電解研削加工における材料除去特性に関する研究*

中島利勝** 大橋一仁** 上田晋一*** 山下 諭† 藤井直人***

Study on Material Removal Process in Electrolytic Grinding

Toshikatsu NAKAJIMA, Kazuhito OHASHI, Shinichi UEDA, Satoru YAMASHITA and Naoto FUJII

In this paper, the material removal mechanism in electrolytic grinding process is experimentally investigated by analyzing the stock removal due to electrolytic phenomenon and to grinding phenomenon in electrolytic grinding process, taking the inevitable accumulation phenomenon of interference depth of wheel into consideration. The material removal effect in electrolytic grinding is also discussed from the viewpoint of machining energy. Main conclusions obtained in this paper are as follows: (1) The electric current in electrolytic grinding process increases from beginning of wheel interference because of the momentary short circuit or electric discharge through generated chips at smaller concentration of electrolyte or applied voltage. Therefore all electric current isn't always consumed for the electrolytic effect. (2) There exists the critical electrolytic conditions from which the electrolytic effect in electrolytic grinding process intensifies. (3) The total consumed energy reduces with the increase of concentration of electrolyte or the applied voltage, but the effective energy rate for material removal decreases at about 7V in applied voltage.

Key words: electrolytic grinding, stock removal, electrolytic effect, grinding effect, electric current, concentration of electrolyte, critical electrolytic conditions, effective energy rate

1. 緒 言

電気化学的溶解作用と機械的研削作用の重畳によって材料除去が進行する電解研削は、電解作用によって砥石への負荷が軽減されるため主に難削材に対して有効な加工法の一つである。その複雑な材料除去機構を解明するためには電解研削現象における各除去作用の割合を求めることが必要であり、これまでに工作物速度が極めて小さく砥石通過直後の過剰な電解溶出によってオーバーカット現象を伴う加工条件においては、小野らによって材料除去量に占める電解作用の割合が求められている^{1, 2)}。一方、過剰な電解溶出が発生せず、加工精度および能率に優れる高い工作物速度の条件については長谷川らによって検討されているが、主に研削抵抗の減少効果を対象としている³⁾。

そこで本研究では、過剰な電解溶出が発生しない工作物速度で電解研削する場合の材料除去機構をより精確に把握するため、研削過程において必然的に生じる砥石のかつき現象⁴⁾を考慮に加え、円筒ブラシ電解研削する場合の電解作用および研削作用が材料除去量に占める割合を検討し、電解液濃度および印加電圧が電解研削の材料除去特性に及ぼす影響を明らかにする。さらに、電解研削による材料除去効果を加工動力の観点から明らかにする。

2. 電解研削方法および条件

図1に円筒研削盤を用いた電解研削装置の概略を示す。実験は円筒ブラシ方式で行った。研削砥石には導電性を有するメタルボンドダイヤモンド砥石を用い、工作物とともに取付け穴の内面および側面の絶縁材によって供給電流の不要な部分へのリークを防止した。なお、砥石表面には各実験前に立形ロータリドレッサを用いて所定のツルーイングならびにドレッシングを施した⁵⁾。電源には直流電源を使用し、陽極である工作物に

Fig. 1 Experimental apparatus for electrolytic grinding

はブラシを、陰極である砥石にはロータリコネクタを介して所定の電圧を印加した。電解液には硝酸カリウム (KNO_3) の水溶液を用い、研削点に確実に供給されるように巻付けノズル⁶⁾を使用した。主な加工条件は以下のとおりである。

研削砥石: SD170N125M-3.0

工 作 物: SK3 ($\phi 100 \times 10\text{mm}$, 非熱処理)

砥石周速度: $V_s = 1979 \text{ m/min}$

速 度 比: $K_v = V_w/V_s = 0.00943$ (V_w : 工作物周速度)

設定砥石切込み量: $\Delta = 0.5 \mu\text{m/rev of workpiece}$

研削系剛性⁴⁾: $k_{sy} = 11.14 \text{ N/\mu m}$

電 解 液: 硝酸カリウム (KNO_3) 水溶液

電解液濃度: $C_e = 2 \sim 10\text{wt.}$

印 加 電 圧: $E = 5 \sim 15\text{V(DC)}$

研削抵抗は工作物支持センタに貼り付けたひずみゲージにより、工作物の寸法生成量は電気マイクロメータにより、また直流電源から供給される電流はクランプメータにより検出し、それぞれパーソナルコンピュータに出力した。加工面の表面粗さは触針式粗さ計で、さらに光沢度計を用いて加工面の光沢度を測定した。

