

◇ 砥粒加工学会技術賞 紹介記事 ◇

機能性インターフェース創成を可能とする  
超音波振動援用プラズマ放電研削加工システムの開発

Development of ultrasonic vibration assisted plasma discharge grinding processing system enabling functional interface creation

小林 敏\*<sup>1</sup>, 立花 亨\*<sup>1</sup>, 村越 親\*<sup>1</sup>, 小池一徳\*<sup>1</sup>, 厨川常元\*<sup>2</sup>, 水谷正義\*<sup>2</sup>  
Satoshi KOBAYASHI, Toru TACHIBANA, Chikashi MURAKOSHI, Kazunori KOIKE,  
Tsunemoto KURIYAGAWA and Masayoshi MIZUTANI

Key words: ultrasonic vibration, plasma discharge grinding, functional interface creation, doping

1. 緒言

最近, 国内製造業においては製品の高機能化傾向が高まり, 軽量, 高強度, 高耐熱性, 耐摩耗性を有する素材を用いた部品加工のニーズが増加している. そこで, 従来加工技術では対応しにくい難削材において, 高周波パルス電流と超音波振動を援用したプラズマ放電により加工面の機械的特性変化による難削材の快削化, さらに低強度材においては, 高強度化加工を可能とし, それらのニーズを量産化対応も含めて解決を図る.

超音波振動を援用させた電極工具(砥石)と工作物間に, 高周波パルス電源により電圧を印加し, その極間に局所的にプラズマ状態を発生, 生成したフリーラジカル, イオンなどにより工作物表面を改質させ, 機能性を高めるため, 高周波パルス電流・超音波振動援用プラズマ放電研削(Ultrasonic assisted Plasma Discharge Grinding, 以下UPD研削)装置の開発を行いこれらの加工を実現する.

2. UPD 研削の原理と構成

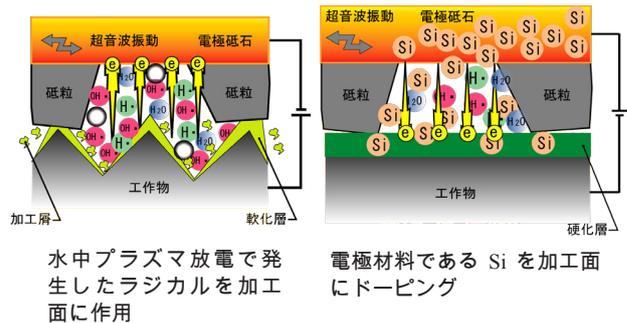
2.1 UPD 研削による快削化加工および改質化加工

難削材の快削化加工は図1に示すように加工表面と工具が接触した部分を選択的に軟質化させて低加工圧で研削する高能率・高精度形状加工である.

一方, 低強度材の改質化加工は図2に示すように高い形状加工を施したのち, 加工表面に珪素あるいはチタン, 炭素などをドーピングしながら加工表面を硬質化させ, 同時に表面粗さ精度を高める低摩擦・耐摩耗などの機能性を追求する表面創成加工である.

このように従来切削・研削技術では対応困難な難削材に対して, 電極工具に超音波振動を伝搬させ, 工具と工作物間に高周波パルス電流を印可して局所的にプラズマを生成させ, それにより加工表面を快削性が向上するように変化させ, 加工効率, 加工精度向上を可能とする<sup>1)</sup>.

同時に快削性の高い材料に対しては, 工作物表面の高強度化を図るプラズマを生成させ, 加工表面における機能性インターフェース創成を可能とする.



