

超硬合金の放電加工に関する研究

國吉 和男

上田 邦太郎*

糸村 昌祐**

1. 緒言

超硬合金は1909年アメリカのジェネラルエレクトリック社でタングステン製造の過程で発見された粉末冶金の基礎技術が始まりである。国内の粉末冶金製品の全生産量は平成7年度192,476t、その中で工具や金型用超硬合金を含む機械材料用粉末冶金製品は80,948t (42.1%) を占め素形材の重要な製品となっている¹⁾。

Coをバインダーに主成分WCを焼結し、比重が13~15で硬度がH_RA90前後の超硬合金が金型に広く使用されているが従来の金属に比べて機械加工が困難で、加工できる形状に制限があった。

一方放電加工は1960年頃から実用化が進み金型加工に広く利用されている加工方法である。原理は絶縁加工液中に工具となる電極と被加工体を数 μm から数10 μm 隔てて対向させていくと、対向面上の点の距離が最も小さいところでスパークが発生しアーク柱となって非常に電流密度の高い電子となって被加工体の一点をたたく。この部分は局所的に高温になり溶融したり蒸発したりする。この時加工液も同時に加熱され急速に気化して高圧を発生する。この圧力により溶融したり蒸発した物質は、電極と被加工体の間から排除され放電痕が生成される。この放電を数千ないしは数万回行うことで、多数の放電痕が累積され加工が進行する。これは導電性材料ならば硬度など機械的性質に関係なく加工が可能であるため、超硬合金でも自由曲面の転写加工が可能となり、近年では特に金型の加工では不可欠の技術となっている。

しかし、基本的に火花放電による熱的な溶融作用を利用しているため、放電加工後は母材と異なった組織層、すなわち溶融再凝固した変質層が形成され、そこにはマイクロクラックや発生ガスによる孔等が無数に存在するため材料の強度が低下することが知られている。従って放電加工方法の改善や加工後の研磨、表面改質など多くの課題が取り組まれている。^{2)~6)}

本研究では県内の超硬合金の金型ニーズに対応するために、超硬合金の加工方法とあわせて、放電加工による変質層とクラック及び抗折力等の検討を行った。得られた若干の知見を報告する。

2. 実験方法

2-1 供試材

供試材は超硬合金（日本タングステン株式会社、G30 J I S B 4104のV40相当品）および比較材として合金工具鋼（J I S G 4404 SKD11）を用いた。

供試材をワイヤーカット放電加工機（三菱電機DWC110SZ）を用いて4 x 10 x 20mmの寸法の試験片を作成した。

電極は断面形状10 x 10mm角の銅（Cu）電極と銅-タングステン（Cu-W）電極の2種類を使用した。

* 琉球大学工学部エネルギー機械工学科学生

* 琉球大学工学部機械システム工学科

2-2 加工条件

試験片の放電加工は以下の装置を使い、目標加工面あらさを超硬合金は14、10、5および1 μm、SKD11は15、10、6および2 μmのそれぞれ4種類の面あらさにした。

形彫放電加工機：三菱電機 M65E、電源G35

加工液：三菱石油 ダイヤモンドEDF-K

加工条件：目標加工表面あらさとその加工電気条件のEパック工程と加工深さを表1に示す。

Eパックとは回路、極性、加工電流、パルス幅、休止時間等16の電気条件を一括パックして登録したもの。標準的なパックはメーカー側から提供されていて、以後このパックされた電気条件をEパックと呼び、E****で表記する。

またEパック工程は表1から、超硬合金で目標あらさ5 μmの場合はEパックE9775で深さ300 μmまで加工し、その後E9777で深さ500 μmまで加工することを示している。

