

微細工具製作における加工技術の確立 (第3報)

— 微細工具による切削加工 —

佐野 正明, 八代 浩二, 米山 陽, 山田 博之, 岡田 勝蔵¹, 吉田 善一², 戸島 昭二³, 斉藤 由樹⁴, 石川 勲⁵

Establishment of technique on manufacturing micro tool (3rd Report)

— Investigation of tool material and tool manufacturing —

Masaaki SANŌ, Koji YATSUSHIRO, Akira YONEYAMA, Hiroyuki YAMADA, Katsuzo OKADA¹,
Zenniti YOSHIDA², Syouji TOSHIMA³, Yoshiki SAITO⁴ and Isao ISHIKAWA⁵

要 約

本研究では各種の素材（タングステン，超硬合金，高速度鋼，焼結ダイヤモンド）に対して微細放電加工を行い，得られた加工面について走査型電子顕微鏡（SEM）による観察および表面あらかさの測定等から評価を行った。その結果，超硬合金および焼結ダイヤモンドは表面あらかさは小さく，放電加工特性が良好である事がわかった。更に超硬合金に対し工具を作製し，得られた工具により穴加工を行った。その結果，放電加工により製作した工具で，切削加工が可能であることがわかった。

Abstract

In this report, various materials (tungsten, cemented carbide, high-speed steel, and polycrystalline diamond) were machined by micro electric discharge machining. Then, their surfaces were evaluated by SEM observation and the surface roughness measurement. The following are the results of the experiment; 1) Few layers were affected in the cemented carbide and the polycrystalline diamond, but many layers were affected in the machining of high-speed steel and tungsten. Moreover, the cemented carbide and polycrystalline diamond showed the tendency to have a smooth surface roughness when they were machined in the finishing condition. 2) The cutting hole experiment was performed with a drill made of cemented carbide. On manufacturing method of cutting tool by micro electric discharge machining, it was possible to drill a copper plate.

1. 緒 言

近年，製品の小型化に伴い，マイクロ金型やマイクロセンサなどに使用される微小部品は，微細軸，微細穴および微細溝等の加工による領域が多いため，マイクロ加工技術の需要が急速に高まっている。

三次元的な形状を自由に加工する方法としては，切削加工方法が広く用いられているが，微細加工の場合，より微細なドリルやエンドミル等の切削工具が必要になる。これらの工具製作では，従来の機械加工の場合，加工反力による工具折損等の問題から限界があり，様々な加工手法が検討されている^{1) 2)}。

これらの要求に対し，放電加工方法は最も有利な加工方法の一つである³⁾。放電加工方法は電極と工作物が非接触で加工が進行するために，加工反力を受けることなく加工できる特徴がある。また放電単発当たりのパルスエ

ネルギーを微小化することにより，微細加工が可能になる。

通常の放電加工面では，放電加工変質層の形成，クラックおよび加工ひずみ（引張残留応力）等の加工欠陥が存在するため，材料強度を著しく低下させる^{4) 5)}。従来は加工物の容積に対して加工変質層の比率が小さく，その影響を無視できる場合もあった。しかし，微細加工物では加工変質層の影響が非常に大きくなり，製品の健全性を著しく阻害する要因となる。特に加工面から，深さ数ミクロンの領域における材料の健全性確認は，加工製品の品質安定性にとって極めて重要な問題である。

今日，微細放電加工（ワイヤ放電研削手法⁶⁾等）により各種微細部品が製造され始めているが，小型形状の加工物に微細放電加工を適用した場合の加工面品質に関する評価は少なく，特に切削工具となる加工面の評価はほとんどなされていない。

そこで，本研究では微細な切削工具の製作手法としてワイヤ放電研削手法を適用し，各種の素材に対して加工を行い，素材の基礎特性を把握するための実験を行った。得られた加工面について走査型電子顕微鏡（SEM）によ

