多回路放電と砥粒による併合研削

土 屋 政 光^{*}

Multi-Circuit Electric Discharge Grinding

compounded with Abrasive Grains

Masamitsu TSUCHIYA

This paper presents the method, which improved the efficiency of the electric discharge grinding very much, and results of experiments for recognition of the effects of the method. This method of the electric discharge grinding is performed by the compound grinding effects of the multi-circuit electric discharge and the abrasive grains.

The experimental results got by using the 30-circuit apparatus and the compound grinding apparatus applied this method are as follows:

(1) The grinding speed of the 30-circuit electric discharge grinding is 24~27 times in case of RC circuit, and 26~29 times in case of transistor pulse circuit, as large as that of a usual single-circuit system.

(2) The relation between the total grinding speed (M_1) of multi-circuit and the number of circuits (n) can be shown by the experimental equation $M_n = n^a M_1$, where (M_1) shows the grinding speed of a single-circuit and values of constant (a) varies according to the grinding conditions.

(3) The compound grinding effect enables the roughness of the grinding surface to decrease.

(4) Compounding the abrasive grains has made it easy to control an automatic feeding of the electric discharge grinding, in addition to which the compressible grinding has made possible without an automatic feeding.

* 山形大学工業短期大学部

1. ま え が き

回転電極を用いて金属の放電加工を行なう、いわゆる放電研削加工については、古くから研究されており^{1)~3)}他の研削法に見られない多くの長所を有することが指摘されている。^{4)~6)}しかし、放電研削の最も有利な応用分野と考えられる超硬合金の研削においても、現在もっぱらダイヤモンド砥石を用いた研削や電解研削が用いられており、放電研削の実用例は少ないようである。このように、放電研削が多くの長所を有しながら実用されない理由としては、研削速度（特に仕上域における）が小さい、研削面が梨地状であり鏡面とすることができない、精密な自動送り機構を必要とするなどの点が考えられる。

筆者は、これら放電研削の欠点を軽減するために、1) 多回路方式の放電研削を行ない放電研削の研削速度を大巾に向上させ⁷⁾、さらに2) 砥粒と組合わせた電極を用い、放電と砥粒とによる併合研削を行ない、研削面あらさの向上および自動送りの簡略化を試みた。⁸⁾ 本論文には、多回路方式の放電研削および併合研削の特徴、試作装置を用いて行なった実験結果について述べる。

2 多回路方式の放電研削

多回路方式の放電加工は、一つの被加工体に対し、電氣的に多分割した電極を対向させ、それぞれの電極に独立した放電回路を接続して放電加工を行なう方法^{9), 10)}で、放電加工の加工速度を著しく大きくすることができる。¹¹⁾ ここでは、放電研削の研削速度を向上させる目的で行なった、多回路方式の放電研削についての実験装置および実験結果について述べる。

2.1 実験装置および方法

2.1.1 電極構造

多分割電極の最も簡単な構造は、環状電極板をそれぞれ絶縁物とサンドウィッチ状に貼り合わせた積重ね形電極であるが、このような電極ホイールでは絶縁物層の部分が加工残りとなり、被加工体に筋ができる。被加工体に筋ができないようにするには、絶縁物層がテーブルの送り方向に対して斜めになるような構造にすればよい。実験に用いた分割電極は、螺旋状電極板を組合わせた構造^{7), 11)}のホイールを試作し、周辺部による平面研削を行なった。各螺旋状電極板間の絶縁および接合剤としては、絶縁耐力、接合

図1 試作電極ホイールの構造（30分割）

図2 試作電極ホイールの外観（30分割）

力および耐油性などの点から、エポキシ樹脂系の接着剤を用いた。なお、絶縁間隔を一樣に保つために、接着剤中に直径0.2 mmのビニール小球を混入した。試作した電極ホイールの構造および外観写真を図1および図2に示す。螺旋状電極板の枚数は30とした。

2.1.2 電源回路

最近の放電加工の放電パルス発生回路としては、半導体のスイッチング素子を用いた回路が多く用いられているが、仕上加工域においては加工精度の点からコンデンサの充放電回路も重要な位置をしめている。実験には、30回路のRC放電回路とトランジスタのパルス発生回路とを試作して用いた。

