

電 解 成 形 研 削 法

Electrolytic Profile Grinding Method

古 橋 一 尊* 水 原 康*
Kazutaka Furuhashi Yasushi Mizuhara

要 旨

電解加工法により、各種材料、形状の総形加工を行なう方法について述べた。円板状のグラファイト電極を、総形バイトによりその円周上を切削成形し、その電極により加工品表面を電解加工法によって加工するため、複雑細密形状の加工が行なわれる。
本論文はグラファイト電極を切削する場合の、総形バイトの摩耗、切削力および各種材料、形状加工時の加工特性について報告したものである。

1. 緒 言

科学技術の進歩に伴って新しい加工法が登場してきた。電解研削法もその一つである。電解研削は、1950 年代に難加工材料の代表的なものである超硬バイトの加工用としてアメリカで実用化され、日本でも数社がこの開発を進め、現在、バイト、平面、円筒、内面、カッタなどの研削に応用されている。

今回報告する電解成形研削は、超硬合金製のプレス型、総形バイトおよび鋼材などを細密形状加工することを目的に数年前に開発され、現在実用段階にはいり急速に発展しつつある。

総形加工は、難作業とされていたが、この加工に使用される工具（従来の加工では、砥（と）石やカッタの総形成形を行なってこれを用いている）の製作が難作業の原因である。電解研削法における電極摩耗が少ないことに着目して、工具である電極にグラファイトを用い、少なくとも数倍の経済性向上の効果を発揮している。

2. 原 理

電解研削を含む電解加工法の原理は、ファラデーの電気分解の法則に基づいている。

電解成形研削法は図 1 に示すように、回転円板電極を陰極に、加工品を陽極にし、この両者間に加工品材質に適した電解液を与える。この際、電解液は加工部に直接供給されず加工部から離れた位置に供給され、加工部には電極回転によって大部分が除去される。電極面に付着残留した程度の微量を与えることが加工精度の点から採用

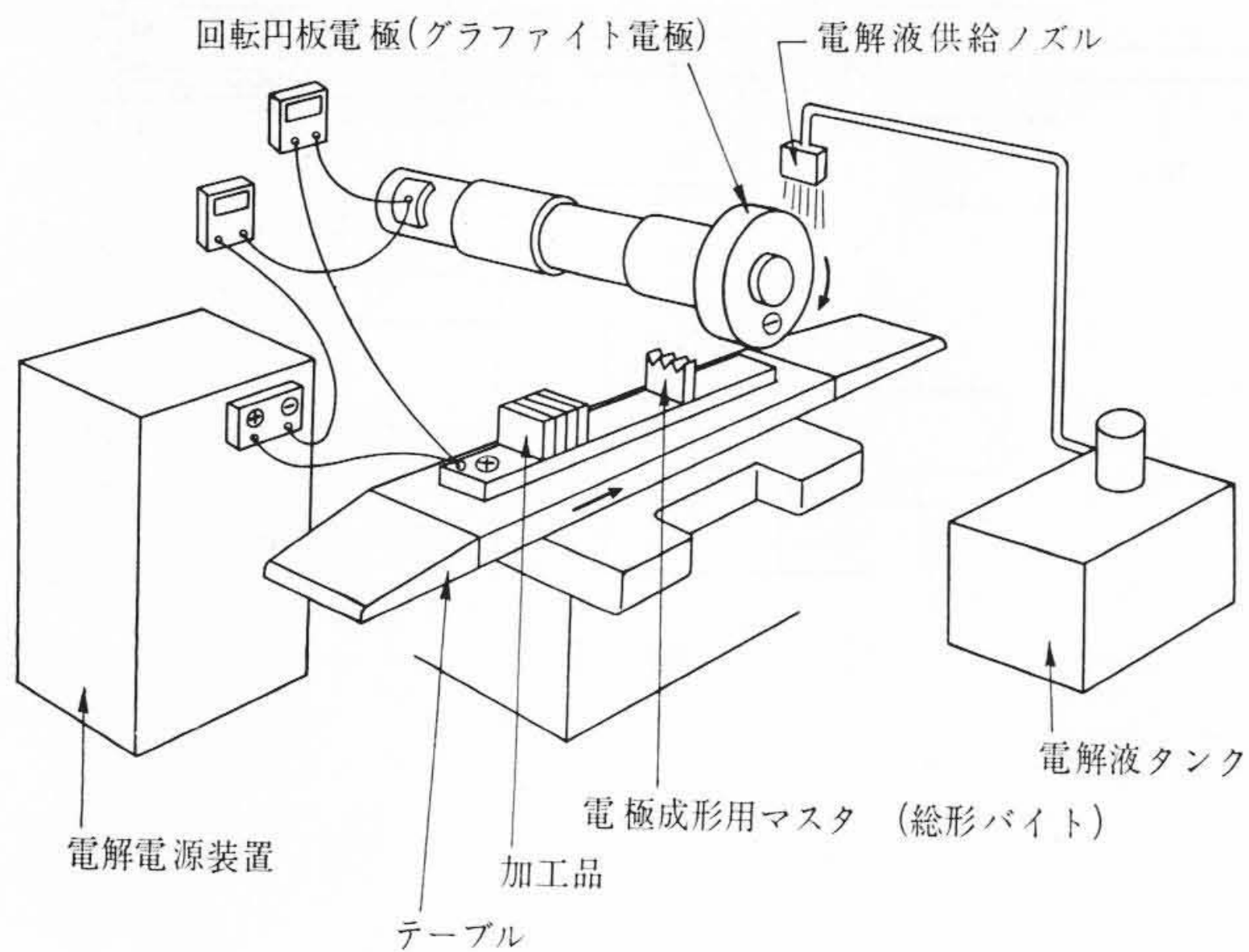


図 1 電解成形研削法の構成

されている。しかし、加工品材質によって選択溶解（溶けすぎたり、溶けなかったりする部分を生ずるため、加工面が凸凹（おうとつ）状になる）や、電流を通しにくい不動態皮膜を加工面に生成する場合がある。

このような場合には、特殊波形の電源により電気化学的に解決させている。また、簡単な形状の場合には、砥粒（アランダム砥粒など）を電極に混入してこの機械的研削作用を電解作用と併用している。

3. 電解成形研削法の分類

電解成形研削は、通常の機械的総形研削と同じように、砥石（電

表 1 砥石成形法による分類

No.	砥石成形法	略 図	砥石の機能	機械研削の場合
1	クラッシングロールにより機械研削用砥石（ビトリファイド砥石）を成形し、その砥石でダイヤモンド砥石を成形研削する方法		通常のメタルボンドダイヤモンド砥石と同程度で導電性を長くしたもの。（砥粒はダイヤモンド粒子である）	ダイヤモンド砥石の成形は非常に困難で、三角山、半円形状程度の成形しかできない。（電解研削の場合も同じである）
2	ダイヤモンドツールにより砥石を成形する方法		通常のビトリファイド砥石と同程度で導電性のあるもの。（砥粒はアランダムシリコンカーバイトなどの一般砥粒）	ダイヤモンドツールにより行なう方法は一般的であるがバリカンの刃のように深みぞの場合は成形できない。（電解研削の場合も同じである）
3	クラッシングロールにより砥石を成形する方法		通常のビトリファイド砥石と同程度で導電性のあるもの。（砥粒はアランダムシリコンカーバイトなどの一般砥粒）	複雑な曲線を与える場合に用いている。深みぞの場合はクラッシングロールの摩耗砥石の欠損などにより成形できない。（電解研削の場合は、電極砥石の硬（かた）さの点から用いられない）
4	マスタ（総形バイト）により砥石を成形する方法		砥石成形時マスターの摩耗がないように軟（やわら）かく切削性のよいもので、かつ導電性のあるもの。（砥粒を含まないものまたはガラスなどの軟砥粒）	機械研削ではこの方式はない。すなわち、研削時に砥石が軟かいと摩耗してしまうからである。

