

知 識 編

1. ワイヤ放電加工の概要

ワイヤ放電加工機は、最近のメカトロ技術により急速に進歩し、金型加工分野はもとより部品加工分野においても重要な役割をにないつつある。特に、金型製作の合理化には大きく貢献している。さらに、合理化設備としてより細密な金型および高精度金型への適用が一段と進み、ワイヤ放電加工機に対する期待と要求がますます強くなっている。

(1) ワイヤ放電加工の現状

近年の多品種少量生産化と製品ライフサイクルの短納期化の中で急激な円高時代を迎え、製品コストの大幅削減が企業の優先課題となり、金型に対しても低価格化と短納期化が強く求められている。

また、製品の軽薄短小化に対応すべく金型の細密高精度化と同時に金型生産性向上策として金型の標準化が進み、型の互換性を持たせるべく高い精度の金型が必要となり、ワイヤ放電加工機に対してサブミクロンに近づく超高精度機の出現も強く望まれている。

このような市場動向の中で、最近のニーズに適合すべく、ワイヤ放電加工機は、種々の新技術や新機能を搭載するようになった。これらの新技術例としては次のようなものがある。

- ① 加工精度 $3\mu\text{m}$ 、最良面あらさ $0.5\mu\text{mRmax}$ が実現できる高精度化技術。
- ② 高速加工から超仕上げ加工（サブミクロン面あらさ）まで可能とする高速加工電源と超仕上げ加工電源。
- ③ 長時間無人運転を可能とする自動スクラップ処理装置などの自動化装置群。
- ④ ワイヤ放電加工機におけるFA化対応技術。

(2) ワイヤ放電加工の特徴

① 長所

- a. 工作物の硬度に関係なく、超硬合金や焼入鋼などの硬い材料でも、通電体であれば容易に加工できる。
- b. 工作物を焼入れしたあとで加工すれば、焼入れによる材料の歪の心配がない。
(焼入れ後、材料の内部応力を除去すること)
- c. 使用する電極は、黄銅、銅、タングステンなどの市販のワイヤが使用できる。
- d. 高精度な加工ができる。
- e. 複雑な形状であっても、単純な形状であっても、形状による加工速度の差異は少ない。機械切削（研削）加工では形状が複雑になると割り型構造にするが、ワイヤ放電加工は一体構造で可能となり、構造が簡単になる。
- f. 複雑な形状であっても、高度な熟練技能を要しない。
- g. 加工中は自動運転であるため省力化、省人化を推進できる。
- h. 金型などでは、雄型、雌型のクリアランスが均一になり、型寿命が伸びる。
- i. 金型などの納期を大幅に短縮できる。
- j. 切削荷重は発生しないため微細な加工が可能。

