

研究成果報告書

研 究 題 目		ハイブリッド粉末混入放電加工による高機能 硬質金型仕上げ面の創成	実 施 年 度 2019-2020 年度
代 表 研 究 者	所 属	岡 山 大 学	
	氏 名	岡 田 晃	印

1. 研究の目的・背景

＜本研究の背景＞

放電加工は金型製作に広く利用され、光学部品や半導体部品用の微細複雑形状金型の加工には特に不可欠である。近年、製品の小型化・高性能化が進展する中で、金型成形においてもより効率的な金型製作と金型の高寿命化のための表面高機能化が強く求められている。放電加工面は熱クラック等が存在するため、従来は手磨きにより表面が仕上げられ、さらに表面硬度や離型性向上のため各種コーティングが施され金型の長寿命化が図られる。しかし、これらの方法は、長時間を要するとともに金型製造コストを増大させている。

一方、近年の放電仕上げ加工技術の進展は目覚しく、放電パルスエネルギーの極微小化、放電痕形状の制御等によって、最大高さ粗さ $0.5\mu\text{m}$ 以下の仕上げ面を得ることが可能である。適切な表面形状の放電加工面は射出成型金型等では離型性も良好であることから、半導体封止金型などでは放電加工仕上げ面をそのまま利用している例もある。また、加工液への金属粉末の混入によっても表面粗さを低減でき、Si 粉末や Al 粉末などを混入した加工液はすでに実用化されている。さらに、混入した金属粉末や電極材質と放電加工油の熱分解炭素の加工表面での化合によって硬質な炭化皮膜を加工表面に形成できることも報告されている。我々も、これまでに Cr 粉末を混入した油加工液を用いて放電仕上げ加工を行うことで、炭化クロム含有硬質表面層の形成に成功している。これらの被膜は母材との境界部分で母材成分との中間層を形成するため、密着強度も極めて高い。

しかしながら、これらの皮膜面粗さは大きく金型仕上げ面としてそのままでは利用できず、皮膜の表面仕上げ加工が別に必要であった。被膜形成の十分なメカニズム解明、および表面粗さの十分に小さい硬質被膜の形成が実現すれば極めて有用な表面処理法となり得る。

＜本研究の目的＞

本研究では、放電加工において表面粗さの極限までの低減、および硬質皮膜形成の目的を異とする2種類の粉末混入放電加工液を混合して利用するハイブリッド粉末混入放電加工仕上げ法を提案する。また、異なる材質の表面層を段階的に形成することによる二層構造被膜形成の可能性についても検討を行った。本手法では、次ページ図1に示すように、放電加工のみで表面仕上げを達成でき既に実用化されているシリコン粉末混入加工液による放電仕上げ法をベースとし、申請者らがこれまで行ってきた硬質炭化クロム表面層が創成できるクロム粉末混入放電加工とのシナジー効果を期待するものである。また、粉末混入放電加工液よりも加工の簡便さが図れる電極材質の放電加工面への含有現象を活用した硬質クロム表面層形成、ならびにそれを利用した二層構造被膜形成についても可能性を明らかにした。

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

(1)シリコン粉末等の混入濃度が表面粗さに及ぼす影響, (2)二層構造被膜形成の可能性, (3)粉末混入放電加工 CFD 解析モデル構築, および(4)硬質仕上げ面の表面性状分析を計画に従って順次実施した. 各実施の概要と主な成果を以下に示す.

(1) シリコン粉末等の混入濃度が表面粗さに及ぼす影響

Cr 粉末混入放電加工によって加工面に Cr 炭化物含有層が形成可能でかつ表面粗さを十分に低減できる粉末混入濃度と放電条件の範囲内で, Si, C 粉末を混入して加工面性状の調査を行った.

その結果, C 粉末混入の場合は表面粗さの低減効果は発現しなかった. 一方, Si 粉末を混入した場合は, 3~4g/L の混入濃度において加工面粗さを低減できることが判明した. このとき, Cr 成分は加工面に均一に分布し, これまでと同様に, 表面に Cr 炭化物含有層が形成できることを確認した. さらに, この粉末混入濃度条件において放電パルス条件を最適化したところ, 手磨き仕上げ面に相当する $1.0\mu\text{mRz}$ 以下の面粗さを得ることに成功した.