* 1 山梨大学工学部 * 2 東洋大学工学部
* 3 高畑精工(株) * 4 (株)池田精機製作所
* 5 (有)昭和精機

表1 素材特性

	融点 (°C)	密度 (g/cm ³)	熱伝導率 (w/mk)	硬さ	電気抵抗値 (μΩcm)
タングステン	3407	19.3	178	69 HRC	5.55
超硬合金	2900	14.3	70	91.5 HRA	20~38
高速度鋼	1200-1400	7.96	24	69 HRC	52~54
焼結ダイヤモンド ⁽⁷⁾	3550	3.51	2000	7000 HK	1375

コバルトの融点;1495°C⁸⁾

る加工面の観察および表面あらさの測定等から評価を行った。更に、得られた知見に基づき微細工具を製作し、切削加工実験を行った。

2 実験方法

2.1 加工素材

実験に用いた素材は、微細放電加工用電極として用いられるタングステン、切削工具用素材として一般的に用いられる超硬合金（超微粒子超硬、直径0.5μm, Cemented carbide）、高速度鋼（高C, Co粉末ハイス, High-Speed Steel, HSS）および焼結ダイヤモンド（直径10.0μm, Poly Crystalline Diamond, PCD）の4種類を使用した。各素材特性を表1に示し、素材のモデル図を図1に示す。

タングステンは素材から引き抜きにより成形した材料であり、超硬合金（WC-Co）および高速度鋼は粉末冶金手法により生成された材料である。また、焼結ダイヤモンドは工具素材となるバルク材がないため、超硬合金基材上に多結晶ダイヤモンド（C）の微粒子を結合材金属（Co）とともに高圧下で結合させた材料を用いた。超硬合金に比べ非常に硬く、また耐摩耗性も優れた特性を持つ（密着力780MPa, 厚さ1.5mm）。

2.2 加工方法

各素材ともにワイヤ放電加工機により、直径1.0mm、長さ20.0mmに切り出したものを試験片とした。

微細放電加工は、三菱電機^(株)製微細放電加工機EDSCAN8Eを使用して行った。加工機の概観図を図2に示し、加工工程およびエネルギー条件を表2に示す。なお、本条件はメーカー推奨の微細加工プロセスに準じた条件であり、E3, E4条件での実測エネルギー値は微細放電加工の範囲内⁽⁹⁾である事を確認している。

加工は試験片に対し、端面および側面について行った。端面加工は試験片端部から1mm程度切り落とす加工を行い、また側面加工は試験片直径を1.0mmから0.8mmまで細

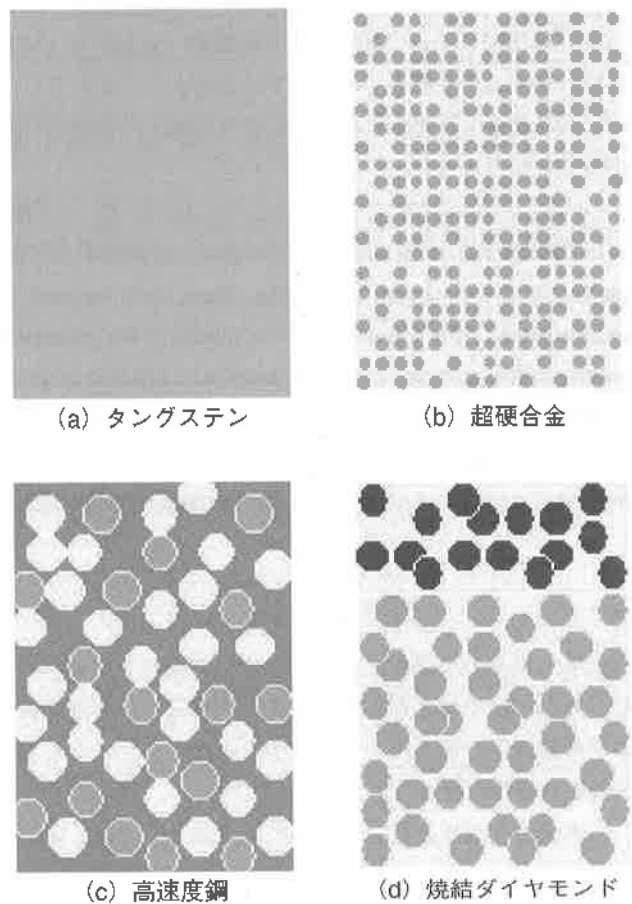


図1 素材のモデル図

表2 加工工程および加工条件

工程	条件	エネルギー ⁽⁹⁾	
荒 ↓ 仕上	E1	ie;25A, te;2μs, to;64μs	8.530J
	E2	ie;5.5A, te;2μs, to;64μs	0.864J
	E3	uc;80V, C;4300pF	0.047J
	E4	uc;80V, C;0pF	0.014J