* 日立精工株式会社

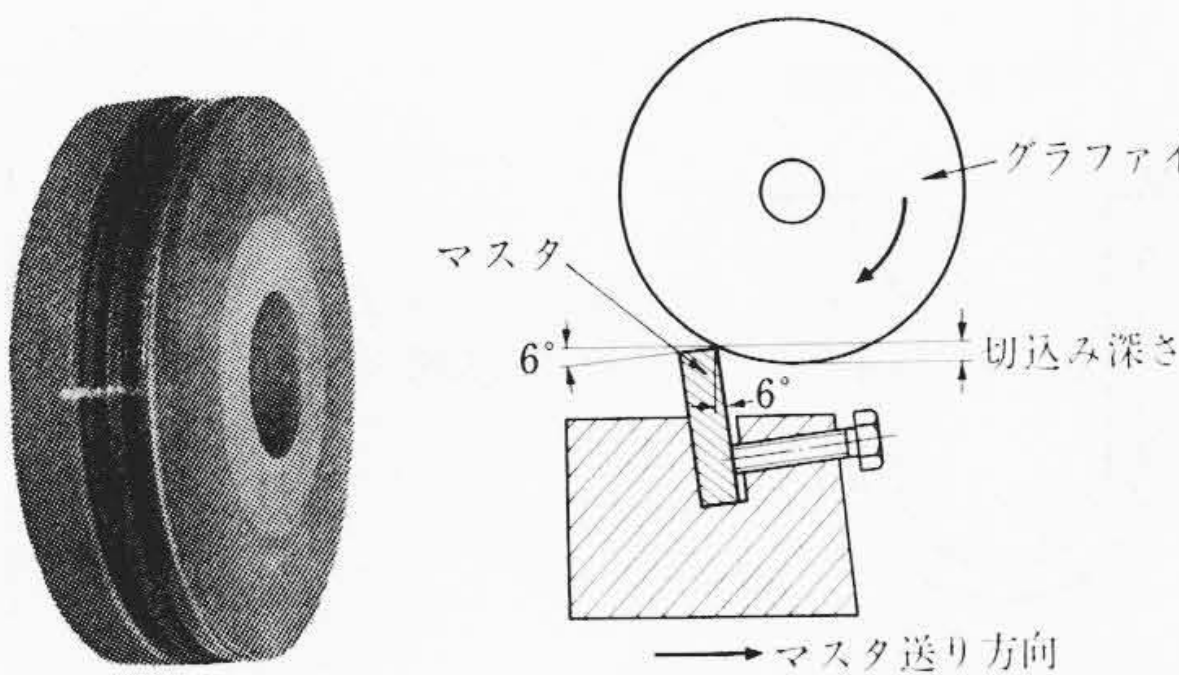


図2 グラファイト電極

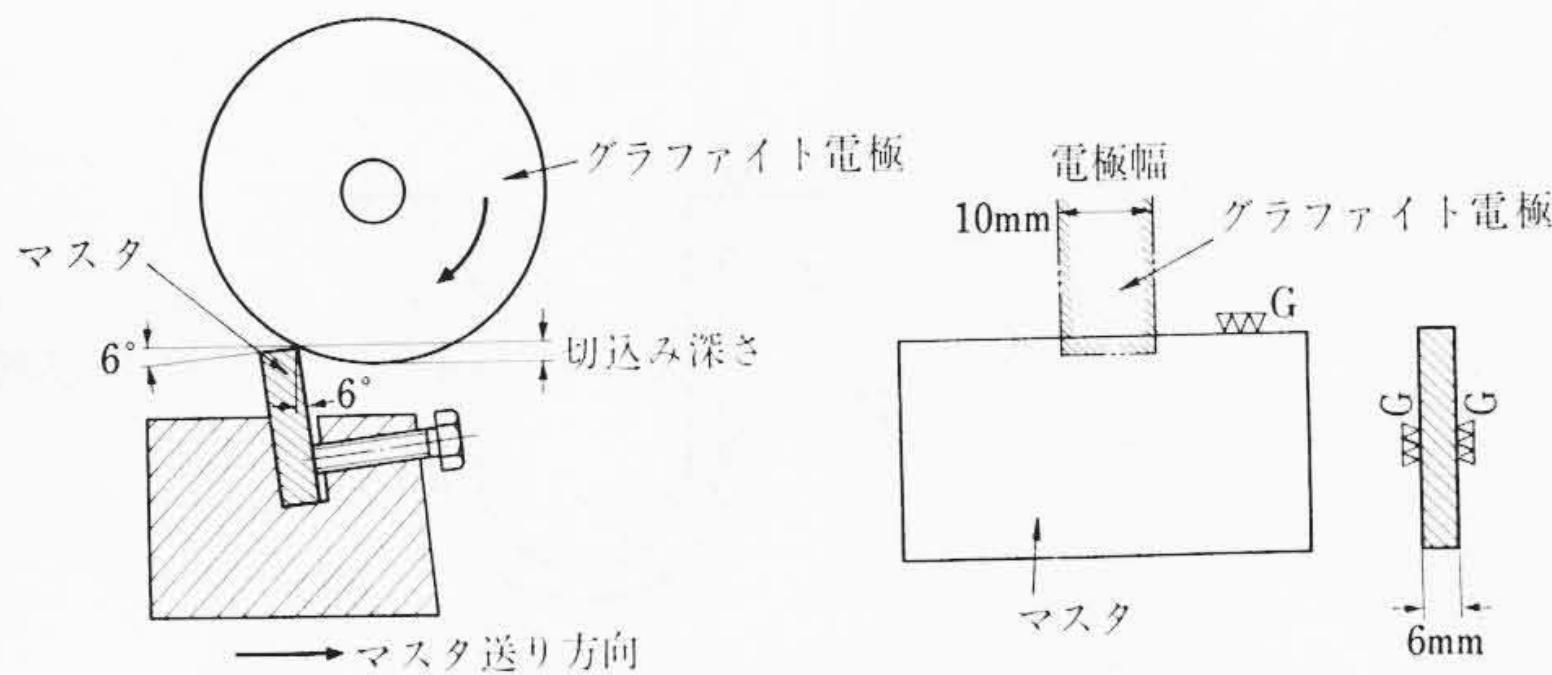


図3 電極成形性能の実験方法

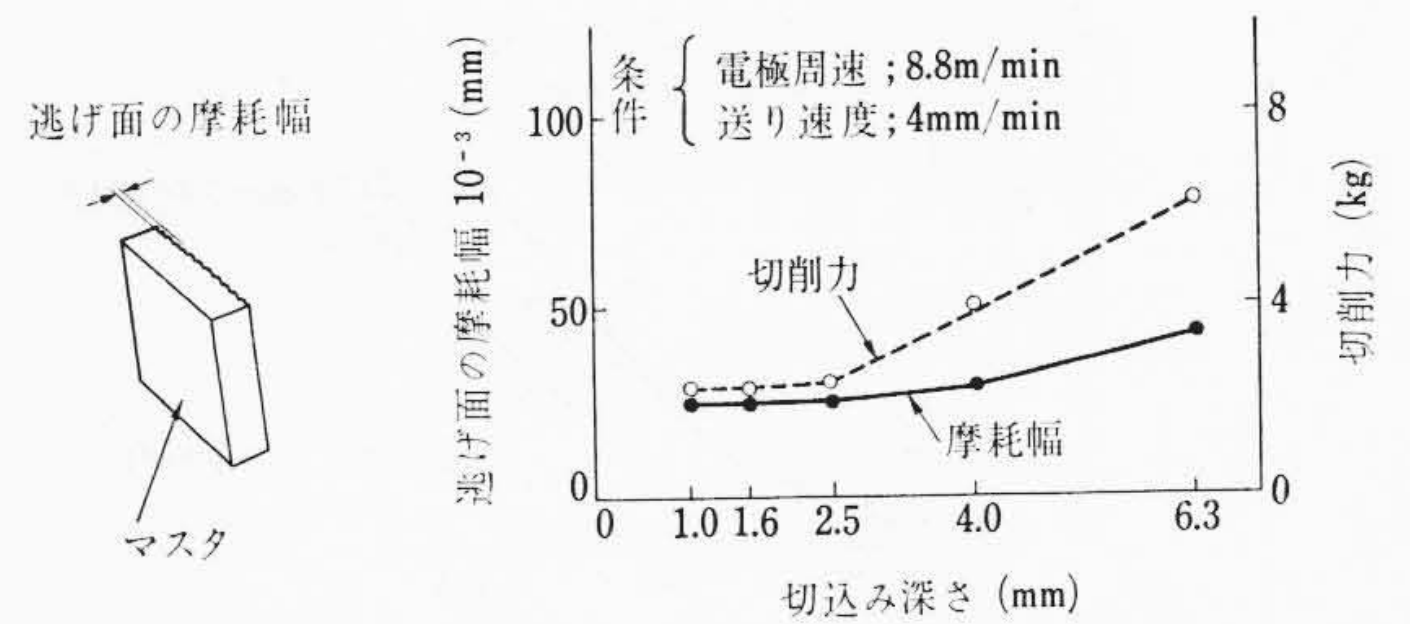


図4 電極成形時の切削力とマスタの摩耗

極)の外周に与えられた形状を加工品に転写することにより加工が行なわれる。この研削法を分類すると、まず砥石の成形方法と電解作用とから分類することができる。砥石の成形方法により表1のように分類される。マスタによる砥石成形の場合、すなわちグラファイト電極を用いる場合が、砥石成形に容易なことは明らかであるが、前章で述べたように選択溶解の発生がある材料の場合には、砥粒入り電極砥石を用いて、これをダイヤモンドツールにより成形せざるを得ない。また、不動態皮膜の発生が著しい材料の場合、たとえば超合金K種や銅合金の場合は、特殊電源により解決できるので、グラファイト電極をマスタにより切削成形する方法が用いられているのが現状である。このように、特殊な場合を除いては、電極砥石の成形が容易なことから、グラファイト電極をマスタにより成形する方法が最も好評を得ているので、この方法についての諸特性を以下述べることにする。

4. 電極(砥石)とその成形性

不動態皮膜の除去もできるようにするため、砥粒を混入した電極をマスタにより成形するため試作実験を行なったが、微量の砥粒を混入してもマスタの摩耗が多く実用に供し得ないことがわかった。そのため、不動態皮膜の除去には電気化学的作用を用いることにし、まず成形性の良い電極を使用することにした。

この方針により電極を選定すると、

- (1) 電極成形性が良いこと(電極成形時の切削性が良く、しかも細密形状に成形してもじゅうぶんな強度が得られること)。
- (2) 電極と加工品が接触し短絡しても、両者の損傷が少ないこと(両者の接触により、接触部における電圧降下を大きくして放電現象を発生しにくくするため、適当な固有抵抗をもった導電体であることが望ましい)。
- (3) 入手しやすく、かつ安価なこと。

以上の3点から、グラファイト電極を電解成形研削用の電極砥石として使用することにした。

4.1 グラファイト電極の選定

各種のグラファイト電極を試験した結果、電解成形研削用グラファイト電極としては、次の特性のものが良いことがわかった。図2は成形を行なった電極の外観である。

(1) 製作方法

グラファイト材料の製作方法には、押出成形と型押し成形があるが、型押し成形のほうが高密度に製作できるので、気孔の発生がなく、電極砥石としてマスタにより切削成形する際、欠けなどの発生がない。欠けが発生すると、電解研削時に欠け部の鋭角部で放電現象が発生しやすくなり、能率、面あらさともに良結果を得られない。

(2) 曲げ強さ

マスタによる切削成形時に発生する切削力および電解研削時に

高速回転するために発生する遠心力に、じゅうぶん耐えられるためには曲げ強さは大きいほど良い。実験によれば 150 kg/cm^2 以上あれば耐えうるということがわかったが、密度との関係もあり現在 400 kg/cm^2 のものを採用している。

(3) 比抵抗

一般にグラファイト電極の比抵抗は、 $7 \times 10^{-4} \sim 12 \times 10^{-4} \Omega/\text{cm}$ であり、この範囲内のものならば、電極と加工品が接触短絡しても両者の損傷はきわめて小さい。

(4) 見掛け比重

高密度のものほど電極成形時の欠けが少なく良品であるが、一般的にグラファイト電極の場合は、これを見掛け比重で表わす。使用できる範囲としては、1.6以上あれば良いが、現在1.8のものを使用している。

(5) そのほか

不純物が少ないほど砥石成形性にすぐれている。当初、黒鉛粉末を合成樹脂により固形化したものを試作したが、この場合、細密形状の成形は行なわれなかった。

4.2 グラファイト電極のマスタによる成形性

(1) 切削力とマスタ切削の摩耗

外径 $200 \text{ mm} \phi \times$ 幅 10 mm のグラファイト電極を、ダイス鋼(SKD-11)、硬度 $\text{HRc } 60^\circ$ のマスタにより図3に示すように切削成形した場合、図4に示す切削力を要し、切削部の摩耗も少ないことがわかった。すなわち、形状深さ 6.3 mm の電極成形を行なう場合、マスタの送り速度 4 mm/min で1回の切込みで行なった際、マスタ切削部の摩耗は 0.05 mm 以下のため掬(すく)い面を 0.05 mm 平面研削することによって、形状に無関係に切削を更生させることができる。

(2) 形状による電極成形時の切削力の差異

図5に示すように垂直な角みぞを成形する場合、純粋な切削力よりもみぞ部側面における電極とマスタの摩擦力のほうが大きい。そのため、必要な電極成形力は大きくなる。その関係を示したのが図6である。したがって、マスタの摩耗、電極成形時間の短縮、マスタ形状の電極への転写精度、電極再成形時の心出し、成形量などから垂直部の少ない部品形状のほうが、電解成形研削法においては望ましい。

