電解砥粒加工の研究 (第 2 報)*

—超硬合金の電解ラッピングにおける極大加工速度—

久 保 田 護**

Study on Electrolytic Abrasive Machining (2nd Report)
 —On the Local Maximum Removal Rate of Electrolytic
 Carbide Alloy Lapping—

Mamoru KUBOTA

Cemented carbide alloys (WC-Co, WC-TiC-Co) are electrolytically lapped in pretty high removal rate which is unproportional to electric current flowed. In relatively low voltage range (about 3 V, current density 5 A/cm²) stock removal rate is 0.04g/A min and in high voltage range the rate gets down to 0.013g/A min so that a local maximum value is found out. In order to make clear this phenomenon, influences of working conditions on removal rates are investigated. High work pressure, high grinding ability of abrasives, high Co content of alloy make the local maximum rate higher. Surface roughness finished and lapping force, which is 25~30% of normal force, have also maximum value in the same range. Electronmicroscopic structures of alloy surfaces electrolytically lapped suggest the surface layer is weekend electrochemically.

Stock removal rate of electrolytic lapping is shown in the following equation.

$$W = W_E + W_M \\ = kI + W_M (G, Q)$$

W : stock removal rate of electrolytic lapping

W_E : electrolytic stock removal rate

W_M : mechanical stock removal rate

I : electric current effectively flowed

k : coefficient given from Faraday's law and current efficiency

G : grinding ability factor of abrasives

Q : quality factor of carbide work

1. 緒 言

電解ラッピングは、電解液に混入した遊離砥粒と導電ラップを工具とし、工作物を陽極、ラップを陰極にして通電し、電解作用と機械作用を併用する加工法である¹⁾。この方法を用いると、電解研削に近い加工速度と仕上面あらさで、超硬合金を加工できる。このさい加工速度は、電流を高めると大になるけれども、単調に増大するのではなく、極間電圧 3 V 前後で極大値を持つことが多い。

この極大値までは、通電による加工速度の増大率が 0.04g/Amin であり、電流密度が高い区域では、これが 1/3 に下がって、ふつうの電解研削²⁾の比電解量 0.013g/Amin と同じになる。

この極大加工速度を利用すれば、低電圧低電流でも比較的高能率の加工ができる³⁾。また電極間にはげしい放電のおこるおそれがないので、電源装置が簡単なものでもすむ。そのうえ作業者にとって不快なガスを発生しないから、換気装置を必要としない。

以上の利点があるから電解ラッピングでは、電流密度を上げて加工速度を高める方向とは別に、極大加工速度を利用する方法が考えられる。

本報では、極大加工速度の成因を明らかにするため、加工条件の変化に伴う極大値の変化、これに対応する仕上面あらさとラッピング抵抗の変化を実験的に求め、仕上面を電子顕微鏡で調べ、超硬合金の電解ラッピングの加工機構を考察した。

2. 実験装置

* 昭和39年度精機学会秋季大会学術講演会にて一部発表

** 正会員 茨城大学工学部

図1 電解ラッピングの実験装置

実験に用いた電解ラッピング装置は、前報¹⁾と同様で(図1)、軟鋼円板を工具(ラップ)として旋盤で回転させ、工作物を平行2枚板ばねで押し付けた。ラップには幅1.5mm、深さ1mmのみぞを3mmおきに半径方向に切っている。工作物は超硬合金 G1, G2, G3, S2 で加工面積 11×4 mm のものを主に用いた。加工液は NaNO_3 , NaNO_2 , NaF の各5%混合水溶液 400cc に 320メシュまたは 400メシュの砥粒 100g を加えたもので、円板の回転によって加工部に供給される。工具の回転速度は10m/s、工作物の押付力は $440 \sim 500$ g ($1 \sim 1.1$ kg/cm²) に選んだ。

ラッピング抵抗を測定するため、試料取付部を平行2枚板ばねで支持し、この板にストレイン・ゲージをはりつけ、ストレイン・メータの出力と極間電圧を二現象の自動平衡式記録計で記録した。この記録に現われない高周波の現象を調べるため、ペンオシロとシンクロスコープを併用した。