試作したRC放電回路の概略を図3に示す。図中太線で示した部分が放電回路で、各回路の出力 $E_1, E_2, \dots, E_n$ を研削盤に設けたブラシを通じて分割電極の各電極板に接続し、Wを被研削材に接続した。また、図中に細線で示した部分は、自動送り信号検出回路を示すが、コンデンサ C_s の端子電圧 V_{sig} は各電極のうち最も放電開始電圧の低い（したがって、最も加工の進行がおくれていると考えられる）電極の放電電圧に応じた値となるから、これを自動送り回路の信号として研削盤テーブルの自動送りを行なった。試作RC電源は、総回路数を30としたので、30組のRC放電回路、信号比較回路によって構成されている。トランジスタのパルス電源は、穴あけ加工の実験^{9), 10)}に用いたものを使用したが、RC回路の場合と同様に30組の放電パルス発生回路および自動送り信号比較回路および自動送り回路によって構成されている。この場合、各放電回路のパルス波形を均一になるようにし、放電パルス電流の最大値を18 Aとした。また、放電研削の場合には、比較的低電圧でも安定した放電を継続させることができる。したがって、放電研削の場合には、パルス回路に加える直流電源の電圧を低くすることにより、スイッチング回路の直流抵抗を極力小さくし、電力損失を少なくするようにした。

図3 実験回路の概略 (RC回路)

2.1.3 機械本体

実験装置の機械本体には、砥石式の平面研削盤を改造し、これに試作電極ホイールを取り付けて用いた。機械本体の主要部分の構成および外観写真を図4および図5に示すが、分割電極の各電極板に通電するために、30組のブラシとスリッピングを取り付けた。研削加工中、加工液 γ 過装置によって常に加工液の γ 過、循環を行なった。テーブルの送りは、プリントモータを用いて行なったが、プリントモータの α

マチュア電流をSCRを用いた自動送り回路によって制御し、自動送りを行なうことができるようにした。

- ①電極ホイール、②③⑥絶縁物、④⑦ボールベアリング、
⑤スリップリング、⑧⑫リード様、⑨主軸、⑩プーリー
⑪ブラシ

図4 実験装置主要部分の構成

2.1.4 実験方法

多回路方式の放電研削の総研削速度 M_n は、回路数を n 、単回路 ($n=1$ の場合) の研削速度を M_1 とした場合に $M_n = n \cdot M_1$ となることが理想であるが、各電極の放電間隙の状態が一樣でないのに一体の自動送りを行なうのであるから、実際には $M_n < n \cdot M_1$ となることが予想される。これらの関係を確かめるために、試作装置について回路数 n を1〜30の範囲で変えて実験を行なった。放電回路数 n を変える場合、電極ホイールの分割数も同時に変えなければならない。実験においては、試作した30

図5 実験装置主要部分の外観

分割の電極ホイールの電極板を n 組に等分し、各組の電極板をブラシの部分で短絡し並列に接続して、それぞれの組に放電回路を接続する方法で行なった。多分割の電極ホイールを用いた放電研削では、電極の消耗に応じて絶縁材の部分も除去されなければならないが、絶縁材の除去の大部分は被研削材との摩擦によって行なわれる。したがって、電極ホイールの周速度はある程度大きくした方がよいが、あまり大きくすると研削液が飛散するようになる。実験における電極ホイールの周速度は、これらの点と研削屑の排除の点とから、120 m/min にえらんだ。研削液には白灯油を用いた。被研削材は、炭素工具鋼 (SK-3) とし、切込み深さは研削条件によって0.5〜2 mmの範囲で変化した。研削速度は、自動てんびんで計測した被研削材の重量変化と所要研削速度とから求め、研削面あらさは小坂式あらさ計によって測定し

た。実験中の放電電圧波形の観測は、シンクロスコープおよびビシグラフを用いて行なった。

2.2 実験結果および考察

2.2.1 RC放電回路

RC回路についての実験条件は、放電回路のコンデンサの静電容量 $C = 0.5, 5 \mu\text{F}$ 、電源の直流電圧 $V = 40, 60 \text{ V}$ とし、信号電圧 $V_{\text{sig.}}$ を一定値とするように自動送りを調整した。電極ホイールには、30分割の黄銅製電極を用い、電極の極性を負とした。