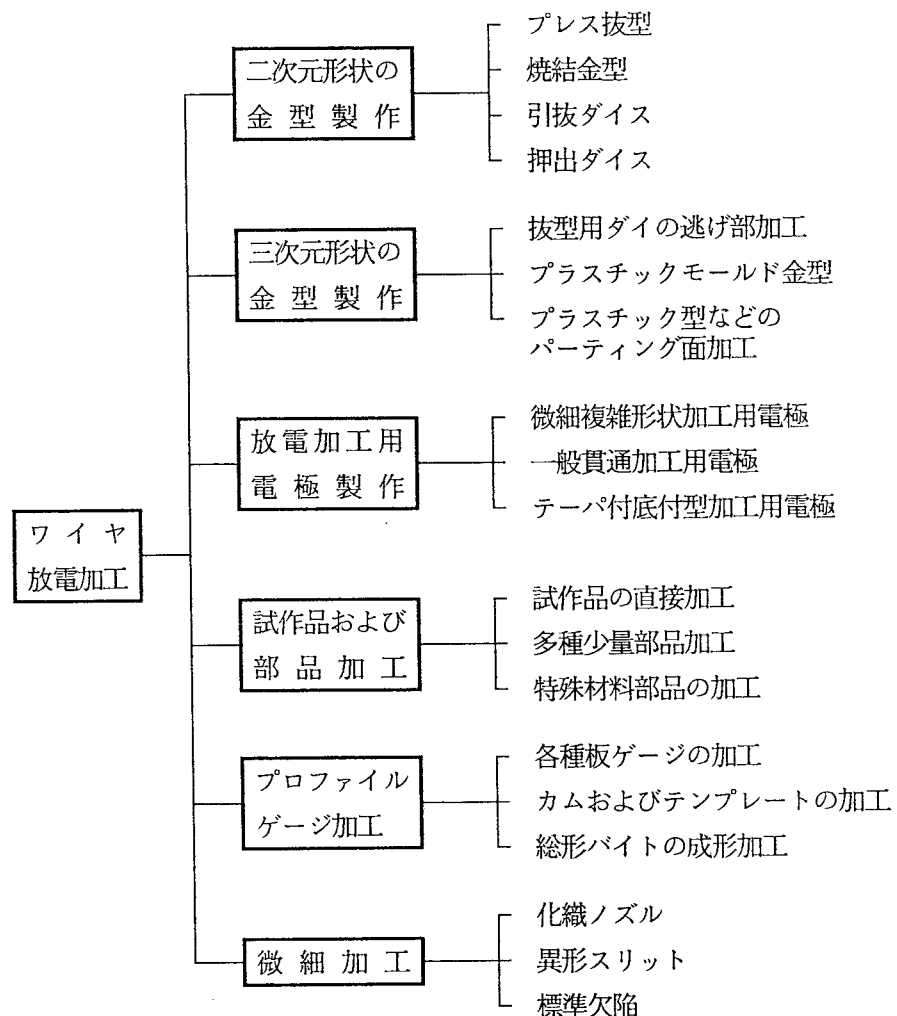
② 短 所

- a. 機械切削加工と比べ加工速度は遅い。したがって単純な形状では機械切削加工が有利。
- b. ワイヤ放電加工は、2次元（テーパも含む）貫通形状に限られる。

(3) ワイヤ放電加工の用途

ワイヤ放電加工の用途を表1に示す。従来は二次元形状の金型製作に最もよく使われていたが、最近の加工速度向上（ $250\text{mm}^2/\text{min}$ ）、面あらし改善（ $0.5\ \mu\text{mRmax}$ ）およびテーパ加工の進歩に伴い、部品加工や三次元形状の金型に、さらに超精密金型（最終仕上げまですべてワイヤ放電加工）の分野に拡大している。

表1 ワイヤ放電加工の用途



(4) ワイヤ放電加工の用途（加工事例）

ワイヤ放電加工の用途例として図1から図5に加工事例を示す。

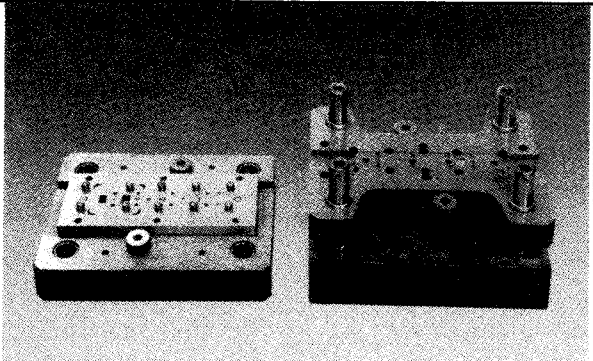
<p>精密順送金型</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 工作物 / SKD-11 ● 面あらし / 2~3 μmRmax ● 加工時間 / 4時間30分 	
--	--