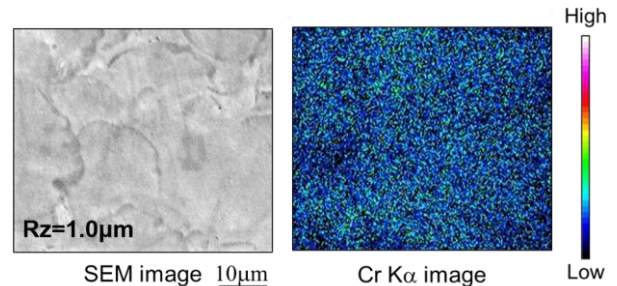


図 Cr/Si 粉末混入放電加工面と Cr 分布

○達成度 90%:C 粉末で加工面粗さ低減は不可能だったが, それ以外は達成できた.

(2) 二層構造被膜形成の可能性検討

まず, 放電エネルギーの大きい条件で Cr 粉末混入放電加工を行ったところ, 加工が過度に進展することで厚い再凝固層形成はやや難しいことが分かった. 次に, 加工簡便化も考慮し Cr 電極を用いて高電極消耗加工条件で加工したところ, $10\mu\text{m}$ 以上の厚いクロム炭化物含有層を形成できた.

続いて, W 粉末混入加工液により表面仕上げと薄い WC 含有表面層の形成を試みたが, W 粉末の攪拌が難しいこともあり, 目的の表面層を得られなかった. そこで, 超硬合金電極を用い極小パルス条件で仕上げ加工を行ったところ, $1.0\mu\text{mRz}$ 以下の面粗さで W 成分を含んだ仕上げ面を得ることに成功した. 断面の成分分析から Cr 含有層と W 含有層が判断でき, 傾斜組成の二層構造被膜形成に成功した.

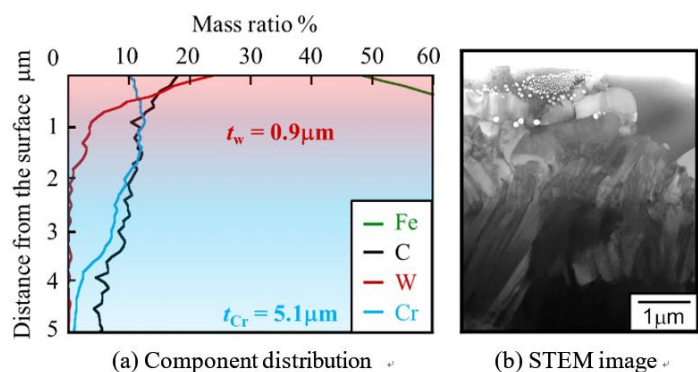


図 二層構造被膜における深さ方向の W と Cr の分布, および STEM 像

○達成度 90%:Cr 粉末では困難だが Cr 電極で厚い再凝固層形成を達成した.

(3) 粉末混入放電加工 CFD 解析モデル構築

放電加工中の極間の加工液流れ場, および金属粉末の挙動について解析するため

に、基本的な数値流体解析モデルを構築した。そして、電極の上下動作（ジャンプ動作やサーボ制御による動作）中における CFD 解析結果と高速度観察結果とを比較し、その妥当性を検討した。

結果として、構築したラグランジュ 2 層流 CFD 解析による金属粉末挙動と高速度観察像の PIV 解析から得られたそれは類似し、また粒子速度もほぼ同等であった。したがって構築した解析モデルにより極間の金属粉末挙動を精度よく再現できる再現できることが明らかとなった。