図6に直流電圧 V を 60 V とし、放電回路数 n を変えて放電研削を行なったときの、総研削速度 M_n の測定結果を示す。総研削速度 M_n は、放電回路数 n と共に増加しており、 $n = 30$ としたときには単回路の研削速度 M_1 の24～27倍の研削速度が得られる。このように、多回路方式を用いることによって、放電研削の研削速度を大幅に改善することができるが、 $n = 30$ のときの研削速度 M_{30} は単回路の研削速度 M_1 の30倍にはならない。多回路方式の効率を実際の総研削速度 M_n と理想的な研削速度 $n \cdot M_1$ との比 $M_n/n \cdot M_1$ (ただし、 n : 放電回路数) によって表わすと、一般に $M_n/n \cdot M_1 < 1$ となる。図6の実験結果をもとにして計算した $M_n/n \cdot M_1$ の値を図7に示すが、 $M_n/n \cdot M_1$ は1より小さく、放電回路数 n の増加と共に小さくなっている。この原因としては、2.1.4で述べたように、各電極が独立した放電を生ずるのに対し、最も研削のおくれている電極を基準にして一体の自動送りを行なったのであるから、放電ひん度の低下する電極が存在し、各回路あたりの平均研削速度が低下したと考えることができる。したがって、多回路方式の効率を増すためには、各電極すなわち各放電回路の研削の進行を均一にすることが重要となる。これには、各放電回路の電気的條件の均一さと電極ホイールの整形状態および被研削材の形状、配置が大きく影響する。実際に、

電極周速度: 120 m/min , コンデンサ容量 C : $0.5, 5 \mu\text{F}$, 電極: 黄銅 (陰極)

図6 放電回路数 n と総研削速度 M_n との関係 (RC回路)

電極周速度: 120 m/min , 被研削材: 炭素工具鋼, 分割電極: 黄銅 (陰極), M_1 : 単回路研削速度, M_n : n 回路研削速度

図7 放電回路数 n と多回路方式の効率 $M_n/n \cdot M_1$ との関係 (RC回路)

電極ホイールの整形を行わずに研削をくり返すと、各電極の放電ひん度に不均一が目立ち、特に研削の初期および終期に不均一が著しくなる。前述の実験においては、電極ホイールの整形を一実験毎に行ない、被研削材の整形、配置についても十分注意した。

多回路方式の放電研削においては、総研削速度 M_n 、回路数 n および単回路 ($n = 1$ の場合) の研削速度 M_1 の関係は、一般に $M_n = n^a \cdot M_1$ によって表わされる。ここに、 a は定数で $a = 1$ となることが理想であるが、一般には $a < 1$ となる。炭素工具鋼を被研削材とし、静電容量 C および電源の直流電圧 V を変えて実験を行なった場合の、 M_1 、 M_n 、 a の値および研削面あらさ $H_{\max}$ の測定結果を表 1 に示す。

表 1 多回路方式放電研削の結果 (RC 回路)

研 削 条 件		M_1 (g/min)	M_{30} (g/min)	a	$H_{\max}$ (μ)
C (μF)	V (V)				
0.5	40	0.015	0.37	0.91	6.5
0.5	60	0.032	0.8	0.93	10
5	40	0.062	1.6	0.95	15.5
5	60	0.094	2.5	0.97	17

2.2.2 トランジスタパルス回路

トランジスタを用いたスイッチング回路の抵抗は、直流電源の電圧を低く設計した方が小さくでき、それだけ電力損失を少なくすることができる。多回路の実験に先だち、単回路について電源電圧 (無負荷時のパルス電圧) を変えて放電研削を試みた。実験結果によれば、直流電源の電圧を 20 V 以下にしても放電研削を行なうことができるが、放電パルスの波形が不規則に変化するようになり、電極間隙が短絡された状態から放電に移行する場合が多くなる。電源電圧を 20 V 程度以上にすると、比較的安定した波形の放電を継続するようになる。放電パルスのパルス幅 τ を 0.2 ms、電流 I を 18 A としたときの放電間隙電圧 V_g および、電極間隙の消費エネルギー P_g と電源からの供給エネルギー P との比すなわちエネルギー効率 P_g/P の変化を図 8 に示し、このときの研削速度 M お

電極周速度：120 m/min、被研削材：炭素工具鋼、電極：銅 (陽極)、 P ：電源から供給したエネルギー、 P_g ：放電間隙消費エネルギー

図 8 放電パルス電圧 V と放電間隙電圧 V_g 、エネルギー効率 P_g/P との関係 (トランジスタパルス回路)