水中プラズマ放電で発生したラジカルを加工面に作用

電極材料である Si を加工面にドーピング

図1 難削材の快削化

図2 快削材の硬質化

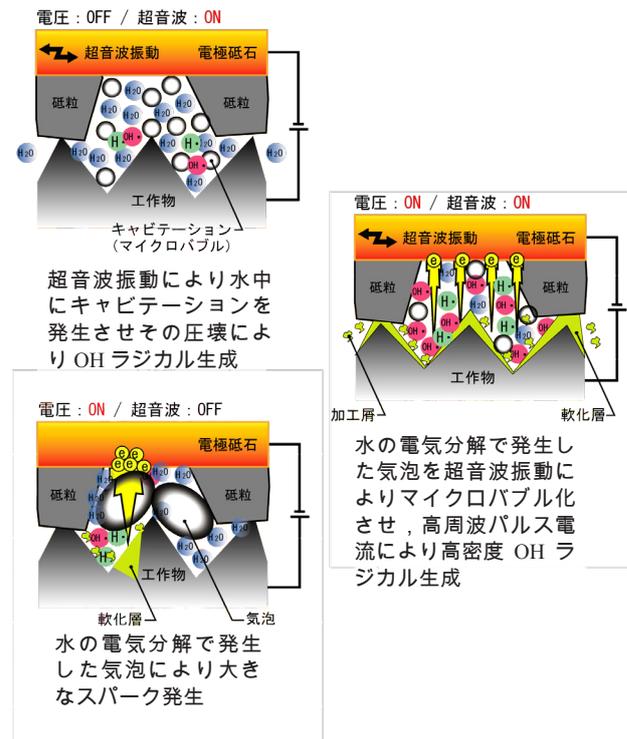


図3 電極への超音波振動伝搬と高周波パルス電流によるプラズマ放電加工の特徴

2.2 UPD 研削のメカニズム

UPD 研削で想定されるメカニズムの概要を図3に示す. 電極への超音波振動伝搬の有無および高周波パルス電流の有無によるプラズマ放電加工の特徴を表している.

\*1 ミクロン精密株式会社: 〒990-2303 山形県山形市蔵王上野578-2  
\*2 東北大学大学院: 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01

(学会受付日: 2017年12月18日)

### 2.3 UPD 研削システム構成とUPD 研削加工装置

UPD研削システムの構成モジュールとして、ベースマシンには3軸制御型デスクトップ加工機を採用し、UPD研削専用通液型超音波スピンドルを搭載し、UPD研削専用電源として超音波発振用高周波パルス電源、マイクロプラズマ放電用高周波パルス電源を付設している。さらにマイクロバブルまたはナノバブル水も供給できる加工液供給装置、純水生成装置などを付設した。一方、加工対象や条件に応じてUPD専用工具(電極砥石)を製作し、組み合わせて図4に示すUPD研削加工装置を試作した。

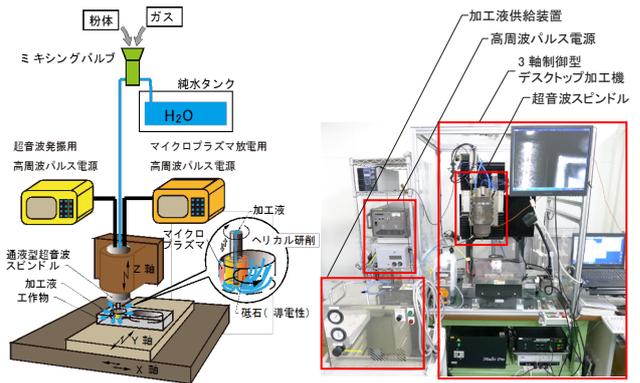


図4 UPD 研削加工装置

### 3. UPD 研削における特徴と実用化

#### 3.1 高周波パルス電流の効果

直流電流を高周波パルス電流にすることで、図5に示すように鉄ボンド砥石と超硬合金の工作物間に発生するプラズマが安定し、加工表面にできる放電痕サイズも小さく均一になった。また、同一条件での放電研削と従来研削の加工抵抗を比較したところ、放電作用の援用効果により加工抵抗が低下することを確認している。

#### 3.2 マイクロバブルや導電性微粒子の混入効果<sup>2)</sup>

UPD 研削において加工液へのマイクロバブルや導電性微粒子の混入が、電極間でのプラズマ発生に大きな役割を果たすことを捉えた。加工液に純水を用いたUPD 研削と、その純水にO<sub>2</sub>のマイクロバブルを混入したUPD 研削(加工液以外は同一条件)との表面粗さおよび加工表面の写真で比較した結果、加工液の純水にO<sub>2</sub>のマイクロバブルを混入させた場合、加工面の放電痕が多く発生していることが確認できた。この結果より、マイクロバブルによりもたらされる電極間の局所的気相生成は微細放電、マイクロプラズマを生じやすくなる作用をもたらす、放電改質の効率向上につながると考えられる。

さらに焼結チタンボンド砥石<sup>3)</sup>を用いてUPD 研削を行い、工作物の表面改質を加工液別に比較した。導電性微粒子を加工液に混入することで砥石母材から工作物表面へのチタン元素のドーピング量が増加し、改質面の硬度が上昇することを確認した。

