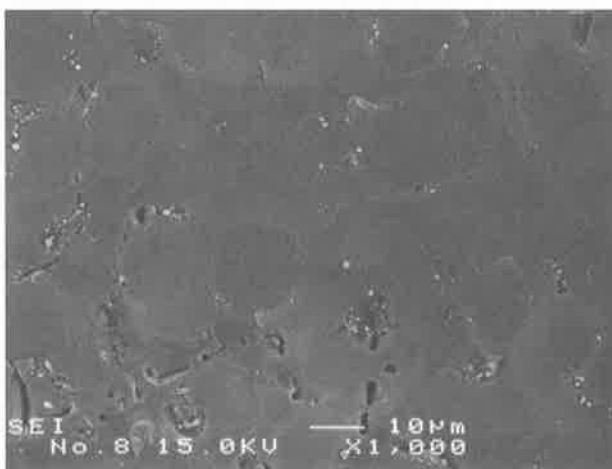
Fig. 8 電極間電圧と電流密度

そこで、電極間電圧を 7, 10, 13 V と設定し、電解加工を行った。Fig. 9 に各処理時間ごとの処理表面の観察結果を示す。加工物に通電後、被加工物表面から電解液中に溶出する様子が観察された。電圧が 7 V の場合では、処理時間が 15 秒～60 秒のいずれの電圧においても、結晶粒界が目立つ、荒れた表面となった。

一方 10 V では、処理時間が 15 秒では凹凸が目立つ表面であるが、30 秒以上になると金属結晶が確認できる、滑らか



(a) 通常放電加工面



(b) 超音波振動付加工面
(電極直径 0.3 mm, 電極送り量 0.3 mm)

Fig. 7 放電加工面の観察結果

	15 秒	30 秒	60 秒
7 V			
10 V			
13 V			

Fig. 9 電解加工後の表面観察結果

な面が得られた。また13Vでは、処理時間が15秒でも滑らかな表面が得られた。このときの各条件での表面粗さ測定結果をTable 7に示す。

処理後の表面粗さは、いずれの条件においても、平均面粗さRaは $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$ 、最大粗さRmaxは $4\sim 8\mu\text{m}$ であり、このことから比較的滑らかな面であるが、面全体に大きなうねりが生じていることが表面粗さ測定結果と観察結果からわかる。

そこで電解液を攪拌することを目的に、超音波加振ならびに電極を回転させて処理を行った。

この時の表面粗さ測定結果をTable 8に示す。超音波加振では、ほとんど効果が認められず、また電極を回転させた場合には、わずかに表面粗さの改善に効果が認められた。しかしながら、処理面には依然としてうねりが存在する。

この原因として、電解加工条件、電解液の攪拌方法以外に材料自身の影響^④が挙げられる。特に、電解加工ならびに後述する化学研磨では、素材の組成、組織、内部歪みなどの影響を受けやすいため、これらの影響が考えられる。

Table 7 電解液無攪拌時の電解加工後の表面粗さ測定結果
(電極間距離1mm, 処理時間60秒)

	7V	10V	13V
Ra (μm)	0.67	0.42	0.42
Rmax (μm)	5.43	4.54	8.13

Table 8 電解液攪拌時の電解加工後の表面粗さ測定結果
(電極間距離1mm, 処理時間60秒, 電圧13V)

	無攪拌	超音波加振	電極回転
Ra (μm)	0.42	0.51	0.34
Rmax (μm)	8.13	10.62	5.69

3-4 化学研磨仕上げ加工

次にステンレス鋼に対し、化学研磨処理を行った結果を示す。試料はステンレス鋼に $\phi 10\text{mm}$ のエンドミルにより切削加工したものをを用いた。切削面の一例をFig. 9 (a)に示す。

この試料に市販の化学研磨処理液を用いて化学研磨処理を行い、処理後の表面の観察を行った。

処理後の表面の観察結果をFig. 10 (b) ~ (f)に示す。処理時間30秒では、処理前と同様にツールマークが残っているが、処理時間が3分になるとツールマークが消え始め、処理時間が5分では、ほとんどツールマークは認められなくなった。さらに処理時間を長くすると結晶粒界が認められるようになった。これらの表面粗さはRa $0.1\mu\text{m}$ 以下であるが、P-Vは $2\mu\text{m}$ 前後であり、処理前と比較し、表面粗さは向上するが、うねりについては改善することができなかった。