よび研削面あらさ $H_{\max}$ の測定結果を図9に示す。測定結果によれば、放電間隙電圧 V_g は電源電圧とともに大きくなり、電極間隙の消費エネルギー P_g も同様の傾向にあるが変化の割合は少ない。一方、電源からの供給エネルギー P は電源電圧に比例して大きくなるから、 P_g/P の値は電源電圧を大きくすると低下することになる。また、電源電圧を20V程度以下にすると、放電パルス波形の変化が激しくなり P_g/P の値が低くなるので、20V付近で最大値を示すようになる。研削速度 M は電源電圧とともに大きくなる傾向にあるが、供給エネルギー P が電源電圧に比例して大きくなるので、加工効率 M/P は電源電圧が25V付近のとき最大値を示している。これらの予備実験の結果をもとにして、多回路の実験にあたっては放電パルスの無負荷電圧（電源電圧）を25Vにした。

トランジスタのパルス電源についても、放電パルス回路 n と総研削速度 M_n との関係について実験を行った。各回路の放電パルスのパルス幅 τ を0.2ms、電流の最大値 I を18Aとし、パルス幅 τ とパルス周期 T との比 τ/T （衝撃係数）を0.2および0.5とした場合の、回路数 n と総研削速度 M_n との関係を図10に示す。この場合の電極ホイールには、30分割の銅製電極を用い電極の極性は正とした。図10の実験結果によれば、回路数 $n=30$ のときの総研削速度 M_{30} は、 $\tau/T=0.2$ のとき3.9g/min、 $\tau/T=0.5$ のとき8.3g/minとなり、単回路（ $n=1$ ）の研削速度 M_1 にくらべそれぞれ28.5倍、26倍になっている。実験結果から計算した多回路の効率 $M_n/n \cdot M_1$ の変化は、図7に示したコンデンサ回路についての効率と同様に、回路数 n の増加につれて減少する傾向にあるが減少

電極周速度: 120m/min, 被研削材: 炭素工具鋼, 電極: 銅 (陽極), 放電回路数 n : 1, 衝撃係数 τ/T : 0.2

図9 放電パルスの電圧 V と研削速度 M , 研削面あらさ $H_{\max}$ との関係 (トランジスタパルス回路)

電極周速度: 120m/min, 被研削材: 炭素工具鋼, 衝撃係数 τ/T : 0.2, 0.5

図10 放電回路数 n と総研削速度 M_n との関係 (トランジスタパルス回路)

の割合は少ない。図10に示した総研削速度 M_n と回路数 n の関係は、コンデンサ回路の場合と同形の実験式 $M_n = n^a \cdot M_1$ によって表わすことができ、定数 a の値は $\tau/T = 0.2$ のとき $a = 0.99$ 、 $\tau/T = 0.5$ のとき $a = 0.96$ となっている。これらの実験結果は、トランジスタを用いたパルス回路についても、多回路方式によって研削速度を大幅に向上できることを示しており、コンデンサ回路にくらべ多回路の効率が大きいことを示している。また、この場合の研削面あらさ $H_{\max}$ は $20 \sim 25 \mu$ 程度であり、回路数によってそれ程変化しないが、 τ/T を大きくすると悪くなる傾向がある。

3. 多回路放電と砥粒とによる併合研削

多分割電極ホイールの絶縁性接着剤中に砥粒を混入した電極を用い、多回路の放電研削と砥粒による機械的研削との併合研削効果について実験を行なった。すなわち、1) 分割電極の絶縁性接着剤の耐摩耗性を適当にすることにより、多回路方式放電研削の自動送りを省略し、2) 砥粒の研削加工効果によって、研削面のあらさを向上させることを試みた。

3.1 併合研削装置および実験方法

3.1.1 併合研削電極

試作した併合研削の電極は、2.1.1で述べた多回路方式の分割電極と同様の構造とし、電極板の絶縁剤として#200(粒度200)のWA砥粒を混入したエポキシ系接着剤を用いた場合および厚さ0.2mmの切断用薄砥石(GC200L)を用いた場合とについて実験を行なった。電極板には、厚さ0.5mm、外径100mm、内径40mmの銅板を用い、電極の分割数を6とした。試作した併合研削電極の構造および外観を図11および図12に示す。WA砥粒の混入比は、接着剤との重量比で0, 0.25, 0.5および1とした。

