

**특별강연**

**방전가공에 있어서의 신조류**

PROCEEDINGS OF THE KSMTE FALL CONFERENCE 2003

**모리 교수**

**일본동경대**



はじめに

放電加工は、工業的な応用がスタートした当初は、タップ抜きに利用される程度であったが、その後多くの優れた研究に支えられて発展してきた。特に図1に示すように、ここ10数年ほどの間にこれまでの常識を覆す新しい試みが盛んに行われるようになってきた[1]。

全体として、a)工具電極、b)加工雰囲気、c)加工対象、d)電極駆動機構、のそれぞれにおいて幾多の新機軸が見出される。

a)形堀放電加工における工具電極材料は、従来の銅やグラファイトに加えて、主に表面改質加工を目指してシリコン半導体や各種粉末成型体が利用され始めた。また微細加工においてはタングス

テン細線が多用されている。電極形態としては従来のソリッド状電極やワイヤ状電極に加えて、高速加工の実現を目指したフレーム状電極やメッシュ状電極の利用が試みられている。電極成形法としては微細電極を対象としたWEDG法や、製品モデルを電極に転写する方法として従来の電鍍法に加えて溶射法もある。

b)加工雰囲気としては、従来の灯油系加工液や水系加工液の単体利用に加えて、これらを必要に応じて交換する方式の導入や、微粉末混入の灯油系加工液やさらに気中あるいは酸素雰囲気中の加工が注目されている。さらに加工雰囲気を積極的に制御するために加減圧チャンバや超音波振動の利用、あるいはミスト、液体窒素、沸騰水などが試みられている。