図1

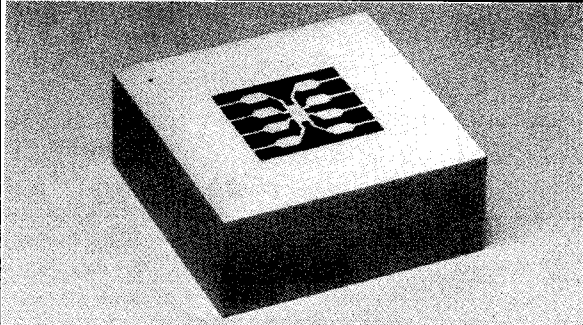
	<p>ICリードフレーム</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 工作物 / 超硬、10mm t ● 面あらし / 0.5 μmRmax ● 加工時間 / 5時間30分
---	--

図2

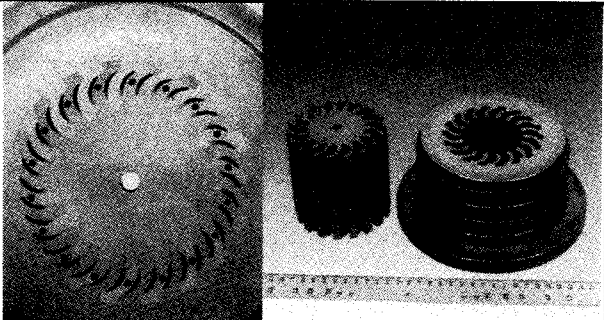
<p>プラスチックモールド型</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 工作物 / SKH、90mm t ● 面あらし / 7 μmRmax ● 加工時間 / 90時間（ポンチ・ダイ合計） 	
---	--

図3

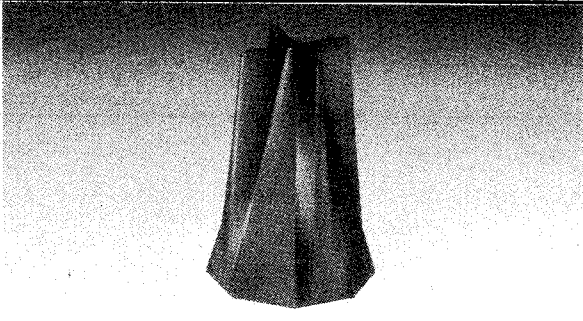
	<p>上下任意形状加工</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 工作物 / SKD-11、80mm t ● 面あらし / 10 μmRmax ● 加工時間 / 2時間30分
---	--

図4

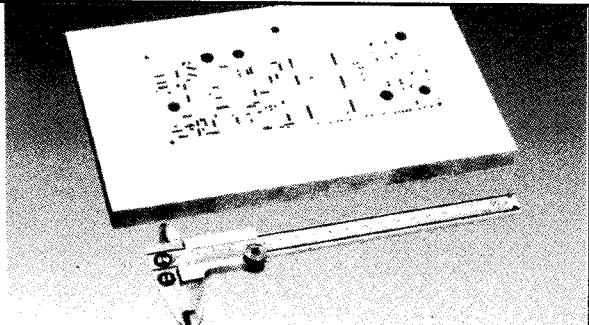
<p>プリント基板</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 工作物 / SK-3、10mm t ● 面あらし / 5 μmRmax ● 加工時間 / 28時間 	
---	--

図5

(5) ワイヤ放電加工の今後の動向

現在、マシニングセンター、NCフライス盤等の工作機械において、5 μm以下の高精度加工機は、全体の5%以下といわれ、表2の到達加工精度と年代に見られるように普通加工で1 μm以下の加工が可能な時代は21世紀と予測されている。表3は高精度加工領域での加工精度と関連技術を示したものである。

こうした一般動向の中で、ワイヤ放電加工機および形彫り放電加工機における課題と最新技術についてまとめたのが表4であり、高精度加工実現については、加工性能と精度が重要な課題となっている。

