

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360064

研究課題名(和文) 極低濃度電解液による環境対応微細電解加工に関する研究

研究課題名(英文) Research on eco-friendly electrochemical micro-machining by using ultra-low concentration electrolyte

研究代表者

夏 恒(Natsu, Wataru)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40345335

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円、(間接経費) 4,350,000円

研究成果の概要(和文)：難削材の加工を得意とする電解加工は、環境対策や加工速度がネックとなっている。本研究は、極低濃度電解液を用いた微細電解加工法を提案し、難削材の微細形状を高精度、高速度で創成するとともに、環境に与えるものづくりの悪影響を最低限に抑えることを目的としている。目標を達成するため、実験と等価回路の解析により、電解液濃度が加工特性に及ぼす影響を調査したうえ、超硬合金微細軸の高速製作や、超音波振動と両極性パルスの併用による超硬合金の加工を実現した。また、極間距離及び加工状態の検出・制御装置を考案し、パルス電解加工の電極消耗の抑制方法を提案して、低濃度電解液による微細電解加工に適したシステムを構築した。

研究成果の概要(英文)：Although difficult-to-cut metallic materials can be machined by electrochemical machining (ECM), the impact to the environment and lower machining rate are bottlenecks to enhance its application. In this research, an ECM method using a very low concentration electrolyte was proposed to realize a precision machining at a high speed for difficult-to-cut materials, and thus to minimize the adverse effects to the environment. In order to achieve the goal, the influence of electrolyte concentration on machining characteristics was investigated experimentally and theoretically with the equivalent circuit. Besides, the fabrication of WC micro shafts with high speed and WC machining with ultrasonic vibration and bipolar pulses were realized. In addition, the detection and control system of the machining state and gap distance, and the method to decrease the electrode wear were proposed. As a result, a machining system suitable for ECM using low concentration electrolyte was constructed.

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 電解液 濃度 微細軸 加工状態 極間距離 検出精度

1. 研究開始当初の背景

レアメタルは様々な特性により、IT、自動車など幅広い産業分野で利用され、我が国の産業競争力を支えている。例えば、電気自動車に欠かせない高性能モーターには希土類磁石、各種2次電池にはコバルト・マンガン・ニッケル、人工関節・骨折プレートにはチタンが使用され、各種レアメタル部品の形状創成の需要が急拡大している。また、これらの部品の加工工具として、タングステン・コバルト・モリブデンを含んだ超硬工具が使用されている。これらの材料の多くは難削材として知られ、形状創成には通常研削、放電加工、電解研削などが用いられる。しかし、研削や放電加工の場合、工具の消耗が避けられない。また、熱加工法である放電加工やレーザー加工を利用した場合、加工面に微細なクラックが生じ、部品や工具の性能や寿命に大きな影響を与える。なお、微細加工を得意とする半導体技術やMEMS技術は材料の制限より、レアメタルを加工できない場合が多い。一方、電解加工は、非接触で電気化学反応を利用した金属加工法であるため、材料の硬さや熱特性に関係なく原子単位で加工でき、残留応力がほとんどないとの特徴を持つ。特に精密加工において大きな問題となっている工具消耗がないので、加工精度を厳密に維持できる。しかし、強酸や強アルカリ性の電解液を使用するので、作業員への危険及び廃液処理による環境問題を伴う。また、工具電極と工作物の極間距離が長い箇所でも加工電流が流れるので、転写精度が悪く、微細加工には不向きとされていた。ところで、2000年にSchusterら(Science, 289, 98(2000))は、幅が数十nsの超短電圧パルスを用いることによって、極間距離を μm またはサブ μm まで狭め、微細電解加工を実現したと発表した。その原理は極間の過渡的な現象を利用し、従来の着眼点とは異なり、電解加工の新しい応用や展開として大きく期待されるようになった。以来、微細電解加工の研究が盛んに行われ、多くの成果が報告されている。しかし、微細電解加工は、幅の短いパルスを利用するうえ、パルスとパルスの間に長い休止時間が必要であるので、加工速度が極端に遅くなり、実用化のネックとなっている。また、電解液には、依然強酸や強アルカリ性の電解液が使われているので、環境問題は解決していない。以上より、電解液の環境問題及び遅い加工速度の問題を解決すれば、表面性状の極めてよい難削材の微細部品や工具の製作には、微細電解加工法が大きく活用されると予想できる。

