

論文の内容の要旨

論文題目 : Electrode wear in micro-EDM

(和訳 マイクロ放電加工における電極消耗)

氏名 : 蔡 曜陽

(Tsai, Yao-Yang)

一、研究背景及び目的

近代生産加工の技術は二つの流れに分かれてきたと言える。一つは自動化、無人化、多様化及びシステム化と言うようにシステムの発展である。もう一つは精密化、微細化テクノロジーの追及である。製品の小型化、微細化への要求はますます強くなっている。昔の重厚長大から、今の軽薄短小の時代へと変化している。1990年代に入ってMEMSが起爆的な発展をとげ、いわゆるシリコンプロセスに基づいた静電マイクロモータからはじまり、各種マイクロセンサ、さらにはより複雑マイクロシステムとしてマイクロマシンの開発へと進みつつある。

現在製作可能とされている微小機械はフォトファブ리케이션を基本とする二次元的なマイクロ構造物がほとんどである。基本的にはエッチングによって形成されるきわめて薄い2次元形状を積み重ねる加工となり、三次元的で複雑な構造物を実現する手段が望まれているのは言うまでもない。マイクロ放電加工、エキシマレーザ加工、LIGAプロセス、マイクロ光造形などといったマイクロ加工方法が提案されているが、立体的な部品製作が基本である。特に、放電加工では工具と工作物が非接触であるため加工力が小さいため、工具や工作物が微細であっても変形しにくいので、装置の位置決め精度さえ確保されれば必要とされる高精度の維持が容易であるという特性がある。また、放電エネルギーを微小化することにより硬さを問わず導電性を有する材料に対して $0.1\mu\text{m}$ の加工粗さが得られる。そのため、マイクロ放電加工法は高精度な微細形状を創成できる超微細精密加工技術として大いに期待されている。

放電加工法は名の示すように加工用電極と工作物間に起させた過渡アーク放電の作用で、工作物材料を除去し、成形、研磨など精密加工を行う点で、従来の機械的加工法とは加工原理

が異なっている。一方、切削工具に代わる電極が工作物の加工と同時に消耗することはその難点の一つである。放電加工で加工形状は電極形状の転写となるが、高精度加工の場合には電極の消耗状態が精度に影響するため、その特性を十分把握しなければならない。なお、マイクロ放電加工を行う場合（特に寸法 $100\ \mu\text{m}$ 以下）放電エネルギーが一般の放電加工に比べて1万分の一と小さくなる。こうした極短パルスの放電では電子流が主要な電荷担体となって、放電エネルギーの熱交換と材料の除去が起こることとなる。しかしながら、放電加工の加工現象は複雑でありマイクロ放電加工のメカニズムはまだ明確でない。本研究の目的は微細穴加工の実験を通してマイクロ放電加工における電極消耗特性を明らかにすることである。

二、実験方法

放電加工において電極消耗は最も困難な問題点であり、零に近づけるための取り組みは従来からつづけられているが、放電特有の現象なので加工に伴い電極が消耗することは避けられない。電極が細くなれば電極の消耗量は大きくなるし、曲率が大きな部位では消耗が激しいことが経験的に知られている。電極形状を転写する放電加工では電極消耗が加工精度に大きく影響するのは当然であるが、貫通穴の加工でも単一電極の使用可能回数に影響する。高精度加工を実現するためには電極形状の変化を明確にする必要があるため、相対的体積消耗率に加えて電極先端の形状が消耗により変形することにも注目した。図1のように新しい解析手法として電極の底部と角部に分けて消耗体積の正確な計算モデルを構築した。次いで、電極消耗に影響している要因を分析し、実験調査の結果に基づいて電極消耗の問題と消耗の決定因子との関係を解明した。電極消耗の要因は図2に示す。

