

放電加工による微細凸形状を有する超撥水面創成技術の開発

在川 功一*1 安部 年史*1

Addition of superhydrophobic structure to metal surface by electric discharge machining

Koichi Zaikawa, Toshifumi Abe

超撥水性を有する表面（超撥水面）は食品や医薬品、工業分野など様々な分野で広く用いられており、その表面は微細な凹凸で構成されている。この微細形状はフェムト秒レーザーやエッチングを用いて加工されているが、この加工法はコストが高いことや加工時間が増大しやすく量産化が難しいことが課題となっている。そこで本研究では、微粒子グラファイト電極に銅を含浸し、電気伝導率や熱伝導率、各種強度、硬さ等の向上を図った「微粒子銅グラファイト(CuGr)電極」を用いた放電加工により、金属表面への微細凸形状の加工性を検証し、超撥水性を有する表面を創成する技術を開発した。

1 はじめに

超撥水性を有する表面（超撥水面）は食品や医薬品、工業分野など様々な分野で広く用いられている。これらの超撥水面の加工には主にフェムト秒レーザーなどの表面マイクロテクスチャ加工が用いられ、微細な凹凸形状が作製されている。しかし、この加工法はコストが高いことや加工時間が増大しやすく量産化が難しいことが課題となっている。

このような微細な凸形状を安価・容易に加工すべく、グラファイト(Gr)、銅(Cu)などの電極材料に切削加工や放電加工で貫通もしくは止まり穴をあけ、その電極によって放電加工する、微細凸形状放電加工が研究開発¹⁾されている。この方法では穴あけ部については放電が発生しないため、それ以外の部分のみ加工が進行し、同時に複数の凸形状が加工される。

微細形状の放電加工では電極消耗を重視するため、CuやCuWなどの金属電極を用いることが多いが、電極製作における微細穴の加工ではバリやカエリが発生しやすい。したがって、放電加工においては悪影響を及ぼす恐れがあるため、これまでは微粒子のGr電極を使用して研究²⁾を実施してきた。しかし、凸形状の微細化については、電極の加工特性（欠けの発生等）上、困難であった。

そこで本研究では、GrにCuを含浸させたCuGr電極に着目した。CuGr電極はGr電極と比較して、硬さや強度の増加、電気抵抗率の減少などの優位性が確認できており、これらが電極消耗率の低下、加工速度の

増加など放電加工特性の向上に寄与している。したがって、微細凸形状の微細化を図り、精密金型等を想定した金属表面に超撥水性を有する凸形状の加工可能性を探るとともに、凸形状と撥水性の関係を調査した。

2 実験方法

2-1 CuGr電極

CuGr電極はGrの基材に対し、HIP法（熱間等方圧加圧法）を用いてCuを含浸して作製した。表1に銅含浸前後の2種のGr電極材料の特性を示す。いずれの電極材料においても電気抵抗率が低下し、かさ密度や曲げ強さは向上していることを確認した。

表1 銅含浸前後のGr電極の特性

	CuGr-A (粒径 4-5 μ m)		CuGr-B (粒径 2-3 μ m)	
	基材	含浸後	基材	含浸後
かさ密度 [Mg/m ³]	1.79	2.92	1.79	3.01
硬さ [HSD]	73	72	80	74
電気抵抗率 [$\mu\Omega \cdot m$]	14	2.1	15.2	1.9
曲げ強さ [MPa]	71	114	73	124
圧縮強さ [MPa]	133	237	162	241

2-2 電極加工

CuGr電極の切削工具はダイヤモンドコーティングを施したものを使用することが一般的となっている。本研究では、直径 0.2 mm, 0.3 mm のダイヤモンドコ

*1 機械電子研究所

ーティング工具と比較対象として、直径 0.3 mm のコーティングなしの工具を用いて微粒子 CuGr 電極材料への加工を行った。加工には電極加工機「 μ V1」(三菱重工工作機械㈱)を使用し、乾式にて加工を行った。表 2 に切削条件を示す。

表 2 CuGr 切削条件

工具	Dia-①	Dia-②	Non-coat
コーティング	ダイヤモンド		なし
刃径[mm]	0.2	0.3	0.3
刃長[mm]	0.6	0.3	0.6
回転数[min^{-1}]	35000	33000	33000
送り速度[mm/min]	200	250	250
総切り込み量[mm]	0.55	0.6	0.55