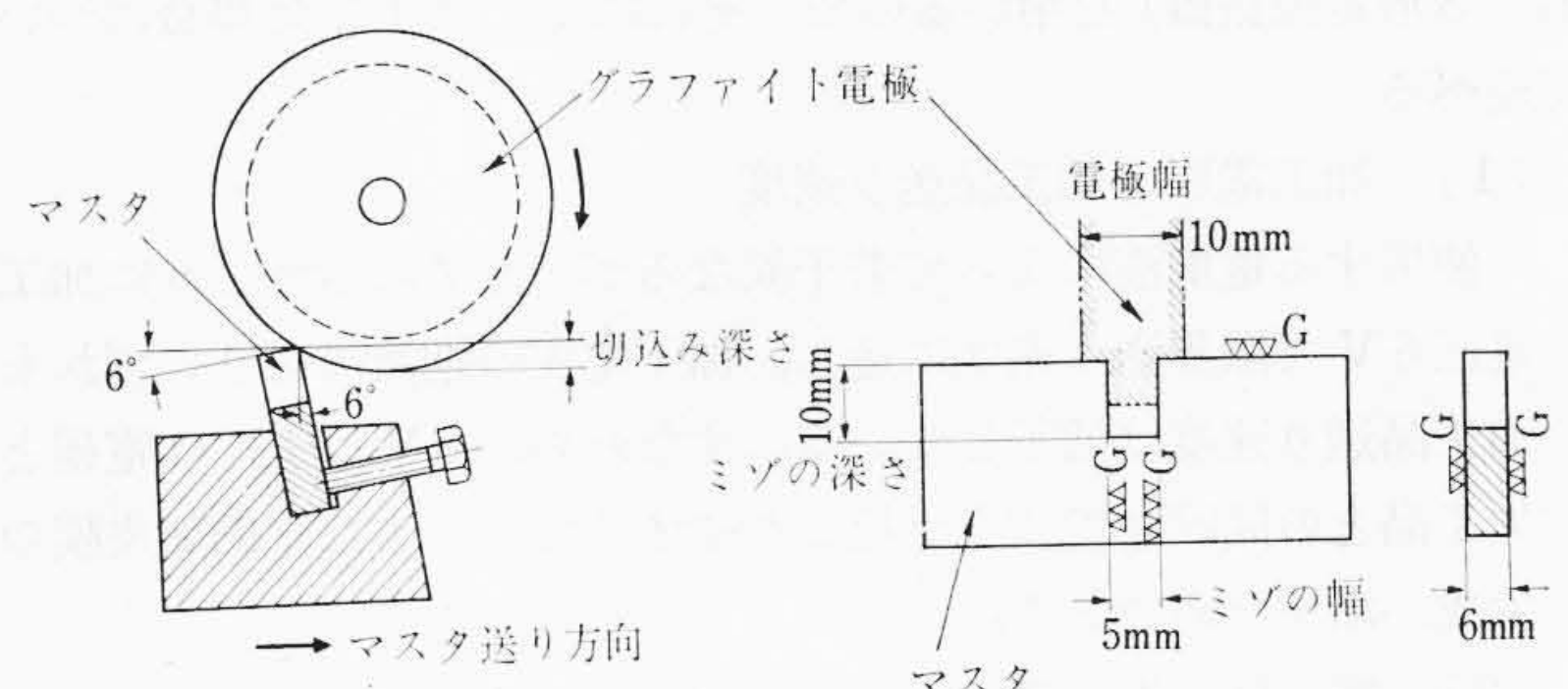


図5 垂直形状の電極成形性能の実験方法

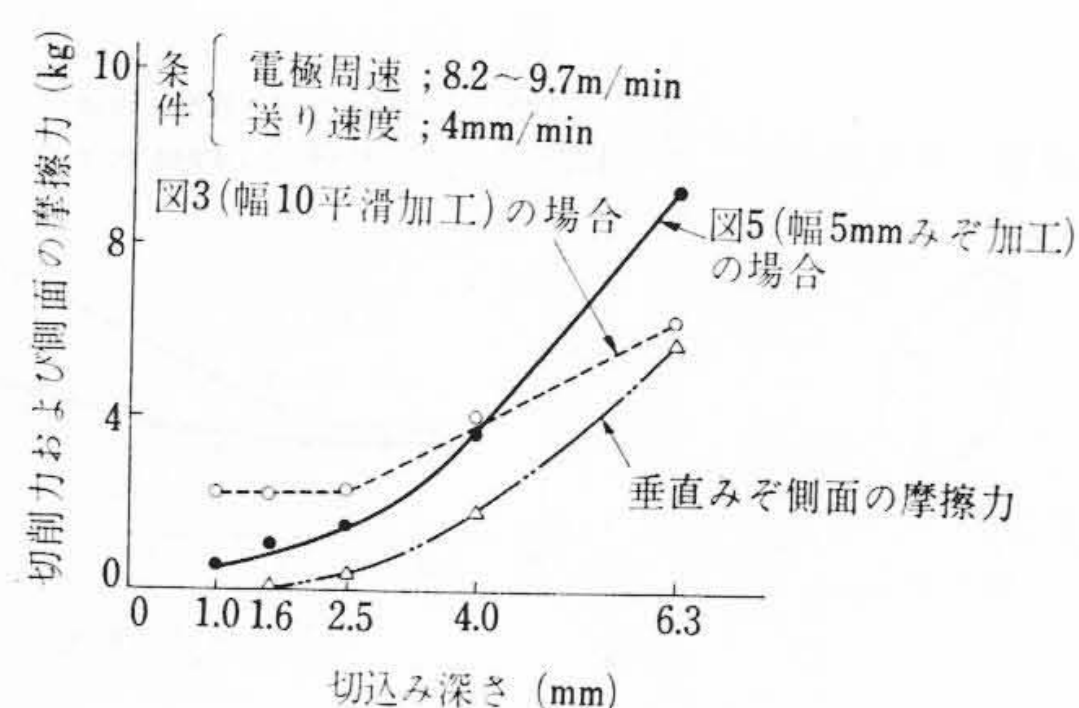


図6 垂直形状の電極成形時の切削力と摩擦力

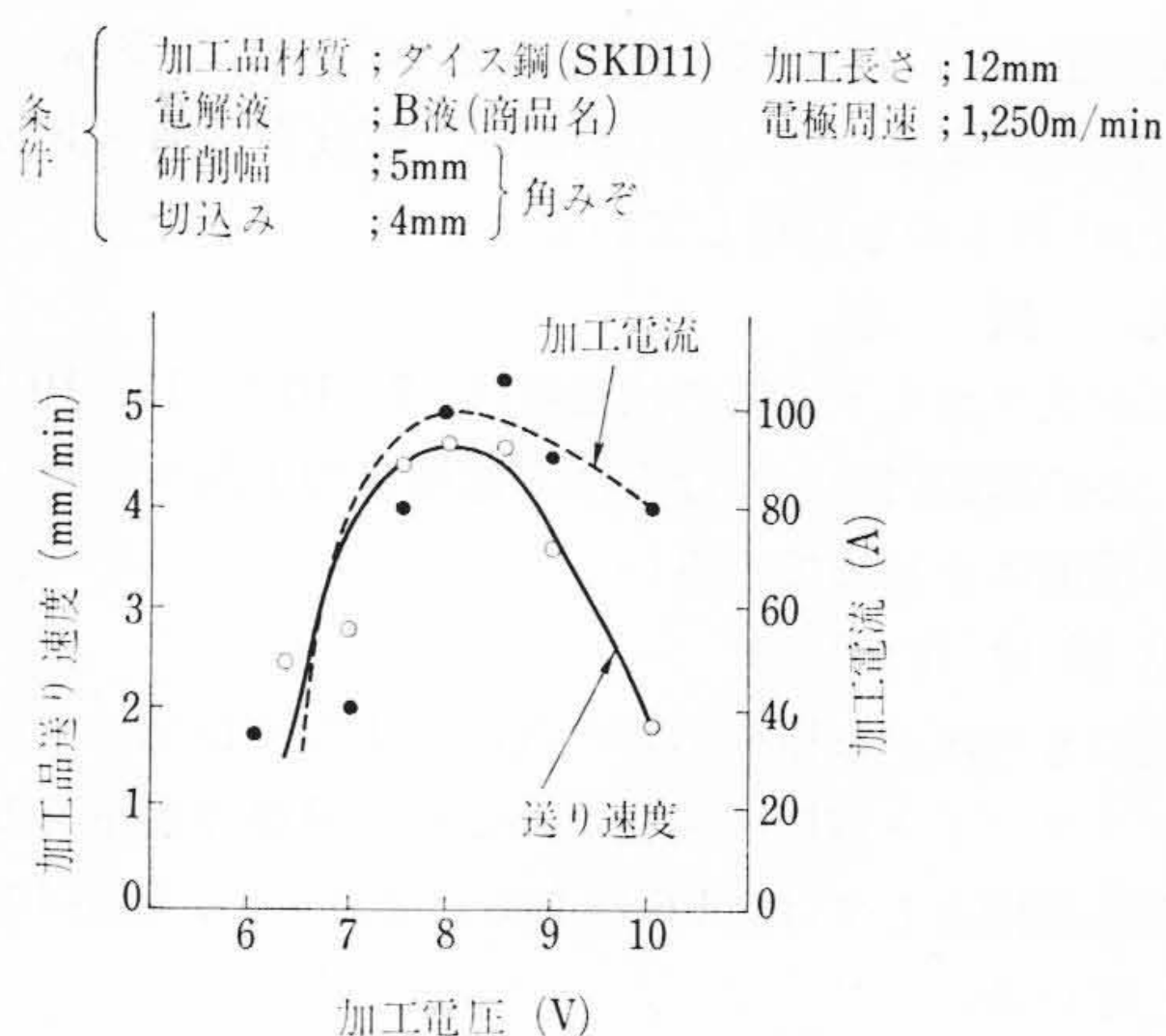


図7 加工電圧と加工品送り速度の関係

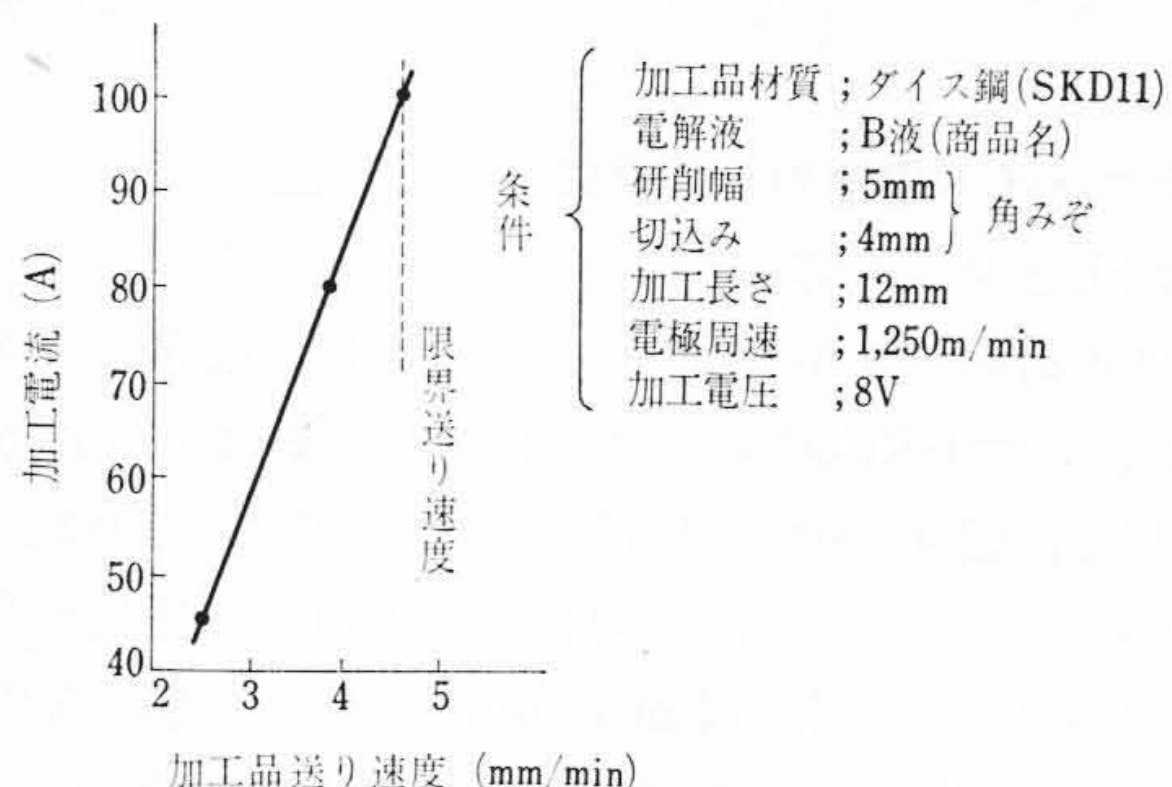


図8 加工品送り速度と加工電流

5. 電解成形研削法における加工特性

グラファイト電極を使用した電解研削では3.に述べたように機械的研削作用が行なわれないため、加工品材質によって生ずる不動態皮膜発生の有無により、使用する電解電源が異なり、しかもその加工特性は著しく異なる。そのため、一般的に不動態皮膜発生が少ない鋼材と、発生の多い超硬合金に分けてその加工の諸特性を述べる。