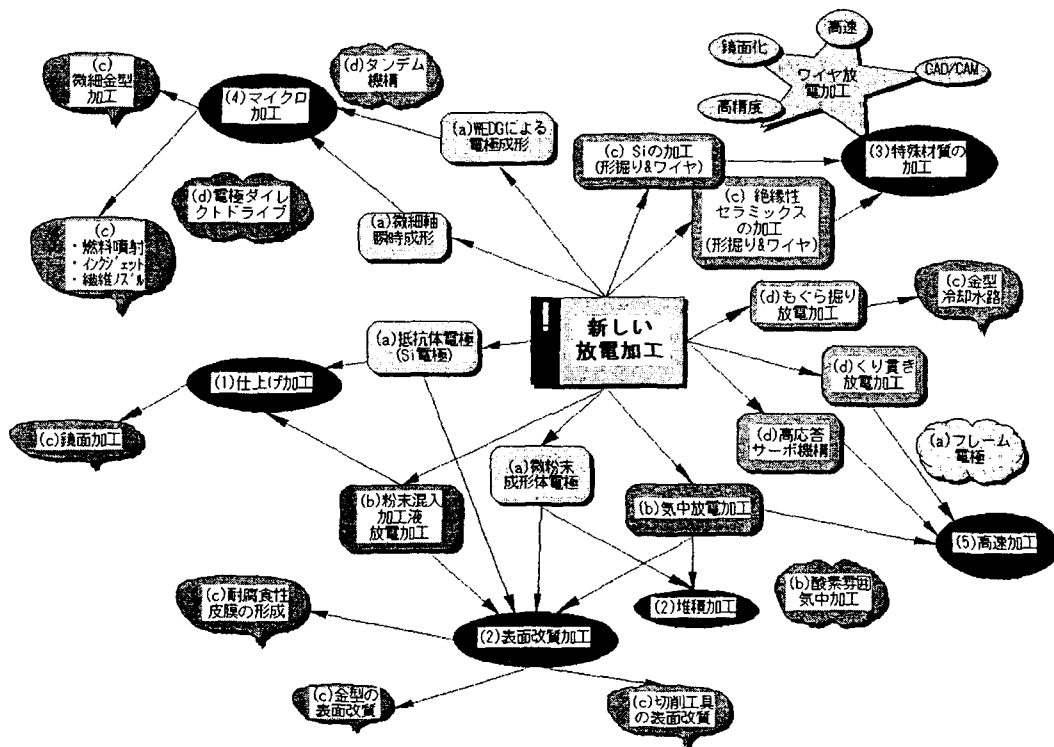


図1 新しい放電加工

c)加工対象としては、従来の部品加工や金型加工に加え、切削工具の成形やその表面改質がある。特に微細工具電極によるマイクロ放電加工は、上記の電極成形法と共にこの分野の標準手法になっている。また従来の鋼を中心とする加工材料に加え、半導体や絶縁性セラミックスあるいは低融点合金など、その対象は大幅に拡大した。さらに、放電加工によって除去や表面改質あるいは堆積(盛上げ)が可能となり、この点においても従来の常識は覆されつつある。

d)電極駆動機構においても、近年のメカトロニクス技術の発展に乗ってさまざまな試みがなされている。駆動源として従来の回転型モータに加え圧電素子や磁歪素子あるいは電磁式リニアモータの採用がある。圧電素子の利用においてはインパクトドライブ機構やインチワーム機構などが適用されている。小型電極の駆動に関しては上記の方式に加え超音波重畳方式やロボットによる加工が試みられている。また電極成形と成形電極による加工とを同時に進めるタンデム型機構も登場した。さらにモグラ掘りと称する曲がり穴加工機構も今日的ニーズに答えようとしている。

以下に放電加工技術の新しい潮流について5つの例を挙げ(図1中に楕円で示す)、そのそれぞれについて述べる。

### 1. 仕上げ放電加工

仕上げ放電加工においては、均一で精細な加工面を得るために、放電一発当りのエネルギーを小さくすることと、放電位置を分散することが必要である。かつて放電加工された面は仕上げ加工条件であっても面が荒く加工の後手磨きを必要とした。特に大きな面積の加工においては著しく面が荒れ、溶融残留物が冷却の際に生じたクラックを除去する必要があった。その原因として、仕上げ加工条件においては極間が狭いために放電が集中し、かつ静電容量が大きくなって各放電のエネルギーが増大することによるとされる。

これに対する解決策としてシリコンなどの半導体を電極とした加工や、加工液中にシリコンやアルミニウム、グラファイトなどの微粉末を混入

した仕上げ加工が提案されすでに定着している。シリコンを電極とした場合は、その電気的抵抗性のゆえに静電容量が自然分割されて、一発当たりの放電エネルギーは制限される。一方、放電は一般に極間粉末の近傍に飛ぶことから、各放電によって生成される加工粉が引き続いて発生する放電の引き金になる。したがって狭い極間で加工粉が滞留すればそこに放電が集中することになる。仕上げ加工において生成粉の量をはるかに超える量の微粉末をあらかじめ加工液中に混入すれば放電は分散する。しかも粉末混入加工液を用いれば極間距離が広がり、加工屑の排出が容易になって、かつ極間の静電容量も小さくなる[2]。しかしギャップが広がった分だけ加工精度が低下する可能性もある。このため様々な種類の微粉末の混入や最適な電極駆動サーボが試みられ、狭いギャップでの面粗さの向上が図られている。図2は自由曲面に対する粉末混入加工液による仕上げ加工結果の写真を示す。

### 2. 表面改質放電加工と堆積加工

シリコンを電極として放電加工をおこなえば、その消耗量は加工物の除去量よりはるかに大きく、極間は大量のシリコン粉末で満たされる。その結果加工物表面はシリコンを含む物質で覆われ、きわめて高い耐食性を示す。他の材料を電極とした場合、その消耗量は材料固有の熱物性値で決まるから、その材料で加工物表面を覆うためには材料

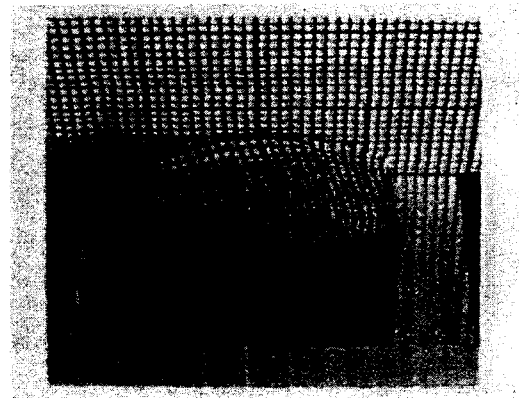


図2：粉末混入加工液の効果(自由曲面加工)

