

機関番号： 12605

研究種目： 基盤研究 (C)

研究期間： 2008~2010

課題番号： 20560099

研究課題名 (和文) 超硬合金の電解加工による形状創成に関する研究

研究課題名 (英文) Research on Shape Generation of Tungsten Carbide Alloy with ECM

研究代表者

夏 恒 (NATSU WATARU)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号： 40345335

研究成果の概要 (和文)：本研究では、代表的な難削材である超硬合金の形状創成を電解加工で実現することを目的とする。目的達成のため、(1)電解加工等価回路による加工精度影響因子の分析、(2)極間距離の非接触検出法の確立と制御システムの構築、(3)電極振動による電解生成物の極間からの排出、(4)超音波洗浄と回転を付加した超硬合金微細軸の製作と、(5)単純形状の重ね合わせによる形状創成を行った。

研究成果の概要 (英文)：The purpose of this study is to generate a free form surface of tungsten carbide alloy by electrochemical machining. To achieve this goal, the following five trials were conducted, (1) analysis of factors affecting the machining accuracy with an equivalent circuit for the electrochemical machining process; (2) establishment of a control system for contactless detection of the distance between electrodes; (3) evacuation of by-products from the inter-electrode area by means of tool electrode vibration; (4) production of micro pins of tungsten carbide alloy under by adding workpiece rotation and ultrasonic cleaning; and (5) shape generation by superimposing simple grooves.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2008年度 | 1,600,000 | 480,000 | 2,080,000 |
| 2009年度 | 1,300,000 | 390,000 | 1,690,000 |
| 2010年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

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： 特殊加工、電解加工、超硬合金、形状創成

1. 研究開始当初の背景

超硬合金は高硬度、耐摩耗性や耐熱性に優れ、切削工具や金型などに広く利用されている。しかし、超硬合金が非常に硬いので、切削では工具の消耗が激しく、ほとんど加工できない。そのため、通常は研削、放電加工、電解研削などの加工法が用いられる。研削や放電加工の場合、工具の消耗が避けられない欠点がある。一方、電解加工は、その加工原

理から、工具電極の消耗がないので、工具の消耗による形状精度の劣化の心配がない。また、電気化学加工法なので、被加工物に熱応力や機械応力が発生しないとの特徴がある。しかし、電解加工は、放電加工と異なり、極間距離がミリオーダーでも電流が流れるので、工具形状の工作物への転写性が悪いことが知られている。また、加工の進行に伴って溶出物や気泡などの電解生成物が極間に

たまり、溶出作用を妨げ、加工が進まなくなる。

2. 研究の目的

本研究では、代表的な難削材である超硬合金の形状創成を電解加工で実現するため、極間からの電解生成物の排出と極間への新しい電解液の供給を容易にするため、重ね合わせ法を用いて、単純電極の走査により、複雑形状を創成する。

3. 研究の方法

- (1) 電解加工の加工精度を向上させるため、電解加工現象を等価回路で表現し、加工モデルの確立を試みた。
- (2) 極間距離の制御を実現するため、パルス波形の極間距離に対する変化を利用し、極間距離を制御する手法を検討した。
- (3) 電解生成物の排出と極間への新しい電解液の供給方法と効果を調査し、超硬合金の電解加工に適した極間生成物の除去方法を検討した。
- (4) 回転と超音波洗浄の付与による超硬合金微細軸の製作を行った。
- (5) 電解液ジェットによる超硬合金の形状創成を試みた。

4. 研究成果

(1) 等価回路による加工特性の解析

本研究では、加工条件が加工速度と加工精度に及ぼす影響を定性的に調べるため、新しい電解加工の等価回路を提案した。

①電解加工等価回路

電気二重層両端の電位がある閾値以上になって加工電流が流れるという現象を図1に示すように、ファラデー抵抗に直列に接続されるツェナーダイオードを用いて再現することにした。この等価回路では、電圧パルスが印加される直後に電流がファラデー抵抗に流れないが、電気二重層コンデンサ両端の電圧がツェナーダイオードの降伏電圧以上になると、電流がファラデー抵抗に流れ始める。