電源には三相全波シリコン整流器を用い、電極電圧の微細な変化を調べるときには蓄電池を使用した。

3. 加工条件が極大加工速度に与える影響の実験結果

超硬合金の電解ラッピングで加工条件を変えると、これに伴って極大加工速度が変化する。一般に、通電しない加工速度が高いときほど、極大加工速度も高くなる。この例を以下に示す。

3.1 加工圧力の影響

加工面積 11×8 mm の G2 を 0.5kg と 1kg の力で押し付けたとき、加工速度と電流の関係の曲線は、いずれも極大値を持つ(図2)。ただし押付力が大きいと、通電しない加工速度、極大加工速度、最大加工速度がみな高くなる。これは圧力の増加によって、砥粒の機械的切削

量ならびに電解生成物の除去能力が高まるからである。最大加工速度より先では、電極間の抵抗が増し、電圧が急に上がり、強い放電が起こって、正常の加工ができない。

単位面積あたりの押付力を一定の 1.1 kg/cm² に保ち、加工面積を 11×4 mm から 11×8 mm に倍増させたとき、電流密度 A/cm² と加工速度 mm/min の関係は、まったく同様であり、特別な面積効果は見られない(図3)。

いずれの場合も、加工速度は電圧3Vで極大になり、4Vで極小になる。

電圧が3Vを越えると電極間のガス発生は盛んになり、電極の間から火花が飛び出す。

座標原点と最大加工速度を結ぶ直線の傾きは、いずれも 0.013 g/Amin に相当する。

3.2 工作物の材質の影響

前報¹⁾で述べたように、同じ WC-Co 系超硬合金であっても、Co 含有量が6%の G2 と 24%の GTi50 では、加工速度に大きな差がある。GTi50 では、通電によ

×: 押付力 0.5kg, ○: 押付力 1kg, 工作物 G2, 加工面積 11×4 mm, #320C 砥粒

図2 加工圧力を変えたときの加工速度、電流、電圧の関係

○: 加工面積 11×4 mm, ×: 11×8 mm, 工作物 G2, #320C 砥粒, 押付力 1.1 kg/cm²

図3 加工面積を変えたときの加工速度、電流密度、電圧の関係

加工面積 11×4 mm 320 C砥粒, 押付力0.5kg
図4 工作物の材質を変えたときの加工速度と電流の関係

工作物 G2, 加工面積 11×4 mm, 押付力0.5kg
図5 砥粒の種類を変えたときの加工速度と電流の関係

×: 新砥粒, ○: 古砥粒, 工作物 S2, 加工面積 11×4 mm, # 320 C砥粒, 押付力0.5kg
図6 砥粒の損耗が加工速度と電流電圧の関係に与える影響

る加工速度の増大率が大きく、電流と加工速度の関係は直線的で、極大値は認められなかった。

Co 5% の G1 は、G2 に似た極大加工速度を持つ (図4)。Co 7% の G3 は、極大値と極小値の差が少なく、G2 の曲線と GTi50 の曲線の中間の形になる。このようになるわけは、Co 量が多いと、超硬合金そのものが削りやすくなる上に、WC 粒の相互結合が弱くなってる

ため、結合剤である Co が WC より先に溶出したとき、表層がずっと弱くなって、いっそう削りやすくなるからであろう。

軟鋼やステンレス鋼 SUS27 のように、組織が電気化学的性質の点でほぼ均質な金属合金では、電流と加工速度の関係が直線になり、極大値はみられない。またこのときは、高電流域でも低電流域でも仕上面あらさに大差がなく、超硬合金の仕上面よりあらかった。

軟鋼とステンレスで直線の傾きが異なるわけは、軟鋼は2価で溶けステンレスは3価で溶けるという説⁵⁾で説明される。

3.3 砥粒の種類の影響

A 砥粒, C 砥粒, ボロンカーバイドで G2 を加工した速度と電流の関係を図5に示す。これは、前報にあげた S2 の場合と同じ傾向であって、低電流域では、超硬合金に対する研削能力の高い砥粒を用いたときのほうが加工速度が大きい。高電流域では、いずれも同じ値に近づく。

ボロンカーバイドは、高電流域で加熱分解しやすく、電極の表面に溶着するので、加工が不安定になりやすい。A 砥粒の場合は、電極の間から飛び出す火花が小さく、加工速度と電流の関係の曲線は、直線部が長い。この直線の傾きも 0.013 g/Amin に相当する。

