研 究

複合研削加工の基礎的研究 (第1報)*

—無電解めっきによる複合研削砥石の製作—

喜 田 義 宏** 井 戸 守*** 久 野 雅 裕†

Study on the Combined Grinding Machining
—Production of Combined Machining Wheel by
Electroless Plating—

Yoshihiro KITA, Mamoru IDO
and Masahiro KUNO

Recently, the development of new materials belonging to hard machinable one has been increasing. In this situation a combined method of mechanical, electro-discharge and electro-chemical machining becomes attractive. It is called combined machining here. This type of grinding wheel which was made by electroless plating of Nickel (Ni) on a conventional WA wheel was investigated. The plated wheel has the same capability as a conventional grinding wheel and it is possible to change the ratio of usual mechanical removal action to electro-chemical removal action with this wheel. In this paper, an experimental analysis to get the condition of making a combined machining wheel is presented. The main factors which influence on

electroless Ni plating were classified into 7 levels and studied by means of experimental analysis based on factorial design through 64 kinds of different plating conditions. The influence of the factors and their mutual effects were obtained and represented as a regressive equation. The influence of the amount of plating, composition of plating bath and circumstances of heat treatment on hardness (Hv) of plated film was investigated. As the results it is known that film hardness reaches up to 1100 Hv after heat treatment at 400°C in air or in vacuum with the bath composite NaH_2PO_3 20 g/l and NiSO_4 40 g/l. Through grinding test, it was clarified that the amount of plating and machining conditions changed the machining characteristics such as grinding force, electric current, electric current efficiency and removal rate.

Key words: combined machining, electroless plating, conductive wheel, grinding wheel, plated film hardness, grinding force.

1. は じ め に

近年科学技術の進歩に伴い、複合材料や特殊材料の開発が盛んに行われている。それらは難削材の部類に属するものが多く、新材料の出現に伴い、その加工技術の研究が必要となる。このような観点から、加工に関しても新しい手法の導入が必要で、例えば、単一エネルギーによる加工のみならず、複数のエネルギーを同時または交互に作用させる複合エネルギー加工法が一つの有効な手段として考えられる。レーザ加工と機械加工あるいは放電加工と機械加工の組合せなど、被加工物の特性に応じて、加工能率や精度向上を目的とした複合加工法が可能であろう。すなわち、複合加工は複合エネルギーを付与することにより、それらの相乗効果を期待し、被削材の除去をより高能率で行わせようとするものである。

従来から存在する電解研削法は、電気化学的除去作用と機械的除去作用を併用した典型的な複合加工である。しかし従来の電解研削は電解的除去作用を主とし、機械的除去作用としては不働態膜を除去する程度で、被削材の除去に関しては主たる能力を持たないとされてきた。その後砥石の改良が進められ、近年では、エカムホイールと呼ばれる砥石表面に銅めっきを施した硬質導電性砥石の出現や、さらに電極を砥石に挿入した新しいタイプの導電性砥石の開発によって、電解と同時に機械的除去を重視した複合研削が行われるようになった。また先ごろ電解・放電・研削の三複合加工についての報告¹⁾が出されたばかりである。このように新しいタイプの導電性砥石の出現によって複合研削加工法は新たな前進の途についたところであると言えよう。この複合加工法は、複合材料はもちろんセラミックス等難削材にもその効果を発揮するものと考えられる。

複合加工砥石として要求される条件には

- (1) 通常の砥石と同程度の研削性を有すること
- (2) 砥石の目直し、成形性に優れること
- (3) 安定した電気伝導度を有すること

等が挙げられる²⁾。そこで、銅よりも安定性および研削

* 原稿受付 昭和58年5月9日。精機学会昭和57年度関西地方定期学術講演会(昭和57年7月13日)にて発表。

** 正 会 員 大阪府立大学工学部(堺市百舌鳥梅町4丁804)

*** 正 会 員 大阪府立大学工学部(現、大阪産業大学;大東市中垣3-1-1)

† 大阪府立大学工学部(現、光洋精工(株); 柏原市国分東条町24)

性が良いと考えられる Ni を, 市販の WA 砥石に無電解めっきをした複合研削砥石を製作した. Ni-P 無電解めっきには多くの因子が影響するため, 複合研削砥石の製作過程で検討すべき多くの問題が存在する. このため本報では, Ni-P 無電解めっきに及ぼす諸因子の影響を明らかにし, また同手法によって作られた導電性砥石のめっき量が, 電解研削特性に及ぼす影響について検討した.