②等価回路パラメータの同定

等価回路の中の未知のパラメータの同定は、図2に示す実験装置を用い、加工電源から流れる電流の解析結果と実験結果

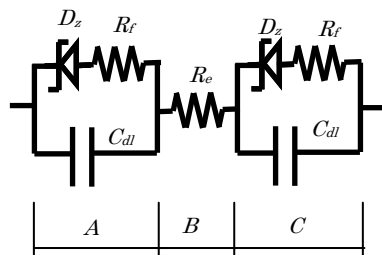


図1 電解加工の極間等価回路

の比較によって行われた。極間距離の異なる3組の電極と工作物は並列に接続されているので、極間距離と電流波形の関係を求めることができる。同定の際、1組の電極と工作物を電源に接続したので、等価回路は図3のように表すことができる。図の中の C_s は配線間の浮遊容量である。実験条件は表1に示す。

各パラメータの同定結果を表2に示す。 V_D はツェナーダイオード D_z の降伏電圧、 g は極間距離である。

また、提案した等価回路を用いて、異なる3種の極間距離において加工量を比較することで加工精度の評価を行った。

(2) 極間距離の検出と制御

電解加工において、加工の進行に伴い、一定の極間距離を保ちながら、工具電極を送らなければいけない。本研究では、パルス電圧印加時の極間距離に対する極間電流波形の変化に注目し、非接触で極間距離を推定・制御する手法について検討し、極間距離の制御システムを構築した。

①極間距離推定原理

パルス電解加工における電流波形は、パルス電圧の立ち上がり時にオーバーシュートが、立ち下がり時にアンダーシュートが観測

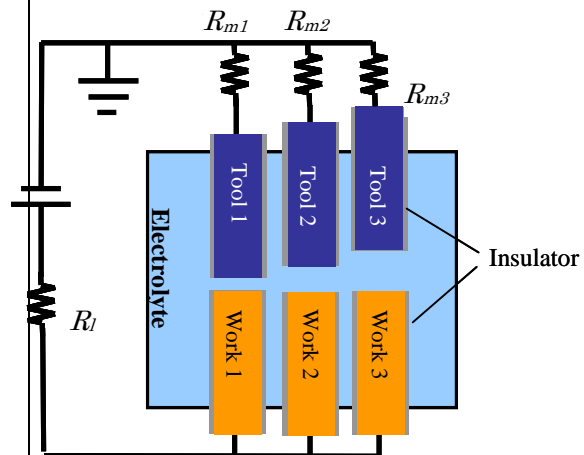


図2 実験装置の概要

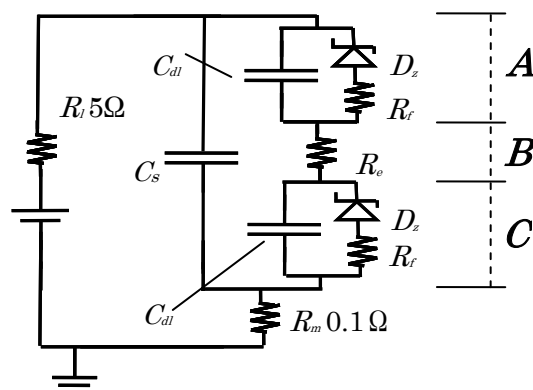


図3 パラメータ同定用回路

表1 実験条件

| | |
|-------------------------|-------------------|
| Workpiece material | SUS304 |
| Tool electrode material | Ti |
| Pulse duty | 50% |
| Pulse width | 5 μ s |
| Gap length | 0.1mm |
| Electrolyte | NaNO ₃ |
| Electrolyte density | 5% |

表2 パラメータの同定結果

| | |
|----------|---------------------|
| C_{dl} | 2 μ F |
| R_e | 7.5g+17.25 Ω |
| R_f | 7 Ω |
| V_b | 1.25 V |
| C_s | 0.02 μ F |

