



T. Shimizu

精密プレス加工用超硬合金の耐摩耗性改質

清水 友治*

1. 緒言

超硬合金の加工には、放電加工法がよく使われる。特に、複雑な三次元曲面を持つような金型を加工する場合は、放電加工が唯一の加工法であると言える。放電加工とは、液中（油または水）のわずかな隙間（数 μm 〜数十 μm ）における過度アーク放電（0.1 μs 〜数ms）による熱作用と、加工液体の気化爆発作用により形成された放電痕の累積によって、希望する所定の形状を加工する加工法である。

放電加工法は大きく分類すれば、特定形状の電極を用いて、電極と反対形状を加工する形彫放電加工と、直径が0.2mm程度のワイヤを巻き取りながら、加工物をあらかじめプログラムした形状に駆動制御して加工を行うワイヤ放電加工に分類される。放電加工のメリットは、電極とワークが狭い極間距離を隔てた現物合わせ加工なため、雄雌型の適合が良いことや、電導性のあるものであれば、材料の硬度に無関係に加工できる、そして、細くて深い加工や、狭くて深い加工が容易であり、加工形状の自由度が高いなどである。デメリットとして、加工表面あるいはその下層に、母材と異なった性質を持つ加工変質層（以後、変質層と略す）を作ってしまうことである。放電加工の放電点の温度は、アークの脚の温度なので、放電点付近はその材料の沸点になっていると考えられる。したがって、溶解したワークは飛散されて消失するが、融点近傍の表面と残留したワークは、放電終了後、加工液によって急冷され、クラックや割れが生じる恐れがある。金型の表面性状は、製品の精度や寿命にかかわるため、そのような変質層を除去するのが一般的である。

変質層の厚さは、材質や加工条件、仕上げ粗さによって異なるが、数 μm から100 μm 以上にもなる場合もある^[1]。金型製造における除去（みがき）作業は主に手作業によって行われ、全工程に占める割合は15〜45%とも言われており、この工程の効率化が求められている。よって、金型を効率的に研磨する技術に関する研究も数多い^[2,3,4]。変質層は、基本的に不要の産物であるが、合金工具鋼材を油中で型彫放電加工した場合、油の炭素成分が加工表面に浸炭することで、母材より優れた機械

的特性を持つことがあることから、変質層を有効に利用する例もある^[5]。しかし、これは鋼の場合であって、母材の性質に大きく左右される物である。

超硬合金の変質層については、基本的に良くない機械特性を示すことが多く、変質層を積極的に利用することはなかった。しかし、変質層の摩耗試験によって、耐摩耗性を示す可能性が得られ、の詳細を知ることは重要である。

そこで本論文では、超硬合金に放電加工したときに生じる加工変質層の摩擦摩耗実験を行い、その耐摩耗性を検討する。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

本研究で使用した摩耗試験装置の様式を図1に示す。この装置は、ブロックオンシリンダ型の摩擦試験機である。シリンダ試験片を旋盤に取り付け回転させ、円筒面にブロック試験片を押し付け摩擦させる仕組みになっている。ブロック試験片にかかる荷重と摩擦力は、リング型のロードセルにより出力され、アンプとA/D変換ボードを介してPCに記録される。荷重はPCによりフィードバックされ、D/A変換ボードから出力された電圧をアンプで増幅しサーボモータを作動させ、一定荷重となるように制御した。また、摩擦速度は、旋盤のチャック横に取り付けたフォトセンサにより検出される回転数と、シリンダ試験片の直径からすべり速度を算出し、旋盤の変速機構により、所定の速度になるよう手動で調節した。

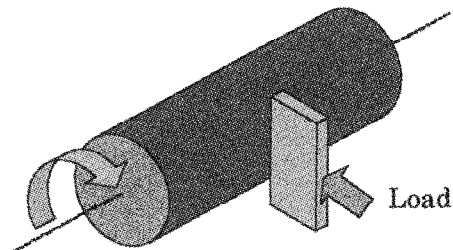


図1 ブロックオンシリンダタイプ摩耗試験

2.2 試験片の準備

シリンダ試験片は、炭素鋼 (JIS S45C, 初期直径 50mm) を用意し、摩擦表面を一定にするために、試験前に回転数 1000rpm, 切込み 0.5mm, 送り 0.1mm で旋削した。シリンダ試験片の表面粗さは、円周方向で Rz (最大高さ粗さ) = 2~3 μm, 軸方向に Rz = 5~6 μm だった。