5.1 鋼材の加工特性

鋼材の場合は、通常の電解電源装置、すなわち、直流電源(商品名:S形電源装置)を用いるので、それにより加工した場合について述べる。

(1) 加工電圧と加工品送り速度

使用する電解液によって若干異なるが、図7に示すように加工電圧8Vで限界送り速度に達し、加工電圧の増減によりいずれも加工品送り速度は低下している。すなわち、8V以上では電極と加工品との間げきで放電が起こりやすくなり、また不動態皮膜の生成が増すためである。

(2) 電 極 周 速

電極周速 700~2,000 m/min の範囲内で試験を行なった。その

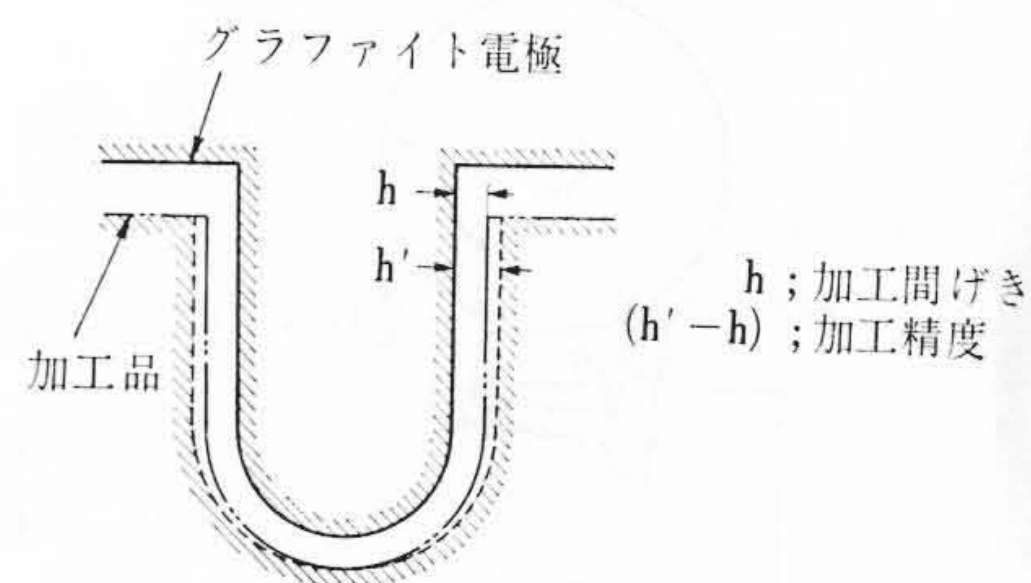


図9 加工間げきと加工精度の定義

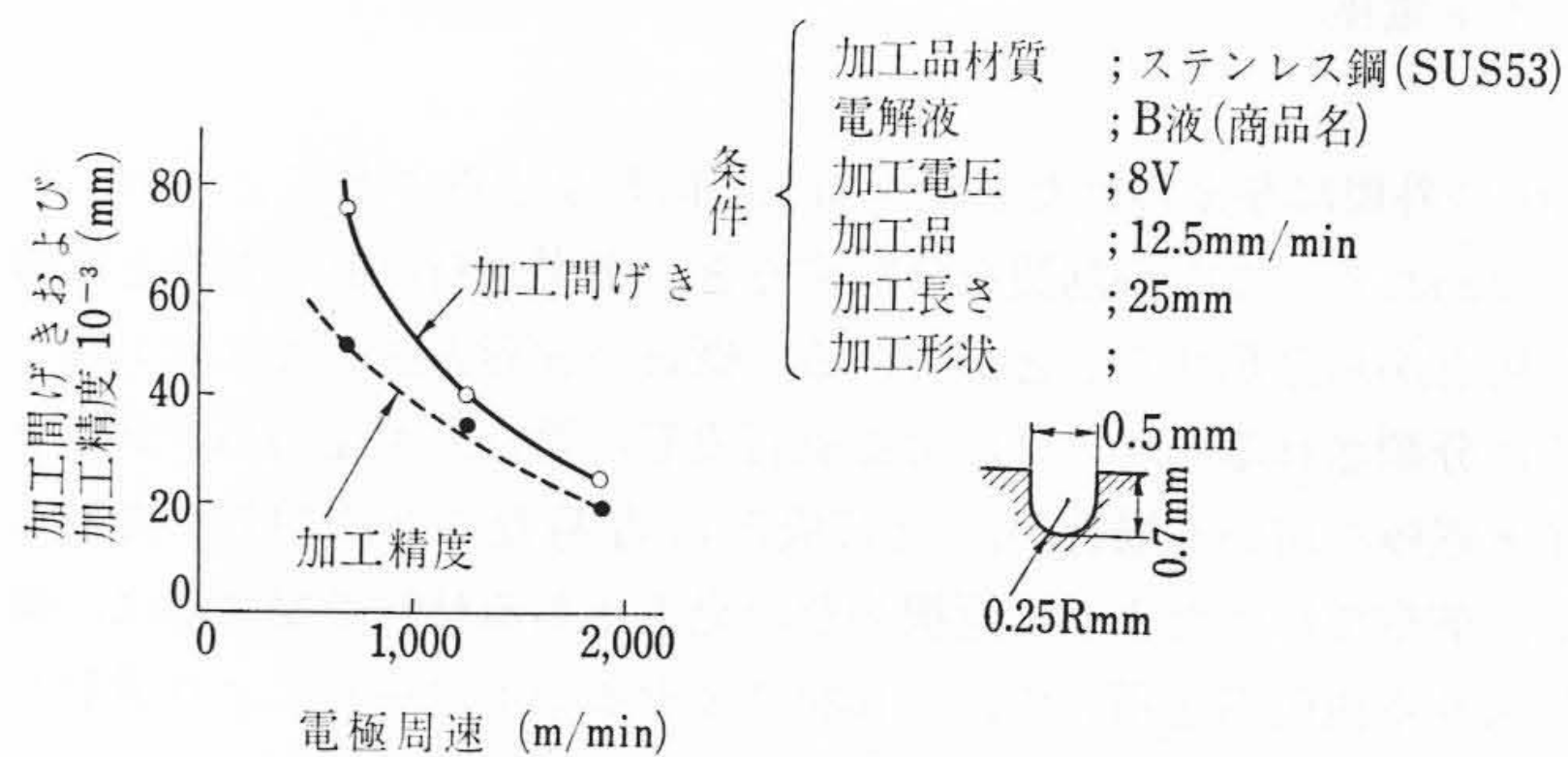


図10 電極周速と加工間げき加工精度の関係

結果、周速の増減によりいずれも加工品送り速度が低下し、特に低速にすると加工間げきが大きく、しかも加工精度も低下することがわかった。このことから、能率、加工精度を考えて、通常の機械研削の場合と同程度の周速(1,200~1,800 m/min)が適正と考えられる。

(3) 加工品送り速度と加工電流

加工電圧を一定にして、送り速度を増加すると、図8に示すように加工電流は直線的に増加する。この理由は、電極外周面と加工品との間げきが小さくなるため、それに伴って放電を発生し始め、ついには短絡する。したがって、各材料、加工電圧における適正加工品送り速度が存在することがわかる。

(4) 加工精度に及ぼす諸条件

加工精度に及ぼす因子としては、電解液の種類、液量(電極周速を高くすると加工部に供給される液量が少なくなる)、加工電圧、加工品送り速度が考えられる。これらの加工精度に及ぼす影響について述べる。

(a) 加工精度の定義

電解成形研削法も、電解加工法と同じように電極と加工品の間に電解液膜の存在する電解間げきを生ずる。すなわち、電解間げきとは電極に対して加工品が大きく加工された量(みぞの場合)をいう。この値は、図9に示すhであるがこの間げき量は、マスタをあらかじめ小さく製作することにより修正できるので、加工精度としては加工品相互間の誤差、 $h'-h$ を加工精度と定義した。

(b) 電極周速の影響

図10に示すように、周速の増大によって、加工精度、加工間げきともに向上する。すなわち、加工間げきが小さいほど、加工精度が向上することがわかる。また電極周速の影響が大きくなることがわかる。

(c) 加工品送り速度の影響

同一電圧のもとに加工を行なうとき、加工品送り速度の増加とともに、加工間げき、加工精度とも小さくなると考えられるが、図11に示すように加工精度はほとんど影響されない。