3.1.2 実験装置および方法

併合研削の実験装置の構成を図13に示す。図13において、 E は併合研削電極ホイール、 W は被研削試料を示す。電極 E の主軸の構成は、図4に示した放電研削の場合と同様であり、直流電動機によってベルト駆動され、電極 E の周速度を連続的に変化することができる。図13中のでこ式の加圧装置によって、被研削試料 W を電極 E の周辺面に対し所定の荷重 P で押し

図11 多回路放電と砥粒による併合研削電極の構造（6分割）

図12 併合研削電極の外観（6分割）

付けながら研削することができる。また、2.1.2に述べたように、テーブルの自動送りも可能である。

併合研削における放電間隙の状態は、主として電極金属の消耗と砥粒消耗（摩耗，脱落）との関連によって定まるが，コンデンサの放電回路では放電開始電圧によって，放電間隙の状態を知ることができる。実験はRC回路を用い，研削条件を変化させた場合の放電開始電圧の変化を，シンクロスコープおよび直流電圧

図 13 併合研削実験装置の概略

計によって測定した。この場合，電極に加える荷重を一定にしても，研削の初期においては対向面積が変化し，放電開始電圧も変化するが，やがて一定値に落ち着くようになる。放電開始電圧の値は，このときの値を測定した。被研削試料には，焼入れを行なった合金鋼 SKD 12（日本特殊鋼，NR₂，硬度 H_{RC} 50）および超硬合金 P 20（三菱金属，ST_i 20）を用いた。試料の大きさは 4 × 11 × 16 mm である。研削液としては，白灯油を用いた。

3.2 実験結果および考察

3.2.1 放電開始電圧

図 13 に示した装置を用いて併合研削を行ない，研削荷重と放電開始電圧との関係について実験を行なった。# 200 WA 砥粒の混入比 1 の電極を用い，合金鋼（SKD 12，H_{RC} 50）を試料とし，研削荷重 P を 0 から 1 kg まで変えたときの P による放電波形の変化を図 14 に示す。この場合，放電回路のコンデンサの静電容量 C を 1 μ F，直流電源電圧 V を 140 V とし，電極の周速度 v を 300 m/min とした。研削荷重 P の小さいうちは，図 14 (a) に示すように放電はまばらであるが，研削荷重 P が大きくなるにつれ，図 14 (b), (c) に示すように放電開始電圧 V_s が低下し，放電ひん度が大きくなる。さらに研削荷重 P を大きくすると，放電波形には図 14 (d) のように連続したアーク放電や短絡を含むようになる。このように，放電開始電圧 V_s は研削荷重を大きくすると低くなるが，砥粒の混入比を変えると同一研削荷重に対する放電開始電圧の値が変化する。砥粒の混入比を 0，0.1，0.25，0.5，1 に変えた電極を用い，研削荷重 P と放電開始電圧 V_s との関係について実験を行なったが，このときの結果を図 15 に示す。また，砥粒を混入した接着剤の代わりに，切断用 G C 薄砥石を用いた電極についても，同様の実験を行なった。図 16 は G C 薄砥石を用いた電極についての実験結果である。図 15 および図 16 において，放電開始電圧 V_s の変化は，放電開始電圧 V_s と電源の直流電圧 V との比 V_s/V の変化によって示してある。図 15 に示した測定結果は，砥粒の混入比が大きい程，放電開始電圧 V_s を同一にするために要する研削荷重 P が大きくなることを示している。図 16 に示した切断用 G C 薄砥石と組合わせた電極についての実験結果も，図 15 の測定結果と同様に，研削荷重 P の大きい程，放電開始電圧 V_s が低くなることを示している。また図 16 の測定結果は，同じ研削荷重 P に対する V_s/V の値が，コンデンサの静電容量 C に

たて軸：50V/div，よこ軸：5ms/div

コンデンサ容量 C ：1 μ F，電源電圧 V ：140 V，電極周速度 v ：300 m/min，被研削材：合金鋼 (SKD 12)，併合砥粒：# 200 WA，混入比1

図 14 研削荷重 P による放電波形の変化

V_s ：放電開始電圧， V ：電源電圧 140 V，電極周速度 v ：300 m/min，コンデンサ容量 C ：1 μ F

図 15 研削荷重 P と V_s/V との関係

V_s ：放電開始電圧， V ：電源電圧 140 V，電極周速度 v ：570 m/min，被研削材：超硬合金 (P20)