く加工を行い、観察面とした。

3. 結果および考察

3.1 SEMによる観察

素材の端面および側面加工した試験片について表面および断面のSEM観察を行った。観察結果をまとめたものを表3に示す。タングステンおよび高速度鋼におけるE1, E2の条件では、加工影響層が非常に厚く存在したが、エネルギー条件の低下に伴い、その厚さは減少した。しかし、超硬合金の場合では、エネルギー条件による変化はほとんど認められず、ごくわずかな加工影響層厚さであった。超硬合金の加工では、放電加工の熱エネルギーによる飛散・除去の影響が非常に大きく、溶融再凝固層が少ない結果であると推察される。

また観察断面内に存在するクラックはタングステンの場合、軸方向に沿うように非常に多く観察された。このことは素材軸方向（圧延方向）に不純物を含む結晶粒界が存在するため、放電加工による熱衝撃と結晶粒界への放電集中の影響から、クラックに進展したものと推察される¹¹⁾。

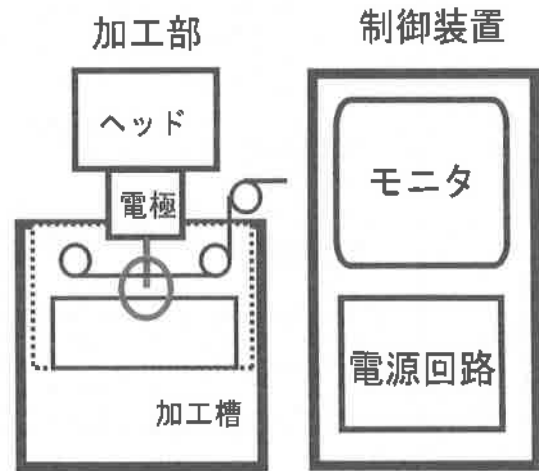
各素材ともに加工エネルギー条件の低下に伴い、表面あらさは低下したが、同一条件（E1, E2）で比較した場合、高速度鋼が最も大きく、次いで超硬合金、タングステン、焼結ダイヤモンドという順であった。特に焼結ダイヤモンドの表面あらさは非常に小さく、タングステンおよび高速度鋼の半分程度であった。タングステンの場合、側面には軸方向に空隙が存在し、測定子がナイフエッジであるため、侵入困難な部分を考えると、実際の表面あらさは更に大きいものと推察される。試験片の融点および熱伝導率から表面あらさ¹¹⁾を考えた場合、焼結ダイヤモンドは融点が高く、また熱伝導率が極めて高いことから表面あらさは最も小さくなり、融点および熱伝導率が低い高速度鋼が最も大きくなるとされる。このことは本結果ともよく一致した結果となった。

エネルギー条件の最も小さいE4では、4種類の試験片の表面あらさはほぼ同程度となったが、特に超硬合金および焼結ダイヤモンドは他の素材に比べ、低下する傾向を示した。これらの結果から、放電加工面の品質は超硬合金および焼結ダイヤモンドの2素材が良好であると確認できたが、同一条件で焼結ダイヤモンドは超硬合金に比べ数10倍程度の加工時間を要しているため、実用的ではないと考えられる。

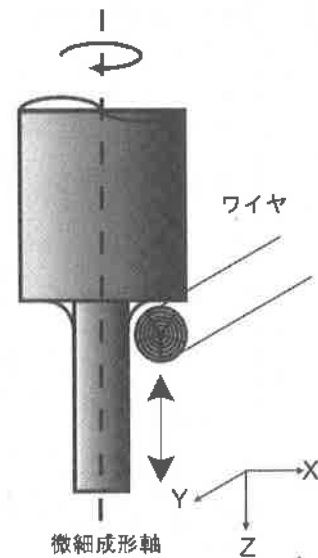
3.2 微細工具の製作

放電加工による加工影響層が少なく、表面あらさが良好であり、加工効率の面で有利な超硬合金を選択して、微細工具の製作を行った。製作した工具を図3に示す。形状は直径100 μ mのD形断面形状を有する一枚刃とし