(d) E/v(加工電圧/電解速度)の影響

加工電圧と電解速度(電解速度とは、加工品送り速度ではなく

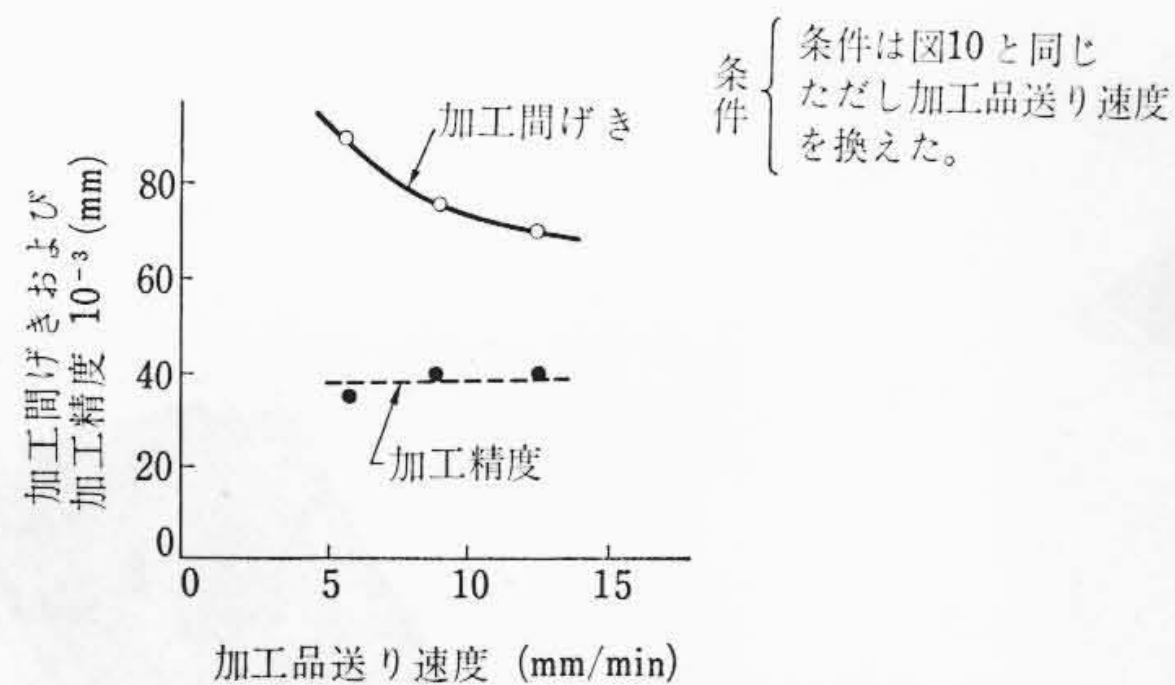


図 11 加工品送り速度と加工間げき・加工精度の関係

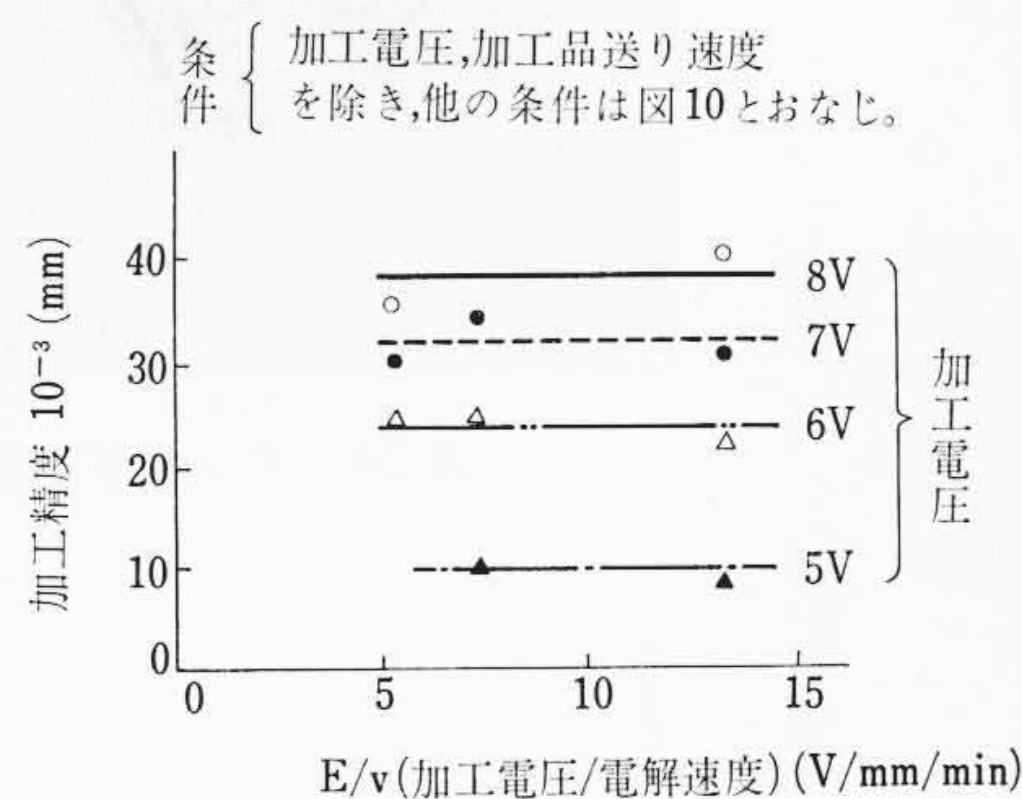


図 12 E/v と加工精度の関係

電極中心に向かって加工品を送り込んだと仮定した場合の速度である)の比を換えて測定した結果、図 12 に示すように加工精度は加工電圧によって決定されている。したがって定電圧の電解電源装置でなければならないことがわかった。

(5) 電 極 摩 耗

電極摩耗は、加工精度に直接影響するが、ダイス鋼(SKD-11)、硬度 HRC60、みぞ幅 2 mm×深さ 3 mm×加工品 1 個の加工長さ 40 mm のものを 200 個加工しても砥石摩耗は認められなかった。

5.2 超硬合金の加工特性

超硬合金は、不動態皮膜の発生により一般の直流電源を用いた場合、ほとんど加工不可能である。ただし P 種は直流電源により加工できる。以下述べるものは、プレス型などに多く用いられる K 種についてであり、これの加工用に特殊電源を開発(商品名: W 形電源装置)して使用した。

(1) 加工電圧と加工品送り速度

鋼材の場合と同じように最適加工電圧があり、この電圧の上下いずれも加工品送り速度が低下することがわかった。

(2) 電 極 周 速

図 13 に示すように電解速度(送り速度と比例関係にある)は、鋼材の場合ほど影響を受けないことがわかった。これは、超硬合金のほうが鋼材の場合よりも、電解間げきが大きいいため電解液の加工部への供給量が多いためである。

(3) 加工品送り速度と加工電流

図 14 に示すように加工電圧を一定にして送り速度を増加すると、鋼材の場合と同じように加工電流は直線的に増加している。理由は鋼材の場合と同じと考えられる。

(4) 加工間げきと加工長さ

超硬合金の場合、鋼材と異なり加工品の両端における加工間げきが大きい。この値を図 15 に示す。加工品が最初に電極に接した側が小さく、徐々に大きくなってしだいに安定する。この値は加工深さが浅くなるほど小さくなるが、電解液の供給方法により若干影響される。