をそのまま用いては難しい。そこで当該材料の微粉末を圧縮成形するかもしくはこれを半焼結するかして製作した電極を用いる。(シリコンの場合は、熱物性値の他に、その高い電気抵抗のゆえに放電点近傍のジュール熱が作用しているために消耗が大きいとされる。)加工物表面に形成された被膜は、他の表面改質法と比べて母材との密着性が高いことが特徴である[3]。

チタン系 (TiH<sub>2</sub>) 電極による油中改質加工ではチタンと油の分解炭素との化学反応の結果加工物表面に TiC が形成される。図 3 はこの加工原理を示す。また TiC 半焼結体を電極とした加工も行われ、超硬材料(WC)上への表面改質放電加工の結果得られた加工物表面の硬さは2千数百HV程度となる[4]。抜き型などの切刃の表面改質に応用され、寿命が延長することが確認されている。

このような表面被覆現象は、放電加工は除去加工であるとする従来の常識を覆すものであり、放電加工の新たな可能性を示している。表面改質放電加工は除去加工と同一の加工機械を用いるため、

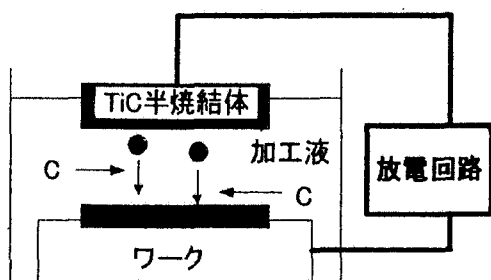


図3 Ti系電極による表面改質の原理

形状付与と表面改質加工あるいは堆積加工との複合加工が極めて容易になる。さらにワイヤ EDM の加工プロセスにおいては、電解現象による陽極酸化物の膜厚を制御したインプロセス着色加工が実現している。これらは金型や工具あるいは部品加工における表面改質法として将来の応用は計り知れない。また気中あるいは加工液中での堆積速度が除去速度を超えて維持される条件を選ぶならば、盛上げ加工による形状創成が可能になり[5]、新たな応用が期待される。

### 3. 新材料に対する放電加工

電気磁気材料などの機能性材料の多くはセラミックスであり、21世紀における産業科学推進の担い手となるであろう。これらの材料はきわめて硬くしかも脆い。時には複雑で精密な形状を必要とするためさまざまな加工法が試みられている。導電性のセラミックスに対する放電加工は上記の目的に合致するため早くからその実用化が期待されていた。加工特性は金属などと同様に熱伝導率と融点(あるいは昇華温度)によって決り、基本的には材料の硬さには依存しない。

放電仕上げ加工において電極材料として用いられたシリコン半導体はその電気抵抗の故に消耗が非常に大きい。このことから、シリコンに対する高能率放電加工の可能性が伺われた。マイクロマシンなどに用いられるシリコン部品の微細加工や、インゴットの切断加工に放電加工が試みられ[6]、将来必須の加工法としてその実用化が囑望さ