3.4 砥粒の損耗の影響

新しい砥粒は、粒がそろっており、角が鋭い。加工中に砥粒の一部は破碎して微粉になり、残りは角が丸みを帯びてくる。これに伴って、同じ電流値でも加工速度は低下し、極大加工速度も下がる。

新しい砥粒を用いたときの電流電圧と S2 の加工速度の関係に対し、同じ砥粒を30分使い古したのちの関係は、曲線の形は同様だけれども、加工速度が全般的に下がり、極大値は約20%低下する。大電流域の加工速度は近接している。このさい、同じ電流値を得るため必要な極間電圧は低くなる。

工作物 G2, # 400 C砥粒, 押付力0.5kg, 加工面積 11×4 mm
図7 仕上面あらさと電流密度と加工速度の関係

a. 焼結したままのG2

#320C 砥粒, 押付力 1 kg/cm^2 , ラップ速度 10 m/s
b. 通電しないラッピング面

c. 電流密度 5 A/cm^2 , 電圧 2.7 V の電解ラッピング面, 砥粒のすじのある部分 d. 電流密度 5 A/cm^2 , 電圧 2.7 V , 砥粒のすじのない部分 e. 電流密度 10 A/cm^2 , 電圧 3.7 V f. 電流密度 20 A/cm^2 , 電圧 5.5 V g. 電流密度 30 A/cm^2 , 電圧 6.8 V h. 電流密度 40 A/cm^2 , 電圧 13 V

図8 電子顕微鏡写真

加工速度が低下するのは、砥粒の機械的研削能力が下がるためであり、極間電圧が下がるのは、砥粒径が減少するので、砥粒でささえられる電極の間隙が狭くなり、電気抵抗が小さくなるためと考えられる。

4. 電流密度による加工面あらさの変化

400 メッシュの C 砥粒を用い、電流密度を変えて G 2 を加工した面のあらさを、小坂式 SD 5 形仕上面検査機で求めた。また場所によるあらさのばらつきを調べるため SE 形仕上面検査機を併用した。

図 7 のように、電流密度 5 A/cm^2 までは、あらさが大になる。はっきりしたすじが加工面に見られ、合金の表層が機械的に削り取られていることがわかる。 5 A/cm^2 から先では、あらさが下がり始める。 20 A/cm^2 以上では、あらさがほぼ一定で、ラッピング方向のすじは、ごくわずかになる。この加工状態における C 砥粒は、合金の表層を削り取る能力をほとんど持たないようである。削り取る能力を持たない範囲は、加工速度と電流密度の関係の曲線の直線部に対応し、あらさが最大になる電流密度は、極大加工速度に対応している。

5. 加工面の電子顕微鏡観察

電解ラッピングした G2 の表面から、クロムシャドウのカーボンレプリカをとり、電子顕微鏡で観察した。焼結したままの試料 (図 8 a) は、真空加熱の結果、Co が気化し、WC の粒子が露出している。通電しないラッピングでは (図 8 b)、合金面に砥粒のつけたすじがある。ただしダイヤモンド研削のような微細なすじはない。極大加工速度に相当する 5 A/cm^2 のときは、砥粒のつけたすじが一部に存在し (図 8 c)、他の部分では WC 粒が露出している (図 8 d)。結合剤の Co は溶出して表層が弱くなり、WC の溶出はあまり進行せず、砥粒の研削能力は高く、合金面は機械的な力の作用でくずれながら除去されるようである。 10 A/cm^2 のときは、露出した WC 粒の表面が電気化学的に溶解している (図 8 e)。このときは電流の多くの部分が WC の溶出に費されていると思われる。 20 A/cm^2 では WC 粒の頂部がならされて平らになり始め (図 8 f) 30 A/cm^2 では、平らな部分がひろがり (図 8 g) 強く押し付けて電解研削した面⁶⁾と同様になる。 40 A/cm^2 では WC の粒界が見られなくなり、極間抵抗の高いことからして、酸化膜の存在が推測される (図 8 h)。

このように、電解ラッピングした超硬合金の表面の組織は、電流密度の変化、すなわち電圧の変化に伴って変わり、電圧その他の加工条件によって加工機構が変化することを示している。