(1)
表2 到達加工精度と年代

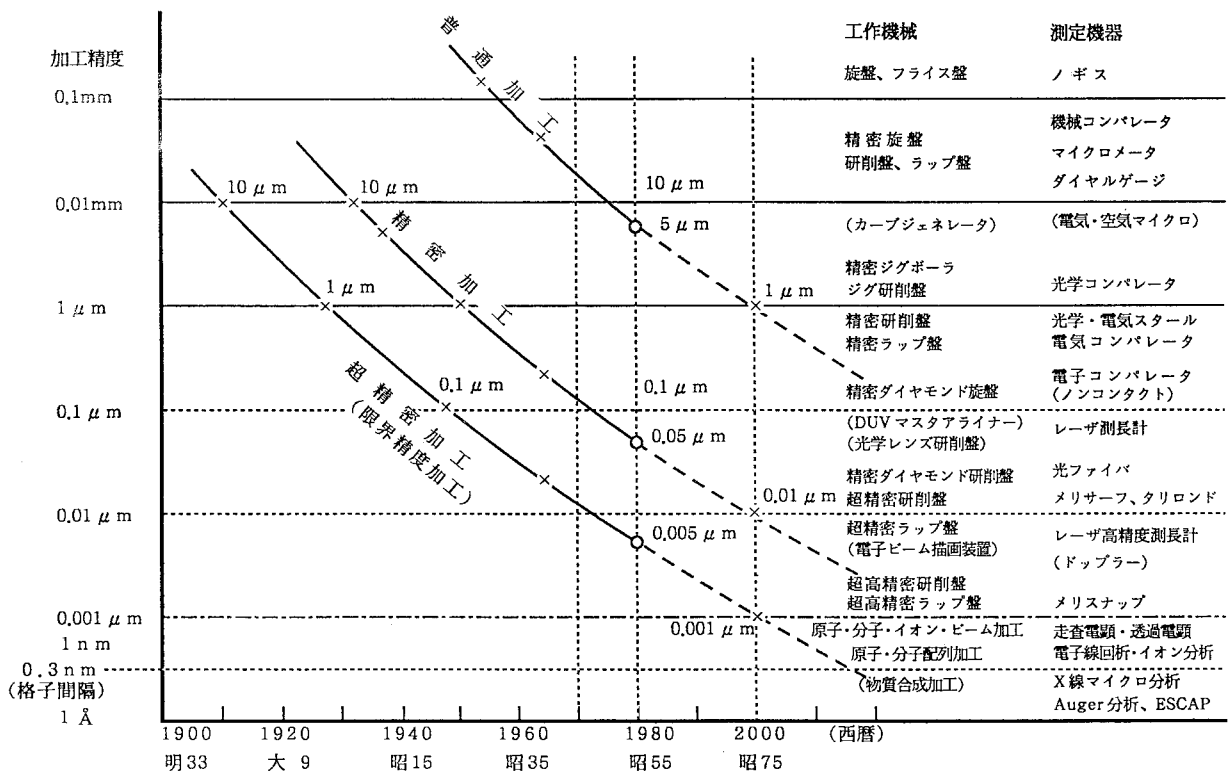


表3 加工精度と関連技術

精度	工作機械要素	測定機器要素	工具材料	加工機構	表面分析法 (解析)	工具・加工物位 置制御装置
10 μm	ボール・ローラ (銅)案内・軸受、 精密平軸受・案内、 精密ねじ	空気マイクロ、ダイ ヤルゲージ、マイク ロメータ、光学偏向	切削工具 高速度鋼(粉末) 超硬合金	放電加工 電解加工 ワイヤカット 放電切断	(成分状態) 光学顕微鏡 (組織)、硬度、 化学分析、分光分析 (赤外)	(順序・状態) A・サーボモータ 電気パルスモータ 電気・油圧パルスモ ータ、リレー、ロジ クコントローラ
1 μm	動圧油圧軸受、 静電空気軸受、 案内、ボール、 ローラ予圧軸受・ 案内	差動トランス、イン ダクタシ、光・磁 気・モアレ尺、精密 空気マイクロ、スト レインゲージ、ピチ コン、CCD	砥粒・砥石 アラシダム(WA、 SA)、カーボラン ダム(GC)、ダイ ヤモンド(人工) (フォトレジスト・ N)	精密放電加工 電解研磨加工 微細切削・研削 光リングラファイ	紫外線顕微鏡 放射化分析 微量分析 マイクロビッカース	DC・サーボモータ (セミクロース) (エンコーダ)最適 制御、トランジスタ ・ロジクコントロ ーラ
0.1 μm	静圧精密空気軸受・ 案内、 弾性ばね案内	精密差動トランス、 レーザ干渉(光)、 容量・電磁型コンパ レータ、放射線カウ ンタ	砥粒、CBN、高融 点金属酸化物 (C、O、M、O、 B、C)(フォトレジ スト・P)	鏡面切削(研削) 真空蒸着、精密ラッ プ、化学蒸着(CV D)(光リングラフ イ、遠・紫外光)	蛍光分析	精密DCサーボモ ータ(クロズドル ープ)、適応制御マイ クロコンピュータ