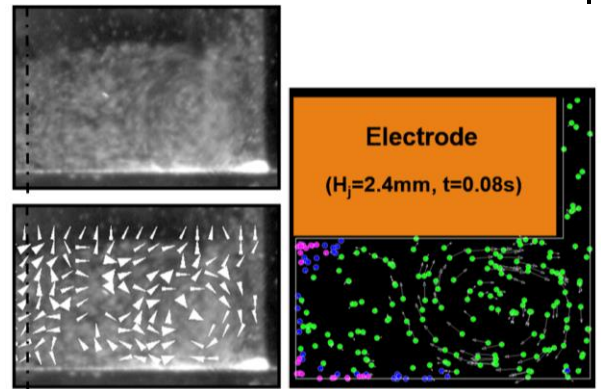


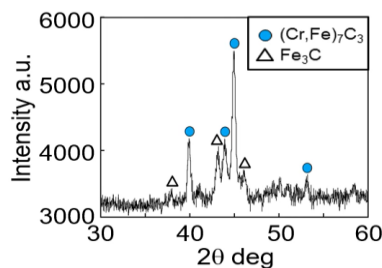
図 極間の金属粉末挙動観察結果と CFD 解析結果の比較

○達成度 90%: 放電爆圧の影響を考慮した解析モデルの高精度化を図りたい。

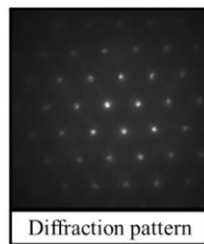
(4) 硬質仕上げ面の表面性状分析と生成メカニズム解明

CrC 含有表面層の分析を行い、Cr は炭化クロム層として存在していることが明らかとなった。また、表面硬度も上昇していることを確認した。一方、二層構造表面では、最表面において W は様々な構造の炭化タングステンとして存在しており、一部は急冷によってアモルファス状態で存在していることが明らかとなった。

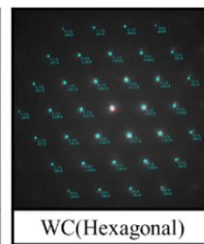
○達成度 100%: 当初の検討は予定通り実施し、達成した。



(a) XRD spectrum of subsurface layer



(b) structure WC in surface layer



(c) Amorphous structure

図 CrC 含有層部分の XRD スペクトル、および表面層での W の材料構造

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

全体の研究経費 680 万円のうち、採択時において工作物材料や電極材料(55 万円)、各種治具作成材料(5 万円)、灯油系放電加工液(50 万円)、および金属粉末(20 万円)の消耗品を購入することで予算内訳書を提出しており、会計報告書に記載の通り、ほぼ予算通り執行を行った。

超硬合金は、二層構造被膜形成の検討において上層の WC 含有仕上げ面層を得るための電極として、金型鋼(工作物)は工作物として使用し、各検討を行った。また、実験を効率的に実施するための治具を作成したり、極間の加工液流れや金属粉挙動の観察を行うために観察モデルを作成するための材料を購入した。さらに、灯油系放電加工液は、異なる粉末混入濃度、2 種粉末混入加工液を数種作成するため準備し、また、これらを用いた粉末混入加工液の混入濃度等の最適化の検討を行った。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

今後はまず当初の計画通り、放電加工条件や粉末混入条件と被膜性状の相関解明、ならびに、金型鋼機能化のための表面特性の体系的評価を実施していく。金型の高寿命化・高機能化のために金型表面に必要とされる、耐摩耗性、耐食性、成形樹脂との離型性、熱疲労特性等を加工条件や粉末混入条件との相関を解明しながら体系的に評価していく。

耐摩耗性や耐食性については、研究室で所有する摩擦摩耗試験機や電気化学測定システムを用い、これらの定量的評価と放電加工条件の相関を明らかにする。また、成形樹脂との離型性については、定量的な評価を行うために、引張試験機を利用した専用の離型力測定装置を構築し、その測定について検討を進めてきた。下記の成果発表2)に示すように、定量的評価が可能になった段階であり、この測定法を利用する。さらに、熱疲労試験については、山梨県産業技術センターの協力を得ながら評価を進める。そして、最後に射出成形機メーカー S 社の協力を得て、実用性を検証する。

金型に対して高機能硬質仕上げ面の創成技術が確立すれば、放電加工による金型の高精度な形状加工後に連続して表面仕上げおよび硬質皮膜形成を同時に可能とする画期的な高能率金型加工・仕上げプロセスの確立が期待できる。工業製品の高能率な生産を可能にする金型の画期的製造プロセスと高機能化であり、産業界に及ぼす影響は大きい。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

（1）学会発表

- 1) 放電加工による二層構造表面層形成に関する基礎的検討, 2020 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, B1401.
- 2) Fundamental Study on Double-Layered Surface Formation by Electrical Discharge Machining, Proceedings of the 18th International Conference on Precision Engineering (ICPE2020), B-5-5.

（2）論文発表（投稿準備中）

- ・“Fundamental Study on Double-Layered Surface Formation by Electrical Discharge Machining” の題目で論文を Precision Engineering（精密工学会英文誌）に投稿準備中.