

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560123
 研究課題名（和文） マイクロ放電加工における3次元振動付加ならびに加工状態のモニタリングに関する研究
 研究課題名（英文） Study on vibration assisted micro-EDM and its machining condition monitoring
 研究代表者
 三井 公之 (MITSUI KIMIYUKI)
 慶應義塾大学・理工学部・教授
 研究者番号：90219668

研究成果の概要：

安定な状態にてマイクロ放電加工を行うためには、切りくずの排出を的確に行い、短絡を防止することが必要である。このため、本研究では加工中に工具電極を圧電素子により振動させることにより、短絡を防止し、加工時間の飛躍的な短縮を達成した。また、放電パルス数カウンタによる新しいモニタリング手法を開発し、放電パルス数と全放電加工エネルギーが金属除去量ならびに工具電極消耗量と良い相関を示すことを確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 生産工学・加工学

キーワード：マイクロ放電加工，振動付加，加工状態のモニタリング

1. 研究開始当初の背景

近年、携帯電話、半導体関連製品をはじめとする工業製品の小型化、軽量化、高密度化がさまざまな分野において進められている。これにともない、それらを構成する部品の微細化のための加工技術についての研究開発が盛んに進められている。マイクロ放電加工は、導電性の材料であればどのように硬い材料であっても、複雑形状を高精度に加工することができる。十数 μm ～数百 μm の寸法領域の加工法として、加工精度が高く、さまざま

な加工形状に対応できることから、各種ノズル、オリフィス、スリットなどの穴加工、微細部品用金型加工などへ適用されている。

一般のマイクロ放電加工では、円筒形状の工具電極を回転主軸により回転することで、安定した放電加工が可能である。しかし、例えば四角穴や四角軸の加工など、電極に回転を与えることができない場合や形彫り放電加工では、切りくずの排出が困難であり、溶着などをまねきやすいことが問題である。また、単純電極による3次元放電創成加工は小

型精密金型の加工において、形状創成の自由度が高いことや電極製作コスト低減が可能であることから、その適用が増加している。しかし、放電創成加工法においても、円筒形状電極以外の四角形、多角形など異形状の電極を使用する場合には、回転主軸が使えないことから、安定な放電加工を行うには、切りくずの排出を的確に行い、短絡を防止することが必要である。

このような観点から、電極に回転運動を与えることができない場合に、振動援助放電加工法が加工の安定性向上に有効なことが報告されている。しかし、振動を与えることによる加工速度向上効果の定量的な評価や加工の安定性がなぜ向上するかといった学術的観点からの究明を詳細に検討するには至っていないかった。

2. 研究の目的

(1) 精密微細加工技術を支える重要な技術の一つとして計測評価技術があげられる。このため、微細部品の形状・寸法を高精度に評価することは、近年そのニーズが高まりつつあり、今後ますます重要になるものと考えられる。

このような観点から、申請者らは、微細加工技術の1つであるマイクロ放電加工を用いて製作した測定用の微細な探針と測定対象との接近をSTMの原理により検出する方式のマイクロ部品用形状・寸法測定装置の開発をおこなっている。

この測定装置ではトンネル電流を検出するプローブとして、多方向に鋭く尖った突起を持つ微細探針を使用することで、三次元形状・寸法測定を可能にしている。従って、測定対象に適した種々の形状の探針を製作することが必要である。一方、これらの研究を行う中で多方向に突起を持つ探針を製作する際に、探針の形状によっては、加工中に被削材と工具電極との間の放電状態が、被削材と工具電極との溶着現象により不安定となる等の原因により探針製作がなかなか難しく、加工途中において探針の折損や、加工が全く進展しなくなるなどの状況も経験した。このため、安定した加工状態を維持して探針を製作するために、圧電素子を用いて工具電極を振動させる方法を試みたところ、加工の安定性が向上し、加工時間の短縮に大きな効果が見られた。この間の関係をより明確にするために、放電加工時における加振振動数および振動振幅と加工時間との関連についての実験を行っている。

一方、本研究を開始する以前の研究では、

工具電極に振動を与えるために使用している圧電素子駆動用の電源の容量の制約から、加振振動数 1kHz、振動振幅 1.5 μm が限度であった。振動数と振幅を高めることにより加工時間をさらに短縮できる可能性が高いために、本申請の研究では、より大電流を流せる圧電素子駆動用電源を使用した実験を行う。また、振動の方向も現在は一方向に限られるが、圧電素子を3個使用することにより3次元的な振動付加実験を試みる。

(2) 一方、現在行っているマイクロパンチプレスにおける最適クリアランスを提案する研究において、一辺 50 μm 程度の微小な四角形パンチをマイクロ放電加工により製作することを試みている。振動付加により加工時間を低減することはできるが、加工の進行状態をリアルタイムで知ることができないために、仕上がり寸法を確認するために加工を中断し、顕微鏡による辺の長さの測定を行い、再度加工を行うという工程を繰り返す必要があり、なんらかの手法によりリアルタイムで加工の進行状態をモニタリングすることが必要である。また、工具電極の消耗をリアルタイムでモニタリングできれば、加工の高精度化に寄与することができる。