2-3 放電加工

2-2 で加工した電極を用いて微細凸形状の放電加工を行った。放電条件を表 3 に示す。加工機には型彫り放電加工機「EA8PV-ADVANCE」(三菱電機㈱)を使用し、被削材としてプラスチック金型に使用される鋼材を 3 種類 (PX5, S-STAR, NAK80) 用意し、加工性を比較するとともに、加工深さを 0.1~0.4 mm まで 0.1 mm ずつ変化させた場合の撥水性への影響を評価した。

表 3 放電条件

電極材	CuGr-A, B (ϕ 200 μm)
被削材	PX5, S-STAR, NAK80
加工深さ[mm]	0.1, 0.2, 0.3, 0.4
放電電流[A]	5.0(Max), 1.0(Min)
放電 ON 時間[μs]	24.0(Max), 2.0(Min)
放電 Off 時間[μs]	12.8(Max), 8.0(Min)
ジャンプ速度[m/min]	3.0
ジャンプ量[mm]	1.4
ジャンプ間隔[s]	0.25
コンデンサ容量[pF]	19000(Max), 0(Min)
揺動[mm]	0, 0.05, 0.06, 0.065

3 結果と考察

3-1 電極加工

表 2 の条件にて CuGr-A, CuGr-B の 2 つの電極を加工した。形状に関しては穴の中心間が工具 Dia-①が 220 μm , 工具 Dia-②が 320 μm とし, 14.5 mm 四方の範囲に正三角形配列で可能な限り加工することとして, 隣接する穴の外周部の間隔が 20 μm となるように設定した。加工後の顕微鏡写真を図 1, 図 2 に示す。銅含浸の効果で電極材料自体の強度が向上したため, いずれの工具においても目標となる 50 μm 以下となる隣接形状間 20 μm の穴加工が可能であった。しかし, Non-coat の工具に関しては, 約 5,000 穴以上の加工において穴外周部に欠けが発生し, 中には隣接する穴どうしが繋がるという結果が見られた。