た。A部が切れ刃に相当する部分であり、側面に4つの逃げ面を持ち、また底面にも15度の逃げ面を持つ形態である。エッジ部にややだれた形状は見られるが、ほぼ目的どおりの形状に製作できた。



(a) 加工装置の外観図



(b) 加工部の詳細図

図2 加工装置の外観図

表3 変質層厚さ測定結果

	E1	E2	E3	E4
タングステン	20 μ m (×)	12.5 μ m (×)	7.5 μ m (×)	2.5 μ m (×)
超硬合金	<1.0 μ m (○)	<1.0 μ m (○)	<1.0 μ m (○)	<1.0 μ m (○)
高速度鋼	12.5 μ m (×)	7.5 μ m (×)	3.8 μ m (×)	1.2 μ m (○)
焼結ダイヤモンド	----- (○)	----- (○)	----- (○)	----- (○)

() 内はクラックの有無 有り×, 無し○

表4 表面あらさ測定結果

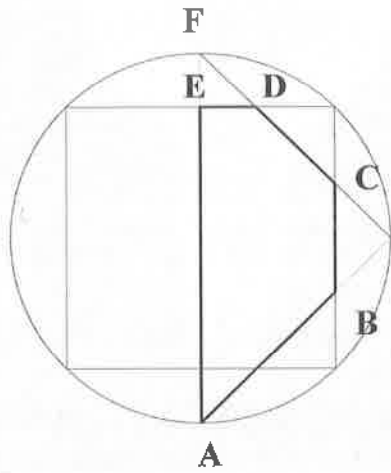
	E1	E2	E3	E4
タングステン	1.17 μ mRa (31m)	0.8 μ mRa (41m)	0.36 μ mRa (7h30m)	0.19 μ mRa (18h18m)
超硬合金	1.38 μ mRa (3m)	0.95 μ mRa (8m)	0.38 μ mRa (4h48m)	0.16 μ mRa (12h31m)
高速度鋼	1.49 μ mRa (5m)	1.23 μ mRa (6m)	0.42 μ mRa (2h53m)	0.23 μ mRa (9h56m)
焼結ダイヤモンド	0.75 μ mRa (44h28m)	0.61 μ mRa (67h42m)	0.42 μ mRa (140h)	0.18 μ mRa (306h)

() 内は加工時間

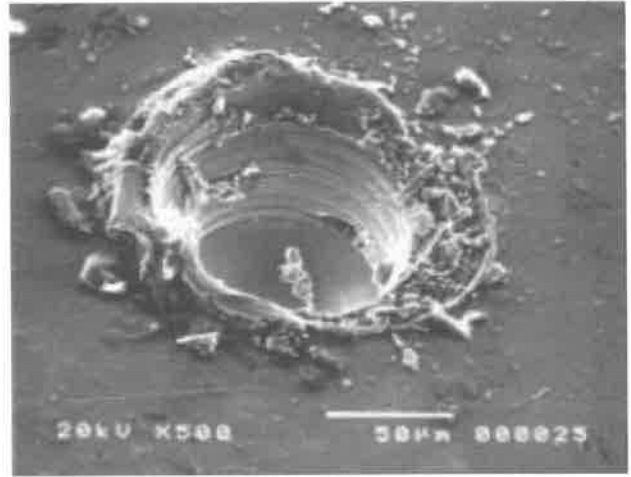
3.3 切削加工

得られた工具により板厚1.0mmの銅, ポリアセタールおよびベークライトに穴加工を行った穴加工機は同放電加工機を用いた。微細加工において, 工具の振れは重要な問題であり, 数 μ mという要求の高精度加工では工具振れを抑制するために, 様々な工夫が施されている。本研究では工具振れを極限までなくすため, 製作した放電加工機上で製作した工具を着脱なく, その状態で穴加工を行うインライン加工で行った。これにより振れはほとんどない状態となる。なお, 切削加工条件は放電加工機が持つ最大回転数1000rpmであり, 送り速度は0.06mm/minとした。

