

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360051

研究課題名(和文) 静電誘導給電法を用いた超短パルス電解加工の研究

研究課題名(英文) Research on Ultra-short Pulse Electrochemical Machining using Electrostatic Induction Feeding Method

研究代表者

國枝 正典(Kunieda, Masanori)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90178012

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：静電誘導給電法を用いた微細電解加工法を開発した。パルス電圧を加工ギャップに容量結合するので、電解電流はパルスの立上りと立下りの数十nsの間だけ流れる。よって、電気二重層は狭いギャップにだけ形成され、数 μm のギャップで加工が可能になる。極間電圧の測定値に基づき、工具電極をサーボ送りするシステムを製作した。そして、直径 $48\mu\text{m}$ の工具電極を用いてステンレス板に内径 $52\mu\text{m}$ の穴加工が行えた。このとき、電流パルスは両極性であるにもかかわらず、工具電極の消耗が無視できるほど小さいことを見出し、その原因を究明した。また、ブロック状の工具電極を用いて微細軸を加工し、放電加工では達成困難な平滑面が得られた。

研究成果の概要(英文)：A novel micro ECM system was developed using the electrostatic induction feeding method. With this method, since the pulse voltage is coupled to the tool electrode by capacitance, the pulse duration of the electrolytic current is determined by the rise and fall time of the voltage pulse and is thus significantly short, realizing the gap width of a couple of micrometers. A servo feed system was also developed based on the measurement of the gap voltage. The tool wear was negligibly small regardless of the bipolar pulse, of which the reason was discussed. The surface finish of micro rods machined using a block tool electrode was significantly smoother than what can be achieved by EDM.

研究分野：電気加工

キーワード：電解加工 微細加工 超短パルス 静電誘導給電 電気二重層 サーボ送り制御 工具電極消耗

1. 研究開始当初の背景

電解加工は放電加工と同様に、導電性があれば材料の硬さによらず加工可能であるが、加工原理は化学的であり、熱的な放電加工と全く違う。加工速度が速く、加工変質層が生じず、工具電極の消耗がないという優れた特長を持つが、放電加工では加工間隙が比較的狭く、間隙がいったん広がると放電は生じなくなるが、電解加工では間隙が広がっても多少の電流は流れる。よって、放電加工に比べてギャップが大きく、穴加工の場合はテーパ穴になり易い。

一方、ns オーダの短パルスを用いると μm 程度の狭ギャップ加工が可能であることが知られている¹⁾。これは、電解反応が始まるには、先ず電極面上で電気二重層が形成されなければならないからである。このコンデンサへの充電としてモデル化できる電気二重層の形成は、ギャップが短い極間では早いですが、ギャップが長い極間では抵抗が大きいため遅い。よって、ギャップが長い極間での電気二重層の形成に必要な時間より短いパルスを用いれば、狭ギャップ加工が実現する。

しかし、ns オーダの短パルスを出力可能なパルス電源は、入手が困難である。

2. 研究の目的

電解加工において図1に示すように、立上りと立下りの速度が十分に速いパルス電圧をキャパシタンスを介して極間に容量結合する。このとき、図2に示すように立上り・立下りの瞬間だけパルス幅が短くピークの高い電解電流が流れる。この静電誘導給電法

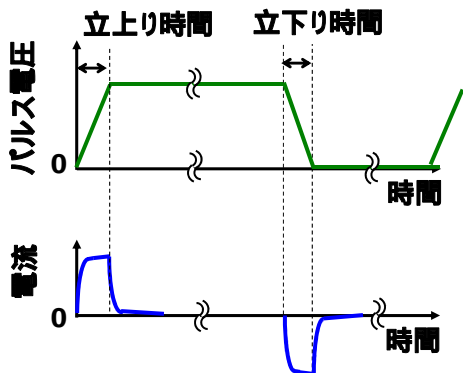
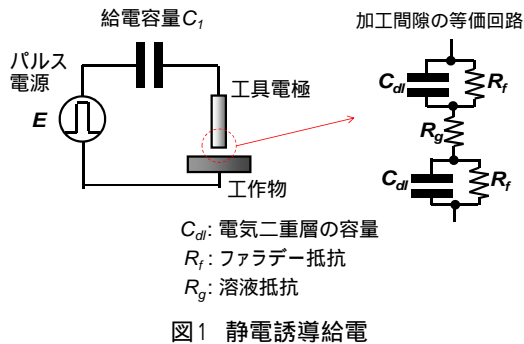