2. Ni-P 無電解めっき

無電解めっきは電気めっきと異なり, 不導体面への直接めっきが可能であるが, 不導体そのものはめっき反応に対する触媒作用を有しない. このため不導体面に触媒作用を持たせるよう前処理を施す必要がある. また, めっき液には金属塩と還元剤のほかいくつかの薬品を添加する必要がある. 本実験で行った処理は以下の通りである.

1) 鋭敏化

不導体表面上に均一な無電解めっきを施すため, めっきの析出核となる触媒活性金属の微粒を試料表面に一様に分布させる必要がある. このため還元剤溶液として塩化第一すず溶液を用い, 不導体表面の鋭敏化処理を行った.

2) 活性化

めっき金属の成長核となり, めっき反応の触媒として作用する微粒子を被めっき体表面に付着させるため, 塩化パラジウム溶液を用いた.

3) 金属塩

めっき被膜となるべき金属イオンを供給するもので, 本実験では硫酸ニッケルを用いた.

4) 還元剤

めっき中の金属イオンを還元することにより, 金属被膜を析出させる作用をするもので, 本実験では次亜りん酸ナトリウムを用いた.

5) pH 緩衝剤

無電解めっき反応が進行すると水素イオンが増加し, めっき液の pH は低下する. このため, めっき速度は低下し, めっき被膜の組成および性状の変化を起こす. この pH の低下を抑制する緩衝剤として酢酸ナトリウムを用いた.

6) 錯化剤

次亜りん酸を用いた無電解めっきではめっきの進行につれてめっき浴中に亜りん酸イオンが蓄積され, これが遊離ニッケルイオンと結合し, 亜りん酸ニッケルの沈殿物が形成される. この沈殿物はめっき反応の触媒として作用するため, めっき液の自然分解の原因となる. この防止策として遊離ニッケルイオンの濃度を下げよう

Table 1 Factors and level

		-3	-2	-1	0	1	2	3
A	SnCl ₂ g/l		5	10	15	20	25	
B	PdCl ₂ g/l		0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	
C	NiSO ₄ g/l		10	20	30	40	50	60
D	CH ₃ COONa g/l		5	10	15	20	25	
E	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ g/l		5	10	15	20	25	
F	NaH ₂ PO ₂ g/l		5	10	15	20	25	30
G	T °C	65	70	75	80	85	90	95

エン酸ナトリウムを用いた.

3. めっき析出速度

めっき析出速度に影響を与える主な要因として以下のものをあげることができる.

- (A) 塩化第一すず (SnCl₂・2H₂O)
- (B) 塩化パラジウム (PdCl₂)
- (C) 硫酸ニッケル (NiSO₄・6H₂O)
- (D) 酢酸ナトリウム (CH₃COONa)
- (E) クエン酸ナトリウム (Na₃C₆H₅O₇・2H₂O)
- (F) 次亜りん酸ナトリウム (NaH₂PO₂・H₂O)
- (G) めっき浴温度

これらの要因がめっき析出速度に及ぼす影響を調べるため, 実験計画法に基づく一連の実験を行った. 各要因については, 今までに発表された例³⁾⁴⁾を参考に, 表 1 に示す 7 水準を設定した. これらの要因およびその二次の交互効果を調べるため, L₆₄ 型直交配列表に割付けを行い, 64 通りの組合せ条件でめっきの析出実験を行った. 本実験では被めっき体としてガラス板を用いた. めっきは, 前述の各処理を行った後, 200 ml のめっき浴中で約 30 min 間行われた. めっき析出速度としては, めっき前後のガラス板重量差から単位面積・単位時間当たりの析出量を求めた. 各要因が析出速度に及ぼす影響を表すため, 表 1 の各要因 A~G を変数 $x_1 \sim x_7$ に対応させ, 析出速度と要因の関係を回帰式として求めた. その結果を以下に示す.

$$\begin{aligned}
 y = & 0.085 + (-17.5x_3 + 41.1x_6 + 28.6x_7 \\
 & + 7.84x_1x_2 + 7.25x_1x_6 + 5.91x_3x_5 + 6.84x_4x_5 \\
 & + 7.81x_6x_7 + 5.69x_1^2 + 7.94x_2^2 + 2.19x_3^2 \\
 & + 7.06x_6^2 + 8.19x_7^2) \times 10^{-3}
 \end{aligned} \quad (1)$$

上式において, 各係数は F 検定により, 主要因は 1%, 交互効果は 5% の危険率で有意なものだけを採用した. この回帰式によるめっき析出速度と実験結果を以下に示す.