* 原稿受付 平成 12 年 3 月 2 日

** 正 会 員 岡山大学工学部 (岡山市津島中 3-1-1)

*** 学生会員 岡山大学大学院 (岡山市津島中 3-1-1)

† 学生会員 岡山大学大学院 (現, (株)ノーリツ 明石市二見町南二見 5)

Fig. 2 Variations of normal force, stock removal and electric current in plunge electrolytic grinding process

Fig. 3 SEM photographs of electrolytic ground surface

3. 円筒プランジ電解研削過程

図2に電解液濃度10%, 印加電圧10Vで円筒プランジ電解研削する場合の1つの研削サイクルにおける砥石台移動量 $d(t)$, 研削背分力 $p(t)$, 寸法生成量 $R(t)$ および砥石と工作物間の電流 $I(t)$ の変化過程を示す。研削背分力および寸法生成量ともに過渡、定常、スパークアウト研削過程において、電解を伴わない通常のプランジ研削加工の場合⁴⁾とほぼ同様に变化するが、電解作用を伴うため砥石と工作物の干涉開始と同時に寸法が生成され始める。砥石と工作物間の電流は砥石の干涉開始時点において約25Aであるが、研削の進行とともに変動を伴いながら徐々に増大し、定常研削状態に達するとかなり広い領域にわたって大きく変動するようになる。ここで砥石台の切込みを停止しスパークアウト研削過程に移行すると、電流の変動は急速に減少し、電解の進行によって砥石と工作物との間隙が徐々に広がるため電流は徐々に減少するものの電流の供給が続くため、電解作用によって寸法生成量は徐々に増加し砥石の切込み量を上回る。以上のことから、本報では主に定常研削状態における材料除去特性について検討する。

4. 電解研削面性状

Fig. 4 Effects of concentration of electrolyte and applied voltage on surface roughness

Fig. 5 Relationships between surface roughness and gloss on electrolytic ground surface

図3に6%の電解液で異なる印加電圧で電解研削した場合ならびに電解液濃度 $C_e=10\%$ 、印加電圧 $E=15V$ で電解研削した定常研削状態における電解研削面をSEMで観察した結果を示す。 $C_e=6\%$ では印加電圧が小さい場合は通常の研削面とほとんど同様であるが、印加電圧が大きくなり、電解作用が大きくなるに従って電解によって材料が溶出した痕跡が明瞭に現れ、砥粒の干涉による条痕が徐々に消滅する。さらに大きな電解作用が現れる $C_e=10\%$ 、 $E=15V$ の加工面には砥粒の干涉痕が確認されず、加工面全体が電解によって生成された面になる。これは、砥粒切れ刃が工作物表面に干涉した後に結合剤表面との強い電解作用によって電解溶出がなされるためである¹⁾。

図4は、電解液濃度 C_e ならびに印加電圧 E が定常研削状態における電解研削面の粗さ $(Ra)_s$ に及ぼす影響を示すものである。電解研削面粗さは電解液濃度が高くなるに従って、また大きい印加電圧で加工するほど改善され、特に比較的大きな印加電圧の場合にその傾向が顕著になる。このような電解条件による表面粗さの変化は、図3に示した電解研削面の観察結果からわかるように電解液濃度ならびに印加電圧が大きくなるほど電解作用により研削条痕の凸部が顕著に除去されるためである。

一般に、電解研削面は図3に示したように陽極酸化膜に覆われ、通常の研削面のような金属光沢は得られない。そこで、図4に示した各定常電解研削面の光沢度 G_s と表面粗さ Ra との関係を図5に示す。なお、光沢度はJIS Z 8741⁷⁾を基に研削方向に沿って加工面に対して 20° および 60° の方向から光を照射した値である。光沢度は一般に仕上面粗さには現れない表面の極めて微細な性状によって決定される。電解作用が強まり表面粗さが約 $0.5\mu mRa$ まで減少するに従って、電解研削面の光沢度は