図 2 にブロック試験片の形状を示す。ブロック試験片には超硬合金 (榊小林工業製 G2: WC-8wt. %Co, 公称粒径 2 μm) を用意した。一般的な手順で焼結し、最後に HIP 処理をした材料で、硬さはおよそ HV2000 だった。上部が摩擦面で、長手方向に滑らせた。

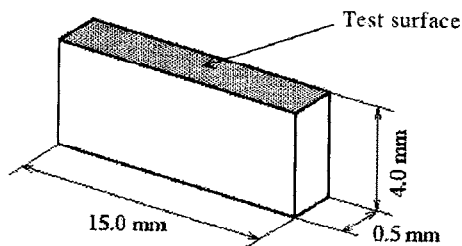


図 2 ブロック試験片

試験片作製の際、摩擦部分だけに表 1 の条件で放電加工を行った。放電加工法の種類としては、ワイヤカット放電加工法 (以後 W.C. と呼ぶ) と型彫放電加工法 (以後, D.S. と呼ぶ) を採用した。W.C. は三菱電機の SX-20P を使用し、加工液がイオン交換処理をした水道水 (比抵抗 100k Ω) で、電極は黄銅製 φ0.25 (沖電気製 P タイプ, Cu:Zn = 65:35) のワイヤを使用した。また、交流により加工を行った。表 1 の A1~A4 はそれぞれ 1 番カット~4 番カットに対応している。1 番カットとは一番初めに行う粗加工であり、2 番カット以降は、すでにカットしてある面を、微小なクリアランスで沿わせることで、仕上げの表面粗さを小さくする目的で行われる。一方、D.S. は牧野フライスの MAKINO43 を使用し、加工液は灯油 (第 3 石油類, 引火点 70℃以上) で、電極には CuW (イースタン技研製 CT300, Cu:W = 30:70) を使用した。電極の極性

表 1 ブロック試験片の放電加工条件

Designation	EDM	Roughness (Ry) [μm]		Working speed
		Setting value	Actual value	
A1	Wire-cut	16 - 18	19.41	1.8 - 2.6 [mm/min]
A2	Wire-cut	11 - 13	9.82	6 - 7
A3	Wire-cut	3 - 5	3.64	6 - 7
A4	Wire-cut	0.8 - 1.2	0.84	6 - 7
B1	Die-sinking	14	14.92	0.11 [g/min]
B2	Die-sinking	9.8	9.51	0.02
B3	Die-sinking	5.5	8.02	0.0034
B4	Die-sinking	1.2	1.87	0.00026

はマイナスである。表 1 には各加工法の仕上げ面粗さの設定値と測定値を、また、加工速度 (D.S. では単位時間当たり加工量) も示した。設定値の仕上げ表面粗さにするには、電極の送り速度や電流、放電時間などを細かく設定する必要があるが、今回は、仕上げ粗さと加工回数を指定しただけで、これら以外の条件は、各放電加工機で標準の最適条件とした。放電加工後は、加工変質層の影響を見る目的から、放電加工面をダイヤモンド砥石 #500, 切込み 2~3 μm で研削した。研削量は表面から、それぞれ 0, 5, 10, 15, 30, 50 μm とした。

2.3 実験方法

実験条件は、実際のプレス加工の加工条件を考慮し、すべり速度 232mm/s, 総すべり距離 800m とした。ただし、押し付け荷重は 100N とした。摩擦を明確に把握するために、無潤滑で実験を行った。

試験前後の試験片の観察には SEM, 元素分析には EPMA を使用した。試験片の硬さの測定にはビッカース硬さ計を使用した。摩耗量は三次元粗さ計により測定した摩耗痕の表面トレースから、算出した。比摩耗量も、単位距離および単位荷重あたりの摩耗量と定義する。

3 放電加工面の観察

代表として A1 試験片の放電加工された超硬合金試験片の断面を SEM 観察したものを図 3 に示す。この断面の EPMA 分析を行った。この結果から、超硬合金の放電加工面の断面は、点線で 3 つに分けることができる。(a) 部は加工表面にあたるが、この部分では Cu と Zn が検出されることから、電極が溶着したものであると言える。(b) 部と (c) 部は、ともに W が検出されることから、超硬合金の WC 粒子であると考えられるが、(b) 部と (c) 部とでは様子が異なる。そこで、この境界部 (点線で囲まれた