図 1 は硫酸ニッケル濃度が析出速度に及ぼす影響を示す. 同図はほかの要因を水準零として求めた結果であり, 同図から硫酸ニッケル濃度は水準 -1 で析出速度は最も

Fig.1 Influence of NiSO_4 Fig.2 Influence of NaH_2PO_2

Fig.3 Influence of temperature

大きく、その濃度が増加すると析出速度は低下することになる。

図2は次亜りん酸ナトリウムが析出速度に及ぼす影響を示すもので、析出速度の実測値は水準2で最大になっている。この場合の硫酸ニッケルと次亜りん酸ナトリウムのモル比は約0.5であった。図3は析出速度とめっき温度の関係を示す。ニッケルの析出反応は複雑で、まだ完全には解明されていないようであるが、基本反応は以下のように考えられている⁵⁾。

Table 2 Composition of electro-bath

NiSO_4 Concentration gw/l	NaH_2PO_2 Concentration gw/l	Point
10	20	A
15	20	B
20	20	C
10	30	D
15	30	E
20	30	F
10	40	G
15	40	H
20	40	I

この式に Eyring の速度式を適用すると Ni^{2+} イオンと H_2PO_2^- イオンの濃度が一定の場合には次式が成立する。

$$\log y = \text{const} - \frac{E}{2.3R} \cdot \frac{1}{T} \quad (2)$$

ここに、 E : 活性化エネルギー、 R : 気体定数、 T : 絶対温度。

この式より析出速度の対数と絶対温度の逆数とは比例関係にあり、図3の結果は上記関係とよく一致する。

4. めっき被膜の硬さ

Ni-P 無電解めっき被膜は熱処理によって硬化することが報告されている。熱処理を行わない状態では被膜は延性に富み、そのまま加工に用いると砥石の目づまりを生ずるであろうし、また良好なドレッシングを行えないことになる。このため本実験では、めっき浴組成と熱処理の関係を明らかにするため、硫酸ニッケルの濃度と次亜りん酸ナトリウムの濃度を表2に示すように変化させ、合計9種類のめっき浴を作成し、これらの組成と得られためっき被膜の硬さについて調べた。またそれぞれのめっき浴によって得られためっき膜は、大気中と真空中の両雰囲気中で熱処理を行った。熱処理としては200°C、400°C、500°C、600°Cおよび700°Cの温度で1h保持し、その後炉冷した。硬さの測定には微小ビッカース硬度計を用いた。図4に、各種めっき浴および熱処理によって得られためっき膜硬さを示す。記号A~Iはめっき浴組成A~Iによって得られためっき膜硬さである。図より明かなように、熱処理を行わないめっき膜硬さは、600 Hv程度であるが、処理温度を400°C位まで上昇させると、めっき膜の硬さは増大する。しかしそれ以上に処理温度を上昇させると硬さは低下することがわかる。ニッケル被膜中に含まれるりんは、ニッケルに固溶している部分とそうでない部分の混在状態となっているが、熱処理を行うことによってりんが次第にりん化ニッケル(Ni_3P)として結晶化し、硬さが増加するためと考

Fig. 4 Hardness of plated film

Fig. 5 Illustration of electroless Ni-plating on a conventional wheel

えられる⁶⁾。さらに温度が上昇すると、りん化ニッケルの結晶粒が粗大化し、めっき膜の硬さは低下してくる。大気中と真空中で熱処理を行った場合、大気中で熱処理を行った方がめっき膜硬さはやや低い傾向がみられるが、その差はわずかである。いずれの場合も処理温度約400°Cで硬さは最高となることがわかった。また、めっき浴組成I、すなわち NaH_2PO_2 が 20 g/l、 NiSO_4 が 40 g/l のめっき浴で最も硬い被膜が得られた。

5. 無電解めっきによる電導性砥石の製作

前述の基礎的実験を基に、めっきの析出速度およびめっき液の安定性を考慮し、組成Iのめっき液を砥石の無電解めっきに採用した。砥石のめっきは、図5に示すように、容器内で砥石を水平に保持し、内部までめっきが施されるよう、その上側からめっき液を注ぎ、砥石を通過させた。めっき砥石としては、精密加工が行えるビトリファイド結合剤のWA砥石を用いた。砥石めっき量は、めっき前後の重量差から算出した。めっき量が、研削加工現象に及ぼす影響について検討するためWA60の砥石に、異なるめっき量(3, 9, 15, 26, 40, 102 gw)を施