図2 パルス電圧によって得られる電流パルス波形

により ns オーダのパルス幅を実現し、放電加工に匹敵する微細加工を実現する。そして、工具電極消耗や仕上面粗さなどの加工特性について研究する。

3. 研究の方法

静電誘導給電法による微細電解加工システムを図3に示す。ファンクションジェネレータのパルス信号を最大周波数 10MHz のバイポーラ電源で増幅し給電容量を介して加工間隙に印加する。電解液には 2wt% の NaCl 水溶液を用い、ノズルから加工間隙に向けて噴出させた。穴加工に用いる工具電極は、タングステンやステンレスの細線を、微細放電加工法の一つである WEDG (wire electro discharge grinding)法を用いて放電成形して製作した。

工具電極の自動送りのために、図4に示すサーボ送り制御システムを製作した。パルス電圧の立上りと立下りにもとない、図5に示す極間電圧の変化が得られる。この極間電圧のピーク値はギャップ長に比例する。よって、

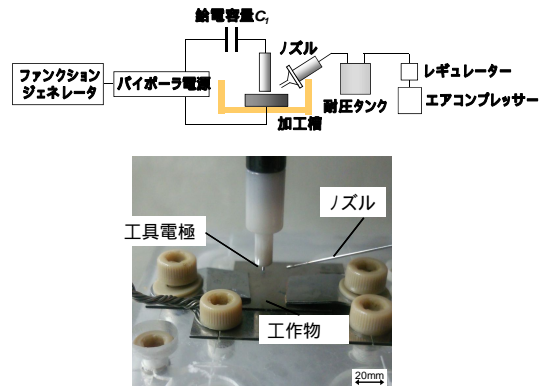


図3 静電誘導給電法による微細電解加工システム

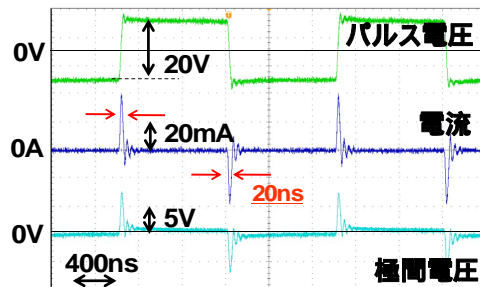
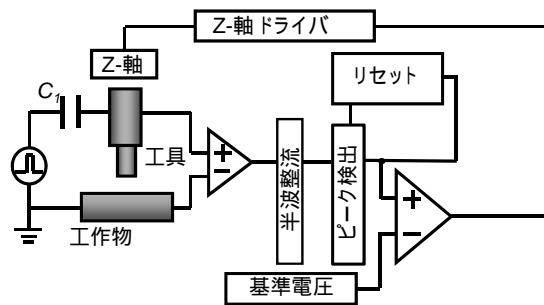


図5 パルス電圧の立上り、立下りにもとない極間電圧と電解電流パルス

半波整流後にピークホールド回路を用いてピーク検出し、基準電圧との比較により工具電極の送りのための指令値を出力し、これをZ軸ドライバに入力する。

4. 研究成果

(1) 微細穴加工

WEDGを用いて放電成形した直径 $50\mu\text{m}$ のタングステン軸を用いてステンレス(SUS304)に電解穴加工を行った。給電容量 C_1 は 47pF 、タングステン軸は 3000rpm で回転させた。パルス電圧の立上りと立上り時間を変えて、電解電流のパルス幅がギャップ長に及ぼす影響を調べた。前出の図5では、電流のパルス幅が 20ns の例を示している。このように、静電誘導給電法を用いることにより、パルス幅が ns オーダのパルス電圧を用いる必要はなく、立上りと立下りの速度を速くすることによって容易に ns オーダの短パルス電流が得られる。