表2はEパック条件の詳細である。

(表-1) 放電加工条件一覧

試験片 材質	電極材	加工条件			
		目標あらさ μm	Eパック工程	加工深さ μm	
超硬合金	Cu及び Cu-W	14	E9775	500	電極極性 (-) ワーク側 (+)
		10	E9776	500	
		5	E9775	300	
			E9777	500	
		1	E9775	300	
			E9778	500	
SKD11	Cu	16	E9610	84	
			E9960	333	
			E9964	445	
			E9967	473	
		10	E9610	84	
			E9960	323	
			E9964	435	
			E9967	463	
		6	E9610	84	
			E9960	311	
			E9964	423	
			E9967	451	
		2	E9970	465	
			E9972	486	
			E9610	64	
			E9960	291	
			E9964	403	
			E9967	431	
			E9970	445	
			E9972	446	
		E9973	480		
		E9974	495		

(表-2) 放電加工Eパック条件一覧

目標あらさ μm	超硬合金 Cu電極、Cu-W						SKD11 Cu電極							
	14	10	14	5	14	1	荒加工			15	10	6	2	
Eパック	E9775	E9776	E9775	E9777	E9775	E9778	E9610	E9960	E9964	E9967	E9970	E9972	E9973	E9974
EP-SEL	TP	TP	TP	TP	TP	SF	SC	SC	SC	SC	SC	TP	SF	SF
POL	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
AUX	0	0	0	0	0	5	4	4	4	4	4	0	5	5
IP	8	6	8	2	8	0	5	3	2	1	1	1	0	0
ΔIP	5	5	5	5	5	0	5	5	3	5	3	2	0	0
GAP	10	10	1-	10	10	13	0	0	0	10	13	5	15	15
ON	2	1	2	1	2	0	10	8	6	5	4	2	0	0
ΔON	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OFF	4	2	4	2	4	0	10	5	5	4	4	2	0	0
ΔOFF	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0
JUMPU	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	4	4
JUMPUD	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1
PCON	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	3	1
JUMP	3	0	3	0	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1
GAIN	60	1	60	1	60	60	80	80	80	70	60	60	50	50
OPAJ	0	0	0	0	0	0	8	8	8	8	8	8	8	8
加工深さ μm	-500	-500	-300	-200	-300	-200	-84	-333	-445	-473	-477	-486	-480	-495

曲げ試験において引張力の作用する下面表層部（加工変質層、熔融再凝固層、機械加工層）の違いが抗折力に及ぼす影響を検討するため、抗折試験には形彫放電加工以外にワイヤーカット面、研削加工面、切削加工面の3種類の試験片も用いた。

- ①ワイヤーカット試験片：加工電流=17~27A、加工電圧=43~50V
ワイヤーカット装置：三菱ワイヤー放電加工機 DWC110S Z
- ②研削試験片：ワイヤーカット面をさらに乾式研削により100~200 μ mを除去した試験片
砥石：ノリタケダイヤ（株）CBN170N75BD4、径300mm
- ③切削試験片：ワイヤーカット面をさらに切削加工で100~ μ mを除去した試験片
刃物：名古屋ダイヤモンド工業（株）2枚刃エンドミル、10mm

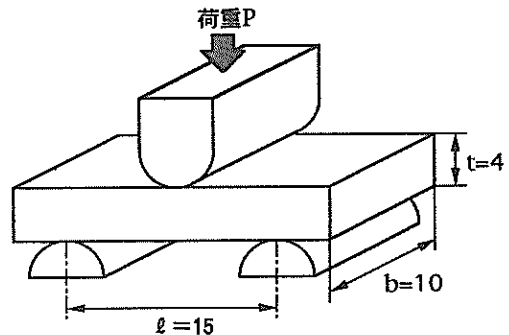
2-3 観察と測定

試験片と電極の観察と諸物理特性の測定は以下の装置を使った。

- ①表面観察：光学顕微鏡（Laica）
走査電子顕微鏡（日本電子（株））
- ②あらし測定：表面粗さ試験機（（株）ミットヨ SV-400）による最大高さあらし（Rmax）
- ③体積電極消耗率：マイクロメーターによる減量長さ（ μ m）から減量体積を計算した
- ④曲げ試験：万能試験機（島津製作所（株）オートグラフAG-50KND）
JIS B4053に準じた曲げ試験
曲げ試験治具は図1に示す寸法に作製した。支点間距離15mmの3点曲げである。
この時得られた荷重から、抗折力を次の式を用いて計算で求めた。