0.01 μm	超硬合金、ルビー・ ボール・ローラ案内 軸受(電圧)、一体 化弾性ばね軸受、電 磁・静電・微動、熱 変形微動	超精密差動トラン ス、近接電磁セン サ、レーザドップラ ー干渉、光ファイバ (光センサー)	切削工具・砥石ダイ ヤモンド(単刃、ペ レット)(天然人 工)(フォトレジ スト・E)	EEM、メカノケミ カルラッピング、反 応性ラッピング、レ ーザ熱処理、PVD、 電子ビーム露 光・SOR	電子回路(ED) X線マイクロ分析 (EPMA)	高精度DCサーボモ ータ(クロズドル ープ)、先行制御、 電磁サーボアクチュ エータ(熱・静 電)、ミニコンピ ュータ
0.001 μm = 1 nm	静電・電磁偏向 (イオン・電子) 電磁・磁歪微動	電子線、X線シンチ レータ、イオン(SEM、 TEM、STEM、 IMA)	原子・分子(反応、 イオン)、活性原子 (プラズマ)、イオ ンクラスター	非接触ラッピングイ オン加工(スパッタ エッチ反応エッチ、 スパッタデポ、イオ ンプレーティング、 イオン注入)	イオン分析 Auger分析	電磁・磁歪サーボ、 超高速電子計算機 (シーケンス、プロ セス)(無人化)
Sub- nano meter			原子・分子(中 性)、中性子	物質合成加工 (原子・分子配列、 分子ビーム加工)		
		温度・圧力・位置セ ンサー			計算機シミュレーシ ョン、有限要素法、 モーダル解析(応 力)	デジタル制御 (状態)
IMA(イオンアナライザ)						
SEM(走査電顕)						
TEM(透過電顕)						
STEM(走査透過電顕)						
			CVD(chemical vapour deposition, 化学蒸着)			
			PVD(physical vapour deposition, 物理蒸着)			
			SOR(synchrotron orbital radiation, X線露光)			