図6に得られた加工穴の断面形状を示す。立上り、立下り時間が短いほど狭ギャップで加工が可能であることが分かる。パルス幅が 20ns のとき、放電加工と同じ $2\mu\text{m}$ 程度のギャップ長で加工が行えている。

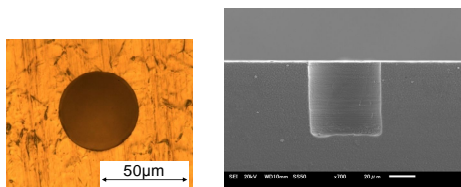
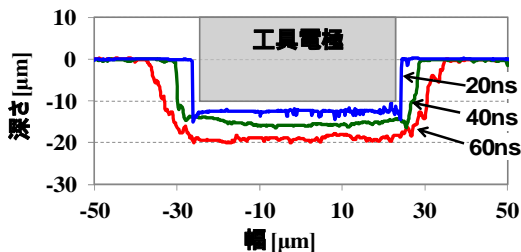


図6 電流のパルス幅がギャップ長に及ぼす影響

(2) 工具電極消耗

前項の穴加工において、工具電極の消耗を測定した。静電誘導給電法では図5のように、パルス電圧の立上りと立下りで、逆極性の電流パルスが極間に流れる。従って、工具電極が陽極となる極性で電流が流れる瞬間があるので、工具電極が消耗する可能性がある。

しかし、予想に反して、タングステンの工具電極の消耗はほとんど生じなかった。その原因として、まずは材料の影響を調べた。タングステンの表面に酸化タングステンの被膜が生じ、溶出が妨げられると考えた。そこで、工具電極材料を工作物材料と同じステンレス(SUS304)に換え、同じ穴加工を行ったところ、タングステンと同様に消耗が生じないことが分かった。

そこで、形状効果を考慮し、工具電極と工作物の両方に直径 $50\mu\text{m}$ のステンレス細線を用い、突き合わせ加工を行った。その結果、両方の電極が同じ長さだけ消耗することが分かった。よって、形状の違いが消耗量に差異をもたらすことが分かった。

次に、形状の違いが消耗量に影響を及ぼす原因を解明するため、加工間隙の電解液中で生じるジュール発熱が電極表面温度の上昇に及ぼす影響を調べた。図7に示す条件で電流が流れたとき、ジュール発熱が軸状の工具電極と平板状の工作物に平等に配分されると仮定し、熱伝導解析を行った。工具電極も工作物も加工間隙以外の境界には断熱条件を用いた。そして、工具電極には1次元、工作物には軸対称2次元の熱伝導を仮定した。その結果、電圧を印加し始めて 0.1 経過後に、工具電極表面の温度上昇が工作物表面の3倍であることが分かった。これは、形状の違いがもたらす熱抵抗の違いである。