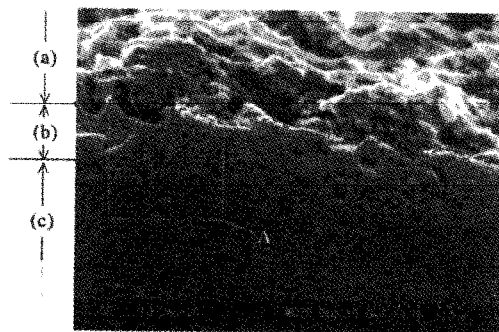


図 3 超硬合金の放電加工面の断面の SEM 写真

部分)の拡大画像と EPMA 分析した結果を図4に示す。下半分で粒子の形状がはっきり確認できるのに対し、上半分の領域では、粒子形状は認められない。これは放電による高熱により一度溶融した WC が、除去されずに再凝固したものであると考えられる。この再凝固層には、所々クラックの存在が確認できることから、機械的に劣化していると言える。よって、図3で言えば、領域(a)と領域(b)は明らかに放電加工による加工変質層である。しかし、領域(c)では見た目の変化は認められなかった。領域(a)と(b)のような、SEM や EPMA によって判断できる加工層を、以後、見かけの変質層と呼ぶことにする。

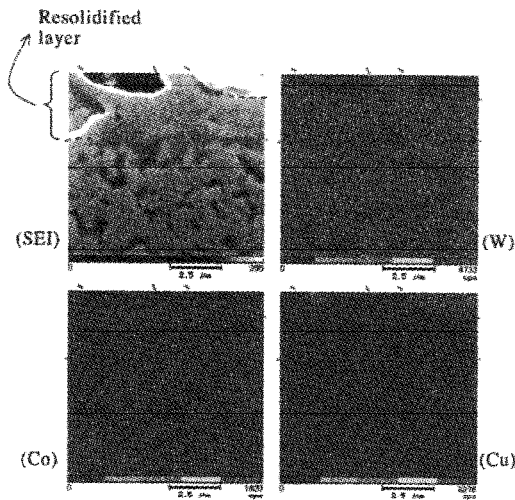


図4 拡大部のSEM写真とEPMA分析

研削後の表面の最大高さ粗さ Rz の変化を図5に示す。研削量を増やすことで表面の凹凸が除去され、最終的に凸部が全て除去されると、 $Rz=0.4\mu\text{m}$ 程度の粗さとなった。

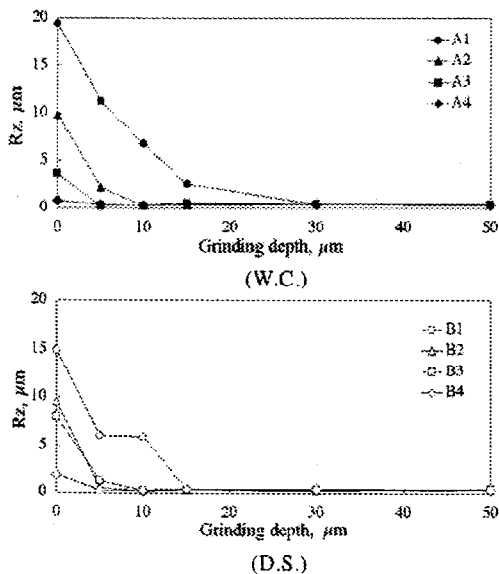


図5 研削後の表面粗さの変化

4 実験結果および考察

実験後の超硬合金の摩耗痕を三次元粗さ計により測定し、比摩耗量を算出した。その結果を図6に示す。横軸は、研削量である。W.C.ではA1以外ではほぼ同様の傾向にあり、研削量が小さいほど比摩耗量も小さいという結果になった。研削量 $0\sim 15\mu\text{m}$ でA1の値だけが高くなっているが、これは、表面粗さが大きいことも理由の一つだが、図14に示す通り、A1表面のCu成分が飛び抜けて多くなっていることから、電極材料の溶着により加工面表面の硬さが非常に小さくなったために比摩耗量が増加したと考えられる。他の試験片では研削量の少ない物ほど摩耗が減少する傾向にあった。一方、D.S.では、全ての試験片で傾向がほぼ同様となり、研削量が $10\sim 30\mu\text{m}$ で、比摩耗量の値が最低値となることがわかった。

ところで、試験片表面の研削は、表面粗さの凹凸の頂点部から指定の研削量まで行っている。図5でも示したとおり、研削量によって残存する表面粗さが異なることから、このままでは粗さの影響を受けるため、純粋に加工変質層だけの摩耗特性を評価するには、図6の比較は適当ではない。そこで、表面粗さの谷底を基準に、粗さの山部方向をマイナス、試験片内部方向をプラスとし、再プロットしたものを図7に示す。つまり、横軸は各研削量から研削前の表面粗さを引いた値である。

