

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：12103

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820019

研究課題名(和文) 回動ワイヤガイドを用いたワイヤ放電ミーリング法の開発

研究課題名(英文) Development of the wire electrical discharge milling using a wire guide with reciprocating rotation

研究代表者

後藤 啓光 (GOTOH, Hiromitsu)

筑波技術大学・産業技術学部・助教

研究者番号：90389718

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：放電創成加工法とワイヤ放電加工法やWEDG法の利点を併せ持つワイヤ放電ミーリング法を開発した。この加工方法では先端が半球状のワイヤガイドを使用する。本研究では、ワイヤガイドを製作し電極材料の検討を行った。さらに、ワイヤ放電ミーリング加工を実現できる加工装置を開発し、超硬合金および絶縁性Si₃N₄セラミックスに対して放電加工を行った。

研究成果の概要(英文)：I developed a new method combining the advantages of ED-milling and WEDM/WEDG. It is named WED-milling (wire electrical discharge milling). In this method a wire guide with a hemisphere tip is used. In this study, I made some guides and examined electrode materials. Furthermore, I developed the machining equipment which could realize wire electrical discharge milling machining and carried out electrical discharge machining for cemented carbide and insulating Si₃N₄ ceramics.

研究分野：生産工学

キーワード：放電加工 回動

1. 研究開始当初の背景

今日における我が国の経済発展を支えた産業として金型産業が挙げられる。金型は超硬合金などの難削材で作製される場合が多く、その加工技術として、放電加工が広く使用されてきた。しかしながら、一般に形彫放電加工法では、工具となる電極が消耗するため加工中に工具の形状を維持することが困難である。そのため、複数の電極をあらかじめ製作し、加工に合わせて交換する必要がある。

放電創成加工法のように、丸棒や角棒などの単純形状の電極を用いて切削加工のように電極を走査させながら加工では、複雑形状の電極製作工程を省略出来る^{1, 2, 3)}が、この手法でも電極の消耗を完全に抑えることは困難である。

一方、ワイヤ放電加工では電極が常に送られるため、このような「電極消耗」を実質的に解決することが出来る。このようなワイヤ放電加工における利点を微細加工に応用した例として WEDG 法⁴⁾ (走行する黄銅ワイヤを工具としたワイヤ放電研削法) が広く知られている。WEDG 法は走行ワイヤを工具電極とすることで、電極の消耗を無視でき、さらに放電加工法の利点である加工反力が小さいことや、超硬などの難削材に対しても容易に適用できるため、高精度な微細軸加工を行う場合、極めて有効な加工手法である。

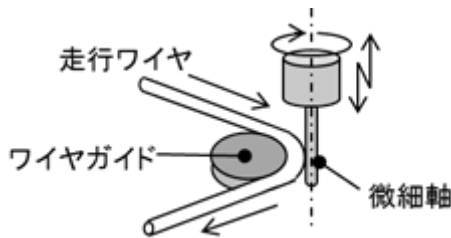


図1 WEDG法の概要⁴⁾

2. 研究の目的

本研究では、放電創成加工法と WEDG 法の利点を併せ持つワイヤ放電ミーリング法を開発し、『工具形状が変化しない形彫放電加工』の実現を目的とする。本研究で使用する回転ワイヤガイドのモデルを図2に示す。先端が半球状のワイヤガイドを用い、ガイドに走行ワイヤを沿わせながら、ガイドを回転させることにより、ボールエンドミルを使用した場合と同様の形状加工が実現できる。

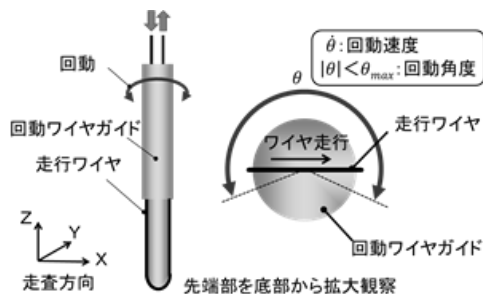


図2 回転ワイヤガイドのモデル

3. 研究の方法

本研究で使用する実験装置の概要を図3に示す。電源はトランジスタ方式とし、内部抵抗を用いて電流を制限した。放電持続時間の設定にはアイソパルス方式を適用した。また、加工中の極間電圧を参照し、Z軸の制御に用いた。なお、θ軸は独立させて制御した。加工液には比抵抗 1M[Ω・cm]以上の脱イオン水または放電加工油を使用し、浸漬させた状態で吹きかけを行いながら実施した。