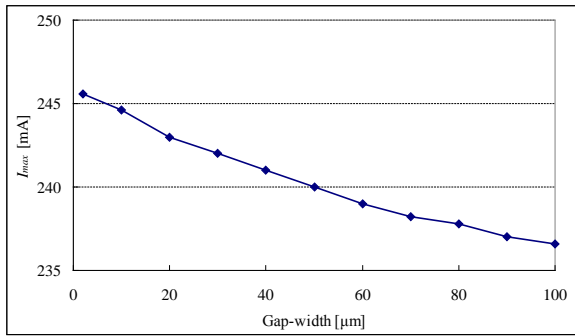


図4 極間距離と最大電流との関係

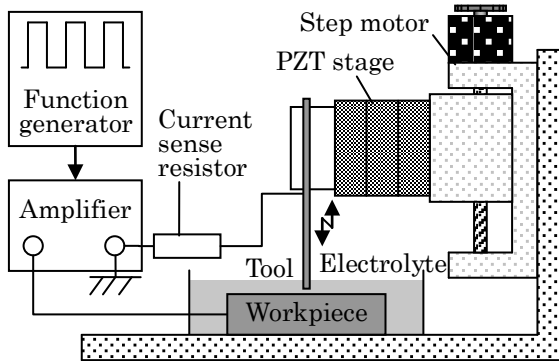


図5 加工装置の構成

される。ここでパルス電圧立ち上がり時のオーバーシュート I_{max} の大きさに注目すると、極間距離の増大に従って I_{max} の値が減少する傾向が見られる。図4に極間距離と I_{max} との関係の一例を示す。このような傾向は極間距離の減少に従い電解液抵抗が減少し、電気二重層の充電の際に生じる突入電流が増大するためである。以上より、予め極間距離と I_{max} の関係を求めておくことで、 I_{max} の値から、加工の進行を伴うことなく極間距離の推定

が可能であるといえる。

②極間距離推定回路と加工システムの構築

構築した加工システムを図5に示す。自作の統合コントローラにより、加工電源のオン・オフやXYZステージの位置決め及び送り速度を一括して制御できる。構築した極間距離推定回路のブロック図を図6に、極間距離制御アルゴリズムのフローチャートを図7に示す。ただし、図中の d は極間距離、 d_{ref} は目標距離、 D は送り量、 D_{ref} は目標送り量である。

③実験による検証

極間距離制御手法を実際に適用した貫通穴加工実験を行い、本手法の実用性について検証を行った。実験では、極間距離の目標値を50 μ mとした。加工中は工具電極の送り量、経過時間、短絡の有無等の情報を、統合コントローラからコンピュータに出力し記録する。加工開始地点を0としたときの工具電極座標の時間変化を図8に示す。結果より、加工開始よりおよそ8,500秒経過後に工具電極座標が-100 μ mとなっており、この前後で工具電極座標の時間変化の傾き、すなわち工具電極の送り速度に顕著な変化が見られる。今回の実験において使用した板厚が100 μ mであることから、この送り速度変化は工作物電極の貫通による極間距離の変化を検出した結果であると考えられる。また、加工終了時における最小極間距離は裏面半径と工具電極半径から求めた結果は42 μ mで、設定した目標極間距離は50 μ mであるから、極間距離をおよそ10 μ m程度の誤差内で制御が可能であることが確認された。

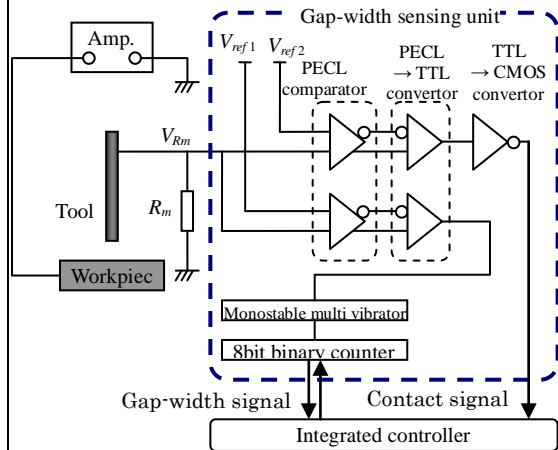


図6 極間距離推定回路ブロック図

(3) 極間生成物の排出と新しい電解液の供給

極間生成物の除去手法として、微細工具への適用が容易な工具電極の機械振動に注目し、振動パターンが加工速度と工具形状の転写精度に与える影響について実験的に調査・検討を行った。