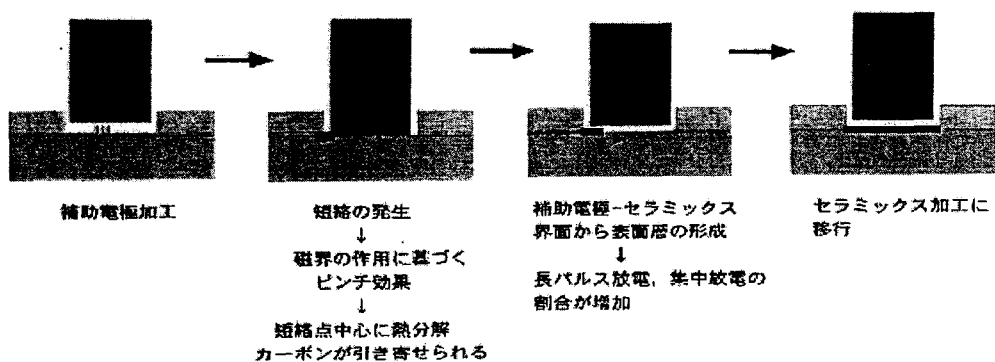


図4 絶縁性セラミックスの放電加工原理

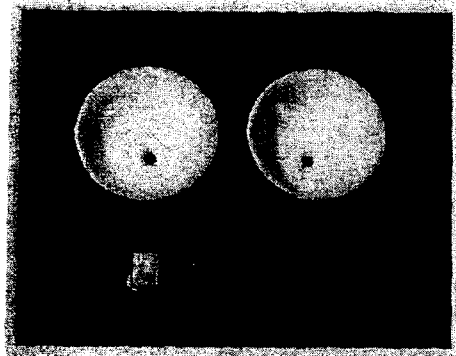


図5 オチョコへの放電加工



図6 ワイヤ放電加工による椅子のくり抜き加工

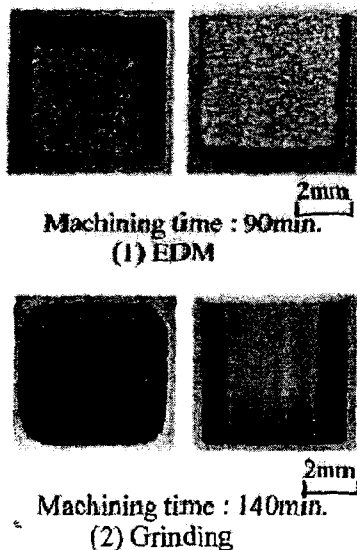


図7 研削加工との比較

絶縁性セラミックスに対する油中放電加工では、あらかじめ導電体で加工物表面を覆ってこれを補助電極とする。工具電極は補助電極を貫通して絶縁体を加工する。図4にその加工原理を示す[7]。絶縁体の表面は加工油の分解した炭素で覆われ、常時導電性が保たれる。補助電極としては、金属板やメッシュを絶縁体表面に押し付けるかあるいはPVDでコーティングしたTiNなどが用いられ、絶縁体表面に形成される炭素導体膜と電源とを電気的に接続する役割を担っている。ワイヤ放電加工では加工物の両面をTiNで覆って後、油中加工を行っている。図5に瀬戸物(オチョコ)に穴あけ加工をした例を、図6に絶縁性窒化珪素に対する加工例を示す。通常の金属(鉄)の比抵抗が $10^{-5}\Omega\text{cm}$ であるのに対して、窒化珪素の比抵抗は $10^{14}\Omega\text{cm}$ である。複雑形状のワイヤ放電加工はほとんど独壇場と言えるが、形彫加工においては現在研削加工法と加工速度を競っている。工具費用などから考えると早晩その評価が固まるものと思われる。図7に窒化珪素の形彫放電加工に関して研削加工と比較した例を示す。

以上のことから、もはや放電加工によって加工できない材用は無いと言うべきであり、放電加工の将来の可能性を端的に暗示している。

#### 4. マイクロ放電加工

放電加工は非接触加工であり平均加工反力が小さいため、微細工具によるマイクロ加工において特に効果を発揮している。マイクロ加工においては工具電極の製作法やそのハンドリングに工夫を要する。

ワイヤ放電研削法(WEDG法)による電極機上成形法は、成形された微細工具を加工機から取り外すことなく、次段の加工を可能とする画期的な手法である。ワイヤ放電加工におけると同様に、工具電極はガイドに沿って次々と繰り出されることから、電極消耗の影響を受けず、高い加工精度が実現する。最近では、微細工具の成形荒加工や仕上げ加工および成形工具による穴あけ加工を同時に機上で実行できる機構が考案され、より実用に近づいた。図8はこの加工方式の模式図を示す[8]。