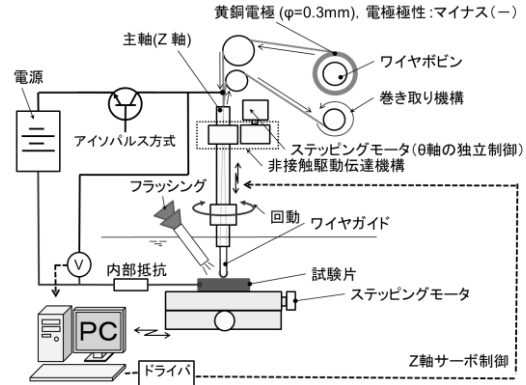


図3 実験装置の概要

4. 研究成果

4.1 超硬合金に対する加工

超硬合金に対するワイヤミーリング放電加工を実施した。加工条件を表1に示す。

表1 加工条件

電極材質	黄銅 (φ0.3)
電極極性	マイナス (-)
加工液	イオン交換水
無負荷電圧: U_i	250 [V]
放電持続時間: t_e	2 [μ s]
放電電流: i_e	11.5 [A]
デューティファクタ: τ	20 [%]
サーボ電圧	200 [V]
回動角度	360 [°]
回動周期	1 [s]
ワイヤ走行速度	50 [mm/min]

4.1.1 貫通穴加工における加工面の観察

図4に示すように、厚さ 3mm の超硬合金に対して貫通穴加工を行い、加工面の SEM 観察を行った。なお、比較のため銅電極を用いて同条件で加工を行い、同様に観察した。加工表面の SEM 像を図5に示す。銅電極で加工を行った場合には加工表面に熔融再凝固した状態が明確に観察され、多くのマイクロクラックが確認された。しかしながら、ワイヤ放電ミーリングで加工を行った加工面からはそのような明確なマイクロクラックは観察されなかった。

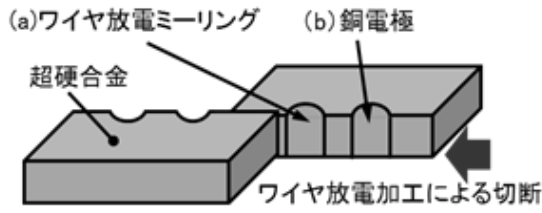


図4 加工の概要

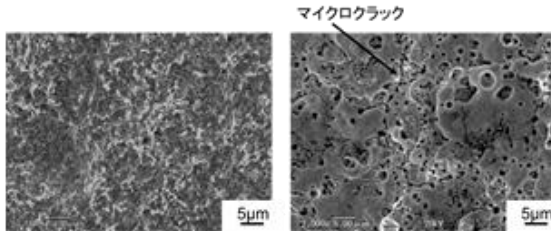


図5 貫通穴加工における加工面

4. 1 2 底付加工における加工面の観察

ワイヤ放電ミーリングによる底付穴加工を行った。加工面の断面 SEM 像を図6に示す。加工穴底部とそれ以外の部分で表面状態に差が見られた。加工穴底部では溶融再凝固した面とマイクロクラックが明確に確認されたが加工穴上部においては確認されなかった。

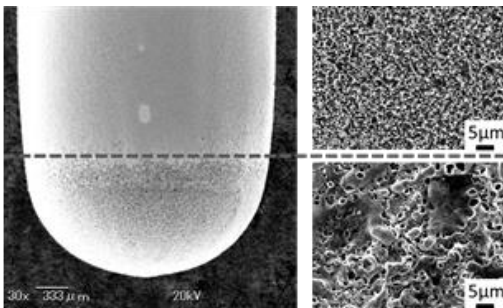


図6 底付加工における加工面

4. 1 3 底付加工における加工履歴曲線

直径2mmのワイヤガイドを使用して設定加工深さ9mmの底付穴加工をワイヤ放電ミーリングにより実施し、加工履歴を調べた。なお比較のため、総型電極として、先端が半球形状の銅および黄銅を用いて同様の条件で加工を行った。実験結果を図7に示す。なお、縦軸の加工深さはZ軸の変位を測定して評価しているため、総型電極の電極消耗は考慮していない。総型電極では加工深さが深くなると加工速度が低下しているのに対しワイヤ放電ミーリングでは、加工深さにかかわらず、ほぼ一定の速度で加工しているのがわかる。これはワイヤ放電ミーリングでは、加工層の排出性が良いことが原因として考えられる。