このときの表面の光沢度を分光反射率で測定した結果をFig. 11に示す。処理後の分光反射率は、処理時間とともに増加し、より強い光沢をもつ面が得られた。しかし、処理時間が7分以上ではそれ以上の分光反射率は得られなかった。

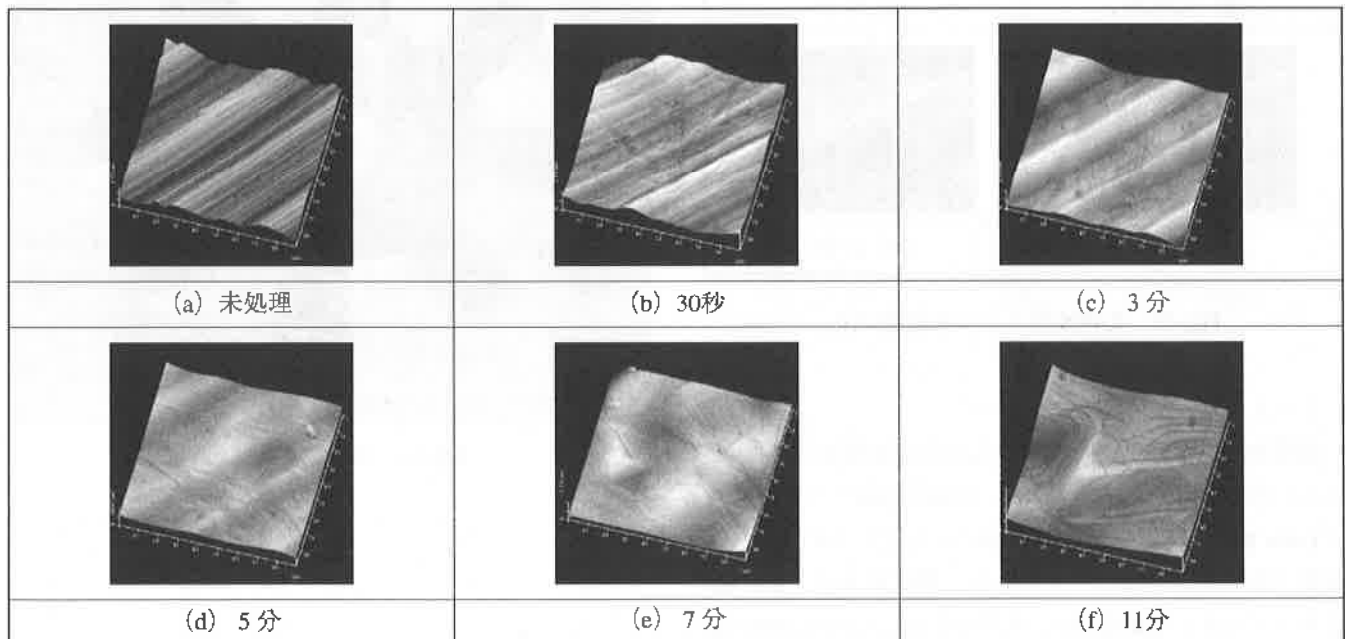


Fig. 10 化学研磨後の表面観察結果

一方、化学研磨を行った場合、エッジ部分のバリ処理にも効果が認められる。このことを確認するために、同一のバリを時間ごとに観察した結果をFig. 12に示す。100 μ m程度のバリは処理時間とともに、縮小していく様子が分かる。処理時間が7分になると、ほとんど認められなくなった。しかし、化学研磨によるバリ処理では、バリの大きさに対応した処理時間が必要であり、比較的大きなバリは除去するのが困難である。このため、バリ処理を目的とする場合、大きなバリは別の手段で処理し、細かなバリのみを対象として処理する事が必要である。