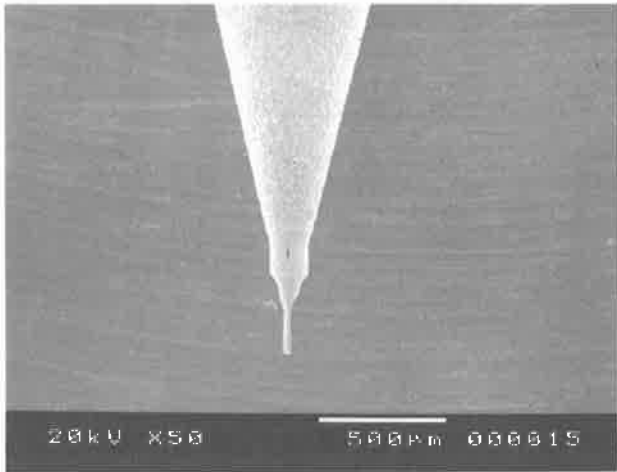
その結果を図4に示す。被削材料が銅の場合では, 加工深さ50 μ m程度まで進行し, この時点で工具折損となってしまうが, 切削によるツールマークも確認でき, 微細加工用の工具として利用できる可能性が確認できた。またポリアセタールおよびベークライトの場合では工具折損はなく, 目的の深さ100 μ mまでの穴加工が可能であった。更に工具形状を直径50 μ mとし, 同様の実験を行った結果を図5に示す。目的とする深さ100 μ mまでの穴加工が良好に行われた。また図6のように直径25 μ m程度の加工も併せて行った結果, 同様に良好な加工面が形成された。この結果, 放電加工により製作された工具での切削加工は十分可能であることがわかった。