①極間清掃ルーチン

実験には、図5に示す加工システムを用いた。極間清掃ルーチンの詳細は以下の通りである。

- Step1: 加工電源を一時的に遮断する
- Step2: 工具を鉛直上向きにストローク d だけ移動する
- Step3: 一定時間経過後工具を元の位置へ戻す
- Step4: 加工電源の供給を再開する
- Step5: 加工パルスを予め決めた回数で印加後、再び Step1 に戻る
- Step6: 累積印加パルス数が目標値に達した

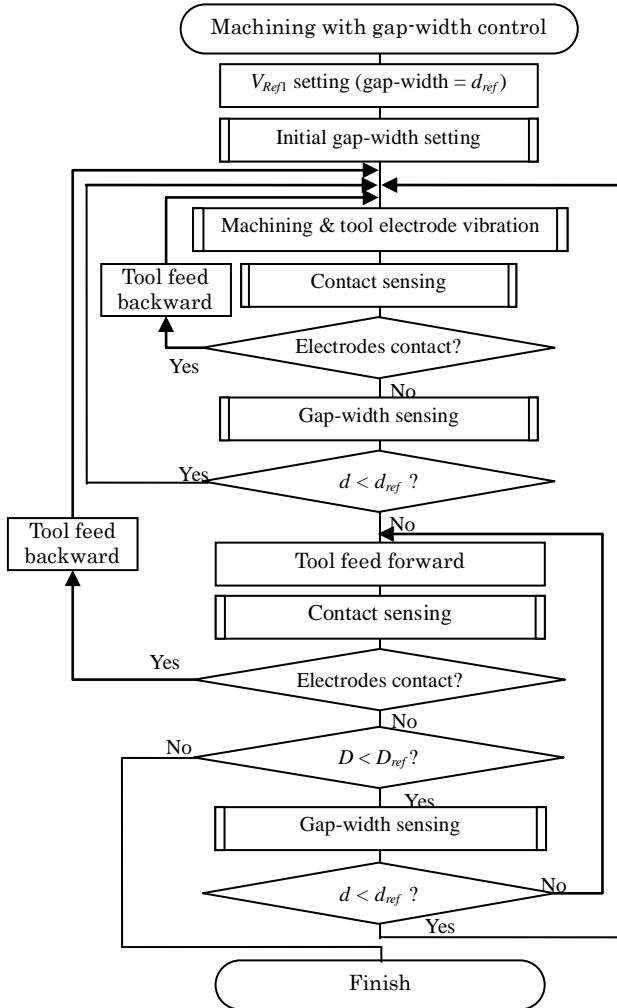


図7 極間距離制御フローチャート

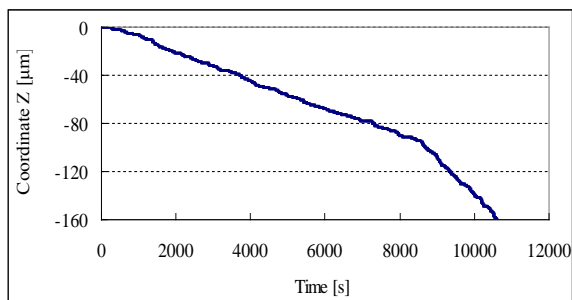


図8 工具電極座標の時間変化

ら加工終了とする

②効果の検証

検証実験で得られた加工痕の断面形状の一例を図9に示す。これより工具電極の機械振動により、加工痕底面中央の凸形状の縮小・解消と、加工量の増大が確認でき、極間生成物を除去することで工具形状転写精度が向上したと言える。