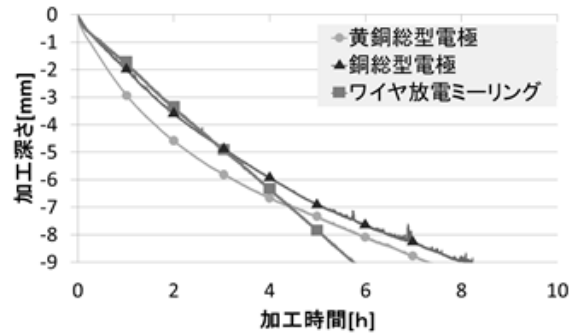


図7 加工履歴曲線の比較

4. 2 絶縁性 Si₃N₄セラミックスの加工

絶縁性 Si₃N₄セラミックスに対するワイヤ放電加工を実施した。加工条件を表1に示す。

4. 2 1 ワイヤ電極の断線

表2に示した加工条件で絶縁性 Si₃N₄セラミックスに対してワイヤ放電ミーリング加工を実施した。しかしながら、加工中にワイヤ電極が断線に至った。加工面の写真と使用後のワイヤ電極を図8に示す。図8に示すように、加工面には加工されずに残留したセラミックスが確認される。残留したセラミックスに対しては放電が発生しないため、導電性被膜が形成されない。そのため、ワイヤ電極とセラミックスとが接触し、ワイヤ電極が断線に至ったと考えられる。

表2 加工条件

無負荷電圧： u_i	150 V
放電電流： i_e	3.25 A
放電時間： t_e	4 μ s
デューティファクタ： τ	20%
放電検知電圧： V_{th}	55 V
回動角度	360°
回動周波数	1 Hz
ワイヤ走行速度	50 mm/min
加工液	放電加工油
電極 (直径)	銅 (ϕ 0.3)

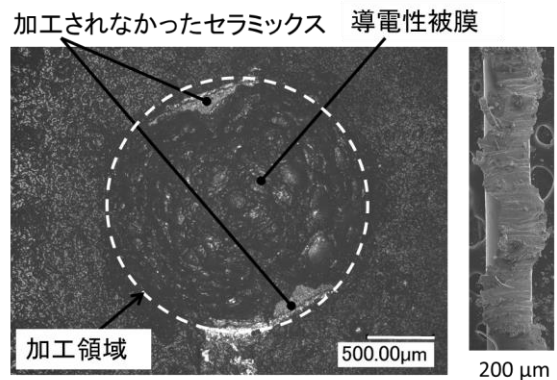


図8 加工面と使用後のワイヤ電極

4. 2 導電性被膜のコントロール

加工中に観察される放電波形の例を図9に示す。図9に示すように、設定した放電時間(4 μ s)に対して、それ以上の時間、放電が継続する長パルス放電が多く観察される。このような長時間放電が継続する長パルス放電によって導電性被膜が形成されると考えられている⁵⁾。

図10に長パルス放電の発生メカニズムを示す。一般に、放電パルス幅の制御にはアイソパルス方式が適用されている。放電に伴う効果電圧が放電検知電圧以下を検出しその後、設定パルス幅の時間だけ電圧を印加することにより放電時間を制御している。しかしながら、絶縁性セラミックスに対する放電加工では、表面に形成された導電性被膜を解して放電が発生するため、見かけの極間電圧が高くなる。そのため、放電が発生したときの電圧が高く、放電の発生を検出できず、設定放電時間以上の長パルス放電が発生することになる。

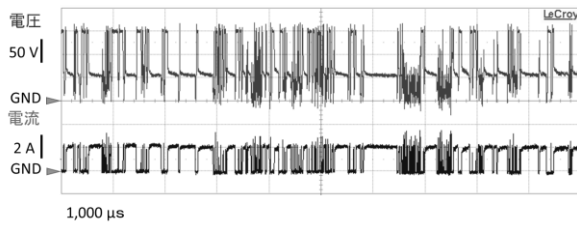


図9 代表的な放電波形(検知電圧55V)