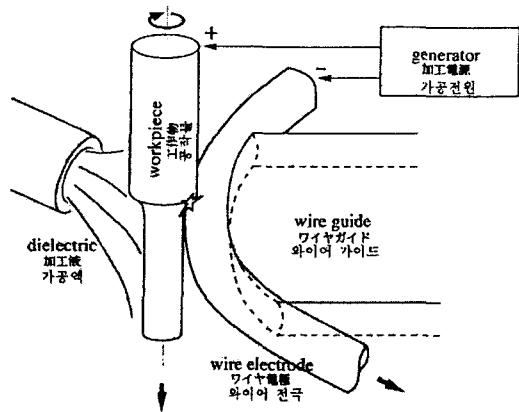


図8 ワイヤ放電研削加工(WEDG)

さらに、複数の圧電素子を組み合わせたインチワーム式の細線電極繰り出し装置が考案され、燃料噴射ノズルの微細穴あけ加工に利用されている。図9にその構造を示す[9]。この方式では電極を保持するホルダーが不要であるため、非常に高速なサーボ(数 KHz)が可能になっている。

微細電極を利用した加工法は燃料噴射ノズルや繊維ノズルあるいはインクジェットノズルなどの穴あけに利用され、さらに微細電極の走査放電加工はマイクロ3次元加工を可能にする。これらは市場ニーズに支えられてさらに発展するであろう。走査放電加工による3次元形状加工においては、加工精度を維持するために、微細電極の側面での放電を極力避けて底面でのみ加工するよう工夫がなされている。

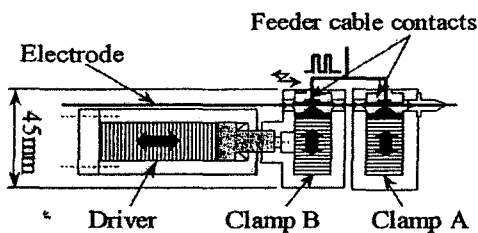


図9 細線電極のダイレクトドライブ方式

## 5. 高速放電加工と新しい展開

最近では切削加工が CAD/CAM と工具材料の発展とに支えられて硬い材料も加工の対象になっている。最終仕上げも含めて一つの型を製作する時間は従来の半分以下になった。一方、荒加工速度だけを対象とするならば、放電加工は他の加工法と遜色ないし、超硬材料などのような特別に硬い材料の加工では放電加工を除いては考えられない。すでに述べたように、セラミックス材料では加工時間は研削加工と同程度である。

一方、荒加工から仕上げ加工に至る一連の加工プロセスを考えると、今のところ、各加工条件における放電加工時間は電極面積や形状に依存して推定した通りにはいかない場合がある。特に仕上げ加工用に電極を交換する場合には電極のセッティング誤差を無視できず、オペレータの経験に頼るところが大きい。各加工条件に対して単位時間あたりの放電回数(放電頻度)と一発の放電による除去体積が制御できるならば、加工速度すなわち加工時間を正確に把握できるはずであり、放電加工を切削加工と同様にロバストな加工と位置付けることができる。そのためには、一つは、噴流のかけ方や電極のジャンプ動作などの更なる工夫をすることによって、放電点を分散し、一つ一つの放電の集積によって全体の加工が正確に予測できる必要がある。工具電極の交換を含む段取りの工夫もさらに必要になる。

従来はテーブル駆動にボールねじが用いられていたが、近年、サーボの高応答性を目的としてリニアドライブ方式の採用や[10]、圧電素子、超磁歪素子を応用した機構が試みられている[11]。この傾向は今後も広がるであろう。また、フレーム

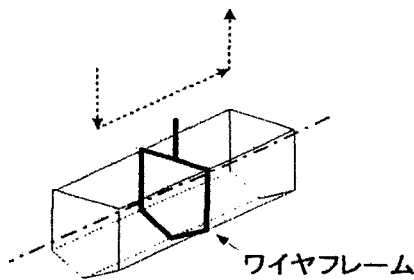


図10 フレーム電極によるくり貫き放電加工

状の電極を走査することによるくりぬき加工(図 10 参照)は形状創成速度を飛躍的に高める可能性がある。当面は低融点合金型の製作に効果を発揮しているが、電極の消耗量を今より格段に押さえることができれば、切削における荒加工を凌駕することにもなろう[12],[13]。さらに金型の冷却水路など曲がり穴加工におけるモグラ掘り放電加工が注目されている。