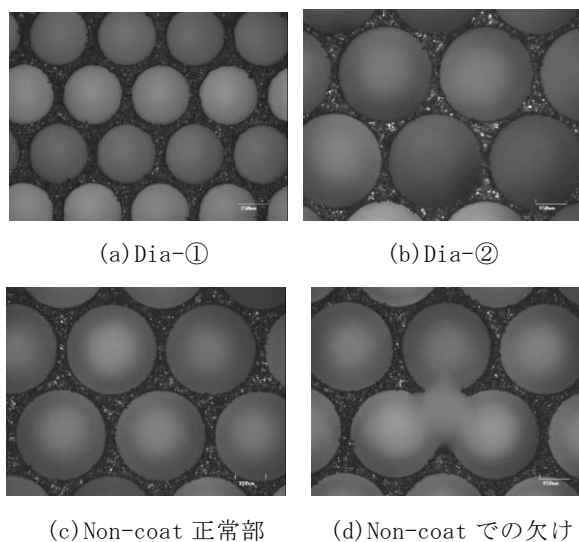


図 1 CuGr-A 加工結果

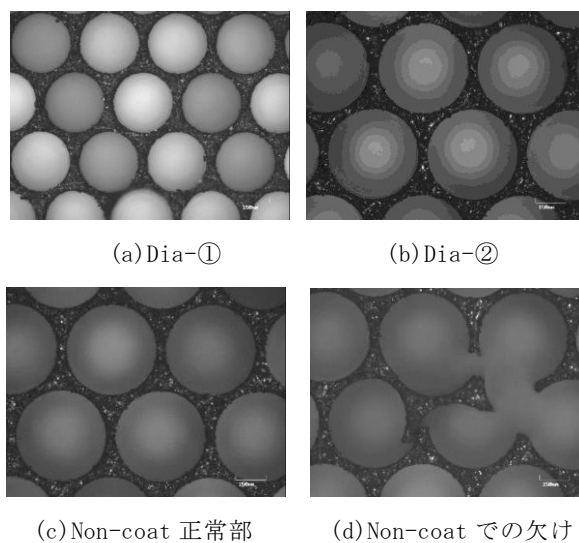


図 2 CuGr-B 加工結果

3-2 放電加工

加工深さを0.1 mmずつ変更して放電加工を行った際の1分あたりの体積加工量を図3に示す。CuGr-A, Bいずれの電極を使用した場合でも加工深さが大きくなるにつれて、体積加工量も増加するが、増加量は漸減している。これは電極消耗の影響が考えられる。また、加工深さ0.4 mmの条件における加工後のSEM像を図4, 5に示す。いずれの深さにおいても凸形状の根元部分に関しては丸みを帯びたような形状となっている。これは電極消耗が電極の角部から優先的に発生することに起因しており、放電加工での微細凸形状加工においては避けられない現象である。さらに、加工深さが大きくなるにつれ、凸形状の上部面積が小さくなる傾向が確認された。これは加工屑の滞留による2次放電の影響と考えられ、特にCuGr-Bの電極でPX5を加工した際は電極消耗が大きく、凸形状の上部形状が大きく崩れていることが確認された。

3-3 加工形状と接触角(撥水性)の関係

固体表面の“ぬれ”の程度を定量化するものが「接触角」であり、接触角とは「端点において、液滴輪郭曲線の接線と固体表面のなす角」と定義される。本研究では接触角計および純水を用い、 $\theta/2$ 法という方法で測定を行った。これは接触角 θ と接触半径 r 、着滴高さ h (図6)との間には以下の関係があることを利用したものである。

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{h}{r} \quad \dots \text{式(1)}$$

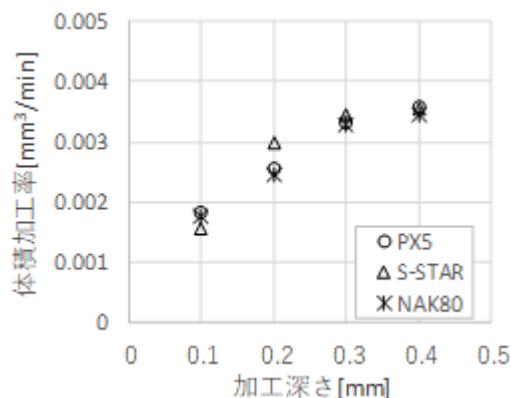
この式から、

$$\theta = 2 \tan^{-1}\left(\frac{h}{r}\right) \quad \dots \text{式(2)}$$

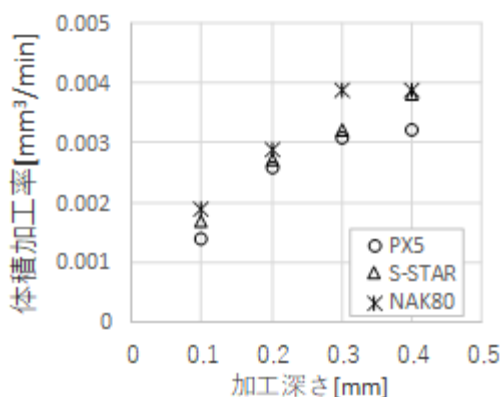
により接触角 θ を求める。液滴輪郭の左端点、右端点、頂点の座標が分かれば、 r と h はすぐに求まるから、非常に簡単に接触角を求めることができる³⁾。

被削材ごとの接触角の比較を行った結果を図7に示す。いずれの材料においてもほとんどの条件下で素材の状態から接触角の値が大きくなっており、CuGr-A電極におけるPX5の加工深さ0.4 mmに関しては 147° となり撥水性の高い面ということが確認された(図8)、超撥水面の目安である 150° に近い値を示した。傾向としては、加工深さに比例して接触角が大きくなる傾向にあったが、これは加工深さが大きくなる