工作物 G2, 加工面積 $11 \times 4 \text{ mm}$, #320 C 砥粒

図 9 押付力とラッピング抵抗の関係

a 低電圧加工, 通電すると抵抗が上がる
b 高電圧加工, 通電すると抵抗が下がる

図 10 ラッピング抵抗の通電による変化

工作物 G2, 加工面積 $11 \times 4 \text{ mm}$, #320 C 砥粒,
ラップ速度 10 m/s , 押付力 1 kg/cm^2

図 11 抵抗係数と電流密度と電圧の関係

6. 電解ラッピング抵抗

加工面に作用しラップの運動に抵抗する力をラッピング抵抗と考える。この力は押付力に対して直線的に変化し、摩擦抵抗に似ているけれども、座標の原点を通ることはない (図 9)。

通電によるラッピング抵抗の変化の記録例を図10に示す。電圧が低いときは、通電によってラッピング抵抗が増大し、高いときは反対に低下する。

ラッピング抵抗 T と押付力 N の比 T/N は、摩擦係数に似ているので、抵抗係数と呼ぶことにする。抵抗係数と電流密度と電圧の関係の例を図11に示す。このときは電流密度 5 A/cm^2 、電圧 4 V でラッピング抵抗は極大値を持ち、それからさき電流とともに低下している。

極大値までは砥粒の切れ刃の食い込む量が増すため抵抗が増大するのであり、高電流域では、電極間に発生する気体と電解生成物がクッションになることと、砥粒の角が燃焼して鋭さを失ない、合金に食い込む深さの減ることが、ラッピング抵抗を減少させる原因と思われる。

抵抗係数 T/N はラップの周速によって変化し、 10 m/s で 0.27 の場合、 1 m/s では 0.37 になり、 20 m/s では 0.25 に下がる。

7. 極大加工速度の成因

実験結果に基づいて、極大加工速度が得られるわけを考える。

図12において、OAは機械的ラッピングによる加工速度であり、これはラップの周速、押付圧力、被加工材に

対する砥粒の研削能力によって定まる。

AB線上では、超硬合金の結合剤である Co が電気化学的に WC より卑であるため、優先的に溶出し、表層が粗になり、機械的性質の劣化した合金表層を砥粒が削り落すので、電解作用で溶出する量よりも多い合金が削り取られる。その結果、加工速度は電流の増加につれて急増する。このときは少量の電解溶出と多量の機械的除去が併存し、仕上面はあらい。

極間電圧が $2 \sim 3 \text{ V}$ になると、電極間にガスが発生し、約 3 V から先では火花が飛び出し、電圧の上昇につれてはげしくなる。WC は発生ガスによって酸化されながら除去される。電解による除去量は電流につれて増大するが、砥粒は電解生成物をこするので、合金の表層を機械的に削り取る量は減少する。電圧電流がさらに上がると、砥粒は加熱され、一部は燃焼し、被削材を削り取る能力は低下する。機械的加工量はさらに下がり、D 点で實際上なくなる。

DE 線上では、電解生成物を砥粒が機械的に除去するだけで、合金の表層を削り取る能力はない。E 点になると、電解生成物だけでも除去しきれなくなり、電極間の抵抗は急増し、電流は減ろうとする。電流を維持するため電圧をさらに上げると、はげしい放電が発生し、工作物に溶融痕ができる。限界の電圧は合金の種類と加工条件によって異なるが、G 2 は約 8 V 、S 2 は約 10 V である。

原点 O からこの曲線に引いた接線 ODE は、電解による除去量を示し、その傾きは G 2 の場合 0.013 g/Amin 、S 2 のとき 0.0125 g/Amin で、電解研削の比電解量と一致する。