図 16 研削荷重 P と V_s/V との関係

よって変化することを示している。コンデンサの静電容量 C と V_s/V との関係について実験を行ったが、同一研削荷重 P に対する放電開始電圧 V_s の値は、静電容量 C の大きい程低くなる傾向にある。図 17 は、WA 砥粒の混入比 1 の電極を用い、研削荷重 P を 0.6 kg 一定とし、静電容量 C を 0.1 ～ 5 μF の範囲で変えた場合の測定結果である。

前述の実験結果は、併合研削の放電開始電圧 V_s の値が、研削荷重によって変化することを示しているが、このことは電極の消耗と砥粒の消耗（摩耗、脱落）との関連によって説明することができる。すなわち、コンデンサ回路を用いた放電研削

の放電開始電圧は、放電間隙長に対応すると考えられる。したがって、ある研削荷重において、放電開始電圧が一定の値に落ち着くことは、砥粒部の消耗と電極板の放電による消耗とが釣合の状態にあり、放電間隙長が一定の値に保たれているといえる。この釣合の状態は研削条件によって異なる。たとえば、研削荷重が極めて小さい場合には、砥粒の消耗が少ないので、電極板の消耗につれて放電間隙長が長くなり、ついには放電が休止してしまう。これに対し、研削荷重の大きい場合には、砥粒の消耗が大きく、また砥粒の被研削面への喰込みも大きくなるので、放電間隙長が小さくなり放電開始電圧が低くなる。放電開始電圧は砥粒の混入比によっても変化するが、このことは研削荷重が砥粒のみに加わり^{12), 13)}、砥粒の混入比の大きい程各砥粒に加わる研削荷重が小さくなることから説明できる。また、放電開始電圧はコンデンサの静電容量を大きくすると低くなるが、これは静電容量を大きくすると研削面があらくなり、砥粒の消耗（摩耗、脱落）が盛んになるためと考えられる。

砥石研削においては、砥粒の消耗が砥石の周速度に影響される。^{13), 14)} 併合研削においても同様のことが予想されるので、研削荷重 P を 0.6 kg, 0.8 kg とした場合について、電極周速度 v を 75 ～ 570 m/min（電極回転数 200 ～ 1,800 r.p.m）の範囲に変えて、放電開始電圧 V_s の変化を測定した。図 18 は砥粒の混入比 1 の電極についての実験結果であるが、電極周速度 v を大きくするにつれて、放電開始電圧 V_s が高くなる傾向にあることを示している。電極周速度を大きくした場合、電極金属の放電による消耗に比べ砥粒の摩耗の方が大きくなり、放電開始電圧が低下することが予想されたが、実験結果は逆の傾向を示している。これは、併合研削の実験においては、放電研削を主体に考え電極周速度を比較的小さい範囲にえらんだ結果、砥粒の消耗のうち脱落によるものが多く、電極周速度を大きくすると砥粒の脱落が少なくなることが原因していると考えられる。

研削荷重 P : 0.6 kg, 電極周速度 v : 300 m/s,
併合砥粒: # 200 WA, 混入比 1, 被研削材:
合金鋼 (SKD12)

図 17 コンデンサ容量 C と V_s/V との関係

このように、併合研削における放電開隙は、砥粒の消耗によって左右される。したがって併合研削の自動送りは、電極の消耗に応じて砥粒が消耗するように、研削荷重や電極周速度を調整して行なわなければならない。

3.2.2 併合研削面

多回路放電と砥粒との併合研削による研削面は、砥粒の研削効果によって放電による盛りり部分が除去されるため、通常の放電研削面に比べて研削面あらさが改善される。砥粒の研削効果は、併合研削の条件によって変わるが、ここでは砥粒の混入比、研削荷重、コンデンサの静電容量および電極周速度と砥粒の研削効果との関係について実験的に検討を行なった。

図19(a)および図19(b)は、砥粒の混入比=0すなわち砥粒を含まない電極を用い、コンデンサの静電容量 C を $0.1\mu\text{F}$ および $1\mu\text{F}$ として、合金鋼を放電研削した場合の研削面の顕微鏡写真および面あらさ曲線である。砥粒を混入した電極を用いた場合には、図19に示した放電研削面の突出部が除去されるが、砥粒の混入比が0.1および0.25の電極の場合には効果が少ない。砥粒の混入比を0.5および1にした電極を用いた場合には、研削荷重の増加と共に砥粒による研削効果が