した電導性砥石を作製した。

5.1 めっき砥石の通電性

めっき砥石の通電性を調べるため、めっき砥石の外周面から半径方向に約5 mm程削除し、砥石スピンドルと外周面の電気抵抗を測定した。めっきされた部分の電気抵抗はほぼ零であり、砥粒の破砕面等空孔でなかった部分は当然めっきが施されていないため通電性はなかった。そこで砥石の通電性とめっき量の関係を求めるため以下の方法でテストを行った。まず、めっき砥石を研削盤に取り付け、スピンドルと砥石表面間に針状ブラシを用いて図6に示す電気回路を構成

した。次にこの砥石をゆっくり回転させ、A-A'間の電位差 E を測定し、ブラシ上を通過した砥石周上の単位通過距離当たりの平均電位差を求めた。図6(b)には砥石中央部と端面で測定した結果を、完全な通電性がある状態を100とした百分率で示した。同図より、めっき量が10 g以下では平均電位も小さく、また中央部と端面では差があることがわかる。

6. めっき量が加工状態に及ぼす影響

6.1 実験方法

図7に実験装置の主要部を示す。複合研削盤は小型の平面研削盤を改造したもので、研削抵抗を測定するため八角形弾性リングにひずみゲージを貼付した動力計を用いた。工作物のオーバカット量を測定するため試料の両側をフェノール樹脂で挟み付けた。この際、各加工条件における樹脂のみの研削抵抗をあらかじめ測定しておき、研削抵抗に及ぼすフェノール樹脂部の影響を補正した。実験条件は表3に示す。

6.2 めっき量と電流変化

Fig. 6 Influence of the amount of plating on wheel conductivity

Fig. 7 The set up of ECG experiment

Table 3 Experimental conditions

ECG wheel	WA 60 M
	Plated (gw) 3, 9, 15, 26, 40, 102
	Size: 150×15×24.5, Straight
	Speed: 1 500 m/min
Workpiece	S 55 C, Annealed 30 min in vacuum
Voltage	0-21 V
Table speed	0-10 mm/min
Setting depth	0.25, 1.00 mm
Dressing	Single diamond point
	Feed rate: 0.2 mm/rev
	Depth of cut: 0.01 mm
Electrolyte	20% NaNO ₂ solution, 4 l/min

砥石に施しためっき量と加工電流の関係を、電圧一定 (10 V) として求めた。図 8 はその結果であり、加工条件を変数として変化させている。同図より、めっき量が増大すると電流も増大し、その増大割合はめっき量が 10 g 以上ではゆるやかになっているのがわかる。

加工条件の影響としてはテーブル送り速度の大きいもの程、および切込み量が多い程加工電流は大きいことがわかる。これは切込み量が多いと砥石と被削材の接触面積が増大し、またテーブル送り速度が増大すると、機械的除去量の増大に伴う新生面が多くなり、不動態膜の生成領域が減少するためと考えられる。

6.3 めっき量と研削抵抗

図 9 はめっき量と研削抵抗の垂直分力の関係を示す。同図より、垂直分力はめっき量の増大とともに減少し、その減少の割合は加工条件が過酷な程少ないことがわかる。これは切込み量または送り速度が増大すると複合加工中に占める機械的加工割合が増大し、めっき量が十分でない場合には、電気化学的除去作用が限界に達しやすいためと考えられる。このため十分な量がめっきされるまではめっき量の増加に伴い研削抵抗も減少することが

Fig. 8 Influence of the amount of plating on electric current

Fig. 9 Influence of the amount of plating on grinding force

わかる。そしてめっき量が 40 g 以上の範囲では、いずれの加工条件に対しても研削抵抗の低下傾向は認められず、このことより 40 g 以上のめっき量があれば電気化学的作用は十分生ずると考えられる。すなわち砥石重量百分率で 15% 程度以上のめっき量があれば研削現象に及ぼす電気化学的作用は可能限度に達すると考えられる。なお、めっき量と研削抵抗の水平分力の関係は、垂直分力の場合と同様な傾向であることが認められた。

6.4 めっき量と電流効率

本報での複合加工は放電がほとんどない場合を考えている。そこで、複合加工は電解作用がその大部分を占めると考え、工作物の電解作用に要した電解電流 I_m に対する理論的電解電流 I_e の比を電流効率とする。単位時