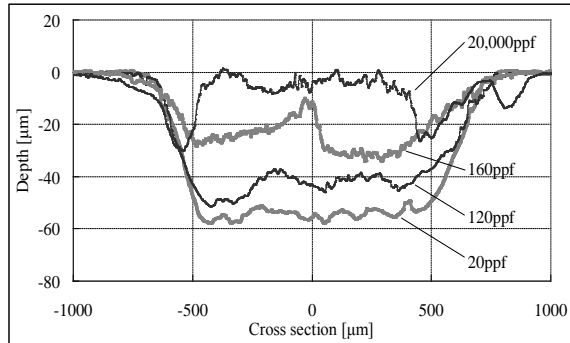


図9 加工痕断面形状の変化

(4) 超硬合金微細軸の製作

NaNO_3 による超硬合金の電解加工の特性を調べるため、超硬合金の微細軸の形成を試みた。

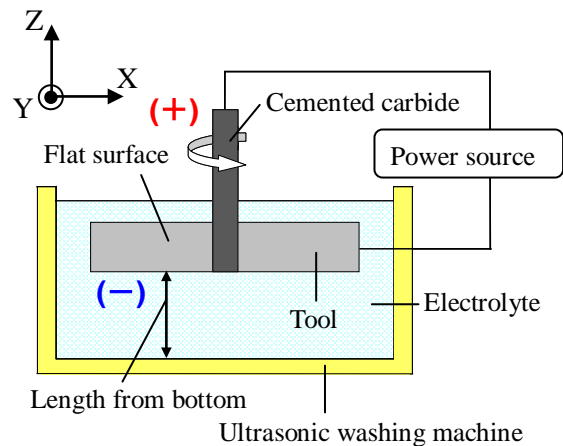


図10 微細軸形成の概念図

表3 加工条件

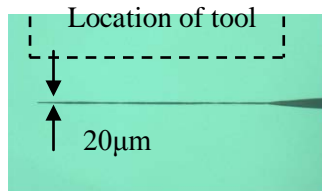
| | |
|---|--|
| Electrolyte | 10% NaNO_3 aq |
| Working current [mA] | 400 |
| Machinig time [min] | 2.5 |
| Revolution [rpm] | 2850 |
| Distance between electrodes [μm] | 350 |
| Length from bottom [mm] | 30 |
| Work material | Cemented carbide $\phi 300\mu\text{m}$ |
| Tool material | SUS304 |
| Tool thickness [mm] | 2 |

①超音波洗浄と工作物回転の付与

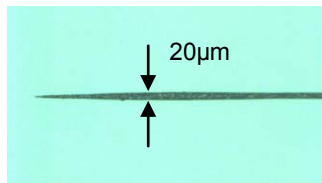
微細軸形成の装置概要を図10に示す。超硬軸を回転させる主轴はXYZ変位テーブルに固定され、工具として使用されているステンレス板に対してXYZ方向への位置決めが可能である。さらに、本加工では超音波洗浄機を加工槽として利用する。加工中の工作物の回転と超音波の付与は、極間生成物と工作物に付着した生成物の除去効果が期待できる。加工条件を表3に示す。

②超硬微細軸の形成

加工後のそれぞれの軸形状の一例を図11に示す。なお、図に示す軸は加工後に超音波洗浄によって生成物を除去した状態である。結果より、2.5分という非常に短い加工時間で最小軸径 $20\mu\text{m}$ 、アスペクト比100以上の微細軸が形成できていることが分かる。



(a)Overall view



(b)Enlarged view

図11 形成された微細軸

(5) 電解液ジェットによる超硬合金の形状創成

電解液ジェット加工は、ノズルからジェット状の電解液を利用した加工法である。本研究では、回転する工作物側面にジェットを噴出することで、極間生成物排出を促進し、旋削による超硬合金の形状創成を試みた。