Fig. 6 Variations of electric current and normal force in electrolytic grinding process at 5V and 15V in applied voltage

徐々に減少するが、更に電解作用が強まり表面粗さが小さくなると光沢度は逆に徐々に大きくなり、電解の効果が小さい約 $0.7\mu\text{mRa}$ の電解研削面とはほぼ同様な光沢度になる。このような表面粗さに対する光沢度の変化は、図3に示したように電解液濃度および印加電圧が小さく電解作用が比較的弱い場合に個々の研削条痕の表面には細かい斑状の陽極酸化膜が生成されるが、電解液濃度および印加電圧の大きい条件では研削条痕が確認されず、陽極酸化膜の表面が細かい斑状から滑らかな表面に変化するためである。以上から、図に示すプロット点の順序が電解作用の強さを表徴すると考えられ、 $C_e=10\%$ 、 $E=10\text{V}$ を境に2つの異なる形態によって表面が創成されることがわかる。

5. 材料除去特性の検討

5.1 電解研削過程における電解溶出電流

図6は、6%の電解液を用いて5Vおよび15Vの電圧を印加させて円筒プランジ電解研削する場合の電源電流 $I(t)$ および研削背分力 $p(t)$ の過渡から定常状態における変化過程である。印加電圧が5Vの場合は、図2でも述べたように砥石と工作物の接触開始から電流は急増し、激しい変動を伴いながら約55Aに収束する。一方、印加電圧が15Vの場合は砥石と工作物の接触開始時点において電流はすでに55A程度であり、若干の変動を伴って定常状態では印加電圧が5Vの場合とほぼ同様な値の電流になる。電解研削に要する電流は、一般に電源から供給される電流値として検出され評価される。したがって、図に示す2つの条件で電解研削する場合、定常状態ではほぼ同等の電流であり、その値からはあたかも同様な電解効果が生じていると解釈される。しかし、図に示す研削背分力は定常研削状態において印加電圧が15Vの場合のほぼ1/10に過ぎない。したがって、計測された電源電流が同等でも加工条件によって電解効果が異なることがわかる。

次に、この現象を解明するために、材料除去の観点から電解効果を検討する。砥石と工作物の干渉点近傍では接触剛性などによるかつぎ現象⁴⁾が存在するため、このかつぎ現象による電

Fig. 7 Relationships between electrolytic gap and electric current in electrolytic grinding process

解作用への影響を考慮しなければならない。そこで、砥石と工作物が接触する前から砥石と工作物が接触し定常研削状態に移行するまでの工作物表面と砥石の結合剤表面との間隙 g_e に対する電流 $I(t)$ の変化過程を図7に示す。なお、横軸である g_e は研削加工において必然的に発生するかつぎ現象⁴⁾を考慮すると次式で表すことができる。

$$g_e = \bar{h}_r - \{d(t) - R(t) - d_o(t) - d_1(t)\} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{h}_r$ は平均砥粒突出量、 $d(t)$ は砥石と工作物との接触位置からの砥石台移動量、 $R(t)$ は寸法生成量、 $d_o(t)$ は砥石摩耗量⁴⁾、 $d_1(t)$ は砥石軸および工作物支持部の弾性変位量⁴⁾である。したがって、砥石が工作物に干渉するまでと干渉後の各過程において g_e は次式によって求められる。

$$g_e = \bar{h}_r - d(t) \quad (d(t) \leq 0) \quad (2)$$

$$g_e = \bar{h}_r - \{d(t) - R(t) - d_o(t) - d_1(t)\} = \bar{h}_r - d_r(t) \quad (d(t) > 0) \quad (3)$$