2. 研究の目的

これからの世界経済を牽引する電気自動車、環境・エネルギー、医療などの分野においては、タングステンやチタンなどのレアメタルの微細3次元構造部品の需要がますます増える。これら難削材の加工には、電気化

学反応を利用した電解加工は得意であるが、環境対策や加工速度がネックとなっている。本研究は、極低濃度電解液を用いた微細電解加工法を提案し、直径 $100\mu\text{m}$ 以下の微細軸を高速で製作したうえ、難削材の微細3次元構造を高精度で創成するための極間距離と加工状態の検出技術を確認するとともに、環境に与えるものづくりの悪影響を最低限に抑える。また、極低濃度電解液による加工に適した電源システムと極間距離制御システムを構築し、等価回路モデルの分析に基づいた加工速度の向上策を検討する。

3. 研究の方法

研究目的と目標を達成するため、加工実験と数値解析により、以下の研究項目を実施した。

- (1) 極低濃度電解液による超硬合金微細軸の製作
- (2) 極間距離と加工状態の検出、工具電極のサーボ送りシステムの構築
- (3) 両極性パルスを用いた超音波振動付与による超硬合金の電解加工
- (4) 遺伝的アルゴリズムを用いた電解加工等価回路のパラメータ同定と加工速度影響因子の調査
- (5) ローレベル電圧の調整によるパルス電解加工の電極消耗抑制の提案と実験による検証

4. 研究成果

- (1) 極低濃度電解液による超硬合金微細軸の製作

直径が $100\mu\text{m}$ 以下の微細軸は、電解加工による形状創成や微細深穴加工用の工具として、また微細部品として求められている。微細軸の加工法としては、旋削加工、放電加工、超音波加工、研削加工などの方法が提案されている。旋削加工は高い加工速度が得られるが、工作物の材料が真鍮等の快削材に限定され、超硬合金の加工は困難である。放電加工は、導電性材料であれば硬度によらず高精度の加工が可能であるが、工具消耗による加工精度の低下を招き、加工速度も遅い。一方、電解加工の加工原理は化学反応による電解作用であるため、熱的加工や機械的加工が持つ問題を克服でき、工具消耗が生じず、金属材料であれば硬度によらず加工が可能である。また、電解加工で超硬合金を加工する場合、電解液としてNaOH水溶液を用いることで、超硬合金の成分であるWCの除去が可能になるが、作業員への危険、および廃液による環境問題を伴う。これらの問題を解決するために、本研究では超硬合金の微細電解加工を行うための電解液として、中性電解液の使用を試みた。また、更なる環境負荷低減を目的として、低コストで容易に入手可能なミネラルウォーターの使用も試みられている。しかし、加工形状の再現性が低く、また、局部的な電流の集中により均一な軸径を持つ微

細軸の製作は困難である。この原因として加工時に工作物に付着する極間生成物が電流の流れを妨げていることが考えられた。そこで、図1に示すように加工中の加工軸の回転と超音波振動の付与による極間生成物の付着の抑制が加工形状に与える影響を調査した。また、電解液の濃度が生成物の付着や加工形状に与える影響を検討するため、ミネラルウォーターと同様の中性電解液であり、濃度の変更が容易に可能な NaNO_3 水溶液を使用し、加工特性を調査した。その結果、以下の知見が得られた。①加工中に軸の回転、超音波洗浄を行うことで、極間生成物、軸に付着する生成物を抑制することができ、軸径が均一で偏心の小さい軸の形成が可能である(図2参照)。②生成物の付着の低減を促進させ、加工時間を長くすることで、局部的な加工による軸先端部の脱落を防止し、軸径の微細化が可能である。③電解液として NaNO_3 水溶液を用いた場合、電解液濃度が高いほど生成物の付着が抑制される。低濃度で加工を行う場合は、生成物の付着を抑制するための新たな対策が必要である。④電解液として NaNO_3 水溶液を用いた場合、電解液濃度の増加に伴う電気伝導率の増加により供給可能な電流値が増加し、均一な軸径を持つ微細軸を短時間で形成可能である。