$$\text{抗折力 (N/mm}^2\text{)} = \frac{3 P \ell}{2 b t^2}$$

- b：試験片幅（mm）
- t：試験片の厚さ（mm）
- P：破断荷重（N）
- ℓ ：支点間距離（mm）



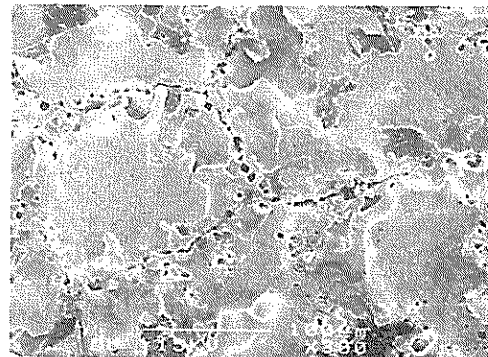
（図-1）抗折試験治具の略図

3. 結果と考察

3-1 SEMによる表面観察

写真1は超硬合金をCu-W電極で加工したときの、実測あらし17 μ m程度の表面の状況である。クレーターはWが熔融した痕跡と考えられるが、よく見ると無数のクラックと大小の孔の存在が確認できる。

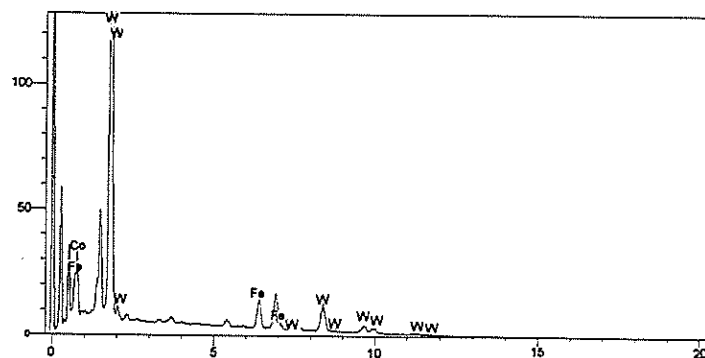
また、写真2-Aは同試験片の曲げ破壊面の表層付近のSEM写真であり、写真2-B及び2-CはEDSによる特性X線分析を行った写真である。SEM像から熔融再凝固した表層と直下の熱影響部は粒子がざくざくの状態で存在している様子がわかる。図2はEDSの



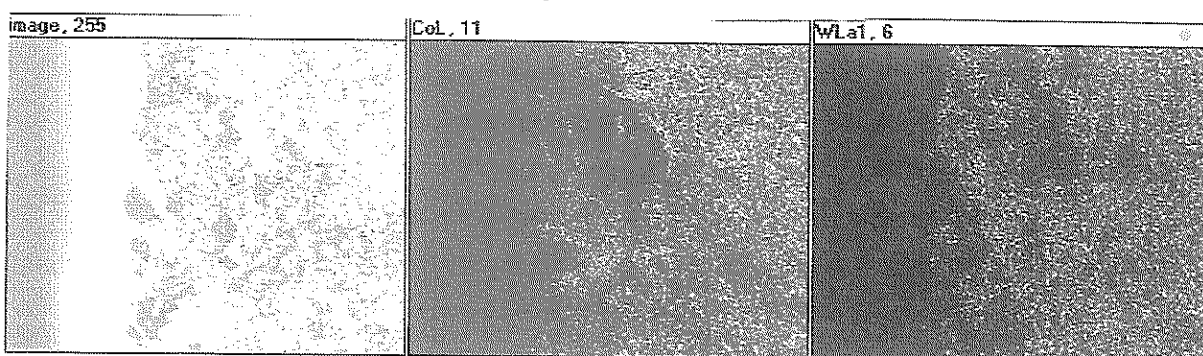
（写真-1）超硬合金の放電加工表面

X線スペクトルで、WとCo元素を確認できる。CoとWの特性X線で面分析をしたのが写真2のB、Cである。表層直下の熱影響部10~20 μm でWは存在しているが、Coは選択的に溶出していることがわかる。