ここで、 $d_r(t)$ は砥石と工作物の接触剛性ならびに表面粗さに起因する切残し量⁴⁾である。なお、ドレッシングした砥石表面において砥粒の突出量は平均砥粒径の約1/3であることが確認されたことから $\bar{h}_r$ を $32.2\mu\text{m}$ とする。図のように、砥石が工作物に干渉する $g_e=32.2\mu\text{m}$ までは間隙 g_e の減少に従って電流は徐々に増加し、その増加割合は印加電圧が高いほど大きい。しかし、砥石と工作物が接触し材料除去が始まると g_e の減少に伴って電流は急激に大きくなり、定常研削状態では印加電圧にかかわらずほぼ55Aに達する。このような傾向は印加電圧が小さいほど顕著である。この結果を図6に示した電流の変動から考慮すると、印加電圧が小さい場合は電解作用が微弱であるため、砥粒切れ刃によって生成された切りくずが結合剤表面との間隙を小さくすることによる放電現象²⁾あるいは切りくずを介した短絡が瞬時に発生していることが考えられる。一方、高い印加電圧の場合は激しい電解作用によって短絡などの現象が生じていないことが予測される。したがって、砥石と工作物が接触した後の電源電流からは電解作用による材料除去量を求めることは不可能である。そこで、図3に示した加工面の観察結果では表面に放電痕がほとんど観察されないことから、電流の供給による材料除去効果は主に電解作用であるとし、砥石が干渉した後の電解溶出電流を特定する。

一般に、電解速度 $\dot{R}_e$ と間隙 g_e との関係はファラデーの法則に基づいて次式¹⁾で与えられる。

$$\dot{R}_e = \frac{\eta M \kappa (E - \Delta E)}{n F \gamma g_e} \quad (4)$$

Fig. 8 Electrolytic current in electric current spent in electrolytic grinding process

Fig. 10 Relationships between electrolytic current and electrolytic removal rate

Fig. 9 Effects of concentration of electrolyte and applied voltage on electrolytic current

Fig. 11 Effects of concentration of electrolyte and applied voltage on electrolytic removal ratio

ここで、 M は原子量、 E は印加電圧、 ΔE は各種要因による電圧低下量⁹⁾、 F はファラデー定数、 η は電解効率、 κ は電解液の比電導度、 n は原子価である。

また、ファラデーの法則から電解速度 $\dot{R}_e$ と電解電流 I_e との関係は次式で表される。

$$\dot{R}_e = \frac{\eta M I_e}{n F \gamma} \quad (5)$$

したがって、式(4)と(5)から間隙 g_e と電解電流 I_e は次の反比例の関係を持つ。

$$I_e = \frac{\kappa(E - \Delta E)}{F g_e} \quad (6)$$

砥石が工作物と接触するまでは電解作用のみによって材料除去が進行するので、 $g_e \leq 32.2 \mu\text{m}$ における g_e と $I(t)$ との関係から式(6)に基づいて砥石が接触した後の電解に要される電流の変化を求めると図中の破線で表される。破線で示す電解溶出電流と電源電流を比較すれば、印加電圧が15Vの場合は砥石と工作物が干渉した後もほぼ破線に沿って増加するものの、印加電圧が小さい場合は砥石干渉後に電源電流は破線を外れ急激に大きくなる。この両者の差が切りくずを介した工作物と結合剤表面との短絡などに起因する材料除去にはほとんど関与しない電流であり、印加電圧が減少することに伴う電解作用の軽減に伴ってこの電流は増加する傾向にある。このことはこれまでに示した加工表面の観察結果ならびに研削抵抗の変化過程からも裏付けられる。

これまでに述べた工作物と結合剤表面の間隙と電解電流との関係から、電解研削過程における電解電流の変化を検討する。図8は、電解液濃度6%、印加電圧10Vで電解研削する場合の

電流の変化過程を示すものである。電流 $I(t)$ は砥石が工作物表面に近づくにつれて徐々に増加し、砥石の接触とともに変動を伴いながら破線で示すように急激に大きくなり約50Aになると定常状態になる。ここに図6の関係から得られる電解電流 I_e の変化過程を表すと図中の実線のようになり、砥石が工作物に接触した以降も I_e は緩やかに増加し、定常状態では $I(t)$ のおよそ60%までにしか達しない。

図9に定常研削状態における電解電流 I_{es} に及ぼす印加電圧ならびに電解液濃度の影響を示す。図のように、印加電圧および電解液濃度が大きくなるに従って I_{es} は大きくなり、電解効果が高くなる。しかし、印加電圧が小さい場合の電解電流は僅かで、図5に示した $C_e=6\%$ 、 $E=5\text{V}$ の場合は約50Aの電流の内、電解電流は僅か3A程度にしか充たない。