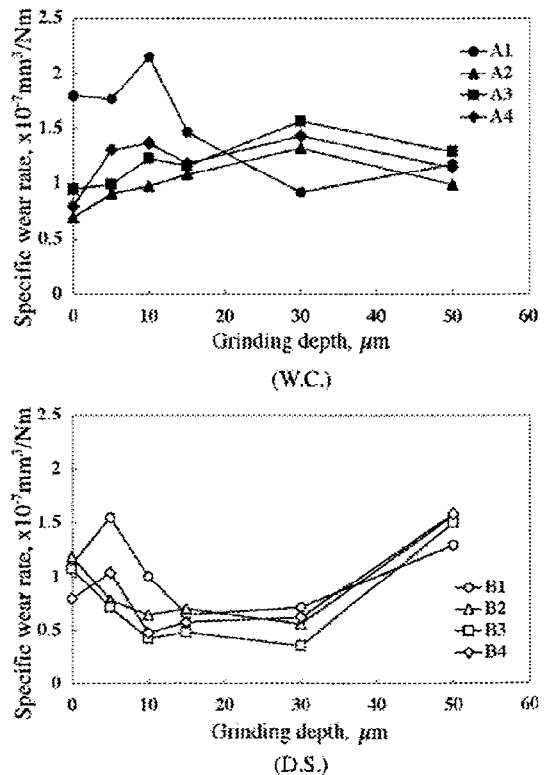


図6 摩耗実験後の研削深さと比摩耗量

よって研削量が 0 のときは粗さの分だけ負の値となり、また正の値では、粗さの影響を除いた特性を見ることができる。その結果、図 6 と比べ、図 7 の傾向の方がより明確になった。

W.C. も D.S. も母材は同じ特性であるから、図 7 から、母材の比摩耗量が、およそ $1.3 \times 10^{-7} \text{mm}^3/\text{Nm}$ であるとする、この値を基準に比較することが出来る。W.C. では、電極の溶着で加工表面が軟化した A1 を除き、 $20 \mu\text{m}$ 付近から最表面にかけて比摩耗量が減少している。その値は、一番減少した A2 で、母材の約 1/2 程度になった。一方、D.S. では全ての試験片で傾向が一致しており、およそ $-10 \sim 35$ の範囲で摩耗が減少し、一番摩耗しなかった B3 で母材の約 1/3 の比摩耗量となった。最表面では W.C. での摩耗とは逆に、増加傾向にあるが、母材の値と比べると、B1 以外は、小さい値となった。

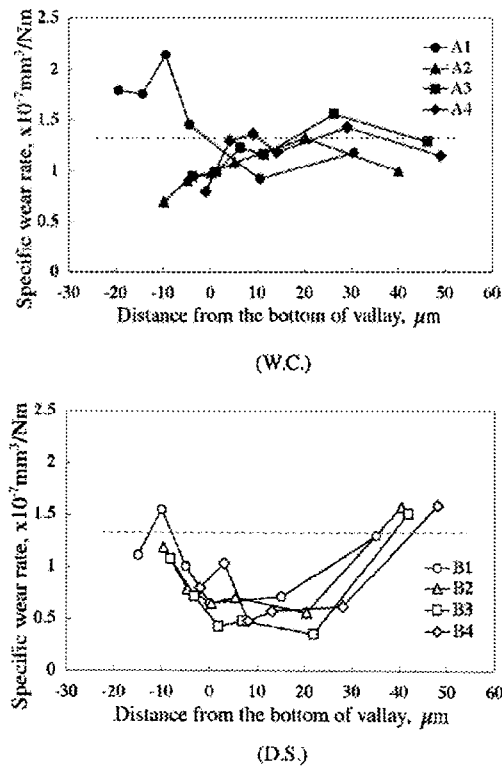


図 7 表面粗さの谷を基準とした比摩耗量の変化

図 7 の横軸 0 の値は、断面で定義した再凝固層の表面側の境と言えなくもない。SEM 画像のスケールから、その再凝固層は厚くてもせいぜい $10 \mu\text{m}$ 程度である。よって、前節で述べた見かけの変質層より、さらに深い領域までが、摩耗特性に関しての変質層であると言える。しかし、この変質層には耐摩耗性があるため、金型製作の際の研磨は、見かけの変質層(すなわち、表面粗さと再凝固層)を除去すれば十分である。例えば、粗さの大きい A1 では表面粗さ高さが約 $20 \mu\text{m}$ あり、再凝固層は

$10 \mu\text{m}$ 程度なので、合計 $30 \mu\text{m}$ 除去すれば実用性がある。実際の金型での研磨量が $100 \mu\text{m}$ であるとする、研磨工程が約 1/3 に短縮され、その上、母材以上の耐摩耗性が得られるため、非常に有用な結果であると言える。