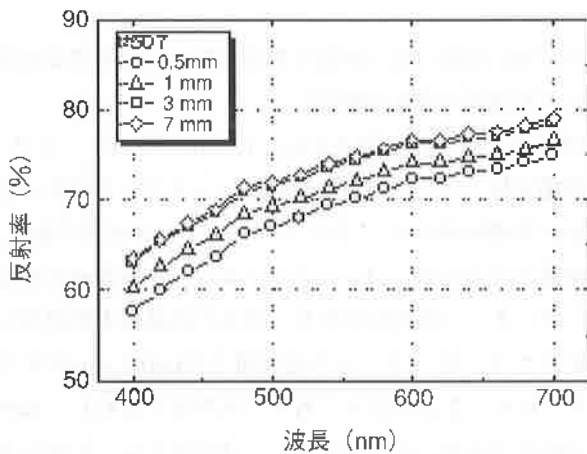


Fig. 11 化学研磨処理後の分光反射率曲線

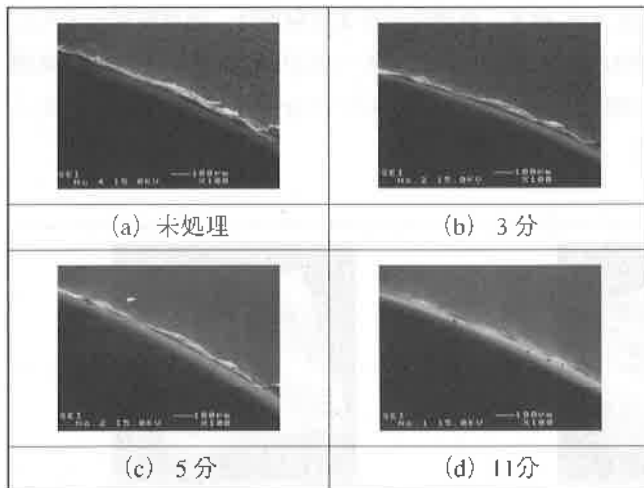


Fig. 12 処理後のエッジ部観察結果

3-5 微小形状の創成加工

微細放電加工機を用い微小形状の創成放電加工を行い、さらに化学研磨仕上げを試みた。創成放電加工の加工条件をTable 9に、実験結果をTable 10にそれぞれ示す。Fig. 13は加工物の観察写真の一例である。創成加工は、 ϕ 0.3mmのタングステン電極を用い、外径約2.2mm、深さ約700 μ mの歯車状を模した形状の加工を行った。このときの底部の

観察結果をFig. 14 (a)に示す。

この試料に対して微細な凹部への化学研磨処理の適用について検討した。

7分間処理後の観察結果をFig. 14 (b), (c)に示す。処理後の底部は放電痕が除去されているが、Fig. 14 (b)とFig. 14 (c)に示すような表面により構成され、ムラを生じた。この原因として、処理部分が微小な窪みであったため、研磨液が十分に攪拌できず、十分な処理ができなかったことが考えられる。

Table 9 創成放電加工条件

放電加工機	三菱電機EDSCAN8E
加工液	DIAMOND E D F - K
電極材質	タングステン
電極直径	ϕ 0.3mm
被加工物	SCM鋼, SUS304
加工回数	1000スキャン