これはWとバインダーのCoの融点がそれぞれ3,410 $^{\circ}\text{C}$ と1,495 $^{\circ}\text{C}$ で大きく違うため、表層部ではCoが急激に熔融蒸発して消滅し、再凝固したW層とその表層直下でバインダー-Coが消失しざくざくしたW粒子の層ができたと考えられる。



(図-2) 超硬合金破面のX線スペクトル



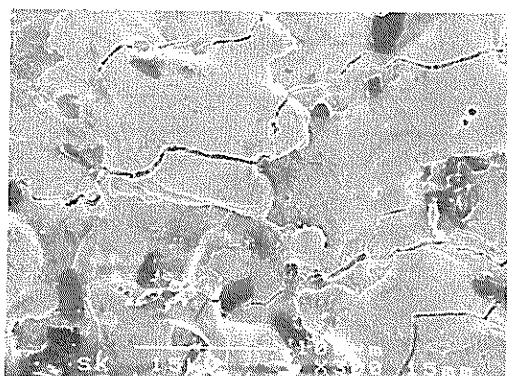
(A) 反射電子像 (SEM)

(B) Coの特性X線像
(写真-2硬合金の破面状況)

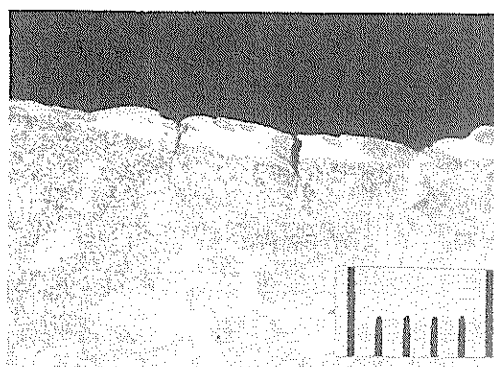
(C) Wの特性X線像

写真3と写真4はSKD11のあらさ4 μm (最終仕上げ加工条件はE9974)の表面のSEM写真と断面の光学顕微鏡写真である。白色の熔融再凝固層すなわち白層が約10~20 μm できていて、その白層表面には無数のクラックと孔が見られる。

これらのクラックと孔は超硬合金、SKD11を問わず、仕上げ面が細かくなっても、放電加工の場合、基本的に無くなることはなかった。



(写真-3) SKD11の表面
(SEM像)



写真(-4) SKD11の断面
(光学顕微鏡)

3-2 表面あらさ

図3はワイヤーカット面と研削面、切削面の表面あらさを示したものである。

ワイヤーカット面は約13.7 μm Rmaxで、切削面3.4 μm 、研削面0.8 μm 程度であった。

また図4は試験片を、表1の条件で形彫り放電加工した時の面あらさを目標のあらさと実測あ

らさの関係として整理した図である。

超硬合金をCu電極とCu-W電極を使って4段階の目標仕上げ面あらさで加工した場合、最終の仕上げあらさはいずれの条件でも目標あらさを約4 μm上回っていた。しかしSKD11をCu電極で加工した場合は目標のあらさが粗いほど、最終の仕上げあらさは大きく粗い方にずれた。したがって次節以降は実測あらさを使って特性値の整理をすることとした。

3-3 体積電極消耗率

図5は表1の条件で所定のあらさまで加工したとき消耗した電極の長さ(μm)と加工深さから体積電極消耗率を次式で求め、図示したものである。

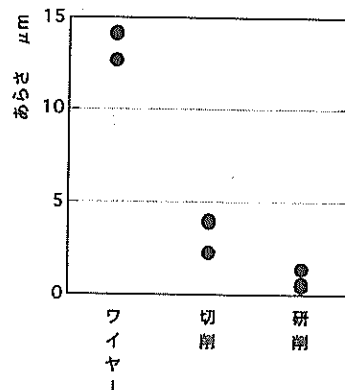
$$\text{体積電極消耗率 (\%)} = \frac{\text{電極消耗体積}}{\text{工作物加工体積}} \times 100\%$$