マイクロ放電加工では工具電極の消耗が大きいために、放電加工機のテーブルの移動量により加工量を推定することはできない。加工の進行状態のリアルタイムモニタリングの手法として、放電パルス数のカウントにもとづき全放電パルスエネルギーを推定することを試みる。

3. 研究の方法

(1) 3次元振動付加装置の試作

すでにマイクロ放電加工において振動付加の有効性(加工時間短縮、放電の安定性の向上)を確認しているが、従来の振動付加装置では、工具電極を振動させるために使用している圧電素子ドライブアンプの性能の制約により、振動数 1kHz、振幅 1.5 μm までしか実験を行っていない。振動数を高くし、振動振幅を大きくすることにより、加工時間をさらに短縮できる可能性が非常に大きいものといえる。このため、より大電流を流せる圧電素子ドライブアンプを用いることにより高振動数、大振幅領域での振動付加放電加工実験を行う。なお、加振振動数の上限を 5kHz、加振振幅を 2 μm 程度とすることを目標とた。

また、現在の振動付加装置は圧電素子を1個使用する1次元仕様である。しかし、工作

物に対する振動方向を変えることにより加工速度に差が生ずることを確認している。従って、振動方向と加工速度との関係を明らかにするために3次元振動付加装置を試作する。3次元振動付加装置は圧電素子3個と平行ばね機構とから構成する。

(2) 金属除去量と放電パルス数との関連についての実験

本研究での実験により、放電パルス数と金属除去量の関係は線形関係にあり、これにより、放電パルスのモニタリングにより金属除去量の推定が可能であることが明らかになった。多数回の実験により得られたパルスの幅と高さを統計的に分析し、放電パルス1発あたりの平均加工エネルギーを求めるところを試みた。当然、工作物と電極材料の組み合わせにより平均加工エネルギーは異なるので、種々の条件にて実験を行った。

(3) 各種材料に対する実験

加工進行度のモニタリング、電極消耗のモニタリング、微細工具材料や金型材料として適しているPCD(焼結ダイヤモンド)やチタンなど、放電加工が比較的難しいとされている材料を含めて、各種被削材、電極材料の組合せとパルス当たりの除去量、極性の影響、電極消耗や表面粗さと振動付加との関連について多くの実験を行った。また、異形状加工物、放電創成加工への本モニタリング手法の適用を試みた。

4. 研究成果

(1) 振動付加マイクロ放電加工

以上、本研究では加工の安定性を増し、加工時間を短縮するために、工具電極に振動を付加することを試み、種々の実験を行った。振動付加マイクロ放電加工については、加工性能の向上を以下のように要約することができる。

工具電極に振動を与えることにより、加工時間を短縮することができる。

加工時間短縮効果については、振動数が高く、振幅が大きいほど加工時間が短くなることを確認した。

振動方向と工具電極の送り方向とが直交する場合の方が加工時間は短くなっている。特に、振動数1kHz、振幅1.5 μm の場合は、本実験において最も加工時間が短かった。なお、この際にはマンドレルを回転させて行う通常の放電加工より加工時間が短くなった。

工具電極に振動を付加しながら、斜め上方向に突起を持つ探針の加工を行い、安定した

加工が行えることを確認した。斜め方向に突起を持つ探針の製作は、加工の不安定性のために、加工中に探針が折れることが多く、製作が困難であったが、振動付加マイクロ放電加工により、安定した探針加工が可能となった。

本研究における成果にもとづき、工具電極への振動付加が放電加工の安定性の向上、及び加工時間の短縮に大きな効果があることが明らかになったので、振動数100Hz、振幅6 μm の振動を工具電極に付加することにより従来は不可能であった斜め上方向探針の製作に成功し、マイクロ部品の形状測定に利用することができた。

一方、工具電極をX-Y平面内にて振動させる二次元振動付加についても、振動付加装置を試作して実験を行った。その効果についてここでは、マンドレルを回転させての加工が不可能な、丸穴以外の異形状穴の加工について、二次元振動を付加して行った実験について述べる。

丸穴加工のようにマンドレルを回転させても穴形状が変わらない加工ではマンドレルを回転させることは有効である。しかし、マンドレルを回転させる方式の加工では、当然矩形形状や三角形などの穴を加工することが不可能である。そうするとそのような穴を開ける際には通常の加工を行うしかないが、それでは時間が何倍もかかってしまう。そこで、丸穴以外の穴加工の際にも振動付加することで加工時間の短縮が可能ならば、振動付加加工の新たなメリットとなり得ると考えられることから、その検証実験を行った。

実験は、電極には300 μm の真鍮線の先端を150 μm 加工して半円状にしたもの(以下形状A)と、その半円をさらに半分加工して四分円状の形状にしたもの(以下形状B)の2種について実験を行った。加振条件は、振動数1kHz、振幅2 μm の二次元円形振動を使用した。加工後の穴にはA、Bの形状が正確に転写されていることを確認している。