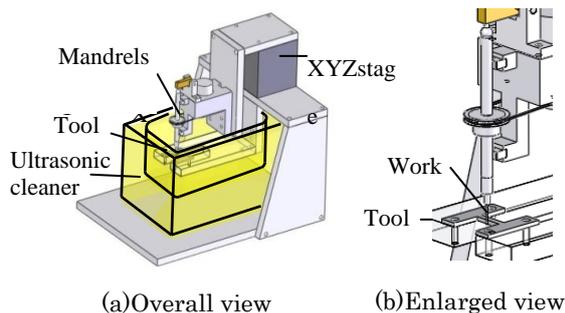


図1 微細軸製作装置

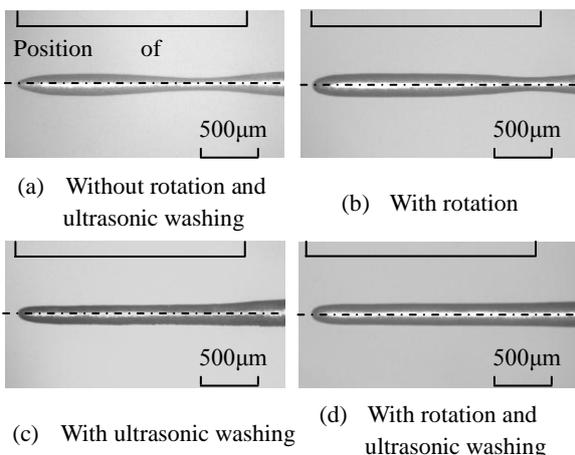


図2 超音波振動と回転による軸特性の向上

(2) 極間距離と加工状態の検出、工具電極のサーボ送りシステムの構築

極低濃度電解液による走査電解加工を実現するため、加工中の極間距離を検出し一定

に保つ必要がある。これまで、パルス電解加工における極間距離の検出手法として、極間電流波形の解析方式、渦電流方式、高周波放射波、超音波方式などが提案されているが、実用化には至っていないため、ほとんどの加工は定速送りで行われている。その際、送り速度が加工速度より遅い場合、極間距離が大きくなり電極形状の転写精度が悪化し、加工精度や加工速度の低下が生じること、また、送り速度が加工速度より速い場合、極間距離が小さすぎ短絡が生じやすくなり、電極の変形や破損が生じる恐れがあることが問題となる。そこで、筆者らは加工が生じない程度のパルス電圧を極間に印加し、その際極間に流れた電流のピーク値から極間距離を検出する手法を提案し、加工中の極間距離を一定に保ちつつ加工を行うことが可能であることを報告している。しかし、その検出感度と精度はまだ低く、微細加工へ適用するには、それらを向上させる必要がある。そこで、本研究では、極間距離の変化に対する検出信号の変化を表す検出感度および応答性、極間距離の正確性を表す検出精度を実用レベルまで向上させるため、極間距離の検出感度と精度に影響を与える各影響因子、例えば電解液濃度、電解液水位、極間に滞留する生成物排出のために行う工具電極ジャンプ動作の周期、加工電圧に着目し、実験的に最適条件を求めた。一方、パルス電解加工において、極間から生成物を排出するために工具電極にジャンプ動作を与えていても、加工部に突起が生じるなど所望の加工形状が得られない場合がある。これは、加工部に部分的な不動態酸化皮膜が生じたなどにより加工状態が悪化したことが原因と考えられる。加工状態の悪化は、加工精度の低下だけではなく、極間距離の検出精度も低下させる。本研究では、電気回路を用いてピーク値と電流量を演算し、その演算結果から自動的に加工状態を検出・制御するシステムを構築することを試みた。図3に構築した実験装置の概要を示す。ファンクションジェネレータを用いて加工パルス電圧、極間距離の検出パルス電圧、及び、高電圧パルスを生成し、アンプを通して極間に印加する。また、加工中は極間に滞留する生成物の除去のため、一定数の加工パルス電圧印加毎にステップモータステージを用いて工具電極にジャンプ動作を与える。図4に得られたピーク値と極間距離の関係を示す。図4より、電解液濃度が低いほどピーク値が小さくなっている。これは、濃度が低くなるほど液中のイオン濃度が低くなり、電気抵抗率が低下するためと考えられる。また、電解液濃度が低いほど極間距離の変化に対するピーク値の変化、つまり図4における傾きが大きくなっている。これは、電解液濃度が低いほど、検出感度が高いことを示している。本研究の主な成果として、加工深さの浅い加工、つまり単純電極による形状創成の加工においては、条件を最適化することで、極