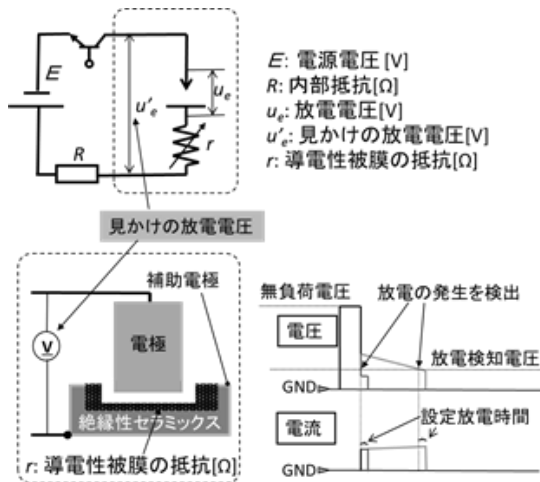


図10 長パルス放電の発生メカニズム

放電検知電圧を数V程度高くした場合、導電性被膜の厚さが薄くなるが、加工を継続することができる⁶⁾。しかしながら、極端に高く設定した場合には長パルス放電が発生しなくなる。そこで、放電検知電圧を極端に高く(100V)設定した状態で長パルス放電の同等の役割を期待し、設定放電時間を長パルス放電とほぼ同等の時間に設定して加工する手法を考案した。図11に考案した方式で加工を行った場合に観察される放電波形を

示す。放電時間の制御ができることが確認できた。

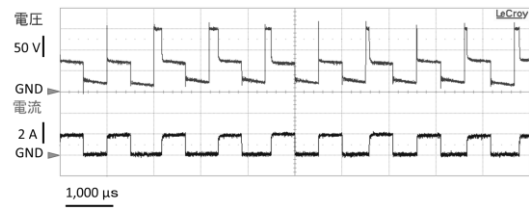


図11 代表的な放電波形(検知電圧100V)

<引用文献>

- ① Z. Y. Yu, T. Masuzawa, M. Fujino, Micro-EDM for Three-Dimensional Cavities -Development of Uniform Wear Method-, CIRP ANNALS, 1998, 169-172
- ② 中島宣洋、放電創成加工法の微細精密加工への適用、精密工学会誌、71、5、2005、557-561
- ③ 富本直一、真柄卓司、湯澤隆、渡辺尚紀、微細創成放電加工、精密工学会誌、64、12、1998、1727-17
- ④ 増沢隆久、精密工学会誌、68、2、2002、180-184
- ⑤ Takayuki Tani, Yasushi Fukuzawa, Naotake Mohri, Nagao Saito, Masaaki Okada, Machining phenomena in WEDM of insulating ceramics, Journal of Materials Processing Technology, 149, 2004, 124-128
- ⑥ Hiromitsu Gotoh, Takayuki Tani, Naotake Mohri, Masaaki Okada, Improvement of Machining Characteristics of WEDM on Insulating Ceramics, Proceedings of the 15th International Symposium on Electromachining (ISEMXV), 2007, 145-148

5. 主な発表論文等

- ① Atsutoshi Hirao, Takayuki Tani, Hiromitsu Gotoh, Shoju Aoshima, Naotake Mohri, Study of deposition machining using electrical discharge with reciprocating rotation in air gap, International Journal of Electrical Machining, 査読有、No. 21、March、2016、1-6
- ② 谷貴幸、後藤啓光、平尾篤利、毛利尚武、亜鉛合金縮小成形電極を用いた多角形状の連続微細穴放電加工、電気加工学会、査読有、49巻、120号、2015、32-38
- ③ Hiromitsu Gotoh, Takayuki Tani, Naotake Mohri, Machining Characteristics of Wire Electrical Discharge Machining on

Insulating Si₃N₄ Ceramics-Relationship
between Electrical Conductive Layer and
Machining Characteristics-, International
Journal of Electrical Machining、査読有、
No. 20、March、2015、17-24

④H. Gotoh、T. Tani、M. Okada、A. Goto、
T. Masuzawa、N. Mohri、Wire electrical
discharge milling using a wire guide with
reciprocating rotation、Procedia-CIRP
Annals-Manufacturing Technology、査読有、
Vol. 6、2013、199-202
DOI:10.1016/j.procir.2013.03.051

〔雑誌論文〕(計1件)

①後藤啓光、回動ガイドを用いたワイヤ放電
ミーリングの展開、精密工学会誌、査読無、
Vo. 81、No. 11、2015、1004-1007

〔学会発表〕(計2件)

①後藤啓光、谷貴幸、毛利尚武、回動ワイヤ
ガイドを用いたワイヤ放電ミーリング-第2
報 加工面の表面性状について-、電気加工
学会全国大会(2014)講演論文集、2014、93-94
②後藤啓光、谷貴幸、毛利尚武、回動ワイヤ
ガイドを用いたワイヤ放電ミーリング加工
法の開発-絶縁性Si₃N₄セラミックスに対する
加工-、電気加工学会全国大会(2015)講演論
文集、2015、79-80

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤啓光 (GOTOH, Hiromitsu)
筑波技術大学・産業情報学科・助教
研究者番号: 90389718

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

武沢英樹 (TAKEZAWA, Hideki)
平尾篤利 (HIRAO, Atsutoshi)