三、実験結果及び分析

本研究では消耗決定要因の解明のためにいろいろな実験を行ない、その結果以下のことが明らかになった。

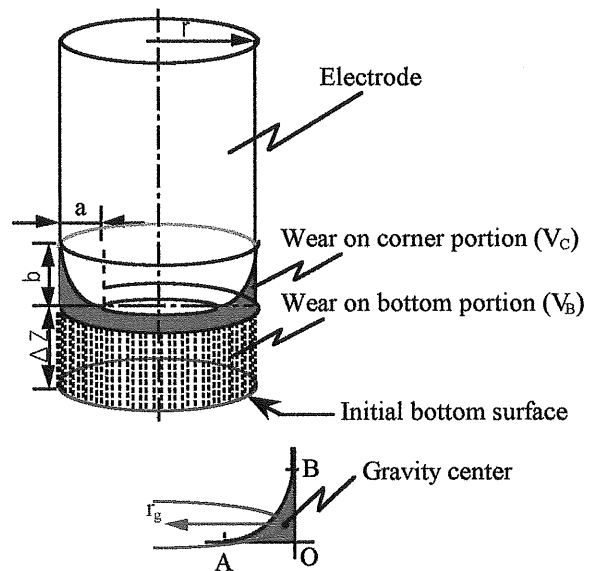


図1. Model of electrode wear

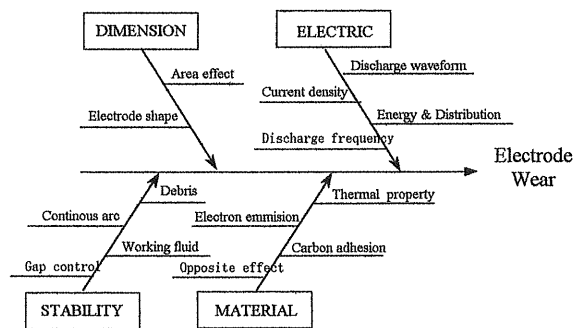


図2. Factor analysis of the electrode wear

(1) 電気条件の影響

EDMがマイクロ分野に用いる場合、加工エネルギーを小さくすることが重要である。放電加工のエネルギーは単位除去量を決定することだけではなく、電極消耗率の要因の一つでもある。電極の体積消耗率は図3のようにパルスエネルギーとともに減少する。RC回路では、コンデンサの容量と電源電圧の調節によりエネルギーを小さくできるが、実際には電源電圧を低下させることによって、連続アークのリスクが大きく増加する。一方、浮遊容量が存在するためコンデンサ容量には下限がある。

ついで放電波形パラメータが電極消耗率にどのように影響を与えるかを明らかにした。図4のように電極の体積消耗率はピーク電流の減少に従って約3%まで減少するが、ピーク電流を0.5Aより小さくすると増加し始めることが分った。ピーク電流が低過ぎる場合、放電の安定性が劣化して短絡を引き起こし、電極消耗率の増加をもたらす。

放電の持続時間を延長するために適切なインダクタンスを挿入することにより電極消耗率を減小することができる。これは従来各種文献により示された結果と同様の傾向である。しかしながら、それらは異なる消耗メカニズムであるため放電エネルギーの非常に小さなレベルに適さない。T-F理論を用いて電子流密度の増大を導くことによりエネルギー配分の観点から説明できる。

(2) 電極材料の影響

電極材料としてはタングステン、モリブデン、チタン、銅、銀、鉄、白金等を用い、各々の電極材料により微細穴あけ加工を行った。この結果より電極消耗は材料熱物性の影響を大きく受けることが明らかになった。図6に加工した後の電極形状と材料の熱的性質との関係を示した。角部消耗の生成は熱の拡散に影響され、温度拡散率が低いTi, Fe, Niの電極などで角部消耗が激しい、工作物の熱伝導率が低い場合も顕著である。なお、電極材料の

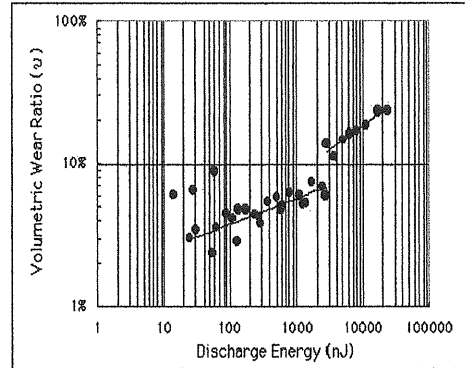


図3. Relationship between discharge energy and electrode wear

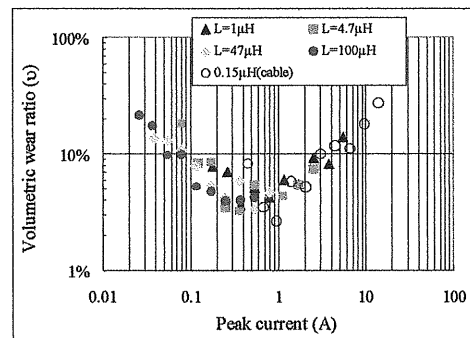


図4. Relationship between peak current and electrode wear

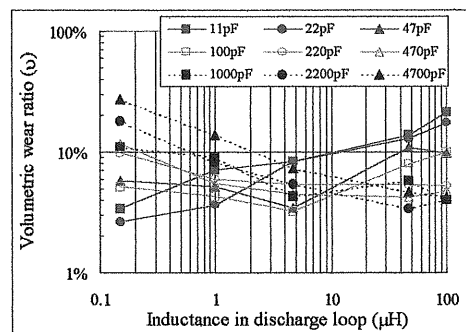
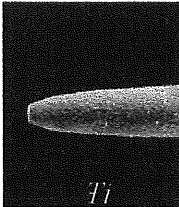
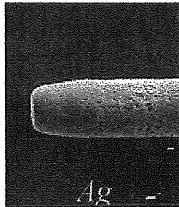
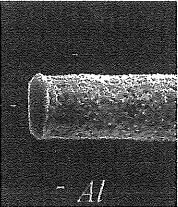
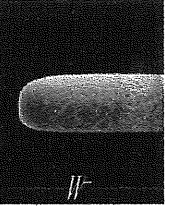
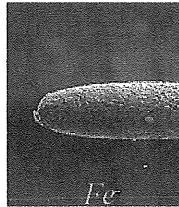
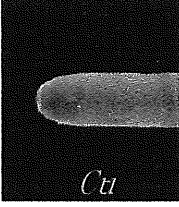
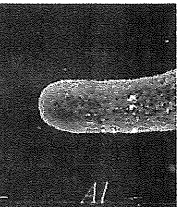
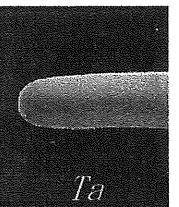