#### 3.3 ヘリカル研削

図6に示す、CBN砥粒を用いた外径9mm、長さ22mmの焼結チタンボンドCBN砥石をUPD研削専用通液型超音波スピンドルに取り付け、純チタンの平板を用いて放電ツーリングを行ったあと、図7に鉄材料の内周面(内径18mm)をUPDヘリカル研削することができた。その様子を示す。

図8に鉄内周面1周を約0.8sでヘリカル運動する際の分割写真の一例を示す。発生プラズマが確認される。

### 4. 機能性インターフェースの創成

本研究ではUPD 研削により工作物加工面を改質することで、加工面の高硬度化や耐摩耗性・耐食性の向上など種々の表面機能向上も狙っている。例えば材料表面を加工プロセ

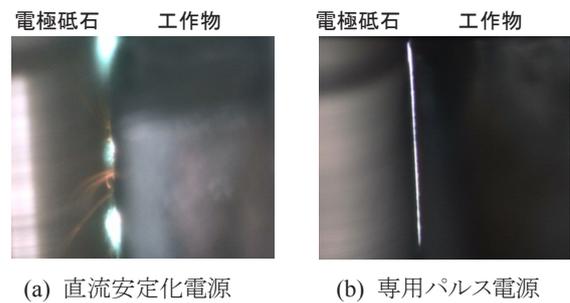


図5 UPD 研削時の放電の様子



直径9mm 長さ22mm 山形県工業技術センター製作  
図6 焼結チタンボンドCBN砥石



図7 チタンボンドCBN砥石による鉄内周面のヘリカル研削加工

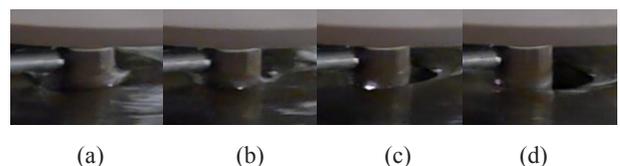


図8 鉄内周と砥石外周の接触点に発生するプラズマ

ス中に高硬度化することにより、その材料を高効率かつ高精度に研削加工を行うと同時に、材料の耐摩耗性を向上させることができると考えている。具体的な方法としては、UPD 研削中に加工面に特定の元素をドーピングすることにより、加工面近傍において化学組成や構造を変化させ、高い表面機能を有する界面、いわゆる「機能性インターフェース」を創成する。

例えば本研究では、TiC 元素含有電極および Si 元素含有電極と工作物間に放電を利用したプラズマを発生させ、加工面への各元素のドーピングの有無について検証を行った<sup>4)</sup>。さらに得られた表面の機能性向上に関してまずは表面の硬度と摩擦係数に注目し、各処理面の硬さ測定および摩擦・摩耗試験を行った<sup>4)</sup>。

### 5. 放電表面処理による加工面評価

#### 5.1 放電表面処理

本研究では、プラズマによる元素のドーピング効果について放電表面処理を行うことにより検証した。図9は本装置の処理部の拡大写真である。電極には、TiC 製電極および Si 製電極を用いた。工作物には、ねずみ鋳鉄 FC250 を用いた。電極をマイナス極性、工作物をプラス極性とし、加工液である油の中で極間にパルス放電を発生させて処理を行った。

#### 5.2 単発放電痕解析

鋳鉄基材に対する TiC 処理および Si 処理の成膜性を明らかにするために、単発放電痕を作成した。本解析では標準条件における TiC 処理、Si 処理に加えて、放電電流、パルス幅の影響についても評価した。実験変数として放電電流を、2, 10, 20 A、パルス幅を 4, 8, 16  $\mu$ s とそれぞれ変化させ、基材上に生成された放電痕の走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察、エネルギー分散型 X 線分光 (EDX) 分析を行った。

まず、放電電流変化時の単発放電痕の SEM 像を図10に示す。同図より TiC 処理面および Si 処理面ともに放電電流の増大に伴い、痕径も増大することを確認した。次に、パルス幅変化時の単発放電痕の SEM 像を図11に示す。同図においても TiC 処理面および Si 処理面ともにパルス幅の増加に伴い、痕径も増大することを確認した。放電電流、パルス幅が大きくなることで放電エネルギーが増加し、電極、鋳鉄基材に作用する熱エネルギーも大きくなると考えられる。

また、放電電流変化時の単発放電痕の EDX 像を図12に、パルス幅変化時の単発放電痕の EDX 像を図13に示す。同図より TiC 処理面、Si 処理面に共通して、放電痕内に陥没部を確認し、EDX 分析により本陥没部には炭素が濃化していることを確認した。