①ノズルの改良と加工装置の構築

本加工法ではギャップ長に比例して抵抗が大きくなる。市販のノズルを用いた場合、工作物との接触を避けるために、十分なギャップ長が必要であった。そこでノズル先端を加工し、ギャップ長を縮めることで、供給する電流を大きくした。加工装置の概略図を図12に示す。改良したノズルと加工時のノズル位置を図13に示す。実験結果より、改良ノズルを用いることで、電流密度が高くなったため、 NaNO_3 水溶液による超硬合金の溝加工ができたことが分かった。そこで、溝の加工痕を軸方向に重ね合わせることによって、形状創成を試みた。

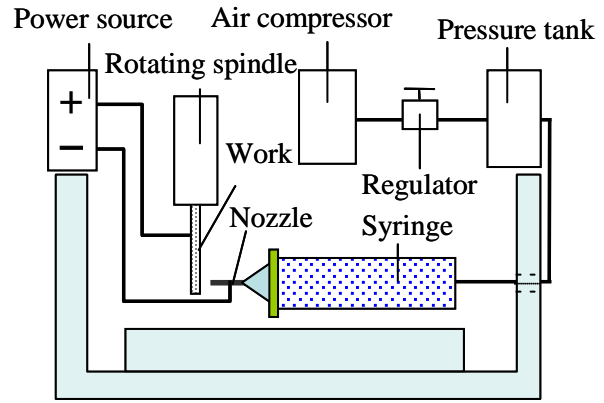


図12 実験装置概略

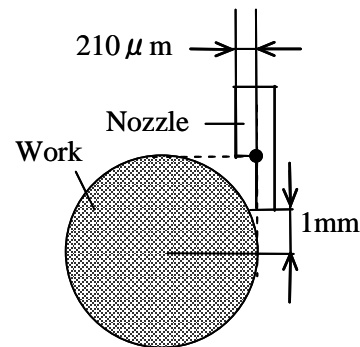


図13 加工時のノズル位置

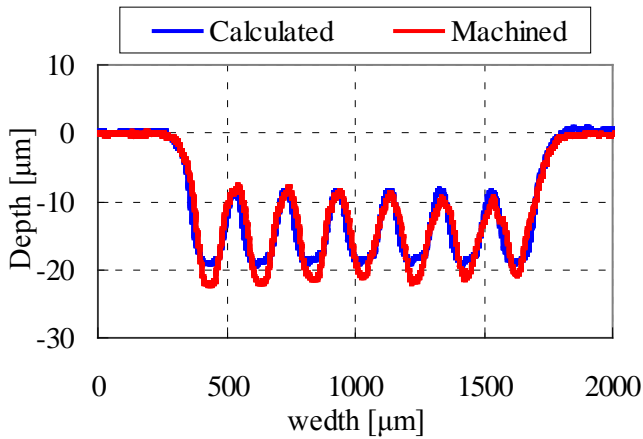
②解析結果と実験結果の比較による検証

超硬合金の加工において、上記の重ね合わせの加工法が成り立つかどうかを確認する必要があるため、単純溝の重ね合わせによる創成形状の理論予測結果と実際の加工結果を比較した。