Fig. 10 Relation between electric current efficiency and the amount of plating

間・単位電流当たりの電解加工体積を V_s とすると、鉄に対する V_s は $2.21 \text{ mm}^3/\text{A} \cdot \text{min}$ と試算されるので、ファラデー電流 I_e は次のように与えられる⁷⁾。

$$I_e = \frac{bV}{V_s} (2\sqrt{t_0 \cdot t_e} + t_e - t_c) \quad (3)$$

ここに、 b : 研削幅、 V : テーブル送り速度、 t_0 : 砥石切込み量、 t_e : 全オーパカット量、 t_c : 境界切込み深さ。

したがって電流効率 η は次式で求められる。

$$\eta = \frac{I_e}{I_m} \times 100 \quad (\%)$$

$$= \frac{bV}{V_s I_m} (2\sqrt{t_0 t_e} + t_e - t_c) \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

式(4)より電流効率を求めると図10の結果が得られる。同図より電流効率は加工条件によって異なり、めっき量が40g以下の範囲ではめっき量の増加に伴い増大するが、それ以上のめっき量では電流効率はあまり変化しないことがわかる。この傾向はいずれの加工条件に対しても同様である。以上のことから、めっき量がある値に達すると電流効率もほぼ一定値に達するとみなせる。

7. 結 言

複合研削加工用砥石として、十分な通電性を有し、かつ通常の研削能力を保持し、さらに成形性に優れた砥石が望ましい。このため通常用いられるWA砥石にNi-P無電解めっきを施した導電性砥石を製作した。無電解めっきには非常に多くの因子が影響し、効率のよいめっき条件を定めることが大きな課題となる。本研究では主要因を取り上げ、実験計画法に基づき、各要因の水準を変化させ、それらがめっき速度に及ぼす影響について検討した。また、めっき膜の熱処理条件やめっき浴組成とめっき膜硬さの関係について調べた。さらに、めっき量

と複合研削現象に及ぼす影響について実験的に検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) めっき析出速度は硫酸ニッケル、次亜りん酸ナトリウム、めっき液温度によって大きく影響される。その他の要因についても交互効果の存在することがわかり、それらの関係式が求められた。
- (2) Ni-P無電解めっき膜の硬さはHv 600程度であるが、300~400°Cの温度で熱処理を施すことによってその硬さを著しく向上させることができる。熱処理は真空中でも大気中でも得られる硬さに大差はない。
- (3) 熱処理後のめっき膜の硬さはめっき浴の組成によって変化する。本実験の範囲では NiSO_4 が40 g/l および NaH_2PO_2 が20 g/lの濃度で最も硬くなり、その値はHv 1100に達した。
- (4) 砥石めっき量は重量百分率で約15%以上あれば、複合研削現象に及ぼす電気化学的作用はほぼ可能限度に達しているとみなされ、それ以上のめっき量に対してあまり変化しないが、15%以下ではめっき量に依存する。
- (5) 複合研削抵抗、電流効率とも加工条件によって変化し、このことから複合研削における電気化学的および機械的除去作用の割合は加工条件およびめっき量が少ない場合(重量百分率15%以下)はめっき量に依存する。

複合研削は、その適用の仕方によって難削材の加工に非常に有効であると思われるが、それらに関しては続報で述べることにする。

最後に、本実験を行うにあたり、重研削専門委員会を通じ、砥石の提供をして頂いた大阪金剛製砥(株)およびめっき砥石のサンプルを頂きました不二越(株)の翁登茂二氏に感謝致します。

文 献

- 1) 久保田 護, 田村祐二: 電解と放電と研削の三複合加工法, 電気加工学会誌, **15** (1982) 30.
- 2) 翁 登茂二: 新しい電解研削砥石, 不二越技報, **31**(1975) 34.
- 3) 石橋 知: 無電解メッキ, 金属表面技術講座9, 朝倉書店(1968).
- 4) 神戸徳蔵, 伊勢秀夫: 無電解メッキ, 電鍍, 金属表面工学全書7, 槇書店(1972).
- 5) 文献3)に同じ.
- 6) 呂 戊辰: プラスチックスのメッキ, 日刊工業新聞社(1964).
- 7) 小野浩二, 島宗 勉, 山本輝久: 電解研削に関する研究(第1報), 精密機械, **45**, 3 (1979) 322.