また、加工時間はどちらの形状でも約75%短縮されており、丸穴以外においても円形振動の加工時間短縮効果が顕著であることを確認している。そして、形状Aに比べて形状Bの方が加工時間は短くなっている。このことから、放電加工では、切削加工のように加工送り速度と加工送り量によって加工時間が定まるのではなく、加工体積に比例することも確認できた。以上より、円形振動は丸穴以外の加工にも加工時間短縮効果をもち、その加工精度には特に影響を与えないということが明らかになった。

マンドレルを回転させることができないこのような加工に円形振動を適用できるということは大きなメリットであり、様々な形状の穴加工へ応用が期待できる。

(2) 放電パルス数カウントによるマイクロ放電加工プロセスのモニタリング

本研究では、放電パルス数カウントによる新しいマイクロ放電加工におけるモニタリング手法を開発し、放電パルス数と全放電加工エネルギーが金属除去量ならびに工具電極消耗量と良い相関を示すことを確認した。

工具電極消耗量は、工具電極と被削材の組合せや加工条件により異なるので、加工量を推定するためには工具電極消耗量を正確に推定する必要があるが、本モニタリング手法により電極消耗量の推定が可能となり、従って精度の高い加工が行えるようになった。

材料除去量が増加すると、当然放電加工パルス数と全放電エネルギーは増加するが、同一の加工条件であれば、平均放電エネルギーは一定である。

工具電極消耗量を正確に推定することは、棒状の単純形状の工具電極を使用して加工を行う創成マイクロ放電加工において特に重要である。

異なる材質の被削材を放電加工する際に必要な全放電パルスエネルギーについての基礎的な実験を行った。

従来、放電加工の容易性を判断する基準として、被削材の熱伝導率()と融点()の積、 $\rho \cdot T_m$ が提案されていたが、本研究では、これに被削材の電気抵抗 R を加えた $\rho \cdot T_m \cdot R$ を提案した。

$\rho \cdot T_m \cdot R$ 積では、放電加工の容易性は加工時間を尺度に論じられてきたが、加工時間は、工具電極と被削材の溶着による電氣的な短絡、キャビテーションなどに大きく依存するため、加工時間を放電加工の容易性の尺度とすることはできない。しかし、新たに提案した $\rho \cdot T_m \cdot R$ 積の方が加工時間についても $\rho \cdot T_m$ 積よりも高い相関関係を示すことを明らかにした。例えば、 $\rho \cdot T_m$ 積によるとアルミニウムは、最も放電加工が容易な材料であるが、その加工時間は最も長い。この理由を明らかにするために、放電パルスカウントによるモニタリングを試みた。その結果、同一の加工量の場合、アルミニウムは最も少ない放電パルス数で加工することができた。これにより放電パルスカウント法が非常に有効なことが示された。

放電加工時間が放電加工の容易性を判断する基準とはならないので、放電加工の不安

定性と無関係な5つのパラメータ、全放電加工エネルギー、放電パルス数、平均放電パルスエネルギー、放電パルス密度、全電極消耗量を指標として導入した。これらのパラメータの全てが、 $\rho \cdot T_m \cdot R$ 積の方が従来の $\rho \cdot T_m$ 積よりも的確に、放電加工プロセスをの状態を示すことを明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4件)

1. Takashi Endo, Takayuki Tsujimoto and Kimiyuki Mitsui: Study of vibration-assisted micro-EDM -The effect of vibration on machining time and stability of discharge --, Precision Engineering, 32 (2008) 269-277. 査読有り

2. Muslim Mahardika, Takayuki Tsujimoto, Kimiyuki Mitsui: A new approach on the determination of ease of machining by EDM processes, International Journal of Machine Tools & Manufacture 48 (2008) 746-760. 査読有り

3. Muslim Mahardika, Kimiyuki Mitsui and Zahari Taha: Acoustic Emission signals in the micro-EDM of PCD, Advanced Materials Research Vols. 33-37 (2008) pp 1181-1186. 査読有り

4. Muslim Mahardika, Kimiyuki Mitsui: A new method for monitoring micro-electric discharge machining processes, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 48 (2008) 446-458. 査読有り

[学会発表](計 2件)

1) 松本 望, 辻本隆之, Muslim Mahardika, 三井公之: マイクロ放電加工の振動付加効果に関する研究(第二報) - 二次元振動付加装置の試作 - , 2008年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, L36, 1017-1018., 発表: 2008/3/18, 場所: 明治大学(神奈川)

2) 辻本隆之, 松本 望, Muslim Mahardika, 三井公之: マイクロ放電加工における振動付加効果に関する研究 - 振動付加効果を利用した微細矩形軸の製作 - , 2007年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, E69, 393-394. 発表: 2007/9/13, 場所: 旭川ときわ市民ホール(旭川)

6. 研究組織

(1)研究代表者

三井 公之 (MITSUI KIMIYUKI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：90219668

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし