

ハイブリッド電極を用いたメタルボンドダイヤモンドホイールの接触放電ドレッシング*

田 牧 純 一** 近 藤 和 久*** 井 山 俊 郎†

Electrocontact Discharge Dressing of Metal-Bonded Diamond Grinding Wheel Utilizing a Hybrid Electrode

Jun'ichi TAMAKI, Kazuhisa KONDOH and Toshirou IYAMA

A hybrid rotary electrode has been developed as a means to realize a precision electrocontact discharge (ECD) dressing of the bronze-bonded diamond grinding wheel. The hybrid electrode consists of paired electrode blades whose gaps are filled with GC abrasive grains to prevent the electric discharge from concentration without an excessively eroded part, and the removal of resolidified bond material to be piled up on the bond matrix is also expected. From the experiments using two electrodes, the hybrid one and a pure electrode without GC abrasives, it has been clarified that the truing effect due to ECD is produced at the DC voltage higher than 20 V in the both methods; however, the hybrid method has an ability to generate a closer wheel surface topography than that obtained from pure ECD method and a finished roughness better than that obtained from the mechanical method using a GC cup truer is achieved if a DC voltage lower than 40 V is applied. The wear of the grinding wheel after hybrid ECDD is the same as that after pure ECDD, but no increase in power due to undesirable contact of the metal bond with the workpiece is observed.

Key words: metal-bonded diamond grinding wheel, electrocontact discharge dressing, hybrid electrode, GC abrasives, wheel surface topography, grinding performance

1. 緒 言

接触放電 (ECD) ツルイーニング/ドレッシングの原理は、直流電圧を印加した電極をメタルボンドと接触させる際に発生する放電エネルギーを利用してボンド材を溶融しマトリクスから砥粒を脱落させることにある。したがって、ECD法は優れた砥粒突出し能力を有するものの電解加工をドレッシング原理とする ELID 法に比べるとボンド材除去量の精密制御が難しく、超精密研削に対応できるトポグラフィ特性をいまだ提供できていないのが現状である。さて、放電加工においては、半導体微粉末 (Si) を混入した加工液を使用することによって放電パルスの発生する位置および時間が分散し、その結果として良好な仕上面の得られることが知られている¹⁾。この考えをメタルボンドホイールの非接触放電 (ED) ドレッシングに適用した例も既に報告²⁾されているが、研削油剤が放電加工液を兼ねる ECD 法においては、砥物粉末の研削油剤への混入は研削仕上面に対して潜在的に有する悪影響を考えるならば避けたい方法である。

本研究では ECD ツルイーニング/ドレッシングを精密化することを目的として、エポキシ樹脂で固定した放電分散用粉末を電極間隙に充てんとともに半導体粉末として Si 粉末の代わりに GC 砥粒を用い、放電分散作用と機械的除去作用の二つの効果をねらったハイブリッド電極を試作した。GC 砥粒 (SiC) の比抵抗値はおおよそ $10^{-2} \Omega \cdot m$ であり Si の比抵抗値 $10^{-3} \Omega \cdot m$ に比べると 10 倍ほど大きい、放電加工において放電分散効果を有することが確認されている¹⁾。また、高橋ら³⁾は電極間隙に GC スティック砥石を挿入することによってドレッシング性能が向上することを平

行電極式 ECD ドレッシング法の場合について報告しているが、その放電挙動については言及していない。そこで、ハイブリッド電極を回転電極式 ECD ツルイーニング/ドレッシングに適用し、ツルイーニング/ドレッシング性能および生成されるトポグラフィを放電挙動の観点から実験的に検討し、その有効性を検証した。

2. 実 験 装 置

図 1 に回転電極式 ECD ツルイーニング/ドレッシング装置⁴⁾の概要を示す。電極は図中に示すように負極電極刃と正極電極刃を交

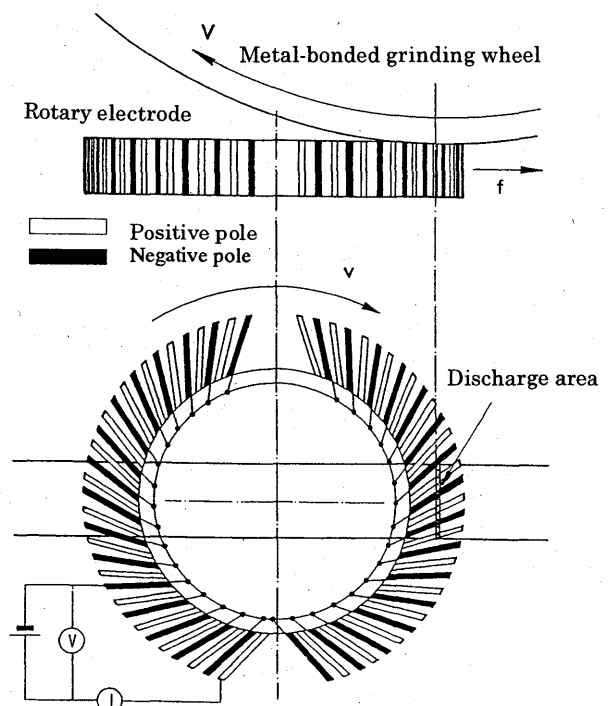


Fig.1 Principle of ECD truing/dressing

* 原稿受付 平成11年5月17日
 ** 正会員 北見工業大学 (北見市公園町165)
 *** 学生会員 北見工業大学 (現, 三菱自動車エンジニアリング(株); 東京都大田区下丸子4-21-1)
 † 正会員 岩手大学工学部 (盛岡市上田4-3-5)

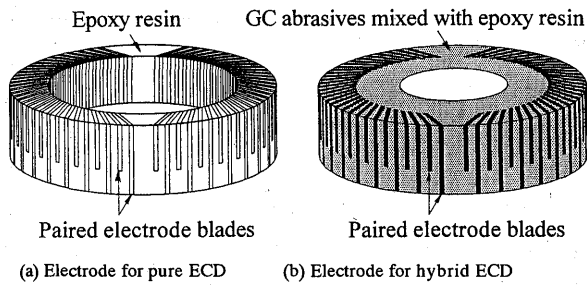


Fig. 2 Two types of electrode ring for ECD truing/dressing

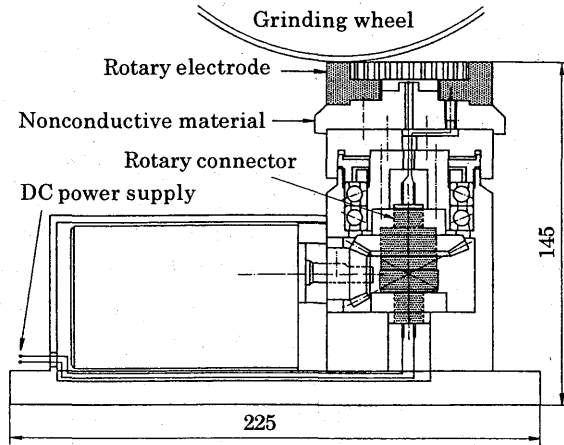


Fig. 3 ECD truing/dressing equipment

互に配置した構造になっており、この電極刃群に数十Vの直流電圧を印加した状態で電極を回転させ、メタルボンドホイールでブランジ研削することによってツルイーグ/ドレッシングが行われる。この時発生する放電は一般の放電加工とは異なる「接触放電」であり、放電電流の on/off 制御は、電極から生成される切りくずの大きさすなわち研削条件を変えることによって行われる。

図2に電極の構造を示す。図2(a)は従来用いている電極⁴⁾であり半径方向に対して10°だけ傾いた64枚の黄銅電極刃(幅1mm)がリング状に左右対称に配置されている。また、電極刃間隙には絶縁確保のためにエポキシ樹脂が充てんされている。傾いた電極刃を左右対称に配置することによって電極が半回転ごとにホイール進行方向に対する電極刃の姿勢角が変化することになり、放電の周期的発生⁵⁾を抑制することができる。試作したハイブリッド電極の構造を図2(b)に示す。この電極はGC砥粒(#240)を混入したエポキシ樹脂(砥粒体積比86%)を電極刃の間隙およびその周辺に充てんした構造となっており、電極部に対する砥粒部の作業面積比は1.3となる。両者の電極ともその底部には雌ねじが加工されており、次に示すツルイーグ/ドレッシング装置の頭部に締め付けて固定することにより電源が供給される構造になっている。図3に平面研削盤用に試作したECDツルイーグ/ドレッシング装置の概要を示す。電極は傘歯車を介して可変速モータで駆動され、ECD用直流電源はハッチングで示す水銀接点型回転コネクタにより供給される。使用した直流定電圧電源装置には5A以上の電流が一定時間以上流れると出力電圧が低下する保護回路が挿入されているため、電極の短絡による過電流の発生を防止することができる。

Table 1 Truing/dressing conditions

| | |
|-----------------|---|
| G.W. | SD270N100M(bronze bond), Diameter 196 mm, Width 10 mm |
| Truing/dressing | G.W. revolution N=1500 rpm, Truer revolution n=300 rpm Truer feed rate f=100 mm/min, Truer infeed a=10 μm Applied DC voltage Ei in ECD T/D : Ei=2-50V |
| Coolant | Synthetic oil (dilution ratio 80) |
| Truer 1 | GC cup wheel GC120FV, Diameter 85 mm, Width 22.5 mm |
| Truer 2 | Pure ECD rotary electrode ring Diameter 73 mm, 64 brass blades of 1 mm wide Electrode width 16.5 mm |
| Truer 3 | Hybrid ECD rotary electrode ring Diameter 73 mm, 64 brass blades of 1 mm wide and GC#240 abrasives Electrode width 21 mm |

Table 2 Grinding conditions

| |
|---|
| Surface plunge grinding |
| Workpiece : Al ₂ O ₃ of 10 mm wide and Si ₃ N ₄ of 4 mm wide |
| G.W. revolutions N=3000 rpm, Workpiece feed rate f=100 mm/min |
| Wheel depth of cut : a=5 μm for Al ₂ O ₃ and a=10 μm for Si ₃ N ₄ |
| Coolant : Synthetic oil (dilution ratio 80) |

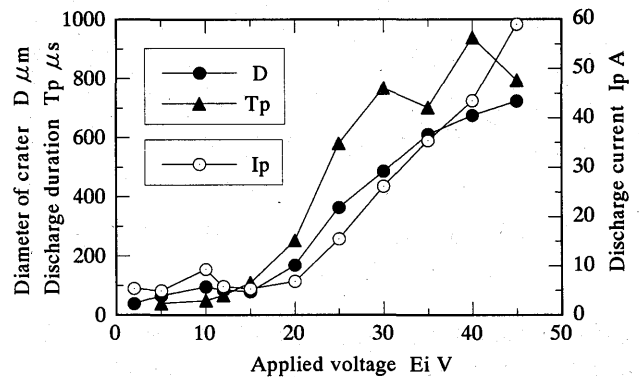


Fig. 4 Impulse discharge between brass and bronze bond

ツルイーグ/ドレッシング条件を表1に示す。実験には粒度#270のブロンズボンドダイヤモンドホイールを使用した。ツルイーグ/ドレッシング時の研削ホイール回転速度は研削時の半値に設定し、ツルイーグ切込み量はいずれの場合にも10 μmとした。また、研削油剤を研削ホイール・電極間接触領域に一律に供給するために直角ノズルを採用した。ツルイーグ時の放電状態は平均加工電流および平均加工電圧を記録することにより追跡し、放電パルス波形を解析する場合にはホール素子型電流センサからの出力を記録した。また、ツルイーグ実験のほかに、先端を円錐状に成形した黄銅材を電極としてブロンズボンドを被加工物とする単発放電実験を研削油剤中で行い、生成される放電痕および放電パルスの挙動を検討した。ホイールの研削性能を検討する場合には、表2に示す条件でセラミックスの平面ブランジ研削実験を行いホイール半径減耗量と動力損失を測定した。

3. 実験結果

3.1 ツルイーグ効果

図4は単発放電実験により生成された放電痕の大きさを直径D

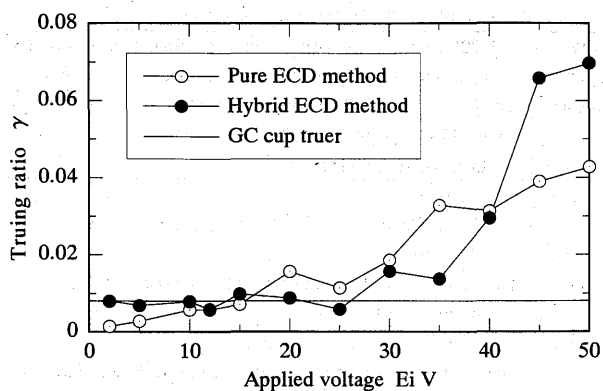


Fig. 5 Truing ratios for three types of truing method

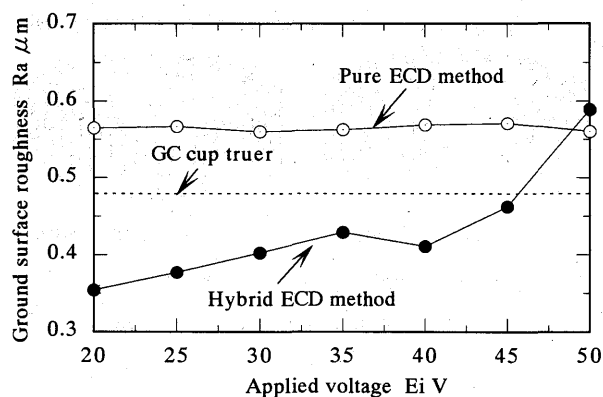


Fig. 7 Ground surface roughness versus applied voltage

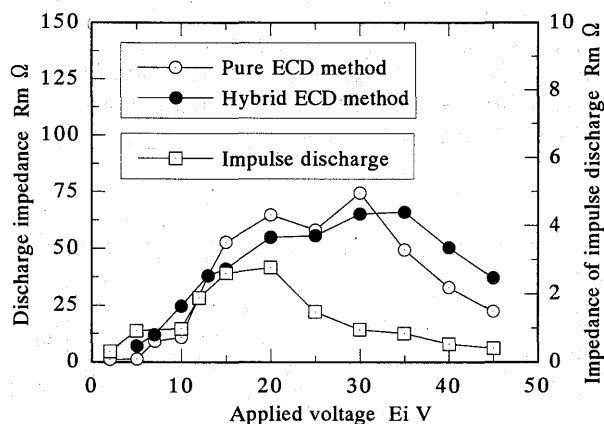


Fig. 6 Discharge impedance versus applied voltage

で評価し、放電電流ピーク値 I_p および放電パルス幅 T_p とともに印加電圧 E_i に対してプロットした結果である。なお、実験結果は極性によって異なる傾向を示したが、本報告で採用しているツルアの構造はツイン電極方式でありツルイーグ時の放電極性はランダムに変化すると考えられるため両者の平均値をプロットした。図より、放電痕直径 D は印加電圧 E_i の上昇とともに増加する傾向を示すが、その増加率は一定ではなく印加電圧 20V 付近を遷移点として大きく変化することがわかる。すなわち、印加電圧が 20V を越えると放電痕直径の増加率は 3 倍以上になる。また、放電電流ピーク値 I_p は印加電圧 20V 以下の領域ではほぼ一定値 (6A) を維持するもののその後は印加電圧に対して線形的に増加している。一方、放電パルス幅 T_p は放電痕直径と同様の傾向を示している。

以上の結果より、黄銅とブロンズボンドの組合せにおけるアーク電圧は $E_g=20V$ であり、安定した放電加工を獲得するためには 20V 以上の電圧を必要とすることがわかる。

図 5 は、ダイヤモンドホイールに 3 種類のツルイーグ法を適用しそれぞれのツルイーグ比 γ を印加電圧に対してプロットした結果である。なお、GC カップツルア法は機械的方法であるためそのツルイーグ比は印加電圧に対して一定値 (0.008) を示している。従来 ECD 法の場合のツルイーグ比は、直流電圧 E_i の印加とともに原点 ($E_i=0V$) を始点として比例的に増加する傾向を示すが、印加電圧 $E_i=20V$ 付近を越えるとデータにばらつきがあるもののその増加勾配が大きくなる傾向を認めることができる。この結果は図 4 に示した放電痕直径の変化とよく対応しており、メタルボンドの放電加工によってツルイーグ効果が得られてい

ることを確認できる。

一方、ハイブリッド ECD 法に注目すると、印加電圧 25V 以下の領域では GC カップツルアの場合と同等のツルイーグ比が得られており、それ以上の印加電圧になるとツルイーグ比が増加を開始することがわかる。その増加率は印加電圧 20V 以上の領域における従来 ECD 法の場合と比べると 2 倍以上の値を示している。

以上の結果は、ハイブリッド ECD 法の場合、図 4 で得られたアーク電圧 $E_g=20V$ 以下の領域では GC 砥粒による機械的ツルイーグが行われるが、アーク電圧 E_g 以上になると放電効果が現れツルイーグ作用を支配するようになることを示している。

図 6 は、ECD ツルイーグ時の平均電流および平均電圧を測定することによってインピーダンス R_m を計算し、印加電圧に対してプロットした結果である。なお、図中には参考のため単発放電実験の結果も示しているが、単発放電の場合には放電電流ピーク値 I_p を用いてインピーダンスを計算しているため ECD ツルイーグの場合よりも 1 けた以上小さい値となっている。単発放電の場合、インピーダンスは印加電圧 20V で最大値をとっており、この結果からもアーク電圧 E_g が 20V であることを確認できる。

さて、アーク電圧以上の領域に注目すると、従来法およびハイブリッド法ともインピーダンスが低下し始める印加電圧の存在することがわかる。また、低下を開始する印加電圧および低下後のインピーダンスはハイブリッド法に比べて従来法のほうが低い値を示している。インピーダンスの低下は放電後の絶縁回復が十分に行われないことを意味しており、結果としてツルイーグ能率の低下をもたらす。図 5 に示したアーク電圧以上の領域における従来 ECD 法とハイブリッド ECD 法のツルイーグ比の違いはこの説明を裏付けるものとなっている。

3.2 ドレッシング効果

ハイブリッド ECD ドレッシングの目的は生成されるホイール作業面トポグラフィの緻密化にある。そこで、印加電圧を変えてツルイーグ/ドレッシングを行った後に Al_2O_3 (JFCC 提供) をブランジ研削し、仕上面粗さを測定することによりドレッシング効果を検討した。

図 7 は算術平均粗さ R_a を印加電圧に対してプロットした結果である。図中に破線で示す値は GC カップツルアでドレッシングしたホイールで研削した場合に得られる粗さ ($R_a=0.48\mu m$) である。従来電極の場合、仕上面粗さは印加電圧の値にかかわらずほぼ一定値 ($R_a=0.56\mu m$) を示すが、ハイブリッド電極の場合には印加電圧の増加に伴い仕上面粗さは劣化する傾向を示す。但し、印加電圧が 45V 以下では従来電極よりも良好な粗さを維持し

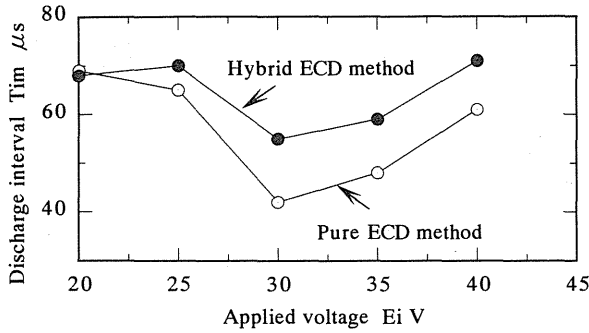


Fig. 8 Comparison of averaged discharge pulse interval between the two ECD methods

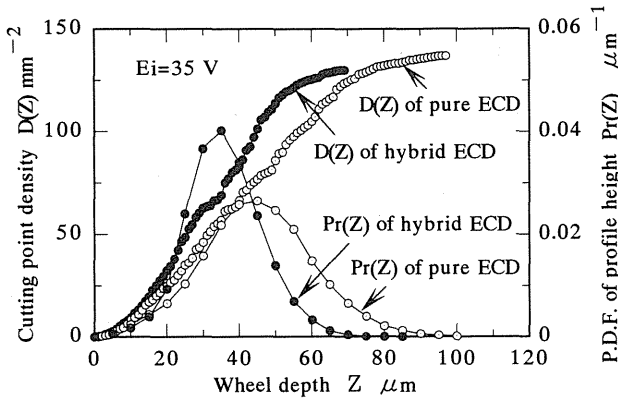
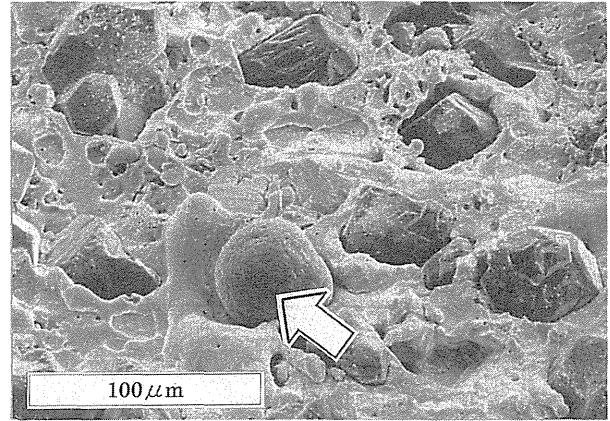
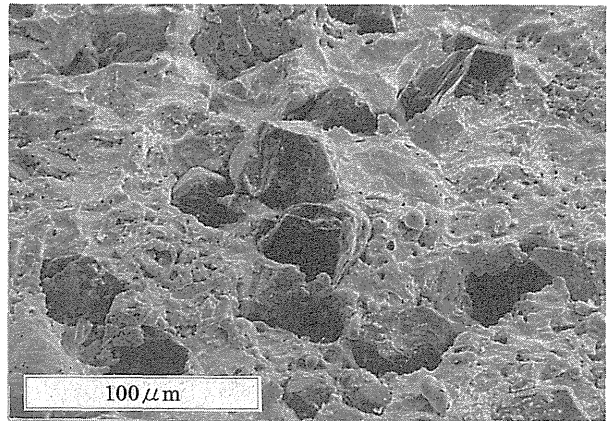


Fig. 9 Comparison of topography characteristics between the two ECD methods



(a) After pure ECD dressing ($E_i=35$ V)



(b) After hybrid ECD dressing ($E_i=35$ V)

Fig. 10 SEM micrographs of wheel surface topography

ており、印加電圧 40V 以下では GC カップツールよりも優れた仕上面粗さを提供している。電極のハイブリッド化によって GC スティック砥石法よりも緻密なトポグラフィが生成される事実は評価パラメータが異なるもの高橋ら³⁾によっても報告されているが、今回の実験によっても同様の結果が得られた。

ところで、従来電極の場合、印加電圧の増加に伴いツルイング比が増加しているにもかかわらず仕上面粗さに変化が現れない理由として、アーク電圧を越えた時点で既にダイヤモンド砥粒の突出量を制御できないほどの過剰放電状態に達していることが考えられる。一方、ハイブリッド電極の場合には GC 砥粒による放電分散効果が過剰放電を抑制するため印加電圧によるトポグラフィ制御が可能な放電状態を維持していると考えられる。

そこで、ホール素子型電流センサから得られる放電パルス波形を記録し放電パルスの発生時間間隔を測定した。図 8 は放電パルス発生時間間隔の平均値 T_{im} を印加電圧に対してプロットした結果である。アーク電圧 ($E_a=20V$) における値を除けばいずれの印加電圧においてもハイブリッド ECD 法のほうが長い時間間隔で放電が発生しており、電極に混入された GC 砥粒が放電の集中による異常アーク放電の抑制効果を与えていることを推察できる。

3.3 ホイール作業面トポグラフィ

図 9 は、印加電圧 $E_i=35$ V の場合について電極の違いがホイール作業面のトポグラフィ特性に及ぼす影響を比較した結果である。図中には 3D 触針法により測定したホイール作業面のプロフィール高さの確率密度関数 $Pr(Z)$ とダイヤモンド切れ刃の累積切れ刃密度 $D(Z)$ をホイール深さ Z に対してプロットしている。いずれの値ともハイブリッド電極を用いることによってその分布範囲がホイール最外周面に移動しており緻密なトポグラフィが生成されてい

ることを確認できる。例えば累積切れ刃密度 $D(Z)$ に注目すると、総切れ刃数は従来電極の場合 137 個/mm²、ハイブリッド電極の場合 130 個/mm² でほぼ同様の値であるが、切れ刃の存在する最深位置 Z_{max} は従来電極の場合で 97 μm 、ハイブリッド電極の場合で 69 μm であり、ハイブリッド電極の使用によって切れ刃存在領域が 30 μm ほどホイール表層部に移動していることがわかる。今回用いたダイヤモンド砥粒 (#270) の公称平均粒径は 50 μm であるから、従来電極の場合にはダイヤモンド砥粒径のほぼ 2 倍の深さまでボンドマトリクスが後退していることを意味し、GC 砥粒を混入しない場合にはいかに過剰なドレッシング、すなわち過剰な砥粒突出しが行われているかを知ることができる。

図 10 は、印加電圧 $E_i=35$ V の場合について電極の違いがホイール作業面トポグラフィに及ぼす影響を SEM で観察した結果である。両者を比較すると、従来電極を使用した場合 (図 10(a)) のボンドマトリクス上には放電によって溶融再凝固したボンドが突起として多数形成されておりその表面は起伏が激しい。すなわち、ホイールの同一深さにダイヤモンド砥粒とボンド突起が混在して存在するトポグラフィが生成されている。例えば、図中に矢印で示す球状突起は再凝固したボンドの例であるが、その先端は周囲のダイヤモンド砥粒よりも高くなっており、研削時にはこの部分がダイヤモンド砥粒に先んじて工作物と接触することにもなりうる。一方、ハイブリッド電極を使用した場合 (図 10(b)参照) には、再凝固により形成されたボンド突起が認められず滑らかな面にな

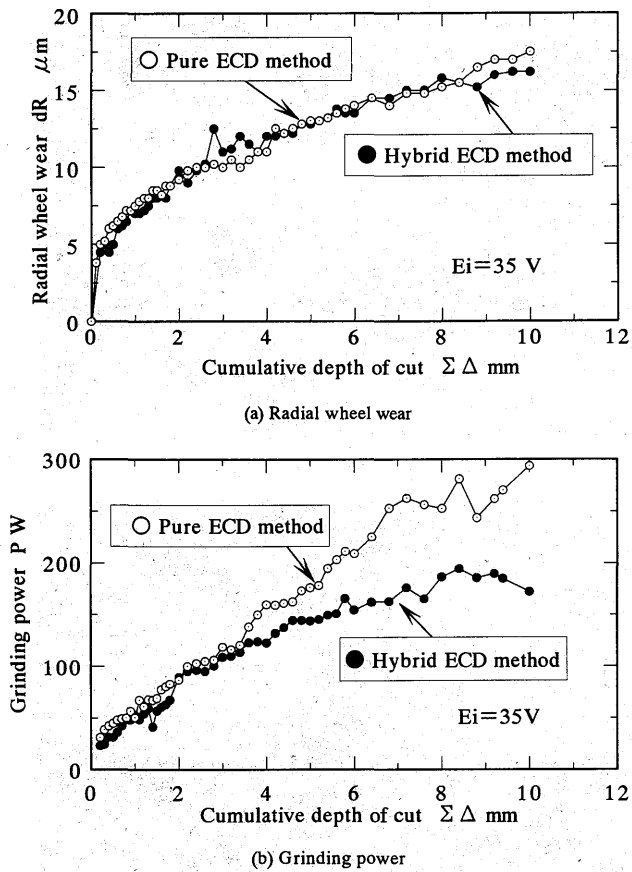


Fig.11 Comparison of grinding performance between the two ECD methods

っており、ダイヤモンド砥粒がボンドマトリクスからよく突出していることがわかる。ハイブリッド電極を用いた場合に平坦なボンド面を形成できる理由として、GC 砥粒の放電分散効果のほかに、電極から排出された GC 砥粒粉がホイール作業面上を通過する際に再凝固して盛り上がったボンドを切削によって除去するというクリーニング効果の存在が考えられる。以上に述べた結果より、ハイブリッド電極の適用によってホイール作業面の切れ刃密度が高くなるとともに平滑なボンド面が一定の砥石深さレベルに保たれることがわかった。

3.4 研削性能

図 11 は、印加電圧 $E_i=35V$ の条件で従来法およびハイブリッド法による ECD ドレッシングを行った後にそれぞれについて Si_3N_4 をプランジ研削し、累積切込み量 $\Sigma\Delta$ に対するホイール半径減耗量 dR とスピンドルモータの動力損失 P の変化を追跡した結果である。図 11(a) に示すホイール半径減耗量の挙動に従来電極とハイブリッド電極の違いは認められないが、図 11(b) に示す動力損失の傾向は異なっている。すなわち、両者とも累積切込み量 3mm あるいはホイール半径減耗量 $10\mu m$ の時点までは同一の動力損失を示すが、その後、従来電極の場合の動力損失はその勾配を変えことなく直線的に増加している。一方ハイブリッド電極の場合には徐々にその勾配を緩め、累積切込み量 10mm に至ってもその動力損失は従来電極の場合における累積切込み量 5mm の時点の値にしか到達していない。この動力損失の違いはボンド材と工作物の接触により発生する摩擦抵抗に起因している。すなわち、図 10 に示したように、ハイブリッド電極の場合には平坦なボンド

面が一定ホイール深さに位置しているためメタルボンドが工作物と接触することはなく、動力損失はダイヤモンド砥粒と工作物間の切削抵抗だけによって発生する。一方、従来電極でドレッシングした研削ホイールの作業面にはダイヤモンド砥粒と同一深さ位置に熔融再凝固したボンド突起が存在しているため、ダイヤモンド砥粒先端の摩滅および後退にともない工作物とボンド材が接触するようになるとその摩擦抵抗が動力損失に付加されるのである。

4. 結 論

メタルボンドダイヤモンドホイールに対して優れたツルーイング能力を有する回転電極式接触放電ツルーイング/ドレッシング法のドレッシング性能を向上させ精密研削に対処できるように緻密化するを目的として、黄銅電極刃の間隙に GC 砥粒を混入したハイブリッド電極を試作し GC 砥粒の放電分散効果およびボンド材の機械的除去効果を実験的に検討した。その結果、以下に示す点を明らかにすることができた。

- (1) 黄銅電極とブロンズボンドの組合せにおけるギャップ電圧すなわち放電開始電圧は 20 V であり、この電圧以下の領域では GC 砥粒の機械的作用によってボンドが除去され GC カップツルア法の場合とほぼ等しいツルーイング比が得られる。印加電圧が 20 V 以上になると放電によるボンド除去作用が支配的となりツルーイング比が急増する。
- (2) ハイブリッド電極は GC 砥粒を混入しない電極よりも緻密なホイール作業面トポグラフィを生成することができ、40V 以下の印加電圧を設定することによって GC カップツルアよりも良好な研削仕上面粗さを提供することができる。
- (3) ハイブリッド電極に混入された GC 砥粒は熔融後再凝固したボンド突起を除去するため平滑なボンド面がホイールの一定深さの位置に形成される。したがって、ハイブリッド電極を用いて接触放電ドレッシングを行ったホイールは研削時においてボンドと工作物が摩擦接触することがなく、それにもなう動力損失が発生しない。

謝 辞

ダイヤモンドホイールをご提供いただいたノリタケダイヤ(株)に謝意を表します。本研究は精密工学会産学協議会産学協同研究会「加工の超高速化および超精密化に関する研究」の援助のもとに行われたものである。

参 考 文 献

- 1) 毛利尚武, 斎藤長男, 成宮久喜, 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.
- 2) 鈴木 清, 竹内恵三, 松尾和明, 具銘浩, 酒井茂紀, 植松哲太郎: 導電性粉末混入液による放電ドレッシングの研究-第1報, 不燃性加工液中への Si 粉末混入の効果, 1993 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1993) 143.
- 3) 高橋邦夫, 鈴木憲二: 接触放電ドレッシング法の実用化研究-新電極方式のドレッシング性能および適用効果について-, 1991 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, (1991) 195.
- 4) J. Tamaki and T.R.A. Pearce: Electro-contact Discharge Dressing of Metal-Bonded Diamond Wheel for Surface Grinding, Advancement of Intelligent Production, Elsevier Science B.V., (1994) 309.
- 5) J. Tamaki and T. Kitagawa: Electrocontact Discharge Dressing of Metal-Bonded Diamond Wheel (Part 1), Trueing Efficiency and Grinding Performance, Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., 26, 4, (1992) 284.