超硬合金をCu電極で加工すると、仕上げあらさが粗い程、電極消耗率が大きくなり、15~20 μm仕上げで約60%の電極消耗率となった。Cu-W電極は加工するあらさに関係なく約10~20%の電極消耗率で推移している。

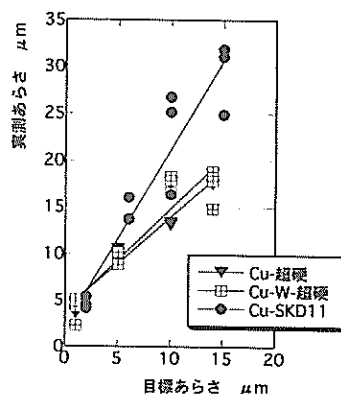
SKD11をCu電極で加工した時の電極摩耗量は約3%で超硬合金をCu-W電極で加工した場合の1/5程度の消耗率であった。

図6は表1の条件で加工したときの仕上げあらさを横軸に、加工時間(sec)を縦軸に對数で表示した図である。

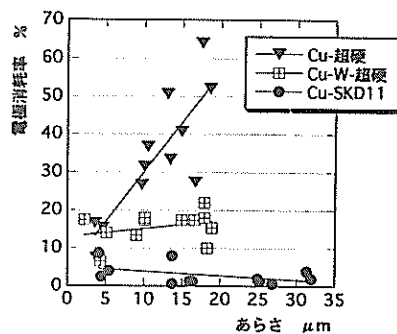
この図から超硬合金の放電加工は仕上げあらさが細くなる程、急激に加工時間が延び、同じ仕上げあらさでは、Cu電極よりCu-W電極の方が加工時間が長くなる傾向であることが分かる。SKD11をCu電極で加工する場合は超硬合金の場合に比べて荒加工は比較的時間がかかり、逆に細かい仕上げの時は加工時間が短めで、一般的に勾配が小さく仕上げあらさが細くなっても極端に加工時間が延びないことがわかる。



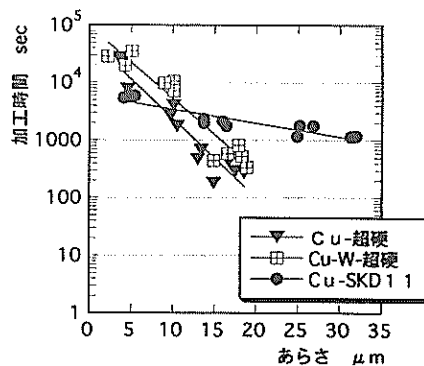
(図-3) 加工方法の違いとあらさ



(図-4) 目標あらさと実測あらさ



(図-5) 体積電極消耗率 (%)



(図-6) 放電加工時間 (Sec)

3-4 曲げ試験

図7は超硬合金をワイヤーカットまま、ワイヤーカット面を切削およびワイヤーカット面を研削加工の3種類の試験片の抗折力を、あらさ(μm)で整理した図である。切削および研削加工試験片はカタログ値の2800N/mm²に近い、2500~3000N/mm²の抗折力を示しているが、ワイヤーカット試験片はその半分以下の約1250N/mm²しか示さない。

図8と図9は横軸にあらさ、縦軸に抗折力をとり、超硬合金をCu電極とCu-W電極を使い表2の加工条件で加工した結果である。

いずれの場合も500~1000N/mm²の抗折力しか発現せず、わずかにあらさが細かくなると左上がりに抗折力が大きくなる傾向が見られるものの、カタログ強度の半分以下であった。

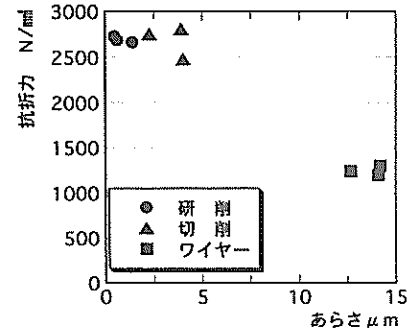
図10はSKD11をCu電極で加工した時のあらさと抗折力の関係である。研削加工の抗折力が1400N/mm²程度であるのに比べて、ほとんど抗折力の低下は見られず、あらさによる抗折力の変化も見られない。(SKD11の静的曲げ強度は、焼き入れのまま1600N/mm²、200℃焼き戻して3000N/mm²)⁸⁾。