5.2 電解作用による材料除去効果

次に、電解研削による材料除去過程における電解作用の効果を検討する。そこでまず、砥石と工作物が接触していない状態で求めた電解電流 I_e と電解溶出速度 $\dot{R}_e$ との関係を図10に示す。電流が約6Aまでは電解作用がほとんど認められないが、それより電流が大きくなると電解溶出速度は直線的に増大する。この関係と図9に示した電解電流を基に求めた電解溶出速度 $(\dot{R}_e)_s$ が定常研削状態における寸法生成速度 $\dot{R}_s$ に占める割合 $(\dot{R}_e)_s/\dot{R}_s$ と電解条件との関係を図11に示す。 $(\dot{R}_e)_s/\dot{R}_s$ は、図9に示した電解電流と同様に印加電圧ならびに電解液濃度に影響され、最も電解効果が高い $C_e=10\%$ 、 $E=15\text{V}$ の条件では除去される材料のほとんどが電解によって除去される。一方、 $E=5\text{V}$ の場合は電解による材料除去はほとんどなされず、印加電圧によって電解効果が大きく異なることがわかる。また、電解液濃度が高い

Fig. 12 Relationships between normal grinding force and ground removal rate or electrolytic one

ほど印加電圧による電解効果の変化は大きい。

以上の結果を基に、電解研削による材料除去性能を検討する。図12は、定常研削状態における砥粒切れ刃の干渉による機械的な材料除去速度 $(\dot{R}_g)_s$ および電解溶出速度 $(\dot{R}_e)_s$ と定常研削背分力 p_s との関係を示すものである。なお図中の小さいプロット点は、図に示したそれぞれの条件で電解研削する場合の過渡研削状態における $\dot{R}_g$ と研削背分力 $p(t)$ の変化過程を示す。電解作用が弱まり $(\dot{R}_g)_s$ が大きくなるに従って定常研削背分力 p_s は大きくなる傾向にあるが、 $(\dot{R}_g)_s$ が約 $0.2\mu\text{m/rev}$ 以下になる電解研削状態の $(\dot{R}_g)_s$ と p_s との関係は、 $(\dot{R}_g)_s$ が大きい状態における両者の関係の延長線上にはなく、 $(\dot{R}_g)_s$ の減少とともに p_s はかなり小さくなる傾向にあり、 $(\dot{R}_g)_s$ が約 $0.2\mu\text{m/rev}$ になる $C_e=10\%$ 、 $E=10\text{V}$ を境界として材料除去特性が大きく異なる。また、過渡研削過程における $\dot{R}_g$ に対する $p(t)$ の関係は、おおむね定常状態における両者の関係に沿って変化するが、定常研削状態で $(\dot{R}_g)_s$ が $0.2\mu\text{m/rev}$ より大きくなる $C_e=6\%$ 、 $E=5, 7.5\text{V}$ の場合では、電解研削初期の $\dot{R}_g$ が小さい状態では $p(t)$ はそれほど小さくならない。すなわち、定常研削状態において $(\dot{R}_g)_s$ が約 $0.2\mu\text{m/rev}$ 以下すなわち $(\dot{R}_e)_s$ がおおよそ $0.3\mu\text{m/rev}$ 以上になる条件では砥石に作用する負荷が急激に軽減される。このことは図4に示した加工面の光沢度の変化にも現れており、 $(\dot{R}_g)_s$ が境界である約 $0.2\mu\text{m/rev}$ になる条件すなわち $C_e=10\%$ 、 $E=10\text{V}$ を境として、それより電解作用が一層強まる条件では光沢度は大きくなる。

6. 加工動力から考慮した材料除去特性

電解研削では、電解作用と砥粒切れ刃による研削作用の重量によって材料除去がなされる。したがって、材料除去能力を総合的に検討するには電解作用も含めた加工動力を考慮する必要がある。