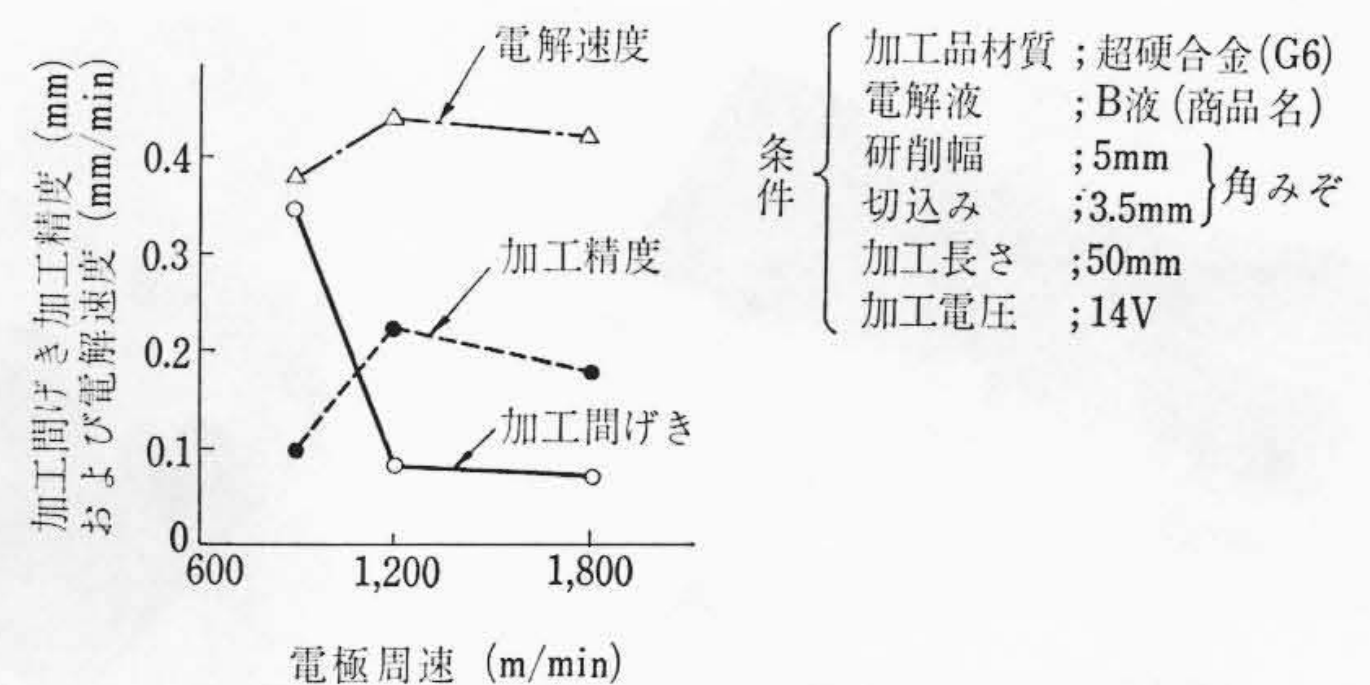


図 13 超硬合金加工時の電極周速の影響

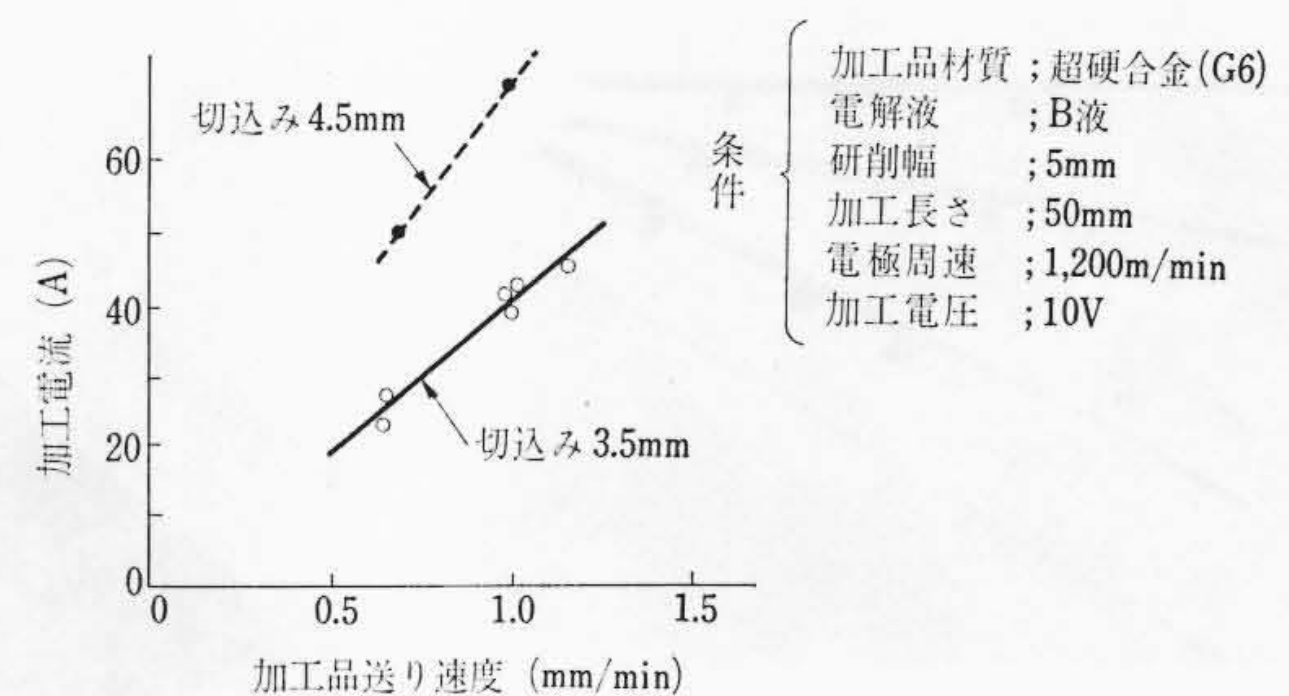


図 14 加工品送り速度と加工電流

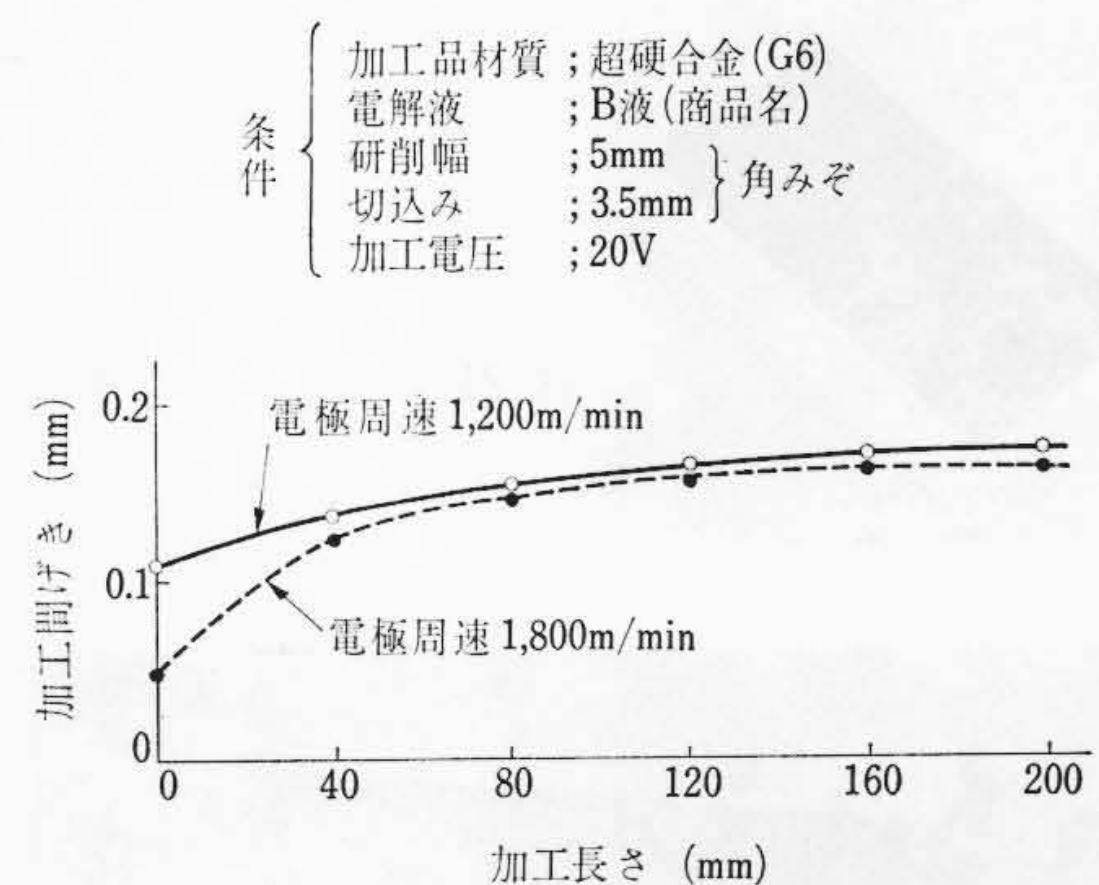


図 15 加工長さとの加工間げきの変化

6. 加 工 例

各種の加工例から、代表的なもの、すなわち、モールド型、プレス型、総形バイトおよび部品についてその形状、加工条件を示したのが図 16~22、表 2 である。特に部品については、カム(編機、電算機用)、みぞ付きピン(電算機、織機、編機用)、電気接点、電磁石用鉄心、ハニカム材、ビデオコード部品などの複雑形状部品や、薄材部品の加工などその適用範囲が非常に広範囲であることがわかった。

7. 電解成形研削適用のポイント

7.1 電解成形研削適用時の検討手段

電解成形研削は、数年前に開発された新しい加工法であるが、その応用範囲は多方面にあると考えられる。この研削法運用時の検討手段を表 3 に示す。すなわち、従来の加工方式による問題点を摘出し、これが電解成形研削で解決できるかを表 3 によって検討する。

7.2 具体的な検討方法

表 3 により解決の見通しがある場合は、加工費、維持費、償却費などを具体的に検討することになる。このうち、加工費を算出するにあたって必要な加工時間の算出方法について述べる。

