電 解 砥 粒 加 工 の 研 究 (第 1 報)*

——超硬合金の電解ラッピング——

久 保 田 護**

Study on Electrolytic Abrasive Machining (1st Report)

——Electrolytic Lapping of Cemented Carbide——

Mamoru KUBOTA

A new process of hard metal working called electrolytic lapping was studied. A rotating mild steel plate lap was connected to the negative pole of D.C. source and work pieces of cemented carbide were to the positive. Abrasives suspended in electrolyte were thrown on the lap surface by its own rotation. Experimental results obtained are as follows.

(1) The surface roughness finished is $1\mu H_{\max}$ and edge roundness is 0.05 mm in the following condition: lap speed 9.3 m/sec; work pressure 1 kg/cm²; electrolyte NaNO₃ 5%+NaNO₂ 5%+NaF 5% mixed water solution; abrasives 320 mesh SiC; mix ratio 0.25 g/cc; current density 30 A/cm².

(2) When the carbide alloys containing 6% Co (G2K, S2) are worked, stock removal rates are not proportional to the electric currents and have a maximum and a minimum. In the maximum point stock removal rate is 0.04 g/A min and in the range of relatively high current density (over 20 A/cm²) it becomes 0.013 g/A min, which is similar to the rate of common electrolytic grinding.

(3) Tool wear was 45% of lost carbide alloys in volume through the whole experiments, and in the optimum condition it may be about 20%.

1. 緒 言

難削金属材料を加工するため電解加工と砥粒加工を併用した加工法を一括して電解砥粒加工と呼ぶことにする。この加工法は砥粒加工の分類からして、9種類考えられる¹⁾。そのうち電解研削は研究が最も進んでおり、超硬バイトの研削などに実用されている。いまこの電解研削において、メタルボンド砥石の結合度を弱めていったとすると、極限では、遊離砥粒と金属円板電極による加工、すなわち電解ラッピングになる。

もし電解液に懸濁させた砥粒がラップと工作物の間に入り込んで両電極の短絡を防ぎ、かつ電解生成物を電極間から機械的に除去するなら、高価なダイヤモンド砥石を用いずに鉄鋼のラップとA砥粒やC砥粒で電解研削に似た加工ができるはずである。

筆者はこの考えによる電解ラッピングの可能性を確かめるため、簡単な装置を自作し、超硬合金の最適加工条件を見いだすことを試みた。

今まで電解ラッピングは、貴金属の顕微鏡試料の研究²⁾や難削金属試料の作成³⁾に使われているけれども、研削に近い加工速度を得た報告は一例しか見当らず⁴⁾、しかもその詳細は不明である。

一般に電解ラッピングの加工条件には、ラップの材質、形状、工作物との相対運動の速さと方向、工作物の材質、形状、面積、電解液の成分、液のかけ方、濃度、温度、粘性、老化度、金属くず混入率、砥粒の品種、粒度、混入率、破碎度、押付圧力、振動の有無、電圧電流およびその波形など数多くの条件が含まれ、これらが相互に関係するので、加工条件は多種多様になる。

本報では、上記条件のいくつかを予備実験に基づいて選定した範囲での最適圧力、砥粒濃度、電流電圧と加工速度、仕上面の性質、工具の消耗について得た結果を報告する。

2. 実 験 装 置

加工装置(図1)の本体は4尺旋盤で、外径290 mmのラップ円板を垂直面内で回転させる。ラップ面のふれは静的測定で 10μ 以下になるように仕上げた。ラップ

* 昭和39年度精機学会春季大会学術講演会にて発表

** 正会員 茨城大学工学部

図 1 電解ラッピングの実験装置

図 2 装置の略図

にはプラスチックの透明カバーをかけてある。カバー底部に入れた 400 cc の電解液と砥粒はラップでかき回わされ、砥粒の懸濁した状態で外周にはね飛ばされる。この液はカバー内のそらせ板にあたってラップの中心部に流下し、ラップ面に沿ってひろがり、薄膜となって加工部にかかる (図 2)。

工作物は断面 11×4 mm の超合金トリディア G2K (WC 94%, Co 6%), S2 (WC 80%, TiC 14%, Co 6%), ダイヤチタニット GTi50 (WC 76%, Co 24%) で、平行 2 枚板ばねを用いた加圧装置 (図 3) の先端に取りつけた。押付圧力 (ばねのたわみ、ダイヤルゲージで指示される) を一定に保つよう旋盤の工具台を手送りし、1 分間の送り量を別のダイヤルゲージで読んで加工速度を求めた。また加工前後に化学てんびんとマイクロメータで重量と長さを測定してダイヤルゲージの読みと照合した。