間距離を $2\mu\text{m}$ 以上の感度・精度で検出することを実現した。しかし、深穴加工において、加工が深くなるにつれて、工具電極対向面積の変化などの検出環境の変化が無視できなくなり、検出感度と精度は低下する。今後は、深穴加工の場合、検出環境の変化を考慮した極間距離の検出を実現することが課題である。一方、加工状態の検出と制御については、加工パルス電圧印加時の電流波形のピーク値と電気量の関係から、加工中の加工状態の検出が可能であり、それに応じた制御が可能となったことで、工具電極の短絡や衝突を回避できたことを実験より検証した。

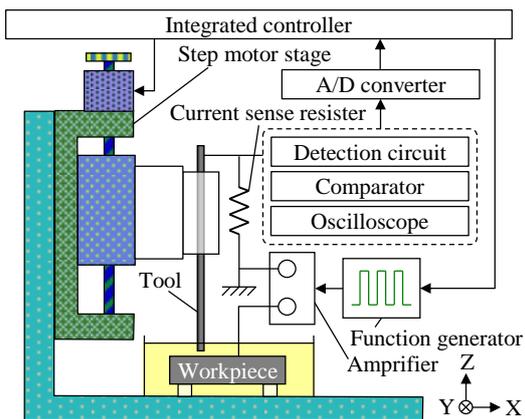


図3 距離と状態の制御システムの構成図

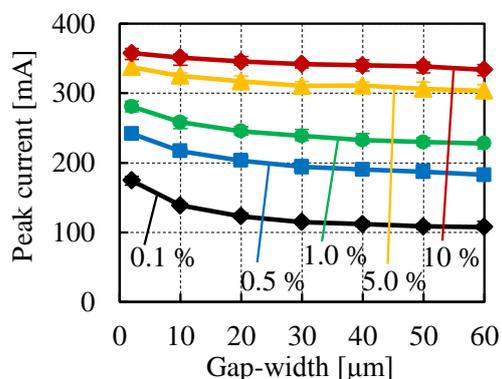


図4 電解液濃度の影響の調査結果

(3) 両極性パルスを用いた超音波振動付与による超硬合金の電解加工

電解加工の環境問題を解決するため、濃度の低い電解液を利用することや、毒性や腐食性の小さい電解液、例えば中性電解液 NaNO_3 を利用することが考えられる。一方、加工の進行に伴い極間に絶縁性の金属水和物、気泡等が発生し加工電流の流れを妨げ、また電流による電解液の温度上昇が加工特性の変化につながるため、生成物や加工熱を速やかに極間から排出する必要がある。なお、中性電解液 NaNO_3 を用いて超硬合金を加工する場合、工作物表面に酸化物が生成し、加工速度と加工精度が低下することも知られている。そこで、本研究では、微細加工にも適用が可能で、加工と同時に極間生成物の排出を行える方