小電極による高速加工において最近画期的な成果が得られている。国枝らによる酸素雰囲気中の反応放電加工がそれである[14],[15]。電極の消耗がほとんどなく、しかも液中での加工速度を超えていることが報告されている。このような気中放電加工は、電解液中でルビーなどの宝飾への細穴放電加工や、前記表面改質加工などにおけると同様に、放電加工を(高温高圧)化学反応加工として新しく見直すきっかけになろう。

#### まとめ

以上に述べたように、新方式の放電加工法は、どれも従来の放電加工に対する常識を覆すものである。これまでの金型加工のみならず、複雑形状の精密部品加工や表面改質加工さらに機能性材料への加工など、加工対象を格段に広げ今世紀の技術革新の核になる手法に育つであろう。なお、本原稿は電気加工技術 Vol.25, No.81(2001)の内容を一部加筆して作成した。

#### 参考文献

- [1] 精密工学会誌 特集:放電加工技術の最近の進歩、Vol.64, No.12 (1998) 1713-1746.
- [2] 毛利尚武、齋藤長男、成宮久善、河津秀俊、尾崎好雄、小林和彦、恒川好樹、粉末混入加工液による放電仕上げ加工、電気加工学会誌 25,49 (1991) 47-60.
- [3] 毛利尚武、齋藤長男、恒川好樹、初山英教、宮川昭彦、放電加工による表面処理、精密工学会誌、59,4 (1993) 625-630.
- [4] 毛呂俊夫、後藤昭弘、毛利尚武、齋藤長男、松川公映、三宅秀孝、TiC 焼結体電極による放電

表面改質膜の研究、精密工学会誌、67,1 (2001) 114-118.

[5] Shinya Hayakawa, Ricardo Itiro Ori, Fumihito Itoigawa, Takashi Nakamura and Tomio Matsubara, Fabrication of Microstructure using EDM Deposition, Proc. of 13th- ISEM, pp.783-793, 2001

[6] 宇野義幸、岡田晃、中西洋人、岡本康寛、単結晶シリコンの放電加工に関する基礎的研究、精密工学会誌、63,10 (1997) 1459-1464.

[7] 谷貴幸、福沢康、古谷克司、毛利尚武: 絶縁性セラミックスの放電加工プロセス、精密工学会誌、63, 9 (1997) 1310-1314

[8] 許東亜、増沢隆久、藤野正俊、大量微細穴放電加工装置の開発、日本機械学会第2回生産加工工作機械部門講演会論文集 (2000) 21-22.

[9] 毛利尚武、森田浩充、齋藤長男、電極ダイレクトドライブ方式による細穴放電加工機の開発、精密工学会誌 58, 12 (1992) 2063-2067.

[10] 金子雄二、正田和男、山田久典、豊永竜生、リニアモータを使った放電加工性能、電気加工技術、23,74 (1999),15-24

[11] 古谷克司、毛利尚武、樋口俊郎: インパクト駆動機構を用いた自走式放電加工機、精密工学会誌、63、9、pp. 1290-1294, 1997

[12] 今野廣、岡本隆司、岸波健史、齋藤勝政、多軸 NC 放電加工機による形状創成加工法に関する研究、精密機械、50, 8 (1984) 1261-1266

[13] 南久、増井清徳、石橋正也、金型用亜鉛合金の高速加工、電気加工学会 2000 年全国大会 (2000) 9-12.

[14] 吉田政弘、国枝正典、気中放電加工、精密工学会誌、64,12 (1998) 1735-1738.

[15] 吉田政弘、国枝正典、気中放電加工における供給気体の影響、精密工学会春季大会講演論文集、(1996) 251-252.