図13は、定常研削状態における砥石と工作物間の電流から求めた電力と研削動力の和である総消費動力 U_s に及ぼす電解条件の影響を示すものである。また図14は、電解溶出電流から求めた電解電力と研削動力との和、すなわち切りくずによる短絡などのため電解に要されない電力を総消費動力 U_s から除いた有効動力 U_e が総消費動力に占める割合 U_e/U_s について電解条件による影響を示すものである。総消費動力は電解液濃度および印加電圧が大きくなるに従っておおむね減少する傾向にある。このことは、電解液濃度および印加電圧が大きくなること

Fig. 13 Effects of concentration of electrolyte and applied voltage on total consumed energy in electrolytic grinding

Fig. 14 Effects of concentration of electrolyte and applied voltage on effective energy ratio in electrolytic grinding

によって電解作用が強まり研削抵抗が減少する結果である。しかし、総消費動力に占める有効動力の割合 U_e/U_s は印加電圧が 7V 程度で最も小さくなる。すなわち、充分大きな電解効果が得られない条件では、切りくずを介した結合剤表面との短絡あるいは放電によって必要以上に電力が消耗され、材料除去効率の低下をもたらすことがわかる。したがって、 U_e/U_s が小さい電解条件では材料除去に要する動力はこれまで評価の対象とされてきた消費動力 U_s よりもかなり小さくなる。以上のことから、比較的低い電解液濃度あるいは比較的小さい印加電圧でそれほど大きな電解作用が生じない場合は、供給電力が材料除去に有効に変換されない。

7. 結 言

円筒プランジ電解研削過程における材料除去現象を電解作用および研削作用の観点から検討し、電解条件による材料除去特性の変化を明らかにした。本報で得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 電解液濃度ならびに印加電圧が比較的低い条件で電解研削する場合は電解作用が小さいため、生成される切りくずを介

した結合剤表面と工作物との瞬時の短絡などによって電流は電解研削の進行とともに大幅に上昇し、定常研削状態では電解液濃度および印加電圧が大きい場合と同程度になる。

- (2) 砥石のかつき現象を考慮し、電解研削過程において砥石と工作物間に流れる電流から工作物の電解溶出に要される電流を抽出した。その電解溶出電流は砥石と工作物間で測定される電流を下回り、電解液濃度および印加電圧が小さいほど両者の差は大きい。
- (3) 電解液濃度および印加電圧が大きくなると電解作用が一層強まる境界条件が存在し、それより高い電解作用が生じる条件では、比研削抵抗が一段と小さくなり、砥石への負荷がかなり軽減される。
- (4) 電解研削に要する総動力は電解液濃度および印加電圧が大きくなるに従って小さくなるが、印加電圧が7V程度では電解に要されない電流が増加し、動力損失が大きくなる。したがって、加工動力の観点からは大きな電解作用を誘発する条件で電解研削することが有効である。
- (5) (3)の境界条件まで電解作用が強まるに従って加工面粗さは

は小さくなり加工面の光沢度は減少するが、更に電解作用が強まると加工面粗さは更に改善されるものの光沢度は一転して向上する。

参 考 文 献

- 1) 小野浩二, 島宗 勉, 山本輝久: 電解研削に関する研究 (第1報) —電解平面研削機構について, 精密機械, 45, 3 (1979) 322.
- 2) 小野浩二, 島宗 勉, 餅田正秋, 平山 忍: 電解研削に関する研究 (第2報) —適正加工条件の選定, 精密機械, 48, 3 (1982) 354.
- 3) 長谷川嘉雄, 花崎伸作, 峠 陸, 山本立春: 高送り電解研削に関する研究, 精密工学会誌, 52, 7 (1986) 1236.
- 4) 岡村健二郎, 中島利勝: 研削の過渡特性 (第1報) —かつき現象の解明, 精密機械, 38, 7 (1972) 580.
- 5) 東江真一, 海野邦昭, 篠崎 襄: ダイヤモンドホイールのドレッシングに関する研究—縦形ロータリドレッサの試作, 昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会論文集 (1987) 925.
- 6) 研削点に研削油剤を供給させる巻付けノズル, 機械技術, 40, 9 (1992) 66.
- 7) 日本規格協会: 鏡面光沢度—測定方法 JIS Z 8741 (1997) 1.
- 8) 高橋正雄, 増子 昇: 工業電解の化学, アグネ (1979) 15.
- 9) 久保田 護: 難削材料の電解放電研削, 精密機械, 50, 3 (1984) 520.