法として、工具に超音波振動を付与しながら加工を行う方法を提案し、その効果を調査した。図5に示すように、超音波振動がない場合、 NaNO_3 による超硬合金の電解加工においては工作物中央に突起部が存在するが、超音波振動を付与した場合は工具直下の加工が進行していることが分かる。これは、超音波振動の付与により極間の生成物が排出され、工具直下に加工電流が流れやすくなったためであると考えられる。また、SEMを用いて加工痕底面を観察した画像(図6)から、超音波振動の付与により、凹凸の少ない表面形状が得られていることが分かる。これは、超音波振動の付与が無い場合、粘着剤であるコバルトが優先的に加工され、タングステンカーバイドは表面に酸化皮膜を生成してしまうのに対し、工具電極へ超音波振動を付与することで、工具直下の酸化皮膜が除去され、コバルトとタングステンカーバイドが共に加工されるためであると考えられる。以上より、超音波による衝撃作用で超硬合金表面の酸化膜をある程度除去でき、中性電解液 NaNO_3 による超硬合金の電解加工を可能にした。一方、直流電源や単極性パルス電源の代わりに、両極性パルスを用いると、中性の電解液を使用しながらも超硬合金表面の酸化物を除去でき、加工精度を向上させることが可能であることが報告されている。そこで、本研究では中性電解液による超硬合金の電解加工を実現するため、工具への超音波付与と両極性パルスを併用し、超硬合金の加工速度と転写精度の向上を試みた。図7に示す単極性と両極性パルスによる加工形状から、両極性パルスのローレベル電圧の絶対値が小さい場合には、加工穴縁部のだれの低減はできていないが、絶対値が大きくなるとだれの低減、つまり両極性パルスによる超硬合金の加工精度の向上が確認できた。しかし、両極性パルスを用いた時、加工速度が低下することが実験結果から分かった。そこで、加工特性の考察のために、電解加工の等価回路モデルを用いて加工に寄与する電流と電気二重層への充放電に寄与する電流のそれぞれを解析した。その結果、両極性パルスを用いた場合、電気二重層の充放電に多くの電流が用いられ、加工に寄与する電流が少なくなるため、加工速度が低下することを明らかにした。