図5. Effect of inserting the inductance

沸点と融点と熱伝導率の積が大きいほど消耗率は小さくなる。図7のように熱伝導率、沸点、融点と潜熱導入した修正比熱の積($\rho \cdot c' \cdot \lambda \cdot T_m \cdot T_b$)或いは($\rho \cdot c \cdot \lambda \cdot T_{mc} \cdot T_{bc}$)と体積消耗率の間には依存関係がある。ただし、 c' (修正比熱) = $c + hm/\rho \cdot T_m$, $T_{mc} = T_m + hm/\rho \cdot c$, $T_{bc} = T_b + (hm + hv)/\rho \cdot c$ 。これを新しい評価関数として、電極材料を選ぶことが重要なポイントとなる。

Condition	Thermal conductivity		Melting point	
	Low, <i>ex. Ti, Fe, Ni</i>	High, <i>ex. Ag, Cu</i>	Low, <i>ex. Al</i>	High, <i>ex. W, Ta, Mo</i>
Results	severe wear on corner	little wear on corner	bending and melting	little change
Sample	 <i>Ti</i> (workpiece:SUS)	 <i>Ag</i> (workpiece:SUS)	 <i>Al</i> (workpiece:SUS)	 <i>W</i> (workpiece:SUS)
	 <i>Fe</i> (workpiece:SUS)	 <i>Cu</i> (workpiece:SUS)	 <i>Al</i> (workpiece:Fe)	 <i>Ta</i> (workpiece:SUS)

Machining condition:
 $u_f=100V$, $R=1k\Omega$,
 $C=100pF$
 50 μm

図6. Morphology of machined electrode with the thermal properties of materials

電極加工面のクレータの観察して電流密度の分析を行った結果、高熱容量の材料はクレータ寸法が小さくなり電流密度が高くなることが明らかになった。さらに、クレータ体積と材料沸点の関係も示した。

これらにより、マイクロ放電の加工メカニズムには材料の蒸発が強く関係していると考えられる。電子放出しやすく、沸点の高い材料、例えば Cu、W は電極として優れている。

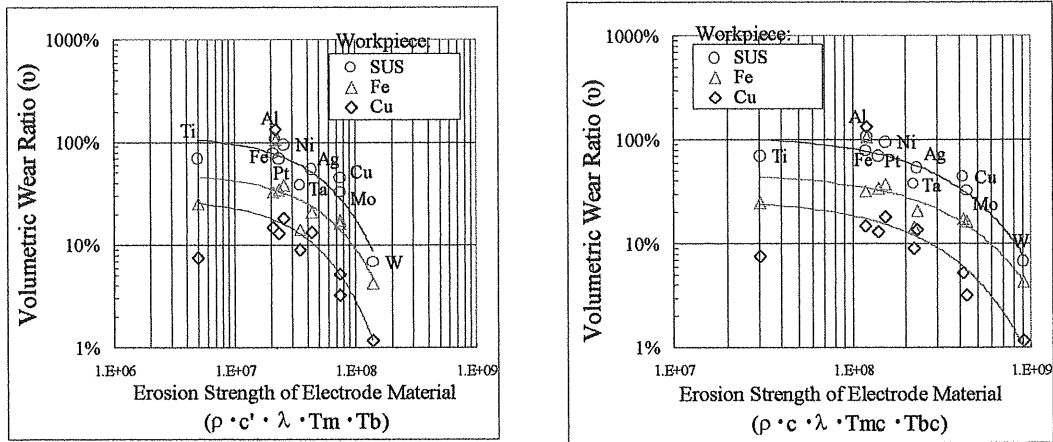


図 7. Relationship between electrode wear and modified erosion streng

四、今後の課題

本論文の研究結果より、今後次のような研究課題についてさらに追究する必要があると考えられる。

(1) 適応ファジィ理論によるギャップの制御

従来、加工プロセスは平均電流または平均加工電圧によって制御しているが、パルス毎の電流量とエネルギーの変動は非常に大きい。したがって、ファジィ理論で放電パルスを分類して望ましい波形の放電が多くなるように制御すれば、プロセスの最適化が可能となる。

(2) ニューラル・ネットワークによる加工条件が異なる場合の電極消耗の予測

EDM の工程を設定するためには、電極消耗の予測が重要である。ニューラル・ネットワーク ANN モデルによる実験結果等を用いれば、加工条件が異なる場合の電極消耗をより正確に予測できる。

(3) マイクロ放電加工に適用するトランジスタ式パルス発生器

マイクロ放電加工の現状では RC 回路を用いているため、電極消耗を低減しようとすると加工速度も低下する場合がある。マイクロ放電加工に適用できるような短パルス単極性のトランジスタ回路が実現できれば、電流量、パルス幅、及び DUTY FACTOR を独立に制御できる。これにより、加工速度保ったまま電極消耗を減らせすことができる。