#### 5.3 鋳鉄基材への放電処理面の評価

鋳鉄基材全面に放電表面処理を施した。全面に一樣な処理を行うため、電極は TiC 電極 ( $\phi 60$  mm)、Si 電極 ( $\phi 100$  mm) を使用した。加工は前節に示した標準条件のもとで行った。図14に示す放電処理面の EDX 像より、TiC 処理面、Si 処理面ともに、単発放電痕観察時と同様に多くの陥没部を含むことを確認した。また、前節と同様にいずれの場合も陥没部には

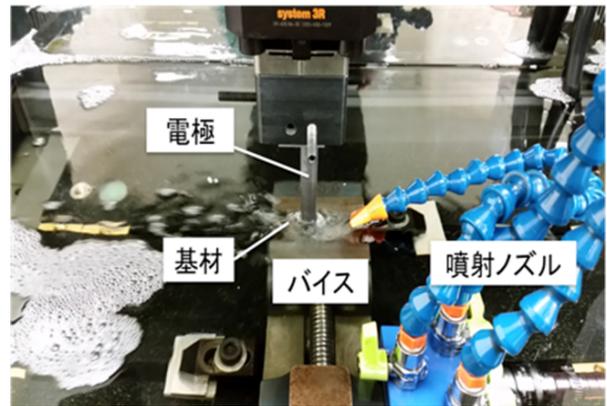
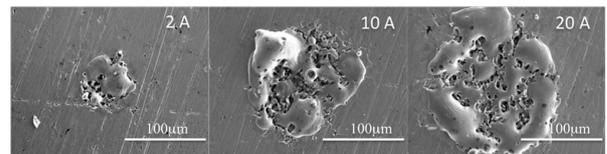
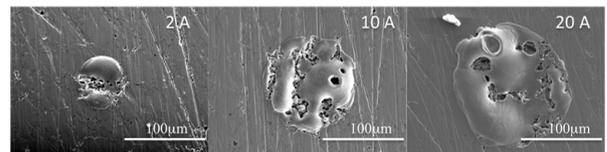


図9 放電表面処理の様子

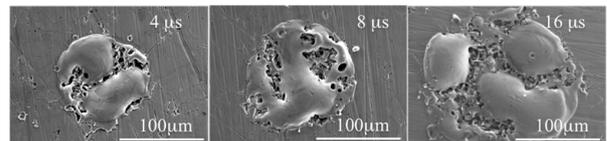


(a) TiC 電極

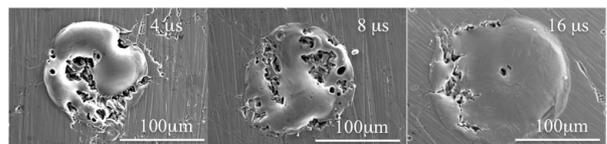


(b) Si 電極

図10 放電電流変化時の単発放電痕の SEM 像

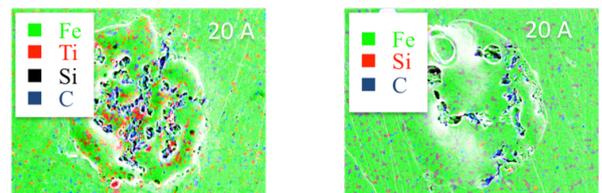


(a) TiC 電極



(b) Si 電極

図11 パルス幅変化時の単発放電痕の SEM 像



(a) TiC 電極

(b) Si 電極

図12 放電電流変化時の単発放電痕の EDX 像

炭素が濃化していることを確認した。

次にピンオンディスク摩擦試験により放電処理面の摩擦特性を評価した。本試験では、基材を油中に浸し、試験ピンを往復運動させることで測定を行った。表1に摩擦係数測定結果を示す。同表より、TiC処理面およびSi処理面ともに铸铁基材に比べて、いずれの往復速度での試験においても摩擦係数が低減していることが確認できる。これは、放電表面処理により形成された陥没部が、铸铁摩擦面に形成されたマイクロディンプルと同様、油溜まりとして作用しているためであると考えられる。

また、処理面の硬度測定を行った。本試験では、5点測定により硬度の比較を行った。硬度試験結果を図15に示す。同図よりTiC処理面およびSi処理面ともに铸铁基材に比べて高硬度を有することを確認した。さらにTiC処理面とSi処理面を比較した場合、TiC処理面の方が高硬度を有することを確認した。TiCのビッカース硬度が2500～3000HV、単結晶シリコンの硬度が1046HVであることから、放電処理面の硬度は使用電極硬度に依存すると考えられる。