(a) 工具形状



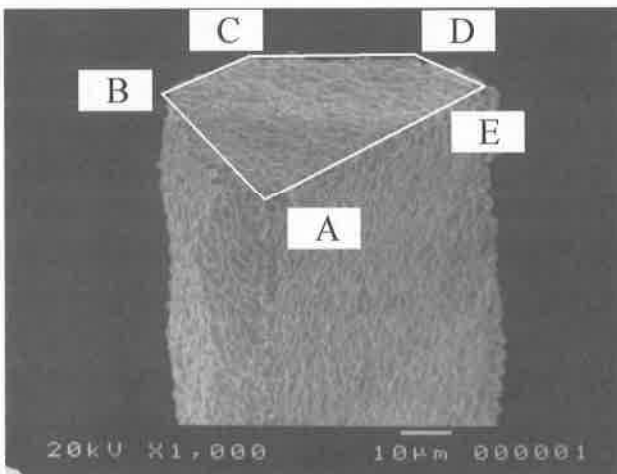
(a) 銅



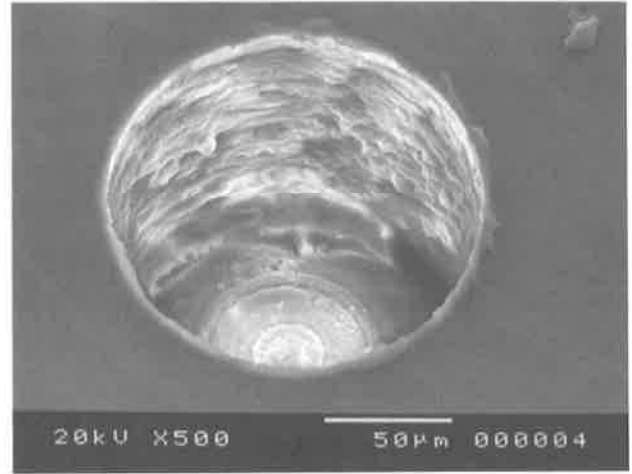
(b) 工具 SEM観察



(b) ポリアセタール



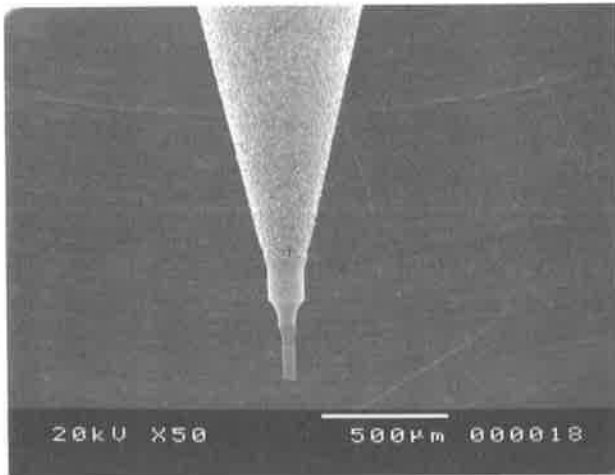
(c) 工具 SEM観察 (拡大)



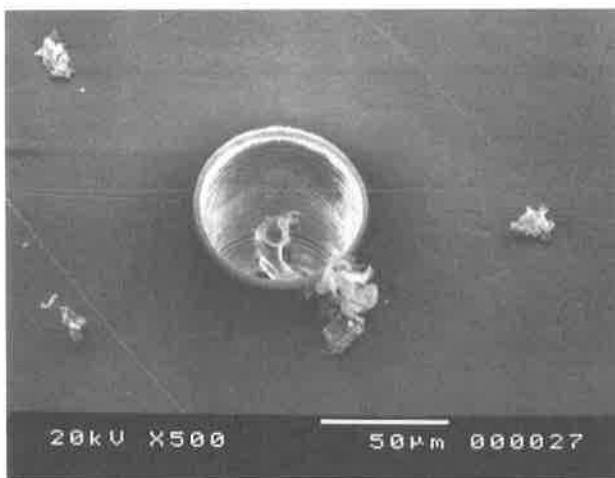
(c) ベークライト

図3 微細工具の製作結果

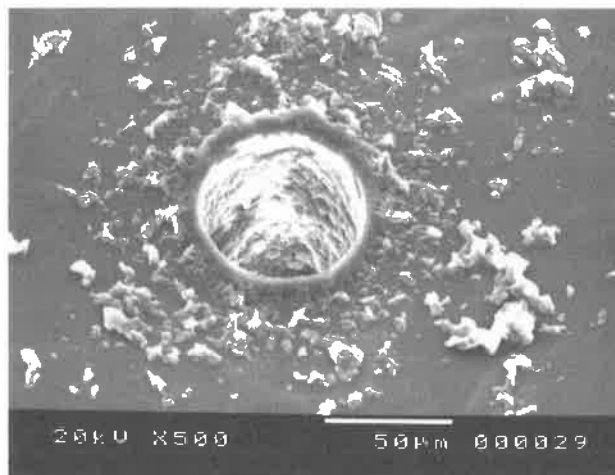
図4 切削加工実験結果1 (直径100 μm, 深さ200 μm)



