

## 低電圧を用いたレジンボンドCBNホイールの接触放電ドレッシング

久保明彦\*<sup>1</sup>, 田牧純一\*<sup>1</sup>, 杉野 豪\*<sup>1</sup>, 閻 紀旺\*<sup>1</sup>, 成田 潔\*<sup>2</sup>

Electro-contact discharge dressing of a resin-bonded CBN grinding wheel using a low open-circuit voltage

Akihiko KUBO, Jun'ichi TAMAKI, Tsuyoshi SUGINO, Jiwang YAN and Kiyoshi NARITA

CBN#170 導電性レジンボンドホイールに接触放電ドレッシングを適用し、無負荷電圧の大きさと電源のパルス化が放電挙動およびホイール作業面生成メカニズムに及ぼす影響について実験的に検討している。その結果、ビトリファイド GC カップ砥石を電極の周囲に配置することによって電極とボンドの短絡を防ぎ良好な放電状態が得られること、火花放電領域すなわち 20V 以下の無負荷電圧を採用することによってニッケル層の溶融を防ぎ、砥粒の異常脱落を抑制できること、無負荷電圧のパルス化によってホイール作業面上に残存する砥粒数は幾分減少するがツルーイング能率は向上することを明らかにしている。また、ビトリファイド GC カップ砥石を用いた機械的ドレッシングに比べて高いツルーイング能力を維持しながら多くの砥粒を突き出させる能力を有していること、SKD11 材の研削性能として少ないホイール半径減耗量と良好な仕上面粗さをもたらすことを確認している。

Key words : electro-contact discharge dressing, conductive resin-bonded CBN grinding wheel, open-circuit voltage, truing efficiency, density of abrasive grains, grinding performance

## 1. 緒言

接触放電 (ECD) ドレッシング<sup>1)</sup>は、導電性ボンドのホイールで回転電極を研削することによって電極切り屑を生成し、電極切り屑とボンド間に発生する放電エネルギーを利用してボンドを溶融除去することにより行われる。その特徴は、超砥粒の周囲のボンドを等方的に除去することによって大きなチップポケットを生成することにある。筆者らは、このドレッシング法をメタルボンドダイヤモンドホイールに適用し、極微粒ダイヤモンドホイールに対しても緻密なトポグラフィを生成できることを明らかにしている<sup>2)</sup>。

一方、放電ドレッシング法は、ニッケル被覆した超砥粒を用いるレジンボンドホイールに対しては、ニッケル層の選択的溶融に伴う超砥粒の異常脱落をもたらすために適用が難しいとされている<sup>3)</sup>。

本研究は、ECDドレッシングの優れたホイール作業面トポグラフィ生成能力を導電性レジンボンドホイールに展開することを目的としている。すなわち、導電性レジンボンド CBN ホイールを対象としてシングル電極式 ECDドレッシング実験を行い、無負荷電圧の大きさと電源のパルス化が放電挙動およびホイール作業面生成メカニズムに及ぼす影響を調査することによって ECD ドレッシングの適正条件を検討している。また、ホイール作業面トポグラフィ特性および研削性能をビトリファイド GC カップ砥石を用いた機械的ドレッシング法と比較することにより、ECDドレッシングの有用性を検証している。

## 2. 実験装置と方法

図 1 にシングル電極式 ECDドレッシング装置の概要を示す。リング状電極を搭載した縦軸型スピンドルの回転中心がホイール幅の中心線と一致するようにこの装置を配置し、回転電極を送り速度  $f$  でプランジ研削することによりドレッシングを行った。研削ホイールとして、ニッケル被覆した CBN#170 砥粒を用いた集中度 100 の導電性レジンボンド CBN ホイールを使用した。レジンボンドには銀粉末を添加することによって導電性を与えた。電極には GC#240 砥粒を集中度 100 で混入した銅系導電性レジンボンドカップ砥石 (単純電極) を用いた。また、電極とホイール間の通電を防ぐため、ドレッシングは乾式で行った<sup>2)</sup>。放電電流波形はホール素子型電流センサで検出し、デジタルメモリスコープに記録した。放電用電源として、ピーク電流制限回路を有しないスイッチングレギュレータ方式の直流電源の他に、波形発生器と電力増幅器で構成したパルス電源 (最大ピーク電流 5A, デューティ比 50%) を採用し、研削ホイールに正極性を与えた。

さて、これまでの実験結果<sup>2)</sup>から、放電挙動は、無負荷電圧 20V を境にして火花放電からアーク放電に移行することが明らかになっている。そこで、無負荷電圧  $E_f$  が ECDドレッシング特性に及ぼす影響を検討するために、 $E_f=15$  V (火花放電領域) と  $E_f=30$  V (アーク放電領域) の無負荷電圧を選定した。

表 1 にドレッシング条件を示す。

## 3. 実験結果

## 3.1 GC砥石挿入電極の効果

単純電極を用いて ECDドレッシングを行い、図1に示す電極の両端部ABをホイールが通過する間に発生する放電電流

\*1 北見工業大学: 〒090-8507 北見市公園町 165

\*2 (株)ニートレックス: 〒470-23 愛知県知多郡武豊町小迎 184  
(学会受付日: 2001年12月6日)

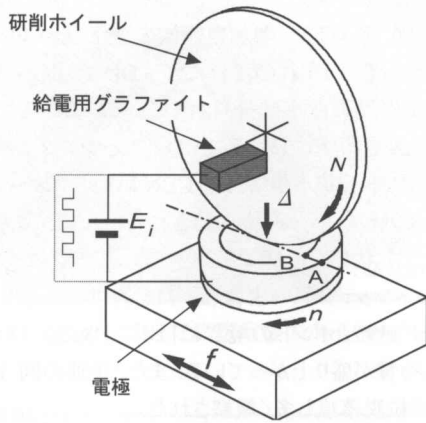


図1 シングル電極式ECDドレッシング装置

表1 ドレッシング条件

研削ホイール	CBN170M100B 外径 180 mm, 幅 10 mm
ECD 法	(a) 単純電極 GC240L100B 外径 70 mm, 内径 50 mm (b) GC 砥石挿入電極 GC240L100B+GC220V 研削ホイール回転数 $N = 3000$ rpm 電極回転数 $n = 300$ rpm 電極送り速度 $f = 100$ mm/min 電極切込み量 $\Delta = 1, 3 \mu\text{m}$
電源	DC 電源 (通電時最大電流 5 A) パルス電源 500~50kHz (最大ピーク電流 5 A) 無負荷電圧: $E_f = 15, 30$ V クーラント: 乾式 (気中)
GC カップ砥石法	GC220V 研削ホイール回転数 $N = 1500$ rpm 砥石回転数 $n = 300$ rpm 砥石送り速度 $f = 100$ mm/min 砥石切込み量 $\Delta = 1, 3 \mu\text{m}$ クーラント: 水溶性研削油剤

を観察した結果、その波形には良好な放電を維持する状態 (I)、電極とホイールが短絡し放電が発生しない状態 (III)、および両者の混在した状態 (II) が存在した。図 2 は、無負荷電圧  $E_f = 15$  V、電極切込み量  $\Delta = 1 \mu\text{m}$  の場合の例である。図中の III 部に示すようにホイールと電極が通電状態になると、ホイール・電極間には放電が発生せず機械的接触だけが存在するため、電極から排出されるレジソンドがホイール作業面に凝着する現象が観察された。その防止対策として、図 3 に示すように電極の内側と外側にビトリファイド GC#220 カップ砥石を配置することにより、ビトリファイド GC 砥石から脱落した GC 砥粒でホイール作業面に付着したレジソンドを除去する作用を付加した。その結果、図 4 に示すように、微細な放電パルスが連続的に発生する安定した放電状態を得ることができた。また、GC 砥石挿入電極の採用によって、単純電極の場合に電極縁部に発生していた強い放電を抑制することができた。

さて、GC 砥石挿入電極を使用することによって ECD ドレッシングには機械的作用が付加されるため、その影響を分離し

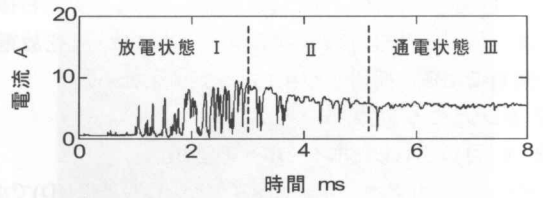


図2 単純電極使用時の放電電流波形

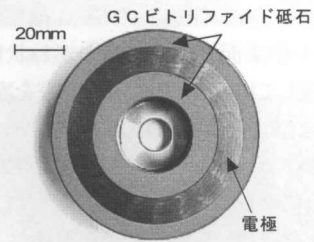


図3 GC 砥石挿入電極

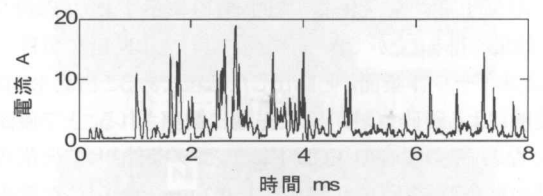


図4 GC 砥石挿入電極使用時の放電電流波形

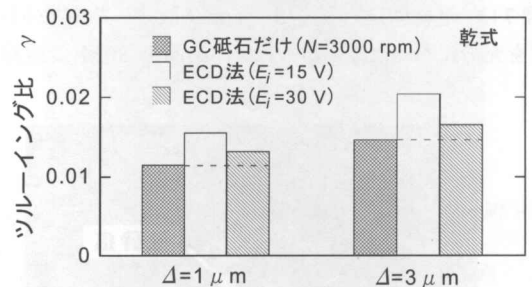


図5 ツルレーイング比

て理解しておくことが必要である。

図 5 は、ツルレーイング能率に及ぼす無負荷電圧の影響を検討するために、電極に挿入した GC 砥石だけを用いた場合と GC 砥石挿入電極を用いて ECD ドレッシングを行った場合についてツルレーイング比  $\gamma$  を比較した結果である。ツルレーイング比  $\gamma$  は、研削ホイールの被除去体積をツルア消耗体積で除した値で与えられる。図より、いずれの場合にも切込み量  $\Delta$  を増加することによりツルレーイング能率は向上している。また、ECD ドレッシングの場合、破線で示した機械的ツルレーイング比よりも大きいツルレーイング比が得られている。ただし、ツルレーイング比に対する放電効果の占める割合を比較すると、火花放電領域の無負荷電圧  $E_f = 15$  V に比べてアーク放電領域の無負荷電圧  $E_f = 30$  V のほうが低い値を示している。このツルレーイング能率の劣化は、アーク放電領域における過剰な放電エネルギーによって電極表面部が崩壊して粗さの大きい表面となり、その結果、電極と研削ホイールの真実接触面積が減少するため

ある<sup>2)</sup>。以上の結果に示すように、ECD ドレッシングの特徴である高いツルージング能率を確保するためには、火花放電領域の無負荷電圧を採用すべきであることがわかる。

3. 2 ドレッシング効果

3. 2. 1 目つぶれしたホイールへの適用

ホイールメーカーでは、ロータリダイヤモンド工具(RDD)でホイールを所定の形状に修正(ツルージング)してからドレッシング、すなわち砥粒突き出し作業を行うことが多い。RDD によってツルージングされたホイール作業面の SEM 観察結果を図 6(a)に示す。ホイール作業面は完全な目つぶれ状態を示しており、CBN 砥粒を被覆しているニッケル層の存在を容易に確認できる。また、CBN 砥粒の表面には RDD との接触によって微小破碎した痕跡が認められる。このように CBN 砥粒とボンドマトリクスが同一平面上に存在するような目つぶれ状態のホイールに対して単純電極を使用した場合には、電極材とボンドの凝着と短絡が発生し、ECD ドレッシングは不可能であった。しかし、GC 砥石挿入電極を使用し GC 砥粒によるボンドの機械的除去作用を付加することによって図 6(b)に示すような砥粒突き出し効果を得ることができた。同図に示す CBN 砥粒が目つぶれしたホイール作業面から露出した砥粒であることは、RDD との接触による破碎痕跡が砥粒先端に観察されることで確認できる。なお、この場合の ECD ドレッシング条件として火花放電領域の無負荷電圧( $E_f=15\text{ V}$ )と  $\Delta=0.2\text{ }\mu\text{m}$  という小さな電極切込み量を採用した。

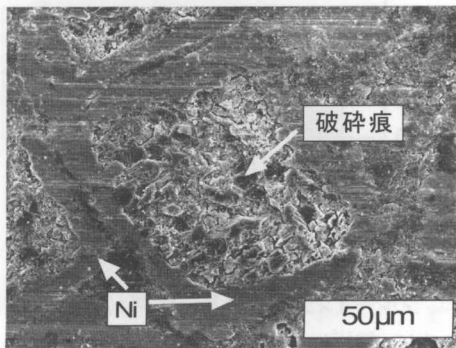
3. 2. 2 無負荷電圧の効果

図 7 は、電極切込み量を  $\Delta=1\text{ }\mu\text{m}$  に設定して ECD ドレッシングを充分に行った後にホイール作業面を SEM で観察した

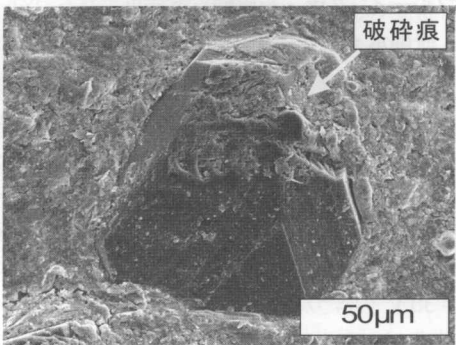
写真である。図 7(a)は火花放電領域の電圧( $E_f=15\text{ V}$ )の場合であり、図 7(b)はアーク放電領域の電圧( $E_f=30\text{ V}$ )を使用した場合である。いずれの場合にも RDD によるツルージング効果(砥粒先端の微小破碎)は消失している。両者を観察すると、火花放電領域における ECD ドレッシングの場合(図 7(a))にはボンド面が平坦であり、CBN 砥粒とボンドの境界にも隙間がなく砥粒はしっかりと保持されていることがわかる。また、砥粒突き出し状態も同様である。一方、アーク放電領域における ECD ドレッシングの場合(図 7(b))、ボンド面は凹凸が激しく、CBN 砥粒とボンドの境界にはボンドあるいはニッケルと思われる物質が盛り上がっている。また、後述の図 10(c)に示すような砥粒脱落も多く観察された。

図 8 は、ECD ドレッシングによって生成されるホイール作業面トポグラフィの特徴と比較するために、GC カップ砥石を用いた機械的ドレッシングにより得られるトポグラフィを SEM で観察した結果である。図 5 に示したツルージング比の結果を用いて、電極切込み量  $\Delta=1\text{ }\mu\text{m}$ 、無負荷電圧  $E_f=15\text{ V}$  の条件で ECD ドレッシングを行った場合にツルージング比に対する放電作用の占める割合(破線より上部の割合)を計算すると 25%というそれほど大きくない値が得られるが、図 7(a)に示した ECD ドレッシング後のトポグラフィは、図 8 に示した機械的ドレッシング後の場合と大きく異なっている。すなわち、砥粒周囲のボンドが一樣に除去されており、放電作用がトポグラフィ特性に対して顕著な影響を与えていることがわかる。

図 9 は、三次元触針法により測定したホイール作業面プロフィール高さの確率密度関数  $P_r(Z)$  をホイール最外周面からの深さに対してプロットした結果である。プロフィール高さが最頻値を

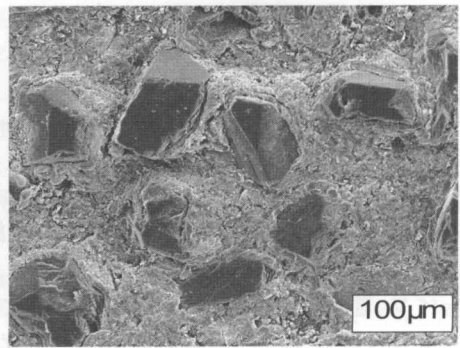


(a) RDD によるツルージング後

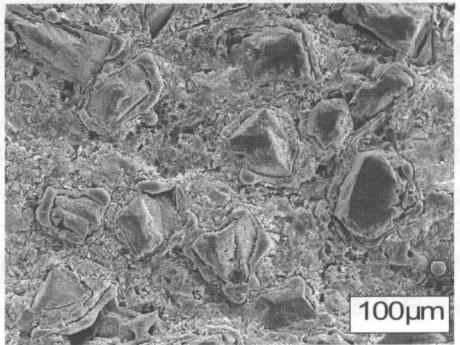


(b) ECD ドレッシング後

図 6 ホイール作業面の SEM 観察



(a) 火花放電領域 ( $E_f=15\text{ V}$ )



(b) アーク放電領域 ( $E_f=30\text{ V}$ )

図 7 ECD ドレッシング後のホイール作業面

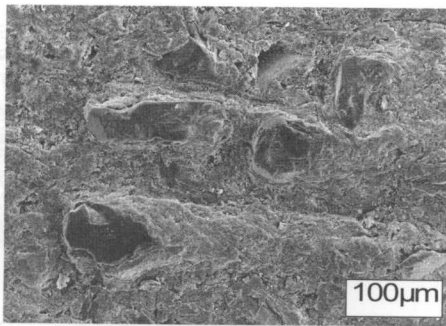
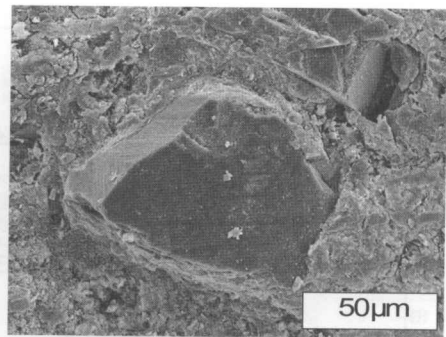


図8 GCカップ砥石法適用後のホイール作業面



(a) 火花放電領域 ( $E_f=15\text{ V}$ )

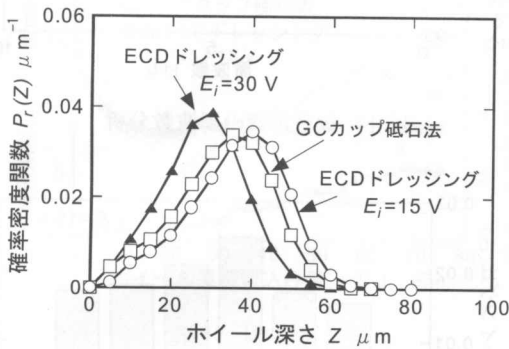
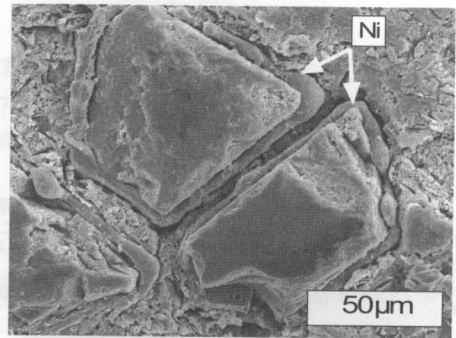
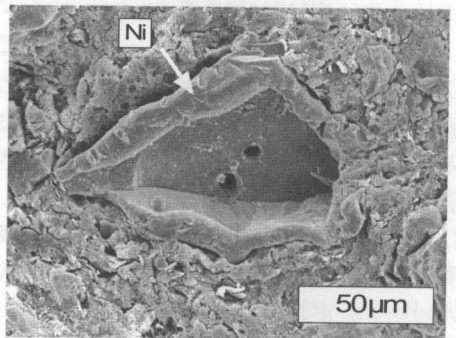


図9 作業面プロフィール高さの確率密度関数



(b) アーク放電領域 ( $E_f=30\text{ V}$ )



(c) アーク放電におけるCBN砥粒の脱落痕 ( $E_f=30\text{ V}$ )

図10 ECDドレッシング後のCBN砥粒の観察

示すホイール深さ  $Z$  に注目すると、火花放電領域の無負荷電圧を採用した場合には  $Z=40\text{ }\mu\text{m}$  という値が得られ、アーク放電領域の無負荷電圧を採用した場合には  $Z=30\text{ }\mu\text{m}$  という値が得られる。この結果は、火花放電領域の無負荷電圧を採用した場合にはチップポケットの平均深さが  $10\text{ }\mu\text{m}$  だけ大きくなることを意味しており、高い砥粒突き出し状態を確認することができる。

さて、GCカップ砥石法でドレッシングを行った場合に得られるトポグラフィはECDドレッシングの場合とその様相が大きく異なることを述べたが、図9に示すプロフィール高さの確率密度関数には大きな差異が現われていない。これは、GCカップ砥石法の場合のホイール作業面プロフィールにはボンドテール部も含まれるためであり、実際にはECDドレッシングの場合よりも低い砥粒突き出し量をもたらす、後述するように砥粒切れ刃数も少ない。

3. 2. 3 CBN砥粒周囲のニッケル被覆への影響

CBN砥粒を被覆しているニッケル層がECDドレッシングの際に発生する放電エネルギーによってどのような熱的影響を受けるのかを検討するため、CBN砥粒周囲のニッケル層に注目してSEM観察を行った。

図10は、無負荷電圧が火花放電領域の場合とアーク放電領域の場合についてCBN砥粒をSEM観察した結果である。火花放電領域の場合(図10(a))、CBN砥粒を被覆しているニッケル層とボンド層の明確な識別は困難であり、砥粒とボンドの境界に間隙は認められない。一方、アーク放電領域の場合(図10(b))には、両者の識別が容易であり、ニッケル層は放電エネルギーによって熔融した後に再凝固し、CBN砥粒の周囲に盛り上がって存在している。また、CBN砥粒とニッケル層、

表2 熱物性値

	$\lambda$ W/m $\cdot$ °C	$\theta_m$ °C	$\lambda \theta_m$ $\times 10^4$ W/m
CBN <sup>5)</sup>	200 - 1300	2730	54.6 - 354.9
ニッケル	88	1455	12.8
導電充填材	412	960	39.6
フェノール樹脂	0.6	150	0.009

ニッケル層とボンドが剥離していることも観察される。盛り上がった部分がニッケル層であることは、図10(c)に示す砥粒脱落痕を観察することによって明確に確認できる。すなわち、砥粒脱落によって生じた穴の周囲をニッケルが土塁のように囲んでいることがわかる。以上の結果より、アーク放電領域の無負荷電圧を使用した場合にはCBN砥粒を被覆しているニッケル層が熔融し、その結果として砥粒保持力の低下、過剰な砥粒脱落、さらには、低い砥粒突き出しをもたらすことがわかる。

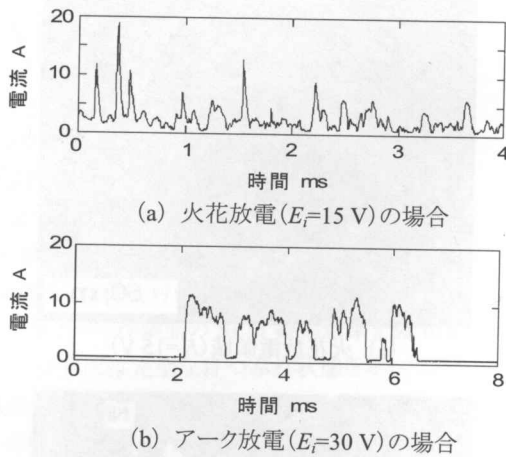


図 11 放電電流波形

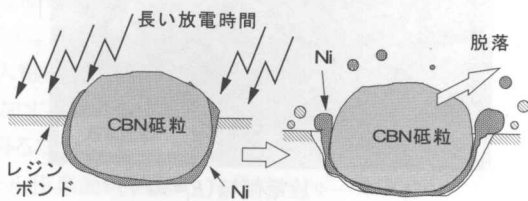


図 12 アーク放電領域におけるECDモデル

さて、放電加工に必要なエネルギー密度は、工作物の熱伝導率  $\lambda$  と融点あるいは熱変形温度  $\theta_m$  との積  $\lambda \theta_m$  にほぼ比例することが知られている<sup>4)</sup>。すなわち、 $\lambda \theta_m$  の小さい工作物ほど放電エネルギーによって除去加工されやすい。

表 2 は、導電性樹脂ボンド CBN ホイールを構成している物質の  $\lambda \theta_m$  値を計算した結果である。この結果より、ニッケルは樹脂ボンドの主成分であるフェノール樹脂に続いて熔融除去されやすいこと、熱伝導率の低いニッケルの熔融を抑えるためには加熱時間すなわち放電持続時間をできるだけ短くすることが肝要であることがわかる。

図 11 は、2 種類の無負荷電圧の場合について放電電流波形を比較した結果である。図 11(a) に示す火花放電領域の場合、放電パルスは急峻なピークを有する三角形波形であり、放電持続時間は 0.05~0.23 ms の範囲にある。一方、図 11(b) に示すアーク放電領域の場合、放電電流パルスは矩形波的であり、放電持続時間は 0.38~0.97 ms という 5 倍近くの値を示している。これらの結果より、アーク放電領域における ECD ドレッシング機構を図 12 に示すモデルを使って次のように説明することができる。すなわち、アーク放電領域では長い放電時間によって CBN 砥粒を被覆しているニッケル層に熱エネルギーが蓄積し、その結果、ニッケル層は熔融する。電極との接触が終了するとニッケル層は冷却され凝固を開始するが、再び CBN 砥粒を覆うことはなく凝集して再凝固する。再凝固したニッケルは砥粒から剥離し、ボンド表面に盛り上がり残存する。このような状態になると、CBN 砥粒とニッケル層、ニッケル層とボンドの間には間隙が生じ、砥粒の脱落をもたらす。

### 3.3 パルス電源とツルーイング能率

ECD ドレッシングにおける放電のパルス化は、電極切り屑

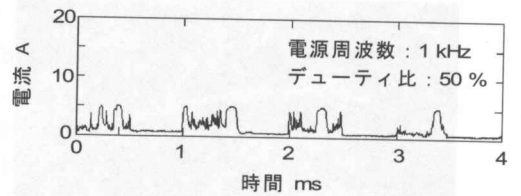


図 13 パルス電源を使用した場合の放電電流波形

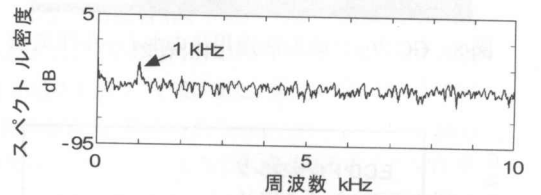


図 14 放電電流の周波数分析

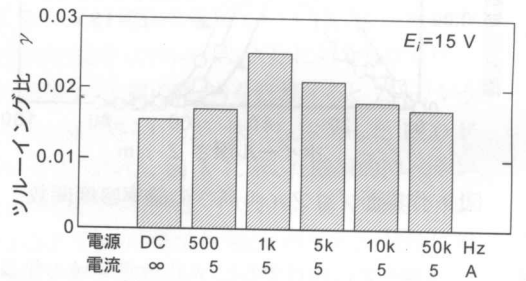


図 15 ツルーイング能率

の生成と分離によって自動的に行われるため、一般的には直流電源が用いられる。しかし、非接触放電方式のドレッシングや電解インプロセスドレッシング (ELID) においてはパルス電源を採用していることから ECD ドレッシングにおけるパルス電源の有効性について検討した。

図 13 は、無負荷電圧を  $E_f=15V$  に設定し、パルス電源(周波数 1 kHz)を用いて ECD ドレッシングを行った場合の放電電流波形を測定した結果である。電源周波数(1 kHz, デューティ比 50%)に同期して放電電流も on/off を繰り返しており、電極切り屑の on/off 効果が高周波として重畳している。なお、パルス電源はピーク電流制限回路を有しているため、放電電流が 5 A 以上になることはない。

図 14 は、図 13 に示した放電電流波形の周波数特性を FFT によって表示した結果である。放電電流は白色雑音のパターンを示しているが、パルス周波数に対応するスペクトルがピークとして存在しており、電源のパルス化が放電電流の挙動に寄与していることを確認できる。

図 15 は、パルス電源の周波数を変えて ECD ドレッシングを行い、それぞれの周波数におけるツルーイング比  $\gamma$  を比較した結果である。電源の周波数を上げることによってツルーイング比は向上するが、パルス周波数 1 kHz の点で最大値をとり、その後減少することがわかる。これは、ボンドを除去するために必要な放電時間あるいは放電エネルギーに最適値が存在することを示唆している。最大ツルーイング能率を示すパルス周波数 1 kHz におけるツルーイング比は直流電源の場合の 1.5

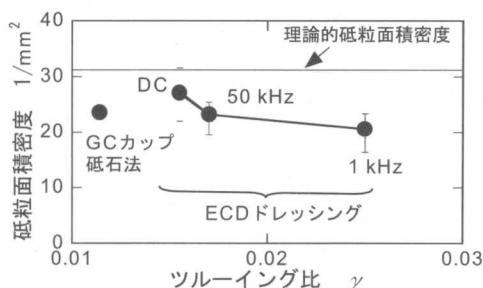


図16 砥粒面積密度

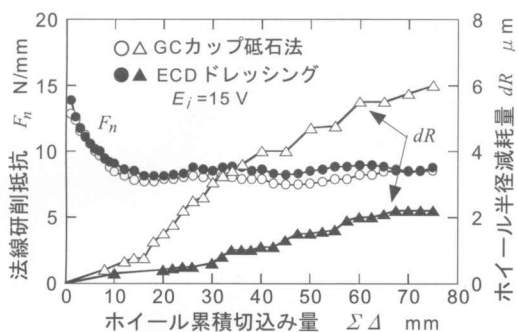


図17 研削抵抗

倍になっており、適正な周波数を持つパルス電源はツルーイング能率の向上に貢献することが認められる。

図16は、ドレッシング後のホイール作業面を観察することによってボンドマトリクス上に突き出したCBN砥粒の面積密度を求め、ツルーイング比に対してプロットした結果である。図中に実線で示す値は、「直径一定の球形砥粒が一様分布しており、砥粒の最大突き出し量は砥粒径の1/2である」という仮定に基づいて計算した理論的砥粒面積密度である。図より、ECDドレッシングの場合、ツルーイング比の増加に伴う砥粒面積密度の減少が認められ、図15において最大のツルーイング能率を示したパルス電源(1kHz)使用時の砥粒面積密度は、直流電源(DC)における値の80%まで減少している。よって、ツルーイング能率の増加は砥粒の脱落をもたらすことがわかる。また、GCカップ砥石を用いた機械的ドレッシング法に注目すると、ECDドレッシングの場合よりも低いツルーイング比であるにもかかわらず、その砥粒面積密度は直流電源(DC)を用いたECDドレッシングの場合よりも低い値を示している。これは、図8に示したように、ボンドテールの発生によってボンドテール周辺に内在する砥粒の突き出しが妨げられるためであり、ECDドレッシングの高いツルーイング能力と高い砥粒突き出し能力を確認することができる。

### 3.4 研削性能

直流電源を用いたECDドレッシング後のホイールの研削性能を検討するために、SKD11材( $H_R C=60$ ,  $100 \times 7.5 \text{ mm}$ )の平面プランジ研削実験(ホイール回転数  $N=3000 \text{ rpm}$ , 工作物送り速度  $f=2 \text{ m/min}$ , ホイール切込み量  $\Delta=10 \mu\text{m}$ , 水溶性研削油剤)を行った。研削抵抗は水晶圧電式動力計(Kistler 9254型)で測定した。なお、研削性能を比較するために、GCカップ砥石を用いた機械的ドレッシングを行ったホイールについても

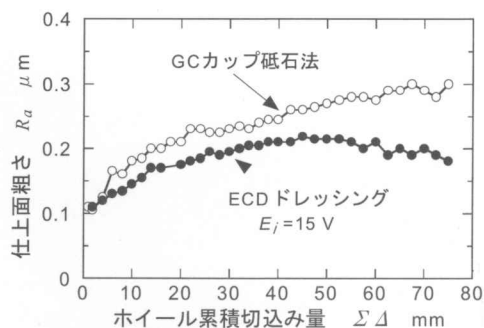


図18 研削仕上面粗さ

研削実験を行った。

図17は、法線研削抵抗  $F_n$  とホイール半径減耗量  $dR$  をホイール累積切込み量に対してプロットした結果であり、図18は、研削仕上面粗さ  $R_a$  をプロットした結果である。研削開始直後における研削抵抗、研削仕上面粗さは、ドレッシング法の違いにかかわらず一致しており、研削の進行に伴う変化の傾向も同一であるが、GCカップ砥石法に比べてECDドレッシングのほうが少ないホイール半径減耗量と良好な仕上面粗さを維持していることがわかる。この結果からもECDドレッシングによって切れ味のよいホイール作業面トポグラフィの生成されることがわかる。

### 4. 結論

シングル電極式接触放電ドレッシングの導電性レジンボンドCBNホイールへの適用性について実験的に検討した結果、以下の点が明らかとなった。

- (1) ビトリファイドGCカップ砥石を電極の周囲に配置することによって電極とボンドの凝着を防ぎ良好な放電状態を得ることができる。また、このGC砥石挿入電極は目つぶれ状態の研削ホイールに対してもドレッシング効果を発揮する。
- (2) 火花放電領域すなわち20V以下の無負荷電圧を使用することによって電極の崩壊にともなうツルーイング能率の低下を抑えることができる。また、CBN砥粒を被覆しているニッケル層の溶融、再凝固が発生しないためCBN砥粒とニッケル層の剥離による砥粒脱落を防ぐことができる。
- (3) パルス電源の使用によって直流電源の場合よりも高いツルーイング能率を得ることができるが、ツルーイング能率の向上は砥粒面積密度の減少をもたらす。
- (4) GCカップ砥石を用いた機械的ドレッシング法に比べて少ないホイール半径減耗量と良好な仕上面粗さを与える。

### 5. 参考文献

- 1) Ш. А. Бахтияров: Интенсификация контактно-эрозионной правки алмазных кругов с торцовой рабочей поверхностью, Станки и инструмент, 12(1987)19.
- 2) 謝晋, 田牧純一, 久保明彦, 井山俊郎: 接触放電ドレッシングの微粒ダイヤモンド研削ホイールへの適用, 精密工学会誌, 67.11(2001)1844.
- 3) 竹内恵三, 岩井学, 植松哲太郎, 上剛史, 喜多健一, 鈴木清: 気中放電ツルーイングドレッシングの研究, 1999年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, (1999)183.
- 4) 齋藤長男, 毛利尚武, 高鷲民生, 古谷政典: 放電加工技術, 日刊工業新聞社, (1997)41.
- 5) 金鐘信, 渡部武弘, 吉田嘉太郎: レーザドレッシングにおけるボンドの除去挙動, 1992年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1992)25.