表4 形彫り放電加工機およびワイヤ放電加工機における課題と最新技術

〔課題〕	〔形彫り放電加工〕	〔ワイヤ放電加工〕	
1. 加工性能	加工速度	<ul style="list-style-type: none"> ・不燃性加工 ・グラファイト電極使用 ・大電流加工 ・高速超硬合金加工 ・高電流ピーク値 	<ul style="list-style-type: none"> ・高速加工 $250\text{mm}^2/\text{min}$ ・合金ワイヤ (C_n, Z_n, F_n) ・高い電流ピーク値 ・高圧力液流
	加工面性状	<ul style="list-style-type: none"> ・鏡面加工 ・$0.2 \sim 0.3 \mu\text{Rmax}$ ・揺動加工 	<ul style="list-style-type: none"> ・鏡面加工 (FS加工) ・$0.5 \mu\text{Rmax}$ ・加工変質層完全除去 ・真直度 (タイコ形状) $2 \mu\text{m}$以下
	超低消耗加工	<ul style="list-style-type: none"> ・高精度複雑加工 ・特殊放電波形 	
2. 精 度	形状精度 超高精度機	<ul style="list-style-type: none"> ・揺動加工 ・電気条件自動切換 ・低電極消耗 ・サーボ方式 ・CPU制御 (4軸同時) 	<ul style="list-style-type: none"> ・(自動) セカンドカット ・加工条件自動切換 ・コーナ精度 ・サーボ方式 ・CPU制御 (4軸同時) ・ワイヤテンション制御 ・変動幅 10g以下
	ピッチ精度	<ul style="list-style-type: none"> ・高剛性構造 ・静動的特性 ・高剛性ガイド 	<ul style="list-style-type: none"> ・高剛性構造 ・静動的特性 ・高剛性ガイド
	熱的要因対策	<ul style="list-style-type: none"> ・加工液温度制御 ・インバータ制御 ・機械熱バランス構造 	<ul style="list-style-type: none"> ・加工液温度制御 ・インバータ制御 ・機械の恒温室組立
3. 自動化	NC機能	<ul style="list-style-type: none"> ・自動測定 ・APC加工 ・データベース内蔵 ・大容量メモリー ・グラフィック機能 	<ul style="list-style-type: none"> ・上下任意形状テーパ ・データベース内蔵 ・大容量メモリー ・グラフィック機能
	外部接続 (FA対応)	<ul style="list-style-type: none"> ・カセット入出力 ・外部端子 ・RS232C ・パソコン接続 	<ul style="list-style-type: none"> ・カセット入出力 ・外部端子 ・RS232C ・パソコン接続
4. 新分野 応 用	部品加工	<ul style="list-style-type: none"> ・放電ミーリング ・不燃性加工利用 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンターマシーニング研 ・磨前加工
	三次元形状加工	<ul style="list-style-type: none"> ・単純電極加工 ・ATC、C軸使用 ・くり抜き加工 ・フレーム電極 	<ul style="list-style-type: none"> ・上下任意テーパカット ・タービンプレード他 ・5面加工 ・形彫放電加工用電極加工
	セラミックスの 加工	<ul style="list-style-type: none"> ・導電性セラミックス ・の放電加工 ・$S_iC, ZrB_2, S_{i_3}N_4$ 	<ul style="list-style-type: none"> ・導電性セラミックス ・ワイヤカット
5. 今後の 新技術	シリコンによる 放電加工	<ul style="list-style-type: none"> ・大面積鏡面加工 ・磨き加工効果 	
	完全自動運転	<ul style="list-style-type: none"> ・APCによるワーク ・自動搬入出 	<ul style="list-style-type: none"> ・APC ・自動ワイヤ交換 ・自動切カス処理

2. ワイヤ放電加工の原理

(1) 加工原理

一般に放電加工法は、図6に示すように銅、グラファイトなどの比較的加工しやすい導電性材料を電極とし、銅、超硬合金などの工作物材料との間に60~300V程度のインパルス電圧を印加しながら、間欠的火花放電を行わせ、その際に発生する異常消費現象を利用した加工法である。電極と工作物の対向する極間隙長は非常に狭く、5~50 μm であり、その間隙にはケロシン（灯油）や水などの絶縁液（加工液）を介在させる。気中のままでは加工が進まない。加工の進行とともに極間隙長は増加するので、その分だけ電極を相対的に送ってやる必要があり、図6におけるサーボ機構がその役割をになっている。

さて、ワイヤカット放電加工法も加工のメカニズムとしては上記のとおりであるが、電極としてワイヤを用いる点が異なっており、銅、黄銅あるいはタングステンなどの細いワイヤ電極により工作物を糸鋸式に加工する（図7）。