直流電源には 3 相全波整流のシリコン整流器 (30V, 100A) または鉛蓄電池 (6V, 12A) を使い、炭素板可変抵抗と炭素ブラシとスリッリングをへてラップに電圧をかけた。電極間の電圧と電流を可動コイル形の直流電圧計と電流計で読んだほか、シンクロスコープで波形

図 3 ラップと加圧装置

を観察した。

3. 加工条件の選定

3.1 ラップ

ラップ材には軟鋼 ($H_R B71$) を用いた。研削したままの円板 (ラップ) と、幅 1.5 mm, 深さ 1 mm のみぞを半径方向に 164 本つけた円板で加工結果を比較したところ、みぞをつけたほうが加工がはやく安定していたので、以後の実験にはすべてみぞつき円板を用いた。ラップの回転数は 750 rpm に選定した。このとき加工部の周速は 9.3 m/sec になる。回転数がこれより遅いと液が薄膜にならないため工作物のエッジが不規則な形に腐食し、速すぎると砥粒懸濁液の飛散を防ぐのがむずかしくなる。

3.2 電解液

NaNO_3 , NaNO_2 , NaF の各 5% 混合水溶液を用いた。 NaNO_3 は超合金の電解研削によく用いられており^{5),6)}, NaNO_2 は装置の防食を兼ね、 NaF は WO_3 を溶解させ電解を促進する目的で加えた⁷⁾。 NaF の鉄鋼に対する腐食性は、 NaNO_3 と同程度であって、 NaCl のようにはげしくはなく、人体に対しても無害のようである。

3.3 砥粒

A 砥粒, C 砥粒, ボロンカーバイドを試験した。ボロンカーバイドは機械的研削量が最も多いけれど、高電流密度域 (10 A/cm^2 以上) では燃焼による消耗が著しく、ラップ面に溶着して加工を不安定にする。A 砥粒は燃焼しないので、電流密度の高い場合に適するが、機械的研削量は少ない。C 砥粒は低電流密度域で機械的研削量が多く、高電流域でも安定で、 80 A/cm^2 までの電流密度が得られた (#400 の砥粒で S2 を加工する場合)。粒度を変えて #100, #180, #240, #320, #400, #600 の C 砥粒を試験したところ、#100 では液中に砥粒が懸濁せず、砥粒と液が分離したままなので、この装置のような横軸の加工機では使えない。#180 の砥粒は、だいたい

懸濁するが、場所によって砥粒濃度に差が現われる。
#240, #320, #400 の砥粒はほぼ同様な成績で加工できる。
#600 では両電極が短絡しやすい。一時的短絡が起こると、電流の無効分が増し、したがって加工速度は急に下がる。短絡しない範囲なら、砥粒が細かいほど仕上面はよく、流せる電流は大になる。

3.4 砥粒混入率

電流 10A (22.5 A/cm^2), 押付力 300 g (0.7 kg/cm^2) のとき、電解液 400 cc に対して #320 C 砥粒を加えた重量で計算した混入率と加工速度の関係を図 4 に示す。
トリディア G2K と S2 は混入率を変えても加工速度に変化なく、極間電圧は G2K のとき 6.5V から 7.5V までは、S2 では 6V から 9V まですでに上がる。この加工条件における砥粒は G2K と S2 に対して機械的研削能力を持たず、両電極をへだてるスペーサになってるだけなので、加工速度は電解電流だけで決まってしまう、砥粒濃度を増しても変わらないと考えられる。砥粒濃度を増せば電解液の割合が減るから、電極間の電気抵抗は増し、一定の電流を流すのに必要な極間電圧は上がる。

図 4 砥粒混入率と加工速度の関係

図 5 押付圧力と加工速度と極間電圧の関係

したがってこの場合は、砥粒の消耗を考えないなら、電解液 1 cc に対して砥粒 0.1 g の割合で十分である。ダイヤモンド GTi50 は 0.25 g/cc で加工速度が最大になる。これは GTi50 の Co 含有量が多く (24%) WC 粒がたがいに結合してないため、電気化学的に WC より卑な Co が先に溶出して表面層が軟弱化し、砥粒の切れ刃一つの機械的研削量が多くなるので、砥粒数の増大につれて加工速度が増すと解される。濃度が 0.25 g/cc を越えると、工作物の上に砥粒が積み重なり、極間に入る電解液の量が減り、間隙内の砥粒の動きも悪くなって、加工速度が下がるようである。