V_s : 放電開始電圧, V : 電源電圧 140V, コンデンサ容量 C , $1\mu\text{F}$, 併合砥粒: #200WA, 混入比 1, 被研削材: 合金鋼 (SKD 12)

図18 電極周速度 v と V_s/V との関係

電源電圧 V : 140V, 被研削材: 合金鋼 (SKD 12, $H_{RC} 50$)

図19 放電研削面の顕微鏡写真と面あらさ曲線 (混入砥粒なし)

大きくなり砥石のみによる研削面に近づく。図20(a)および図20(b)は、砥粒の混入比1の電極を用いたときの、併合研削面の顕微鏡写真および面あらさ曲線の例であるが、研削荷重 P の増加と共に砥粒による研削効果が大きくなることを示している。市販の切断用薄砥石GC200Lを組合わせた電極で、超硬合金($P20$)を研削したときの、併合研削面の面あらさ曲線の例を図21に示す。この場合もWA砥粒を混入した電極の場合と同様の傾向を示している。面あらさ曲線の測定結果から求めた、研削荷重 P と

(a) コンデンサ容量 $C = 0.1 \mu\text{F}$

(b) コンデンサ容量 $C = 1 \mu\text{F}$

被研削材：合金鋼 (SKD12, $H_{RC} 50$), 電源電圧 V : 140 V, 電極周速度 v : 300 m/min, 併合砥粒: #200 WA, 混入比 1

図20 併合研削面の顕微鏡写真と面あらさ曲線

研削面あらさ $H_{\max}$ との関係を図 22(a), 図 22(b) に示す。図 22(a) は, WA 砥粒の混入比 1 の電極を用いて, 合金鋼を研削したときの測定結果であるが, 研削面あらさ $H_{\max}$ は研削荷重 P の増加に伴って小さくなっている。この場合, 研削荷重 P の増加につれて放電開始電圧が低下し, 放電開始電圧 V_s と電源の直流電圧 V との比 V_s/V が 0.2 程度以下になると, 図 14(d) に示したように, 放電波形中にアーク放電や電極と被研削物との短絡を含むようになる。アーク放電を含むようになる限界の研削荷重 P は, コンデンサの静電容量 $C = 0.1 \mu\text{F}$ のとき 1.3 kg , $C = 1 \mu\text{F}$ のとき 1 kg 程度である。また, 図 22(b) は GC 200 L 薄砥石と電極板を組合わせた電極によって, 超硬合金を研削したときの測定結果である。この場合も, 図 22(a) と同様に研削荷重 P を大きくすると研削面あらさが小さくなるが, 研削荷重 P が 0.2

被研削材：超硬合金 (P 20), 電源電圧：140 V,
コンデンサ容量 $C = 0.1 \mu\text{F}$

(a) 放電研削面 (b), (c) 併合研削面

図 21 放電研削面および併合研削面の面あらさ曲線

(a) 合金鋼 (SKD 12)

(b) 超硬合金 (P 20)

図 22 研削荷重 P と研削面あらさ $H_{\max}$ との関係

kg を越えると面あらしに与える荷重の影響が少なくなっている。以上の実験結果は、砥粒の混入比を大きくし、研削荷重を適当に大きくして併合研削を行えば、研削面あらしが改善できることを示している。このことは、砥粒による研削の効果によると考えられるが、研削荷重を大きくすると放電開始電圧が低下し、放電痕自体が小さくなることも原因していると考えられる。

前述の実験は、電極の周速度を一定に行なったが、併合研削面は電極周速度によっても影響される。電極周速度 v を 75～570 m/min (電極回転数 200～1800 r.p.m.) と変えて、電極周速度 v と研削面あらし $H_{\max}$ と関係について実験を行なった。この場合、研削荷重を一定にして電極周速 v を変えると、放電開始電圧 V_s は図 18 と同様の变化をする。実験においては、電極周速度 v の変化に応じて研削荷重を調整し、放電開始電圧 V_s を 100 V ($V_s/V \div 0.7$) に保つようにした。図 23 (a), 図 23 (b) は、被研削材がそれぞれ合金鋼、超硬合金のときの、電極周速度 v と研削面あらし $H_{\max}$ との関係についての実験結果である。研削面あらしは、電極周速度 v を大きくする程小さくなっているが、 $v < 300$ m/min の範囲においてその傾向が著しい。この場合、放電開始電圧 V_s を 100 V 一定に保つために、研削荷重を 0.1～0.15 の範囲で調整したが、この範囲の研削荷重の変化に対する研削面あらしの変化は 1～1.5 μ 程度である。したがって、図 23 に示される研削面あらしの変化は、砥粒の研削効果が電極周速度によって変化し、周速度の大きい程砥粒の研削効果が大きくなることを意味している。