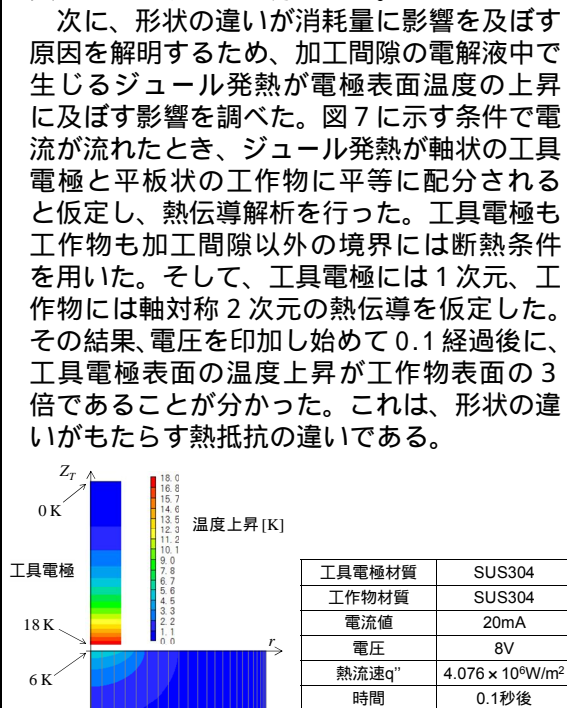


図7 電流のパルス幅がギャップ長に及ぼす影響

そこで、工具電極と工作物の両方に直径 $50\mu\text{m}$ のステンレス細線を用い、形状効果が生じない状況下で、片方の電極(工具電極)の固定ジグのみをヒータで温めて突き合わせ加工を行った。ヒータにはセラミック抵抗を代用し、セラミック抵抗に流す電流によってジグ温度を変化させた。ジグ温度はシース熱電対をジグに押し付けて測定した。図8は加熱した工具電極の消耗長さを、非加熱の工作物電極の消耗長さで除した値(消耗率)を示す。温めた側の電極の消耗が小さいことが分かる。従って、形状効果が電極表面温度の違いを生じさせ、表面温度が高い軸状電極の消耗を減少させたと考えられる。

電極表面温度が高いと消耗が減少する理由としては、電気二重層の電気容量が温度上昇に伴い増加する現象²⁾が原因であると考え

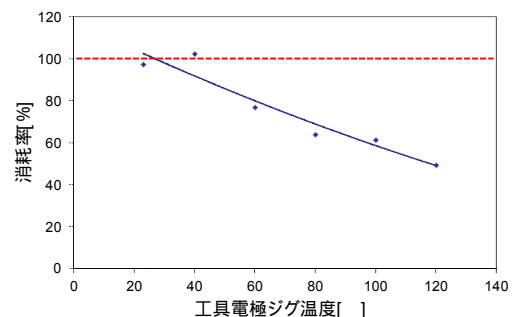


図8 電極温度が消耗率に及ぼす影響

られる。電気二重層の容量が大きいと電気二重層が形成される前に電流パルスがオフであり、消耗されにくくなると考えられる。

(3) 微細軸加工

静電誘導給電法を用いて、微細軸の電解加工を試みた。図9に示すように、工具電極にはタングステンのブロック電極を用い、ステンレス(SUS304)細線を素材として加工した。形状効果を考慮すると、タングステンの工具電極が消耗することが予想されたので、等価回路に示すようにダイオードを用いて両極性パルスを単極性化した。

図10に示すように、WEDGを用いてステンレス細線を直径200 μm に前加工し、これを素材として図9の方法で直径89 μm に加工した。形状精度は良くないが、電解加工面は放電加工面に比べて平滑であることが分かる。また、電解加工面は熱影響層がないので、残留応力やクラックの生成がない。よって、放電加工後の仕上げ加工に応用することも有効であると考えられる。

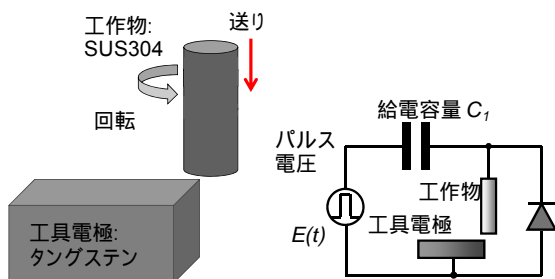


図9 静電誘導給電法を用いた微細軸の電解加工

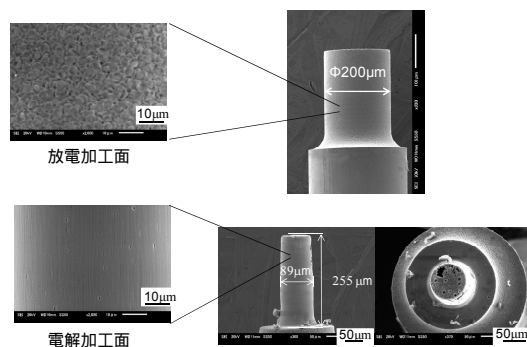


図10 静電誘導給電法による微細軸の電解加工(送り速度: 0.6 $\mu\text{m}/\text{s}$ 、電解液: NaCl 2wt%水溶液、ピーク電流: 100mA、パルス幅: 40ns)

<引用文献>

Rolf Schuster, et.al: Electrochemical Micromachining. Science, 289, 5476 (2000) 98-101.