(1) 加工時間の算出

図 23 に示すように、切込み深さ(加工形状深さを 1 回の切り込

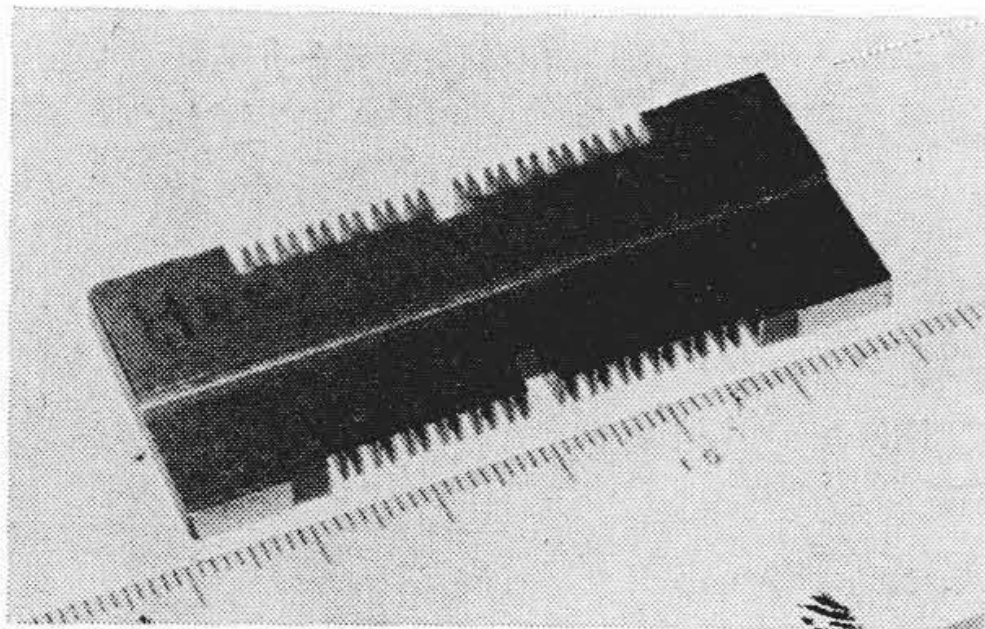


図 16 モールド型

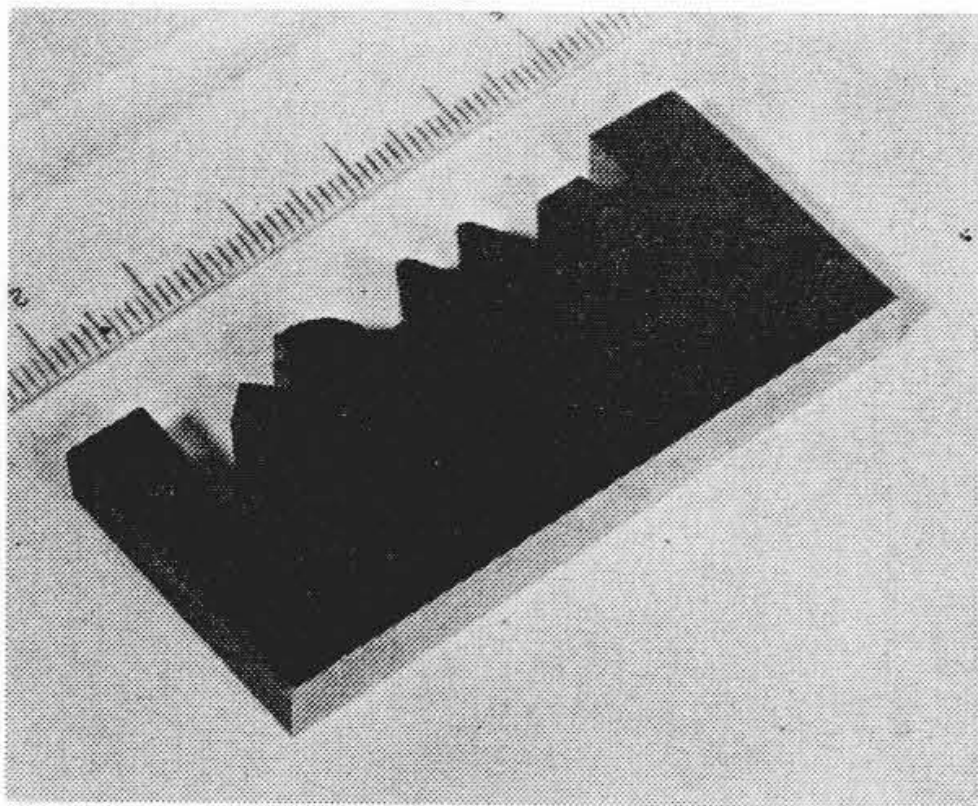


図 18 総形バイト用ピース

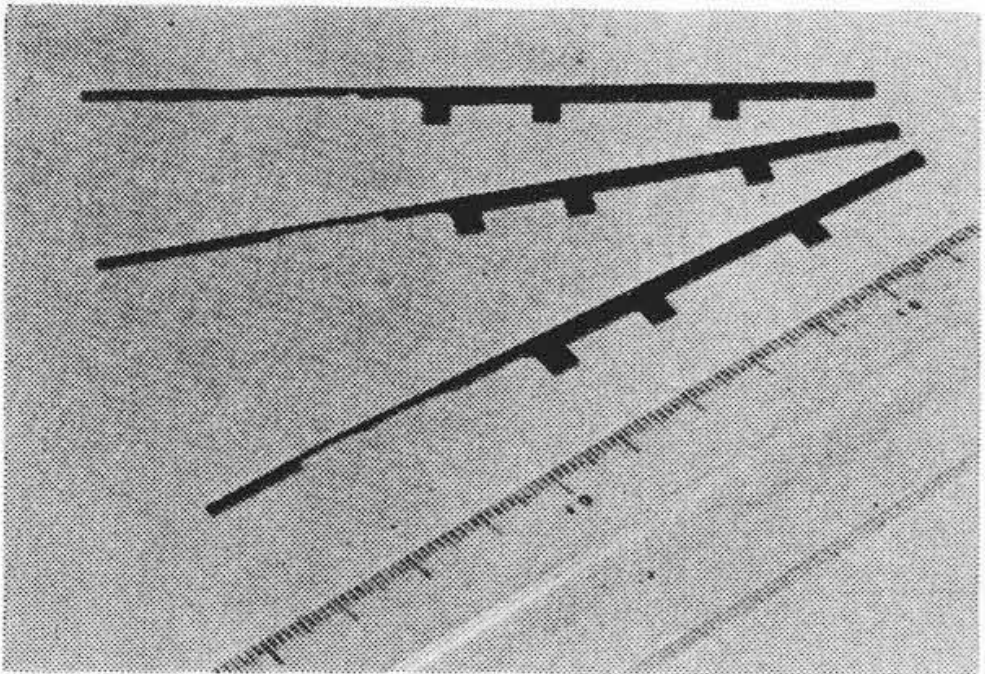


図 17 メリヤス編機用針

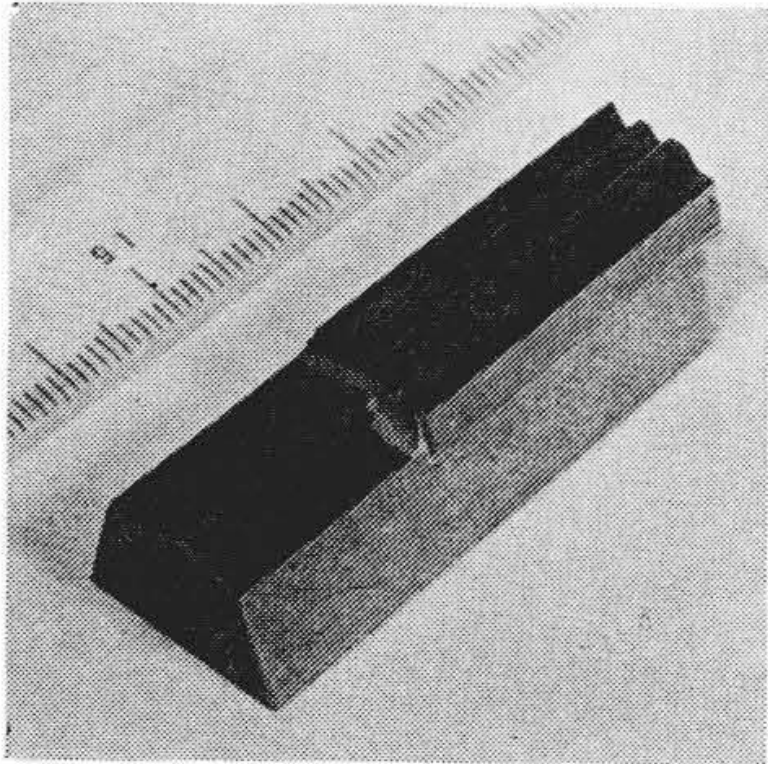


図 19 総形
バイト

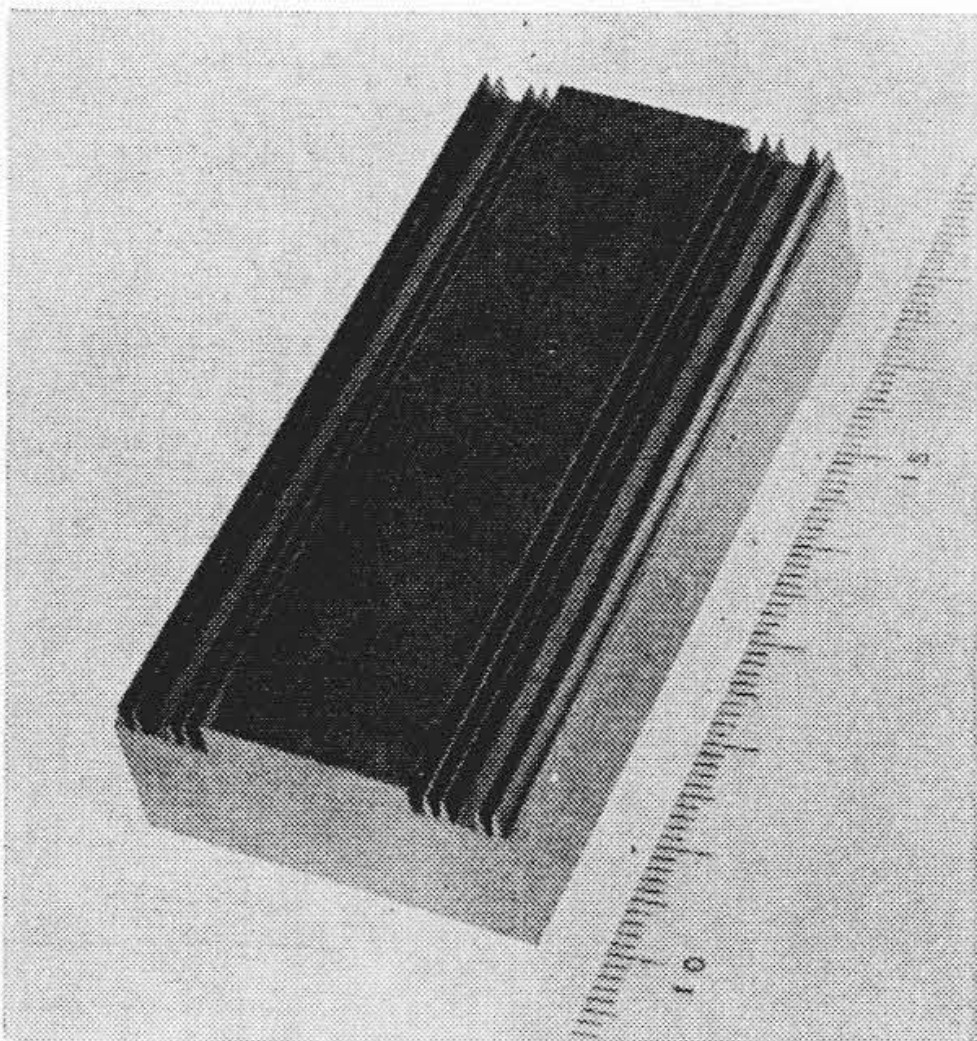


図 20 プレス抜き型

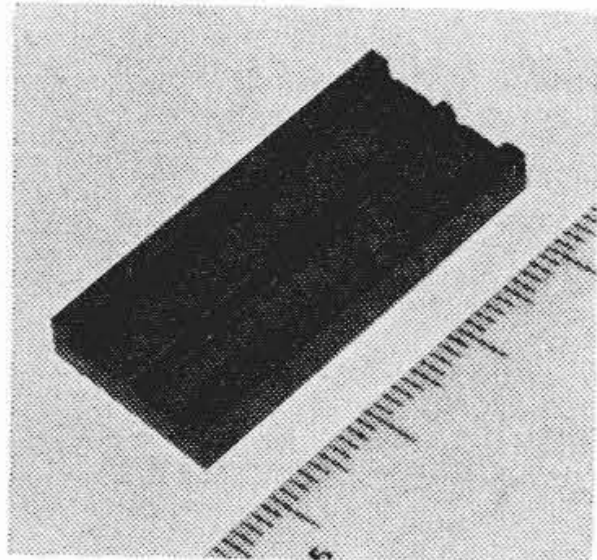


図 21 プレス抜き型

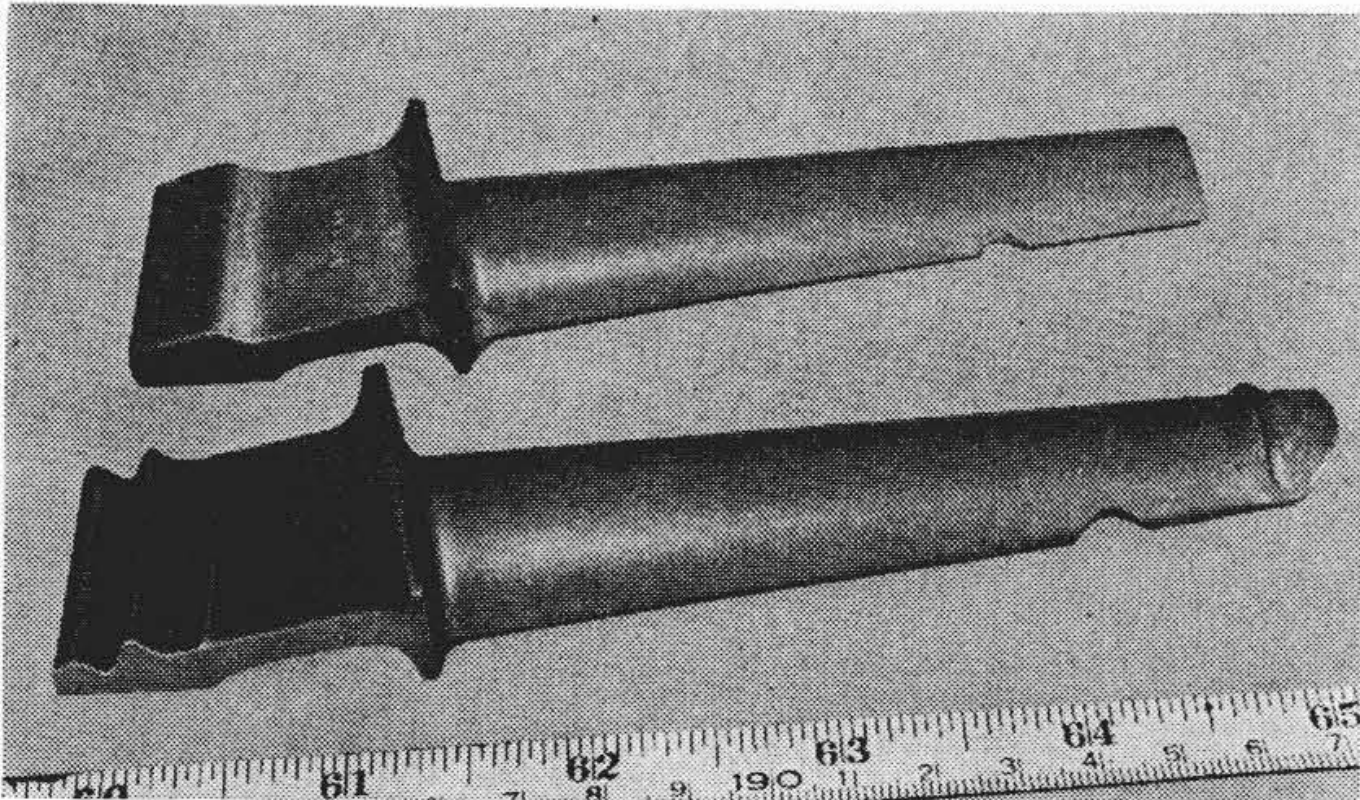


図 22 タービンブレード根みぞ

表 3 電解成形研削の適用手段

分類	従来の加工方式		従来の加工方式による問題点		電解成形研削の特長	電解成形研削して効果のある部品の例
機械研削	砥石(電極)成形方法	加工方法	熟練した作業が必要	未熟練者が容易に行なえる	射出成形(インジェクション)に用いるモールド型 プレス抜形(メス、オス) 電線、コイルなどの矯正ゲージの加工 小物部品加工用の総形バイトの研削	弱電工業
	投影微い成形	投影プランジ研削	砥石摩耗が多く、成形に多くの時間が必要で能率が悪い	砥石摩耗は微少で、しかも砥石成形容易		
		微い研削	部品形状複雑のため、砥石幅が小さくなり、能率を低くした軽荷重作業になる	複雑形状部品の場合砥石成形などが容易のため、能率がよい		
	クラッシング	プランジ研削	部品形状複雑のため、砥石成形困難	幅 0.3×深さ 3mm 程度まで成形可能		
放電加工	グラファイトカーボン電極をマスタにより成形	放電加工	加工能率が悪い	能率は数十倍	工具メーカー その他	
			放電熱により、ワレができる	ワレの心配がない		
			仕上面粗さが悪い(Hmax 10μ程度では困る)	仕上面粗さは Hmax 3μ程度にできる		

表 2 加工例

部 品 名	図の番号	テーブル1チャックの部品数量	加工品の材質、硬度	電 源	切 込 み (mm)	送り速度 (mm/min)	電 圧 (V)	電 流 (A)	加工時間 (min/1個あたり)	加工精度 (mm)	仕上面粗さ (Hmax μ)
モールド型	15	2個	ダイス鋼 HRC60 (SKD11)	直 流	5.0	2.3	8.5	500	6	±0.02	3.0
メリヤス編機用針	17	200	炭素工具鋼 HRC40 (SK5)	直 流	0.7	40	8.5	150	0.8 s	±0.02	3.0
総形バイト用ピース	18	1	ダイス鋼 HRC60 (SKD11)	直 流	10.0	2	8.5	400	25	±0.02	3.0
総形バイト	19	20	超硬合金 (P20)	特 殊 電 源	3.0	1	14.0	80	13	±0.05	3.0
プレス抜き型	20	1	ダイス鋼 HRC60 (SKD11)	直 流	3.0	3.8	8.5	600	25	±0.025	3.0
プレス抜き型	21	25	超硬合金 (G6)	特 殊 電 源	1.7	1.7	14.0	30	5	±0.05	3.0
タービンブレードの根みぞ	22	5	超耐熱鋼	直 流	5.0	4	8.5	120	13	±0.03	6.0