直線 OE と曲線との開きを縦座標、電流または電圧を横座標にとった曲線は、電流または電圧による機械加工速度の変化を示す。

8. 電解ラッピングの加工速度

電解ラッピングの加工速度 W は、つぎのように考えられる。

$$W = W_E + W_M$$

W_E は電気化学的除去速度

$$W_E = kI$$

$$I = I_0 - (I' + I'' + I''')$$

I_0 : 全電流

I : 工具、電解液、工作物を通り電解作用をする有効な電流。

I' : 工具、放電柱、工作物を通る電流

I'' : 工具と工作物の接触部を通る電流

I''' : 工具、砥粒、工作物の接触部を通る電流

正常な電解ラッピングの状態では、 I' 、 I'' 、 I''' は

図12 電解ラッピング速度の説明図

I にくらべて小さく、無視できる。

k の値は、電流密度の変化に伴って電解機構が変化すると変わりうるが、極間電圧 2~4 V のピーカ・テストの結果から判断すると、おおむね一定と考えられる。

W_M は機械的除去速度であって、砥粒の研削性能 G と工作物の被研削性 Q で定まる。

$$W = kI + W_M (G, Q)$$

G は砥粒群の工作物に対する運動と切れ刃の数および性質で定まる。これには工具 (ラップ) の材質、形、速度、圧力、砥粒の粒度、濃度、性質および加工間隙の状態によるこれらの変化が影響する。

Q は工作物の機械的性質と、電解によって表層が弱くなる程度、および電解生成物の性質で定まる。超硬合金では、Co 含有量が多いと、電解によって弱くなりやすい。

電解作用は工作物の表層を弱くして機械的除去量を増大させ、機械作用は電解生成物を除去して電解作用を助ける。

W_E は電流とほぼ直線関係にある。 W_M は、 G 、 Q の関数として変化し最大値を持つ。したがって W は極大値を持つ。

9. 結 論

電解ラッピングにおける極大加工速度の成因を明らかにするため、加工条件が極大加工速度に与える影響を調べ、仕上面あらさとラッピング抵抗を測定し、電子顕微鏡で仕上面を観察した。これらの結果から、つぎのよう

- (1) 電解ラッピングの加工速度は、工作物が電気化学作用を受けて反応生成物になる電解加工速度と、砥粒が表層を削り取る機械加工速度の和になる。
- (2) 電解加工速度は、電極間を有効に流れる電流に比例し、 G 2 のとき 0.013g/Amin, S 2 のとき 0.0125 g/Amin である。
- (2) 機械加工速度は加工条件によって変化する。超硬合金の表層は電解によって弱くなるので、加工速度

は電流の増大につれてまず上昇する。極間電圧が 3 V を越えると、砥粒が合金の表層を削り取る能力は下がり、機械加工量は低下する。その結果、機械加工速度は最大値を持つ。したがって、電解ラッピング速度は極大値を持つ。

- (4) 加工速度が極大になると、仕上面あらさもラッピング抵抗も最大になる。これは砥粒が合金面に深く切り込んでいることを示す。
- (5) 極大加工速度で仕上げた面を電子顕微鏡で見ると、WC 粒が角ばったまま露出しており、砥粒の作用で WC 粒が脱落すると思われる。電流密度がこれより高い区域では、WC 粒が溶解し、角が丸みを帯び、表面が平らになっている。

本研究にあたって御助言をいただいた東京大学倉藤尚雄先生、東北大学佐藤健児先生はじめ放電加工研究会の方々と、実験に協力された鈴木紘氏および日本電子原宿展示場の方々に厚く感謝します。

(1965, 9 月 25 日受付)

参 考 文 献

- 1) 久保田護：電解砥粒加工の研究 (第 1 報)，超硬合金の電解ラッピング，精密機械，31 巻 3 号 (1965) 234.
- 2) 佐藤健児：超硬合金の電解研削に関する研究 (第 1 報)，電解液 NaNO_3 および NaNO_2 の場合の電解反応，精密機械，30 巻 2 号 (1964) 217.
- 3) 久保田護，鈴木紘：超硬合金の電解ラッピングの研究，茨城大学工学部研究集報，12 巻 (1965) 97.
- 4) H. ラインハルト：ダイヤモンド研削砥石による超硬質金属の電解加工，マシニスト，6 巻 8 号 (1962, 8 月) 42.
- 5) 伊藤祐光，近藤邦夫，林俊雄：電解加工法の研究 (第 4 報)，極間電圧リサージュ図形，精機学会昭和 39 年度秋季大会学術講演会，昭和 39 年 10 月 2 日.
- 6) 古野知祐：電解研削機の応用と問題点，機械と工具，7 巻 9 号 (1963, 8 月) 20.