につれ、凸形状上部の面積が小さくなったことが要因と考えられる。



(a)CuGr-A



(b)CuGr-B

図3 加工深さごとの体積加工率の比較

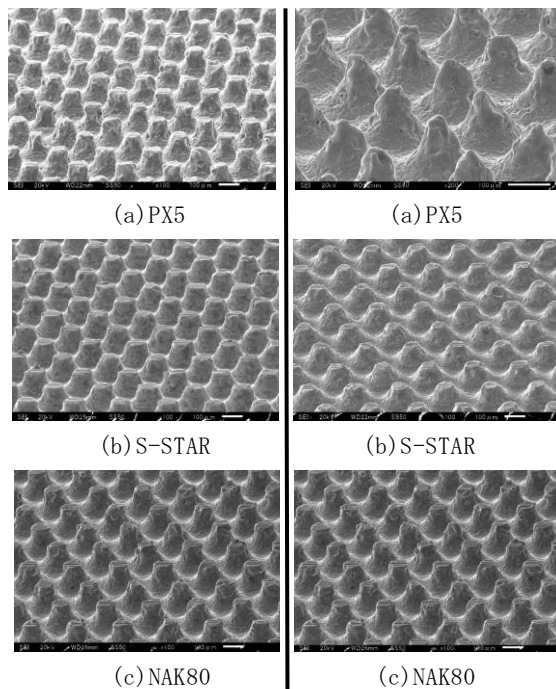


図4 CuGr-A 加工後

図5 CuGr-B 加工後

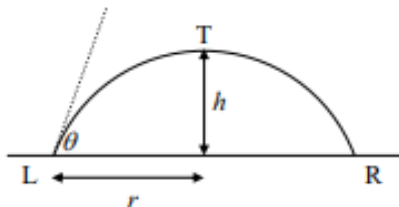
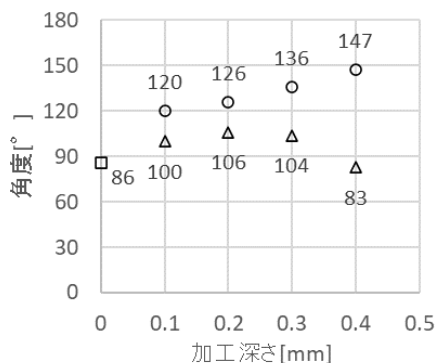


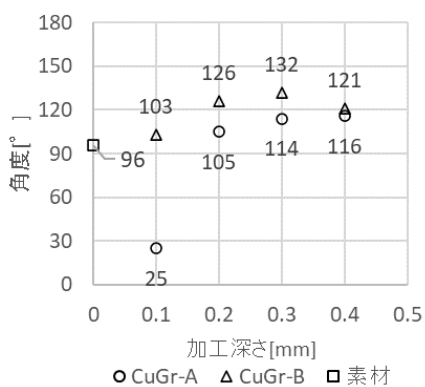
図6 接触角と液滴の関係



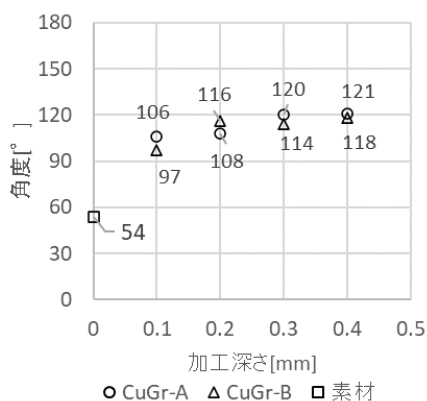
図8 接触角147°の撥水性表面



(a) PX5



(b) S-STAR



(c) NAK80

図7 被削材別加工深さと接触角との関係

4 まとめ

2種のCuGr電極を使用して、3種のプラスチック金型材に対し、超撥水効果を想定した微細凸形状の放電加工を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 銅含浸による効果は、基材であるGr電極に対して電気抵抗率の低減、強度の向上が確認された。
- (2) CuGr電極は、Gr電極と同様、ダイヤモンドコーティングを施したエンドミル等の切削工具が有効であることを確認した。
- (3) 放電加工後の形状においては微細凸形状が確認され、加工深さが大きくなるにつれて凸形状上面の面積が小さくなり、接触角が増大する傾向であった。
- (4) PX5の金属表面にCuGr-Aの電極を用いて加工深さ0.4 mmで放電加工を行ったところ、接触角は147°となり、超撥水の指標となる150°に近い結果を示したとともに、水滴が転がる様子が確認された。

5 謝辞

本研究は(一財)内藤泰春科学技術振興財団の令和2年度調査・研究開発助成によって実施いたしました。ここに感謝申し上げます。

6 参考文献

- 1) 正木ら;電気加工学会全国大会講演論文集, pp. 47-48 (2000)
- 2) 在川功一ら;2014年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 901-902 (2014)
- 3) 福山紅陽;表面技術, Vol. 60, No. 1, pp. 21-26 (2009)