以上の結果より、変質層では耐摩耗性を持つことがわかったが、その理由を考察する必要がある。そこで、硬さと比摩耗量の関係を求めたものを図 8 に示す。

一般に、硬さと摩耗には密接な関係があるが、A1 の電極溶着による軟化以外には傾向を読みとることは出来ない。同じ硬さを持つものでも、比摩耗量が 3 倍近く異なる場合もあり、硬さ以外の要因が関与していると思われる。また、超硬合金の摩耗メカニズムは凝着摩耗が支配的である。よって、硬さ以外に摩耗を支配するパラメータとして材料の凝着性を緩和する材料特性の変化が生じたものと思われる。

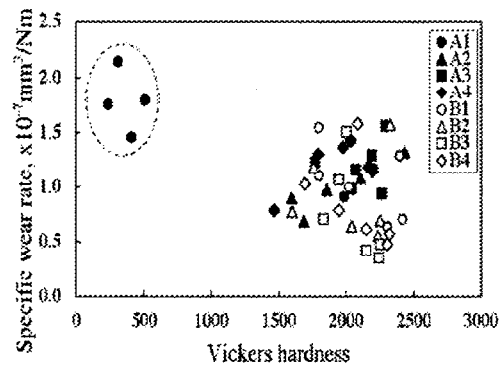


図 8 放電加工面の硬さと比摩耗量

5 結 言

超硬合金表面に各加工条件で放電加工を行い、表面下に生じた加工変質層の摩耗特性を、摩擦摩耗試験機を行うことで求めた。そして以下の結論を得た。

(1) ワイヤカット放電加工した超硬合金では、表面に近いほど摩耗しにくいことがわかった。しかし 1 番カットでは、ワイヤの材料成分である Cu の溶融により軟化層ができたため、逆に摩耗が大きくなった。型彫放電加工した試験片では、表面粗さの谷底から下層に $30 \mu\text{m}$ 程度の耐摩耗層が見られ、比摩耗量は母材に対しておよそ 1/2~1/3 であった。

(2) 放電加工による耐摩耗層を利用することで、金型製作における研磨工程の短縮化が期待できる。仕上げ面粗さが大きい加工条件の場合では、粗さと再凝固層の除去、仕上げ面粗さが小さい場合は、ほぼ粗さのみの除去で実用性があり、なおかつ母

材以上の耐摩耗性が得られる。そして、これら研磨工程は、従来に比べ、1/3以下の所要時間で済むことになる。

謝辞

本研究の一部は、天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成（AF-2000016）によって行われたこと、および岩手大学工学部岩渕明教授の指導を受け、当時岩手大学工学部附属金型技術研究センターの石川周外助手の全面的な協力を得て行われたことを記し、ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] 斉藤長男, 毛利尚武, 高鷺民生, 古谷政典: 放電加工技術, 日刊工業新聞, (1997) 52
- [2] 中田雄三, 清水友治, 岩渕明: 複合電解研磨法による金型の鏡面仕上げ, 日本機械学会'00-10 中国四国支部・九州支部合同企画徳島地方講演会講演論文集 No. 005-2 (2000) 271
- [3] 水野雅裕, 井山俊郎, 木村元, 三船英伸, 和村広見: 超音波楕円振動を利用した小型金型の磨き加工に関する研究, 砥粒工学学会誌, 43, 5 (1999) 226.
- [4] 梅原徳次: 磁性流体研磨, トライボロジスト, 41, 6 (1996) 476
- [5] 向山芳世監修: 型彫・ワイヤ放電加工マニュアル, 大河出版, (1989) 81.
- [6] 西潤一郎, 清水友治, 渡邊英輝, 岩渕明: 超硬合金の摩耗に及ぼす放電加工の影響, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集, 名古屋 1998-11 (1998) 602.
- [7] R. L. FULLMAN: Measurement of Particle Size in Opaque Bodies, J. Metals, (Mar., 1953) 447.
- [8] 鈴木壽: 超硬合金と焼結硬質材料, 丸善株式会社, (1986) 67.
- [9] K. JIA & T. E. FISCHER: Abrasion Resistance of Nanostructured and Conventional Cemented Carbides, Wear, 200 (1996) 206.
- [10] H. SAITOH, A. IWABUCHI & T. SHIMIZU: Effects of Co Content and WC Grain Size on Wear of WC Cemented Carbide, 2nd Asia Int. Conf. on Tribology, Jeju Island, Korea, Oct. 2002 (2002) 213.