みで与える), 加工品材質がわかれば, 次式によって算出される。

(a) 砥石成形時間: T_d min

$$T_d = \frac{\sqrt{D \cdot t}}{\sqrt{\frac{D}{t} \cdot N}} \quad (\text{min/加工品 1 個当たり}) \dots\dots\dots (1)$$

(b) 正味加工時間: T_w min

$$T_w = \frac{\sqrt{D \cdot t} + l}{\frac{v}{2} \sqrt{\frac{D}{t} \cdot n \cdot n'}} \quad (\text{min/加工品 1 個当たり}) \dots\dots\dots (2)$$

(c) 加工時間: T min

$$T = T_d + \text{加工品取付け取はずし時間} + \text{余裕時間} \quad (\text{min/加工品 1 個当たり}) \dots\dots\dots (3)$$

ここに D : 電 極 直 径 (mm)

t : 切 込 み (mm)

v : 電 解 速 度 (mm/min) 鋼材 (0.7~1.0 mm/min) 超硬合金 (0.2~0.5 mm/min)

N : 1 ロッド加工品数 (個)

n : 長手方向 1 チャックの加工品数 (個)

n' : 前後方向 1 チャックの加工品数 (個)

l : 加工品 1 個の長さ $\times n$ (mm)

8. 日立電解成形研削盤

電解成形研削法は, 1966 年に実用化に成功し, 現在, 1 社で 30 台使用している例がある。

図 24 は機械の外観, 表 4 は仕様を示したものである。

9. 結 言

以上, グラファイト電極を用いた電解成形研削について論じたが, これらを要約すると,

- (1) 電極のマスタ成形時の摩耗は, 微量でしかも形状に無関係に切刃を再生できる。
- (2) グラファイト電極の摩耗は, 通常の加工品数程度ならほとんどゼロと考えてよい。
- (3) 電解速度は, 鋼材 0.7~1.0 mm/min, 超硬合金 0.2~0.5 mm/min である。
- (4) 加工間げきは, 鋼材 0.03~0.08 mm, 超硬合金 0.2~0.3 mm である。
- (5) 加工精度は, 鋼材 $\pm 0.03 \sim \pm 0.05$ mm, 超硬合金 $\pm 0.05 \sim \pm 0.1$ mm である。
- (6) 電極周速は鋼材の場合, 加工精度に影響するが超硬合金の場合はほとんど影響しない。
- (7) 加工電圧は, 加工間げき, 加工精度に直接影響するので, 定電圧の電解電源装置であることが望ましい。
- (8) 加工品送り速度は, 加工精度に影響しない。

などが判明した。

なお, 本論文においては電解成形研削法の概略を述べた程度であるが, 詳しくは別の機会に発表するつもりである。また, この電解成形研削法は, 開発後数年しか経過していないにもかかわらず急速に発展しつつあり, 広範囲の応用が期待されるものである。

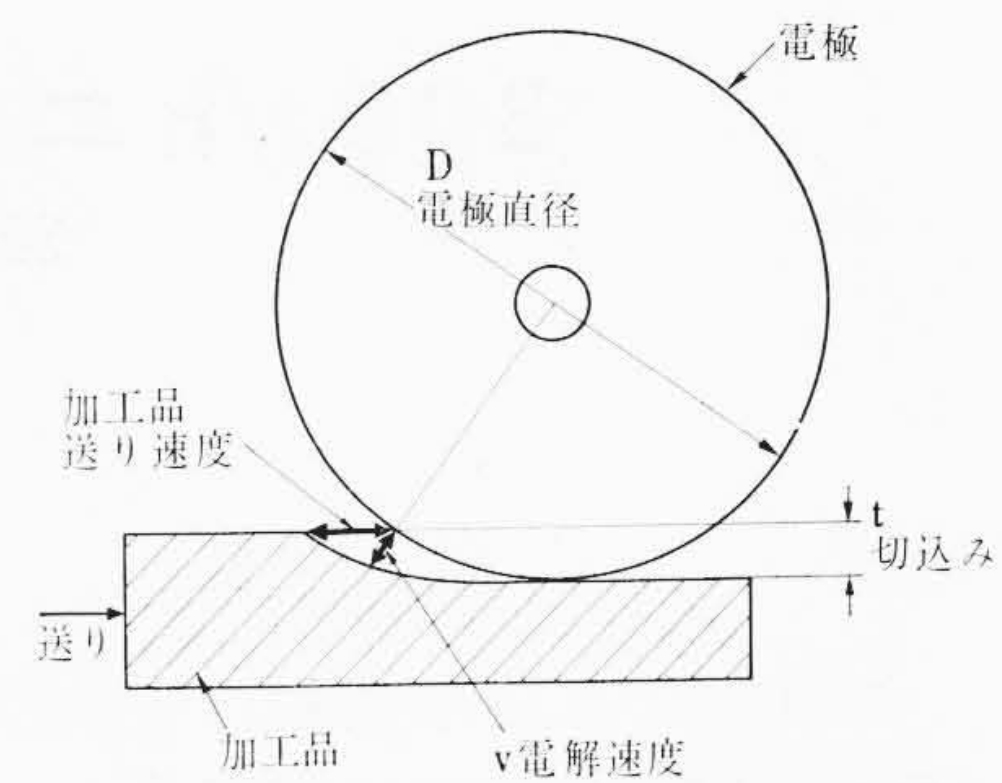
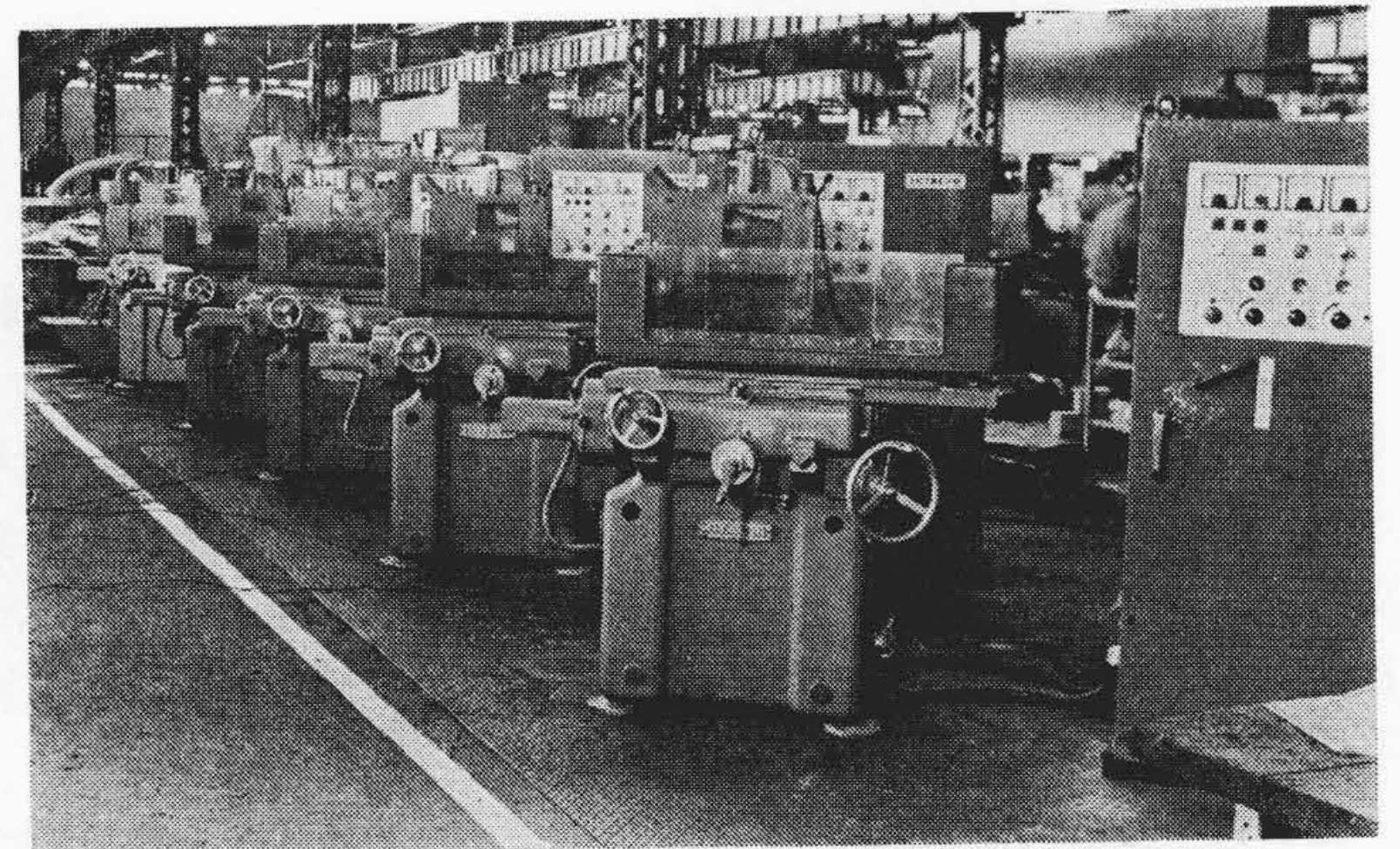


図 23 加工品送り速度と電解速度の関係



(GHL 100 SP-E 6 S 形)

図 24 日立電解成形研削盤

表 4 日立電解研削盤シリーズの仕様

1. 機 械 部			GHL-100SP-E	GHL-200SP-E	GHL-300S6P-E	GHL-300S9P-E
No.	項 目	単 位				
1	テ ー ブ ル 作 業 面 積	mm	100×250	200×600	300×600	300×900
2	テーブル左右最大移動量	mm	300	650	650	950
3	テーブル前後最大移動量	mm	115	210	345	345
4	砥石軸中心と テーブル上面との距離	mm	100~350	100~350	100~600	100~600
5	テ ー ブ ル 送 り 速 度	mm/min	0.5~100	0.5~100	0.5~100	0.5~100
6	砥石の大きさ (外径×穴径×幅)	mm	205φ×60φ×50 ⁽¹⁰⁰⁾	205φ×60φ×50 ⁽¹⁰⁰⁾	305φ×60φ×50 ⁽¹⁰⁰⁾	305φ×60φ×50 ⁽¹⁰⁰⁾
7	砥石回転数 (研削用)	rpm	1,500~3,000	1,500~3,000	1,000~2,000	1,000~2,000
8	砥石回転数 (砥石成形用)	rpm	50Hz (cps) 15/ 60Hz (cps) 18	15/18	15/18	15/18
9	砥石駆動用 モートル (研削用)	kW	1.5	1.5	3	3
10	砥石駆動用 モートル (砥石成形用)	kW	0.1	0.1	0.1	0.1
11	テーブル送り用モートル	W	50	50	50	50
12	電 解 液 タ ン ク 容 量	l	125	125	125	125
13	重 量 (機械とタンク)	kg	1,025	1,325	3,125	3,825
2. 電 源 部			一 般 用		超硬合金用	
No.	項 目	単 位				
1	入 力 電 圧 (±10%)	V	200/220	200/220	200/220	
2	最 大 出 力	kW	7.2	3.6	—	
3	最 大 出 力 電 圧	V	12	12	14	
4	電 圧 制 御 方 式	—	定 電 圧	定 電 圧	定 電 圧	
5	最 大 出 力 電 流	A	600	300	300	
6	重 量	kg	800	400	800	

参 考 文 献

御子柴ほか 3 名: 超硬合金の電解加工法, 日立評論 第 19 巻 第 3 号 (1967) p. 319~324