Table 10 創成放電加工結果

加工深さ	0.72mm
電極消耗	4.7mm
加工時間	(SCM鋼) 15時間55分間
	(SUS304) 19時間30分間

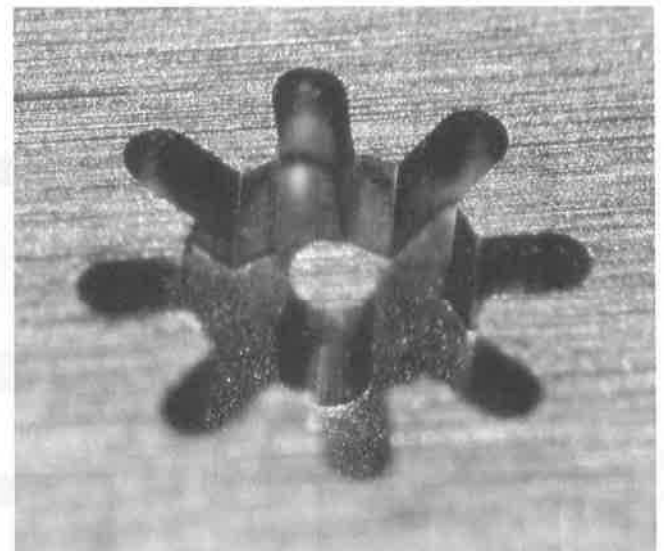


Fig. 13 創成放電加工例

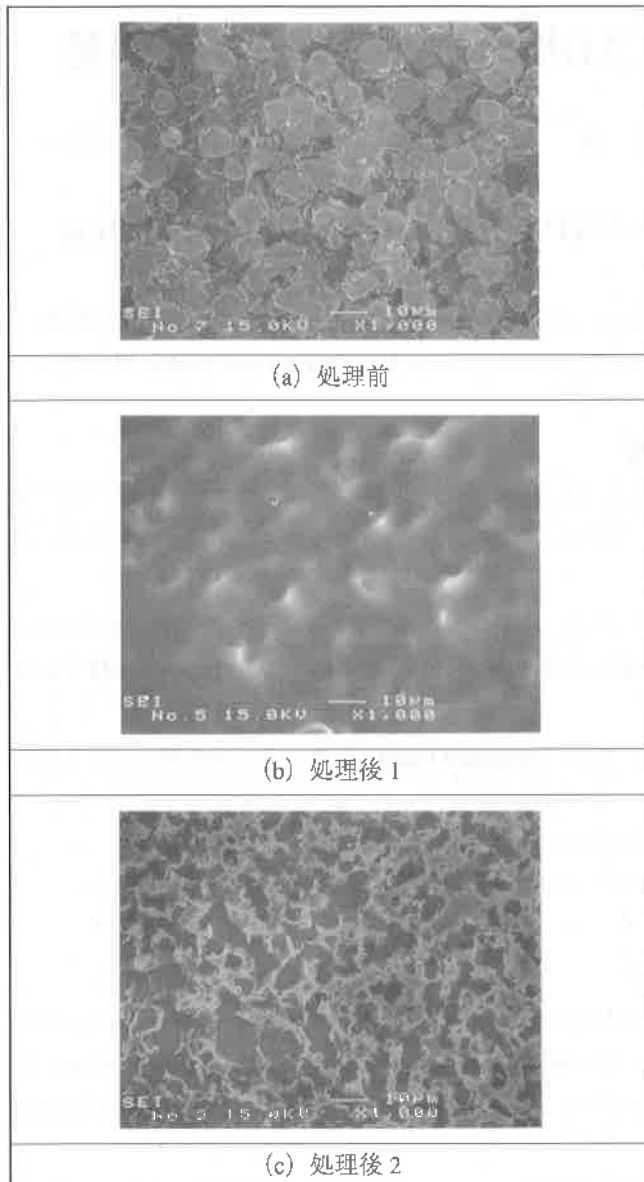


Fig. 14 化学研磨後の底部観察結果

4. 結 言

微小形状の放電加工および超音波振動付加放電加工、電解研磨仕上げ、化学研磨仕上げの検討を行った結果を以下に示す。

- (1) 微細放電加工機における電気条件プログラムの設定値とほぼ同様の加工面粗さが得られた。しかし、微細電気条件では、加工時間が非常に長く加工効率が悪かった。
- (2) 電極直径 ϕ 0.3、長さ1mmで穴加工を行った場合、超音波振動を付加した放電加工では通常加工に比べ表面粗さの測定値に大きな違いはなかったが、クラックなどの加工表面の小さな凹凸がない放電痕のみの加工面が得られた。
- (3) 電解研磨では、短時間で滑らかな面を得ることができたが、表面にうねりが生じた。

- (4) 電解研磨、化学研磨とも素材の加工歪みの影響を受けやすいため、材料の履歴に注意する必要がある。
- (5) 創成放電加工により微小形状の加工を行い、化学研磨仕上げを試みた。その結果、微小な凹部でも処理の効果が認められたが、研磨液の流動に注意する必要がある。

参考文献

- 1) 増沢隆久：電気加工学会誌，Vol35，No.80，5（2001）
- 2) 清水 清，三代祥二，植松哲太郎，正田和男，佐々木哲夫，中林 浩，望月芳彦：第1回電気加工学会全国大会講演会論文集，103（1991）
- 3) 室 真弘，正木 健，池本義寛，古澤可意，側 友宏：電気加工学会全国大会（1994）講演会論文集，19（1994）
- 4) 小川 仁，野上輝夫，板東和宏，常本佳生：電気加工学会全国大会（2000）講演会論文集，43（2000）
- 5) 平尾篤利，毛利尚武，斎 治男，齊藤長男：2003年度精密工学会春季大会学術講演会講演会論文集，（2003）
- 6) 佐藤敏一：電解加工と化学加工，朝倉書店，p37（1970）
- 7) 高沢孝哉：バリテクノロジー入門，桜企画出版，P134（2002）