(a) 合金鋼 (SKD 12) の研削

(b) 超硬合金の研削

図 23 電極周速度 v と研削面あらし $H_{\max}$ との関係

4. む す び

放電研削の研削速度および研削面あらさの向上,さらに自動送りの簡略化を目的として,多回路方式の放電研削および放電と砥粒とによる併合研削を試みた結果,次のような結論を得た。

(1) 多回路方式を採用することにより,放電研削の研削速度を大巾に改善することができる。30回路方式の試作装置についての実験結果によれば,単回路方式の研削速度にくらべ,コンデンサ回路の場合24〜27倍,トランジスタパルス回路の場合26〜29倍の研削速度が得られている。

(2) 多回路方式の放電研削の総研削速度 M_n と回路数 n との関係は,実験式 $M_n = n^a \cdot M_1$ によって示すことができる。ただし, M_1 は単回路 ($n = 1$) における研削速度, a は研削条件によって定まる定数で,コンデンサ回路の場合 $a \approx 0.91 \sim 0.97$, トランジスタパルス回路の場合 $a \approx 0.96 \sim 0.99$ である。

(3) 併合研削を行なうことにより,放電研削面を改善することができる。試作併合研削電極を用い,コンデンサ回路について行なった実験結果では,研削面あらさを $1/5 \sim 2/5$ にすることができた。

(4) 併合研削の自動送りは容易であり,任意の放電開始電圧で安定した研削を行なうことができる。また,自動送りを省略して加圧研削を行なうことができる。この場合には,研削荷重,電極周速度などを調整して,放電開始電圧を所定の値にすることができる。

(5) 併合研削面のあらさは,研削荷重および電極の周速度を大きくすると小さくなる傾向にあるが,放電による研削効果との関係で,最適の研削荷重および最大の周速度が存在する。

試作装置を用いた実験は,必ずしも最適の条件で行なったとはいえず,多回路方式および併合研削の効果を確かめるに止まったが,放電研削の研削性能を高めるのに有効な手段であることは十分確認することができた。さらに最適研削条件についての研究を進めることによって,研削性能を高め応用分野を広めることができると考えられる。

(1972. 7. 25 受付)

参 考 文 献

- 1) 倉藤尚雄, 須田孝, 岩本尚: 放電研削の研究(第1報), 精密機械, XXI, 10 (1955), 378.
- 2) 倉藤尚雄, 須田孝, 芝康平: 放電研削の研究(第2報), 精密機械, XXII, 1 (1956), 9.
- 3) 鳳誠三郎, 倉藤尚雄: 改訂放電加工, コロナ社(昭和43年), 235.
- 4) 三谷喜男: 超硬バイトの放電研削, 機械と工具(1958, 5), 24.
- 5) 大越諄, 佐田登志夫: 放電研磨による超硬切削工具の寿命改善, 精密機械, XXV, 9 (1959), 1.
- 6) 豊島達兄, 長谷川要: 超硬工具放電研磨の諸特性について, マシナリー, (1960, 3), 413.

- 7) 西村重志, 土屋政光: 多回路方式による放電研削加工について, 第40回放電加工研究会資料 (1965, 7)
- 8) 土屋政光, 植松利夫: 放電と砥粒とによる併合研削, 日本機械学会・精機学会講演論文集205, (1969-9), 82
- 9) 丹羽義栄, 藤本良三, 土屋政光: 多回路方式放電加工による単一穴の加工, 第53回電気加工研究会資料, 53-103 (昭和44年1月), 13.
- 10) 丹羽義栄, 藤本良三, 土屋政光, 大泉忠夫: 放電加工電源の最近の傾向, 精機学会主催放電加工に関する講習会 (第12回) テキスト (昭和39年).
- 11) 藤本良三: 多回路方式放電加工法, 電気加工学会誌, 3-6 (昭和45年3月), 1.
- 12) 佐藤健児: 研削理論, 精密機械, 27-6 (昭和36-6), 323.
- 13) 小野浩二: 研削仕上, 槇書店, (昭和37年).
- 14) 田中義信, 斉藤勅男: 精密工作法, 養賢堂, (昭和37年).