3.5 最適押付圧力

押付圧力と加工速度と極間電圧の関係を図 5 に示す。このときの加工条件 (電流 10A, #320 C 砥粒 0.25 g/cc) では 1 kg/cm^2 が最適圧力である。低すぎる圧力では、陽極膜が十分に除去されないで極間抵抗が大きく、高すぎる圧力では、電解液を通らない電流の割合が増し、電解にあずかる電流が少なくなって加工速度が低下すると思われる。 1.5 kg/cm^2 以上の圧力では、工作物とラップが金属接触しやすい。

4. 実験結果

4.1 電流電圧と加工速度の関係

C 砥粒で電解ラッピングすると、G2K (図 6) と S2 (図 7) では 3V, 2A (4.5 A/cm^2) において加工速度に極大値がある。極大点までは通電による加工速度の増大率が 0.04 g/A min で、超硬合金の電解研削の比電解量 0.013 g/A min の 3 倍になる。同じ電解液と超硬チップを用いたピーカテストでは極大が現われず、低電圧低電流でも比電解量は 0.013 g/A min 程度なものと電極間に放電火花が見え始める電圧は約 3V, ピーカテ

図 6 Co 6% の WC-Co 合金 (G2K) の電解ラッピングにおける電流と電圧と加工速度の関係
#320, C 砥粒, 0.25 g/cc , 1 kg/cm^2

図 7 Co 6% の WC-TiC-Co 合金 (S2) の電解ラッピングにおける電流と電圧と加工速度の関係
320, C 砥粒, 0.25 g/cc, 1 kg/cm²

図 8 Co 24% の WC-Co 合金 (GTi 50) の電解ラッピングにおける電流と電圧と加工速度の関係
320, C 砥粒, 0.25 g/cc, 1 kg/cm²

ストによるガス発生開始電圧は 2.1V であることからして、3V までは電解によって弱くなった合金表面層を砥粒が深く研削し、3V 以上では発生機の酸素と火花放電の中で砥粒が燃焼して機械的研削能力を失い、いっぽう陽極膜の量は増えるので、金属地まで研削しなくなるのが極大値のできる原因と思われる。GTi 50 (図 8) は極大値を示さずに 0.033 g/A min の割合で加工される。

図 9 電流と加工速度の曲線の砥粒による変化
S2, # 320, 0.25 g/cc, 1 kg/cm²

図 10 極間電圧の変動

G2K, # 240, C 砥粒, 1 kg/cm², 5V, 10A,
下は 500 サイクルの正弦波

ただし脱落金属粒子が極間に入って加工を不安定にしやすい。

砥粒を変えて S2 を加工したときの電流と加工速度の関係を図 9 に示す。機械的研削能力の高いボロンカーバイドは C 砥粒より山が大きくなり、A 砥粒は山が小さくて直線に近くなる。A 砥粒のさいの直線部の傾きは 0.0125 g/A min すなわち電解研削の比電解量と同じになる。

加工中の極間電圧の波形の一例を図 10 に示す。電圧の微細な振動は砥粒が細かいほど少ない。

4.2 仕上面

加工速度と電流の曲線の極小点より左では、仕上面に砥粒の条痕が深く、 H_{max} 8 μ に達し、極小点より右では、約 1 μ になる。G2K はすじのついた半光沢面になり、S2 で 50 A/cm² 以上の面は方向性がなくもっている。GTi 50 は条痕が深い。仕上面の顕微鏡写真を図 11 に、小坂式 SD 5 形仕上面検査機によるあらさ曲線を図 12 に示す。一般に電解ラッピング面は電解研削面に類似し、砥粒による条痕がやや多い。

4.3 エッジの丸みと変形

図11 仕上面の顕微鏡写真

G2K, #400, C砥粒, a: 0A, b: 20A

曲 線	工 作 物	砥 粒	電流密度 (A/cm ²)	あらさ $H_{max}(\mu)$
A	G2K	#320, C	0	7
B	G2K	"	36	1
C	S2	"	55	0.7
D	GTi 50	"	14	4