G. W. Herzog, W. Sitte, O. Fruhwirth: The Temperature Dependence of Double-Layer Capacitance. Surface Technology, 9 (1979) 337-346.

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3件)

Tomohiro Koyano, Masanori Kunieda, Electrochemical Micromachining Using Electrostatic Induction Feeding Method, Key Engineering Materials, 523-524 (2012) 305-309 査読有
DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.305

Tomohiro Koyano, Masanori Kunieda, Micro Electrochemical Machining Using Electrostatic Induction Feeding Method, CIRP Annals, 62, 1 (2013)175-178 査読有
DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.107

真鍋彰啓、国枝正典、静電誘導給電法を用いた電解加工における工具電極消耗の研究、電気加工学会誌、48, 119, (2014) 186-193 査読有
DOI: http://doi.org/10.2526/jseme.48.186

[学会発表](計12件)

小谷野智広、国枝正典、静電誘導給電法を用いた微細放電・電解加工の加工特性、2013年度精密工学会春季大会学術講演会、2013/3/13、東京工業大学、東京都

小谷野智広、国枝正典、静電誘導給電法を用いた超短パルス電解加工の研究、電気加工学会全国大会(2012)2012/12/7、西日本総合展示場新館、福岡県

Tomohiro Koyano, Masanori Kunieda, Electrochemical Micromachining Using Electrostatic Induction Feeding Method, 14th International Conference on Precision Engineering (ICPE2012), 2012/11/10, 淡路夢舞台国際会議場、兵庫県

小谷野智広、国枝正典、静電誘導給電法を用いた微細電解加工における極間距離の制御、2012年度精密工学会秋季大会学術講演会、2012/9/15、九州工業大学、福岡県

Masanori Kunieda, Advances in Electro-discharge and Electro-chemical Micromachining, 37th MATADOR Conference on Advanced Manufacturing, 2012/7/27, Manchester, 英国

小谷野智広、国枝正典、静電誘導給電法を用いた微細電解加工の研究、第206回電気加工研究会、2012/6/4、名古屋工業大

学、愛知県

Tomohiro Koyano, Masanori Kunieda, Micro Drilling EDM with High Rotation Speed of Tool Electrode Using the Electrostatic Induction Feeding Method, 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012, 2012/6/4, Zurich, Switzerland

Tomohiro Koyano, Masanori Kunieda, Ultra-Short Pulse ECM Using Electrostatic Induction Feeding Method, ISEM XVII, 2013/4/11, Belgium, Leuven

真鍋彰啓、国枝正典、静電誘導給電法を用いた電解加工における工具電極消耗の調査、2014年度精密工学会春季大会、2014/3/18、東京大学、東京都

W. Han, M. Kunieda, Servo Feeding Control System used in Micro Electrochemical Machining with Electrostatic Induction Feeding Method, Proc. of the 10th International Symposium on ElectroChemical Machining Technology (INSECT 2014), 87-95 2014/11/13, Germany, Saarbrücken

W. Han, M. Kunieda, Development of Servo Feeding System for Micro ECM using Electrostatic Induction Feeding Method, 2014年度精密工学会秋季大会、2014/9/16, 鳥取大学、鳥取市

W. Han, M. Kunieda, Fabrication of micro-rods by micro-electrochemical machining with the electrostatic induction feeding method, 2015年度精密工学会春季大会、2015/3/18, 東洋大学、東京都

6. 研究組織

(1)研究代表者

國枝 正典 (KUNIEDA MASANORI)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号： 90178012

(2)研究分担者

三村 秀和 (MIMURA HIDEKAZU)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号： 30362651