## 6. 結言

本研究では、放電加工において電極工具への超音波振動の伝搬が短絡を抑制し、マイクロバブルや導電性微粒子を用いることで、放電加工に対する効果を捉えたうえで、超硬合金やチタン合金の難削材の研削加工の高効率化、高精度化を可能とする条件を見出した。

焼結チタンボンドCBN砥石を用いてUPDヘリカル研削を可能とする量産実用化を目指し、UPD研削専用通液型超音波スピンドルを開発して、UPD研削加工装置を実現した。

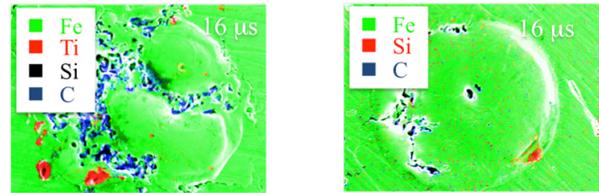
さらに、加工表面を積極的に改質させ付加価値を高める試みを行い、機能的インターフェースの創成では、铸铁基材への放電表面処理を行い、耐摩耗性、摩擦特性について検討を行った。

その結果、単発放電痕の分析により、放電電流、パルス幅を増加させることで、単発痕径は増大することを確認し、また、処理面に炭素が濃化した陥没部が見られることを確認した。

铸铁への処理面の摩擦係数測定により、TiC処理、Si処理ともに、摩擦係数低減に有効であると確認した。また、铸铁に放電表面処理を行うことで高硬度面形成が可能であり、TiC処理面、Si処理面の比較により、TiC処理が高硬度面形成により有効であると確認した。

## 謝辞

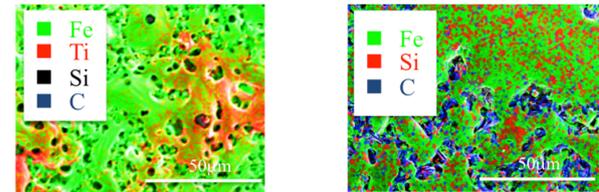
本研究開発と実用化については、主に経済産業省東北経済産業局、平成25～27年度戦略的基盤技術高度化支援事業に基づいて行われたものであり、御支援を賜りました関係各位に深甚なる感謝を申し上げます。



(a) TiC 電極

(b) Si 電極

図13 パルス幅変化時の単発放電痕のEDX像



(a) TiC 電極

(b) Si 電極

図14 全面に放電処理を施したサンプルのEDX像

表1 摩擦係数測定結果

	30 cpm	60 cpm	120 cpm	average
TiC処理	0.133	0.149	0.144	0.142
Si処理	0.132	0.138	0.131	0.133
铸铁	0.271	0.280	0.176	0.242

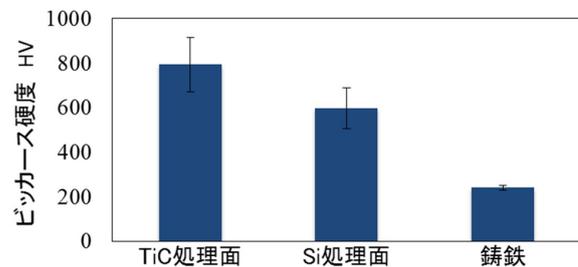


図15 硬さ測定結果

## 7. 参考文献

- 1) S. Li, Y. Wu, M. Nomura, S. Kobayashi, T. Tachibana: Ultrasonic assisted electrolytic grinding of titanium alloy Ti-6Al-4V, International Journal of Nanomanufacturing, Vol. 13, 2 (2017).
- 2) ミクロン精密株式会社: 難削材の高精度・高効率加工と機能的インターフェース創成を可能とする高周波パルス電流・超音波振動援用プラズマ放電研削装置の開発, 平成27年度戦略的基盤技術高度化支援事業, 研究開発成果等報告書, (2016).
- 3) T. SUZUKI, T. Konno: Improvement in tool life of electroplated diamond tools by Ni-based carbon nanotube composite coatings, Precision Engineering, Vol. 38, 3 (2014), 659.
- 4) N. Sumi, C. Kato, K. Shimada, M. Mizutani, T. Kuriyagawa: Influence of Workpiece Materials on the Characteristics of the Layer by Electrical Discharge Coating, International Journal of Automation Technology, Vol. 10, 5 (2016), 773.