図12 仕上面あらさ

切削工具の研摩に電解ラッピングを用いるにはエッジの丸み半径が0.1mm以下でなければならない。ラップの回転速度と液のかけ方に注意するなら、丸み半径を0.08mm以下にでき、0.01mm程度のも得られる。ただし大電流域ではエッジから0.1~0.2mm離れたところにみぞができやすい。

4.4 工具の消耗

平面研削しておいたラップを約5時間使用したのち、ミニメータでラップの断面曲線を求め、工具の消耗量を計算した。電極面のくぼみ深さ0.14mm、くぼみの全体積1260mm³である。この間に断面4×11mmのチップを長さで64mm、体積で2830mm³削ったから、ラップの体積消耗比は45%である。実際には大きなラップで小さい工作物を研削したので、工具の直線消耗比は

0.22%にすぎない。このデータは種々の加工条件で使用した全体の結果であるから、大電流密度で加工したときの消耗比はこの半分のはずである。電極の成形は容易であり、その形が工作物に転写されるから、超硬合金の総形研削に用いる可能性がある。

5. 電解ラッピングの機構

実験中に観察された現象から電解ラッピングの機構を定性的に考える。

回転する電解ラップ面に垂直に一定圧力で工作物を押し付けておき、砥粒を懸濁させた電解液をラップにかけると、ラップに付着した液はラップの回転につれて工作物との間に押し込まれ、工作物は浮き上がってラップ面から離れる。この間隙に砥粒が液といっしょに入り込み、両電極の金属接触を絶つ。砥粒はころがり運動とすべり運動をしながら間隙を動き、一部は破砕し、高電流密度(10 A/cm²以上)では放電による加熱と摩擦熱の作用で高温になり、発生機の酸素のもとで燃焼し研削能力を失う。電解反応で生ずるラップ上の陰極膜と工作物上の陽極膜は、砥粒によって除去され、新しい金属面がつつぎに露出するので、電解研削に近い大電流密度が得られる。超硬合金の表面層は電解によって弱くなるので、砥粒の研削能力が失われない低電流密度域では、電流の増大に伴って機械的研削量が増し、0.04 g/A minの能率が得られる。

こうして電解ラッピングでは、陽極溶解と機械的研削が同時に行なわれ、前者はふつうの電解研削と同様である。後者は工作物と加工条件によって変化し、極大値を持ち得る。

6. 結 論

- 1) 回転円板と遊離砥粒を用いる電解ラッピングによって超硬合金を加工し電解研削に近い結果を得られる加工条件を見いだした。すなわち砥粒の粒度 #240~400, 電解液への混入率 0.1~0.25 g/cc, 押付圧力 0.8~1.2 kg/cm², 電流密度 10~80 A/cm² である。
- 2) G2K と S2 を電解ラッピングするとき電流と加工速度の関係は直線にならず、極大値と極小値を持つ。極大加工速度は電圧 3V の付近で得られ、ここまでは約 0.04 g/A min の加工能率を示し、電解研削の比電解量の 3 倍になる。GTi50 は極大値を持たず 0.033 g/A min の加工能率になる。
- 3) 仕上面あらさは H_{max} 1 μ , エッジの丸み半径 0.05 mm 程度である。
- 4) 工具の成形が容易で消耗比は体積で 20% 程度だけ

ら、総形研削に用いる可能性がある。

5) 電解ラッピングにおける加工機構と電極間の砥粒の挙動を推定した。

本研究のため試料を提供された三菱金属鉱業株式会社と実験に協力された鈴木紘 (茨城大), 近藤曠史 (石川島播磨, 当時学生), 竹内敏彦 (松下電器, 当時学生) の三氏に厚く感謝します。

(1964, 9 月 1 日受付)

参 考 文 献

- 1) 久保田護: 電解砥粒加工法について, 砥粒加工, 1 巻 4 号 (1964, 9 月).
- 2) G. Reinacher: Metallographische Präparation von Edelmetallproben durch elektrolytisches

Wischpolieren. Z. Metallkde, Heft 4 (1957) 162.

- 3) エム・ベ・ブロンヒン, エヌ・エヌ・シャバノフ: 金属試料の電解ラッピング装置, 機械と工具, 8 巻 2 号 (1964, 2 月) 95~96.
- 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 年 8 月) 42.
- 5) 倉藤尚雄, 霜弘太郎: 電解研削の研究, 精機学会昭和36年度秋季大会学術講演会, 昭和36年11月26日.
- 6) 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.
- 7) Вероман В. Ю.: Электроалмазная обработка твердого сплава. Станки и инструмент (1963) 25.