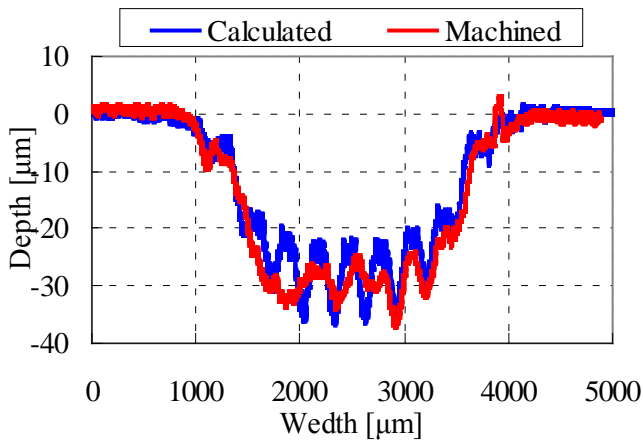
まず1本の溝を加工し、それを基準として、等間隔で重ね合わせることによって、加工痕の予測を行った。重ね合わせの加工実験では、1本の溝加工を行い、決められた値分軸方向にノズルを走査し、その位置で再び溝加工を行う。この工程を繰り返し目標の走査距離になるまで重ね合わせを行う。図14に、工作物に真鍮と超硬合金をそれぞれ用いた場合、ノズルを単純溝幅の2分の1ずつ軸方向にずらして、7本重ね合わせた断面形状を示す。結果より、単純溝の重ね合わせによる創成形状の予測結果が実験結果と、溝と溝の間隔や深さがほぼ一致していることから、電解液ジェットによる超硬合金の形状創成の可能性が示唆された。ただし、超硬合金の場合、予測結果と実験結果が完全に一致していないため、超硬合金の加工の際に表面に生成された酸化膜が次の溝加工に多少影響を与えることが考えられる。

以上の実験結果より、超硬合金において、単純溝の重ね合わせで複雑な形状を以下の方法で創成できると考えられる。まず、基準となる加工電流と工具の滞在時間を決めて、基準溝を加工し、その断面形状を測定する。次

にこの基準溝の深さを a_1 倍、 $a_2 \cdots a_i$ 倍にしなが、横方向にずらして重ね合わせて行く。 a_i は重ね合せ係数と呼ぶ。この重ね合せ形状が目標形状と一致するような重ね合せ係数を求めれば、目標形状の創成ができる。なお、溝の加工深さは滞在時間に比例するので、重ね合せ係数に比例して滞在時間設定すればよい。



(a) 真鍮の場合



(b) 超硬合金の場合

図 1 4 単純溝の重ね合わせによる形状創成

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 1 件)

- ① W. Natsu, T. Kunimi: Analysis of ECM Phenomena with Equivalent Circuit for Electrolysis, International Journal of Electrical Machining, 査読有, No. 15, 2010, pp. 45-50

[学会発表] (計 9 件)

- ① 澁谷直城, 夏 恒, 極低濃度電解液による微細軸形成条件の検討, 2011 年度精密工学会春季大会, 2011 年 3 月 1 日, 精密工

学会 WEB サイト

- ② 中山尚志, 夏 恒: 工具電極の超音波振動による電解加工特性の向上, 2011 年度精密工学会春季大会, 2011 年 3 月 1 日, 精密工学会 WEB サイト
- ③ 寺田 篤, 夏 恒: 工具電極の運動制御による生成物の排出と電解加工特性の向上, 2010 年度精密工学会秋季大会, 2010 年 9 月 28 日, 名古屋大学
- ④ 夏 恒, 国見喬嗣, 阿部亮史: 等価回路の解析による電解加工特性の理解, 第 199 回電気加工研究会, 2010 年 6 月 4 日, 工学院大学
- ⑤ A. Terada, W. Natsu: Development of Gap-width Controlling System for Micro-ECM, the 16th International Symposium on Electromachining, 2010 年 4 月 21 日, 中国上海
- ⑥ 阿部 亮史, 夏 恒: 電解等価回路を用いた加工特性向上の試み, 2010 年度精密工学会春季大会, 2010 年 3 月 16 日, 埼玉大学
- ⑦ 寺田 篤, 夏 恒: 工具電極の運動制御による電解加工特性の向上、電気加工学会全国大会 (2009), 2009 年 11 月 26 日, メルパルク京都
- ⑧ 寺田 篤, 国見喬嗣, 夏 恒: マイクロ電解加工機の極間距離の制御に関する研究, 2009 年度精密工学会春季大会, 2009 年 3 月 11 日, 中央大学
- ⑨ 国見喬嗣, 寺田 篤, 夏 恒: マイクロ電解加工における極間現象の解明の試み, 電気加工学会全国大会 (2008), 2008 年 11 月 28 日, CIC 東京

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

夏 恒 (NATSU WATARU)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 40345335

(2) 研究分担者

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