(a) 工具

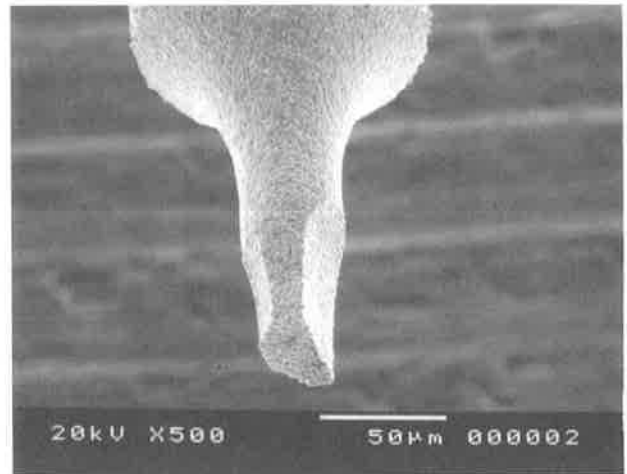


(b) ポリアセタール

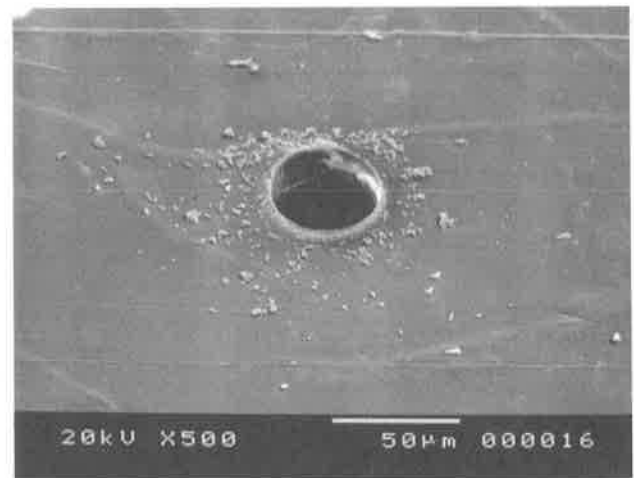


(c) ベークライト

図5 切削加工実験結果2 (直径50 μ m, 深さ100 μ m)



(a) 工具



(b) ポリアセタール



(c) ベークライト

図6 切削加工実験結果3 (直径25 μ m, 深さ50 μ m)

4. おわりに

タングステン, 超硬合金, 高速度鋼および焼結ダイヤモンドの各素材に対し, 微細放電加工を行い, その加工影響層の挙動について各種評価により検討を行った。得られた結果を要約すると以下のことが明らかとなった。

(1) 超硬合金および高速度鋼および焼結ダイヤモンドで

は, 良好な加工面を呈したが, タングステンの場合は, 放電加工による熱エネルギーの影響から, 軸方向に対し, クラックが認められた。

(2) 同一条件で加工した場合, 焼結ダイヤモンドが最も表面あらさは小さかった。また仕上げ条件での加工では, 超硬合金も同様に表面あらさは小さい傾向を

示した。

- (3) 超硬合金に対し工具を製作し、得られた工具により穴加工を行った。その結果、軟質材料の銅ではバリが認められるが、切削加工は可能であることがわかった。
- (4) 超硬合金に対し工具を製作し、得られた工具により穴加工を行った。その結果、樹脂材料に対しては、切削加工は可能であることがわかった。

参考文献

- 1) 江頭快, 水谷勝巳: 放電加工成形された極小径ボールエンドミルによる切削加工, 精密工学会誌Vol.69, No.10, P.1449-1453 (2003) .
- 2) 熊谷正夫: 微細な工具をつくる, 産総研ニュース No.5, P.3 (2004) .
- 3) 増沢隆久: マイクロ放電加工技術の概要, 電気加工学会誌, Vol.35, No.80, P.5-20 (2001) .
- 4) 日原政彦, 藤原和徳, 向山芳世, 緒方勲: ダイカスト金型鋼に関する研究 (第一報), 精密工学会誌, Vol.55, No.10, P.1869-1874 (1989) .
- 5) 向山芳世, 日原政彦: 熱疲労に基因する放電加工面品質の研究 (第一報), 電気加工学会誌, Vol.24, No.48, P.24-34 (1992) .
- 6) T.Masuzawa, M.Fuino, K.Kobayashi and K.Suzuki : Wire electro discharge grinding for micro-machining, annals of the CIRP, Vol.39, No.1, P.431 (1985) .
- 7) エンレメトシックス(株): 切削工具材の紹介, P.18.
- 8) 理科年表, 丸善, P.469 (2000) .
- 9) 佐野正明, 八代浩二, 米山陽, 岡田勝蔵: 放電加工による微細工具作製技術に関する研究, 電気加工学会全国大会講演論文集 (2004), P.19-22. (2004) .
- 10) 増沢隆久: マイクロ放電加工—現状と展望—, 電気加工学会誌, Vol.32, No.69, P.53-59 (1998) .
- 11) 佐野正明, 八代浩二, 米山陽, 山田博之, 岡田勝蔵, 吉田善一, 戸島昭二, 斉藤由樹, 石川勲: 微細工具製作における加工技術の確立 (第一報) 山梨県工業技術センター研究報告, No.18, P.24-29 (2004) .