写真5は超硬合金をCu電極で加工したあらさ13μmの試験片の断面クラックの写真である。深さ30~50μm、長さ100~200μmで表層部とほぼ平行なクラックである。

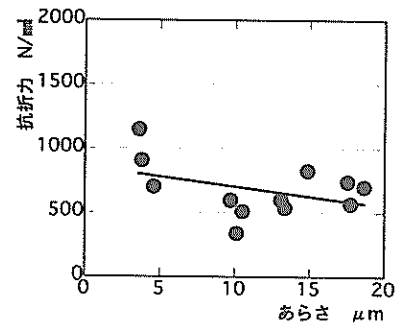
写真6はSKD11のクラックで白層から母材まで垂直に70~80μmの深さまで延びているのがわかる。

したがって荒加工でできた大きなクラックが仕上げ加工時に十分除去されないと、荒加工時のクラックが残留して、見かけ上あらさは改善されても、抗折力の改善にはつながらないことが予想される。

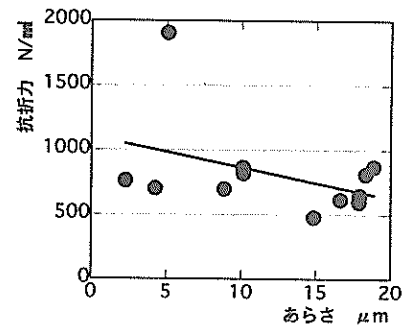
図11は超硬合金を荒加工目標14μm(E9775=500μm)で加工した時の抗折力と、加工目標1μmの加工を荒加工有り(E9975+E9778=500μm)と無し(E9778=200μm)で加工した時の



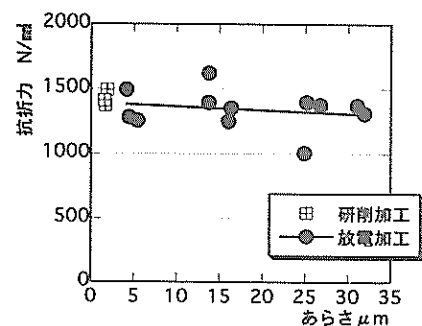
(図-7) 加工方法の違いと抗折力



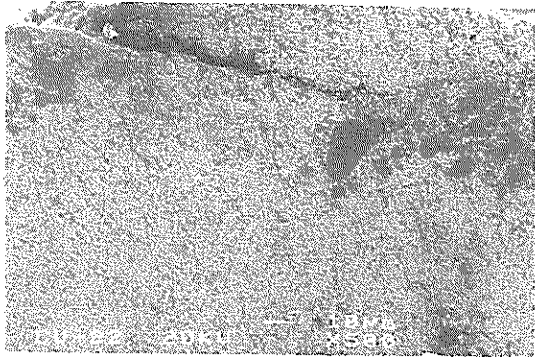
(図-8) 超硬合金の放電加工 (Cu電極)



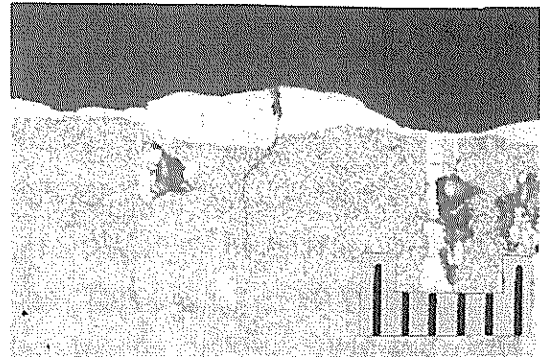
(図-9) 超硬合金の放電加工 (Cu-W電極)



(図-10) SKD11の放電加工 (Cu電極)