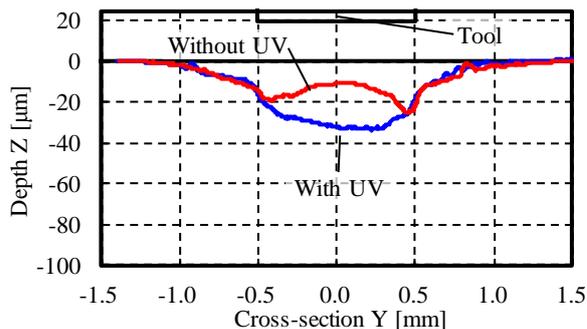


図5 超音波振動付与と加工形状の関係

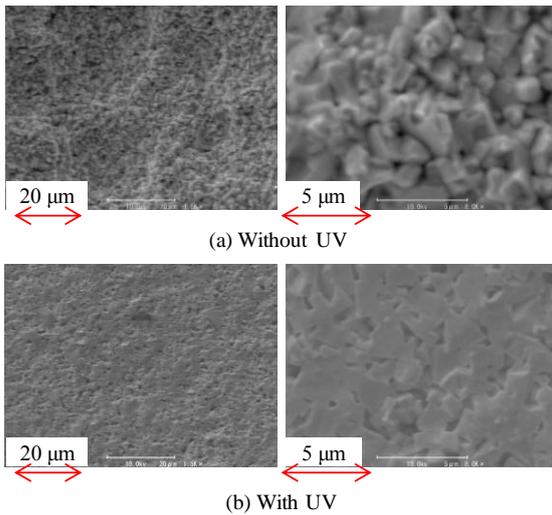


図6 加工面のSEM写真

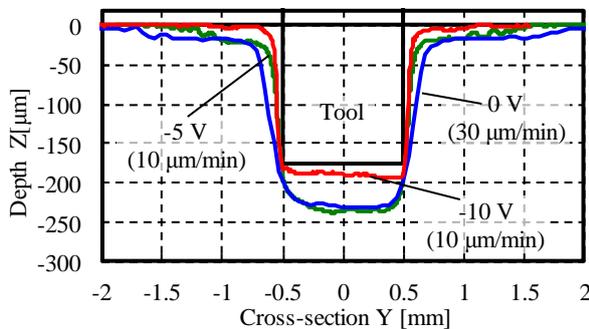


図7 加工形状と電圧値との関係

(4) 遺伝的アルゴリズムを用いた電解加工等価回路のパラメータ同定

電解加工における加工精度と加工速度に影響を与える要因を解明するには極間現象を表現した等価回路を用いた解析が有効であるが、電解加工条件の範囲において等価回路の抵抗値やコンデンサ容量等のパラメータの値を同定する研究はほとんど報告されていない。特に、電解加工の陽極と陰極で化学反応が異なるため、陽極のパラメータ、陰極のパラメータはそれぞれ異なると考えられるが、等価回路のパラメータの組み合わせは複雑であり、試行錯誤しパラメータを決定することは難しく、同定に長時間要してしまう。そこで、本研究では信頼性や同定精度の向上策として等価回路モデルのパラメータを陽極と陰極に分けた同定を試みた。また、等価回路のパラメータ同定の効率化を図るため、最適化問題を解く際に用いられる遺伝的アルゴリズム（以下 GA とする）によるパラメータ同定作業の自動化を試みた。GA とは生物の進化過程をモデル化し最適値を求める手法である。また、GA では適応度の高い個体を次世代へ継承するため、効率よく最適値を検索することが可能である。なお、パラメータ同定の妥当性を検討するため、加工特性に大きな影響を与える極間距離、電圧、電解液濃度を変化させ、実験を行い、実験結果を

解析結果と比較した。その結果、遺伝的アルゴリズムを用いて等価回路のパラメータ同定が可能であることが判明した。なお、遺伝的アルゴリズムを用いて同定を行なった結果、等価回路のパラメータ同定に要する時間を大幅に短縮することができ、解析精度を向上させることができた。

(5) ローレベル電圧の調整によるパルス電解加工の電極消耗抑制の提案と実験による検証

電解加工では、パルス電源を用いることで直流電源を用いる場合に比べ加工精度が向上することが一般的に知られている。しかし、この場合に工具が材料によって消耗するという直流電解加工では見られない現象が生じる。加工中に工具形状が変化することにより所望の形状が得られなくなるため、高精度な微細電解加工を実現するためには工具消耗を抑制する必要がある。本研究では、工具の消耗を抑制する手法として印加パルスのオフセット電圧を上昇させることを提案し、加工実験により、工具消耗の抑制効果を検証した。また、ワイヤ電解加工においてオフセット電圧を上昇させたパルス波形が加工速度や加工精度などの加工特性に及ぼす影響について実験により調査し、加工特性に最適なパルス条件を求めた。その結果、オフセット電圧を加えることで電極消耗がなくなると同時に加工速度が向上すること、また、ハイレベル電圧やパルス幅によらずオフセット電圧を適切に加えることで加工精度が向上することを確認した。

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 9 件)

- (1) Wataru Natsu, Daiki Kurahata: Influence of ECM pulse conditions on WC alloy micro-pin fabrication, *Procedia CIRP*, 査読有, Vol. 6 (2013), pp. 402-407. DOI:10.1016/j.procir.2013.03.093
- (2) 澁谷直城、夏恒: 極低濃度電解液を用いた環境対応電解加工による超硬合金微細軸の形成、*電気加工学会誌*、査読有、Vol. 46, No. 112 (2012), pp. 74-80. <https://www.jstage.jst.go.jp/browse/e/jseme/-char/ja/>
- (3) Naoki Shibuya, Yukihiro Ito, Wataru Natsu: Electrochemical Machining of Tungsten Carbide Alloy Micro-pin with NaNO₃ Solution, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 査読有, Vol. 13, No. 11 (2012), pp. 2075-2078. DOI:10.1007/s12541-012-0273-2
- (4) Katsuaki Endo, Wataru Natsu:

- Influence of Low-Level Voltage in Pulse ECM on Electrode Wear and Machining accuracy, Applied Mechanics and Materials, 査読有, Vols. 217-219(2012), pp. 2388-2392. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.217-219.2388
- (5) Benjamin Akimoto, Wataru Natsu: Study on Parameter Determination for ECM Equivalent Circuit, Applied Mechanics and Materials, 査読有, Vols. 220-223(2012), pp.1990-1994. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.220-223.1990
- (6) Shinji Harada, Wataru Natsu: Study on Sensitivity of Gap-width Detection with Peak Current in Pulse ECM, Proceedings of the 12th euspen International Conference, 査読有, (2012), pp.120-123. <http://www.tuat.ac.jp/~natsulab/>
- (7) Wataru Natsu, Atsushi Terada: Approach to Detect and Control Gap-width with Peak Current in Pulse ECM, Advanced Materials Research, 査読有, Vol. 482-484(2012), pp. 1973-1978. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.482-484.1973
- (8) Naoki Shibuya, Wataru Natsu: Fabrication of Tungsten Carbide Alloy Micro-pin with Environment-Responsive ECM Using Ultra-low Concentration Electrolyte, International Journal of Electrical Machining, 査読有, No. 17(2012), pp. 32-37. <https://www.jstage.jst.go.jp/browse/>
- (9) Naoki Shibuya, Wataru Natsu: Micro Pin Fabrication by ECM with Ultra-low Concentration Electrolyte, Proceedings of the 11th euspen International Conference, 査読有, (2011), pp. 297-300. <http://www.tuat.ac.jp/~natsulab/>
- (2013)、2013年12月5-6日、名古屋市愛知県産業労働センター
- (4) 夏恒: 日本特殊加工分野の最新研究動向 中国第15回全国特殊加工学術会議、2013年10月25-27日、中国南京市南京航空航天大学 (招待講演)
- (5) 原田慎治、夏恒: パルス電解加工における極間距離と加工状態の検出に関する研究、2013年度精密工学会春季大会、2013年03月13-15日、東京工業大学大岡山キャンパス
- (6) 倉畑大輝、夏恒: 電解加工パルス条件が超硬合金微細軸形成に与える影響、2012年度精密工学会秋季大会、2012年09月14-16日、九州工業大学戸畑キャンパス
- (7) 遠藤克彰、夏恒: パルス電解加工のローレベル電圧が工具消耗と加工精度に及ぼす影響、2012年度精密工学会春季大会学術講演会、2012年3月14-16日、東京都八王子市首都大学東京
- (8) 原田慎治、夏恒: ピーク電流を用いたパルス電解加工の極間距離検出感度に関する研究、電気加工学会全国大会 (2011)、2011年11月24-25日、茨城県つくば市研究交流センター
- (9) 澁谷直城、伊藤幸弘、夏恒: 電解加工による超硬合金の微細軸形成過程の観察、電気加工学会全国大会講演会 (2011)、2011年11月24-25日、茨城県つくば市研究交流センター
- (10) 澁谷直城、夏恒: 超硬合金の微細軸形成における電解加工条件の調査、2011年度精密工学会秋季大会学術講演会、2011年9月20-22日、金沢大学
- (11) Wataru Natsu, Hisashi Nakayama, Zuyuan Yu: Improvement of ECM Machining Characteristics by Applying Ultrasonic Vibration, Proceedings of International Symposium on Green Manufacturing and Applications, 2011年10月6-7日、韓国ソウル大学
- (12) Naoki Shibuya, Yukihiro Ito, Wataru Natsu: Research on ECM Conditions for Micro-pin Fabrication of Tungsten Carbide Alloy, Proceedings of International Symposium on Green Manufacturing and Applications, 2011年10月6-7日、韓国ソウル大学
- [学会発表] (計12件)
- (1) 原田慎治、夏恒: 電流波形によるパルス電解加工状態検出の可能性、2014年度精密工学会春季大会学術講演会、2014年3月18-20日、東京大学
- (2) 秋元ベニヤミン、原田慎治、夏恒: 遺伝的アルゴリズムを用いた電解加工等価回路のパラメータ同定、2014年度精密工学会春季大会学術講演会、2014年3月18-20日、東京大学
- (3) 黒木壮介、夏恒: 単極性パルスと両極性パルスによる超硬合金の電解加工特性の比較と考察、電気加工学会全国大会
- [その他]
ホームページ:
<http://www.tuat.ac.jp/~natsulab/>
6. 研究組織
研究代表者
夏恒 (Wataru NATSU)
東京農工大学・大学院工学研究院・教授
- 研究者番号: 40345335