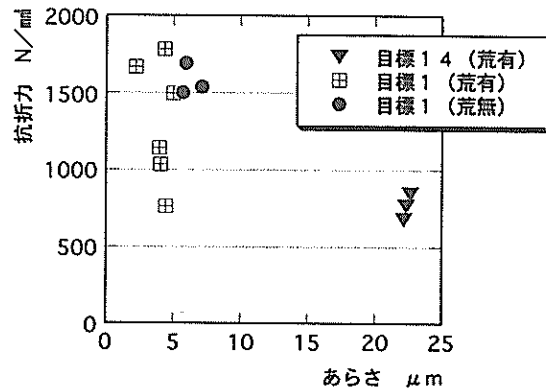


(写真-5) 超合金の放電加工によるクラック (SEM像)



(写真-6) SKD11の放電加工によるクラック (光学顕微鏡)

抗折力を比較した図である。加工目標 $1\ \mu\text{m}$ 荒加工有りは初めの荒加工 (E9775) で $300\ \mu\text{m}$ 加工した時に発生したクラックが、仕上げ加工 (E9778) で $200\ \mu\text{m}$ 加工しても除去できずに残留したためか、抗折力のバラツキが大きい。しかし荒加工無し (E) で $200\ \mu\text{m}$ 加工すると明らかに $1500\ \text{N}/\text{mm}^2$ 以上の強度を発現した。すなわち荒加工で発生した大きなクラックを仕上げ加工で除去し、より微細なクラックに置き換えれば、抗折力の改善に期待が持てることがわかった。



(図-11) 荒加工の有無と抗折力

4. 結 言

超合金の金型ニーズに対応するため、形彫放電加工による加工変質層やクラック、抗折力を検討したところ得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 放電加工は通常の荒加工 ($20\sim 30\ \mu\text{m Rmax}$) から仕上げ加工 ($1\sim 2\ \mu\text{m Rmax}$) まで、熔融再凝固層とその下の熱影響部からなる変質層が生成され、そこにクラックや孔が多数存在する。
- 2) 超合金の加工変質層はWの熔融再凝固層とバインダーのCoが熔融蒸発して少なくなった熱影響部からなり、 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ 長のクラックも確認できた。
- 3) SKD11の加工変質層は明確な白層を形成し、クラックは白層から母材に大きく ($70\sim 80\ \text{m}\ \mu$) 伸びている。
- 5) 超合金は放電加工によってカタログ値 (機械加工試験片) の $1/2$ に低下したが、SKD11は機械加工試験片と同等でほとんど低下しなかった。
- 6) 超合金は荒加工で発生したクラックを十分除去するように仕上げ加工を設定すれば、すなわち仕上げ面あらさを細かくするほど抗折力は向上する傾向がある。
- 7) 超合金は放電加工で著しく強度が低下し、熔融再凝固層に発生するクラックが影響していることがわかった。すなわち、仕上げあらさの向上で抗折力の改善が見られたので、今後さらにあらさの向上、表層部のクラックの有無、長さ、深さ等抗折力改善の検討をする必要がある。

参考文献

- ①素形材年鑑：（財）素形材センター 平成7年度版
- ②安田：「ワイヤー放電加工の原理と実際」溶接学会誌 Vol.65-2(1996),pp14-16
- ③田村：「レーザー照射による放電加工面の改質」精密工学会誌 Vol.60-6(1994),pp812-816
- ④斎藤、毛利：「大面積放電加工における仕上げ面粗さの向上」
精密工学会誌 Vol.57-6(1991),pp22-26
- ⑤増井：「放電加工における加工面性状」応用機械工学 1989年 12月,pp90-95
- ⑥田村：「酸化現象を利用した超硬合金放電加工面の改質」
精密工学会誌 Vol.61-6(1995),pp824-828
- ⑦田中：「形彫放電加工の原理と実際」溶接学会誌 Vol.65-2(1996),pp10-12
- ⑧金属熱処理技術便覧編集委員会：「金属熱処理技術便覧」日刊工業新聞(1976),pp545-546

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターに

ご連絡ください。