工作物を積載しているクロステーブルは、一般にNC制御サーボモータ駆動によりX、Y軸方向に送りが与えられ、2次元形状の加工が行われる。

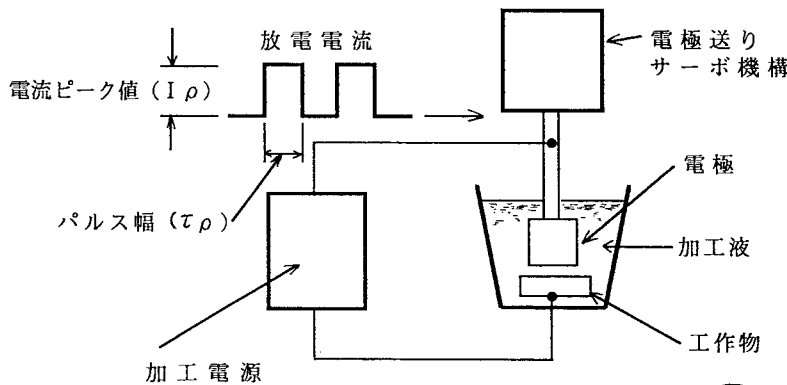


図6 放電加工機の機構

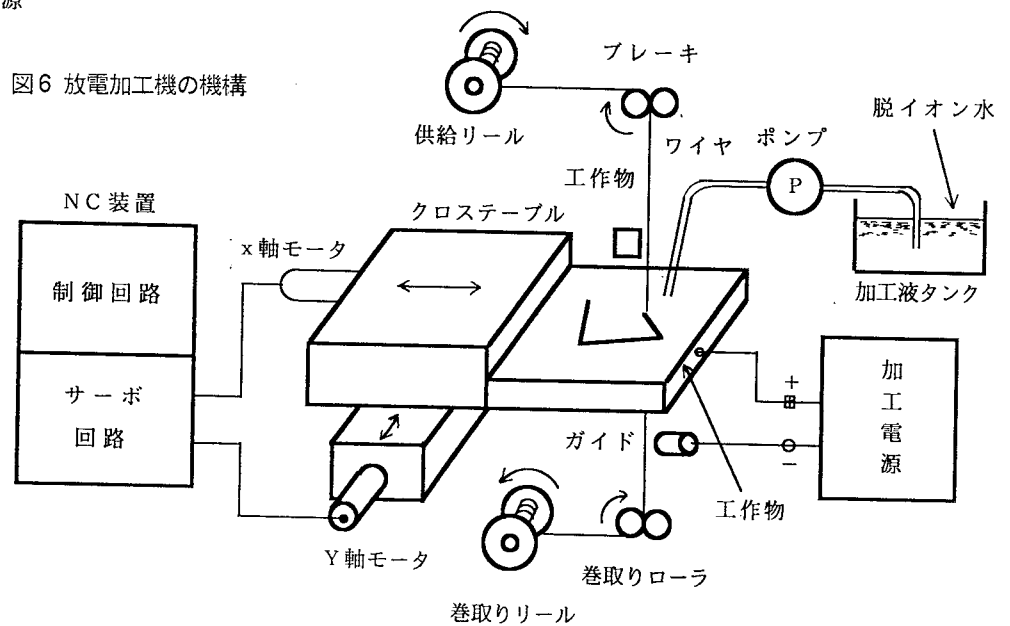


図7 ワイヤ放電加工の原理図

ワイヤは、供給リレーから常に一定速度（5～10m/min）で送り出され、放電によって生じる電極消耗を補正している。ワイヤ径は通常0.03～0.33mmである。ワイヤは放電圧力などによる強制振動をできる限り小さく押えるため常に変動のないテンションをかけておく必要がある。その値は通常ワイヤ破断力（拡張力）の1/2程度で、黄銅ワイヤ（φ0.2）ならば1000～1800gが一般的である。

加工液は、水あるいはケロシンが用いられるが、取扱いが容易で火災の心配がなく加工部分とワイヤの冷却が良く、さらにワイヤの強制振動があっても極間に短絡が発生しない程度の広い間隙を形成し、また加工粉の排除が良好であり、炭化物やタールの発生がなく極間の清浄化がなされやすいことにより加工を安定に保つことができるということなどの理由から、現在ではほとんど水が加工液として使用されている。水の導電率（あるいは比抵抗）は、加工特性に大きな影響を与えるので、この値を一定に制御することが加工特性を向上させる上で非常に重要である。

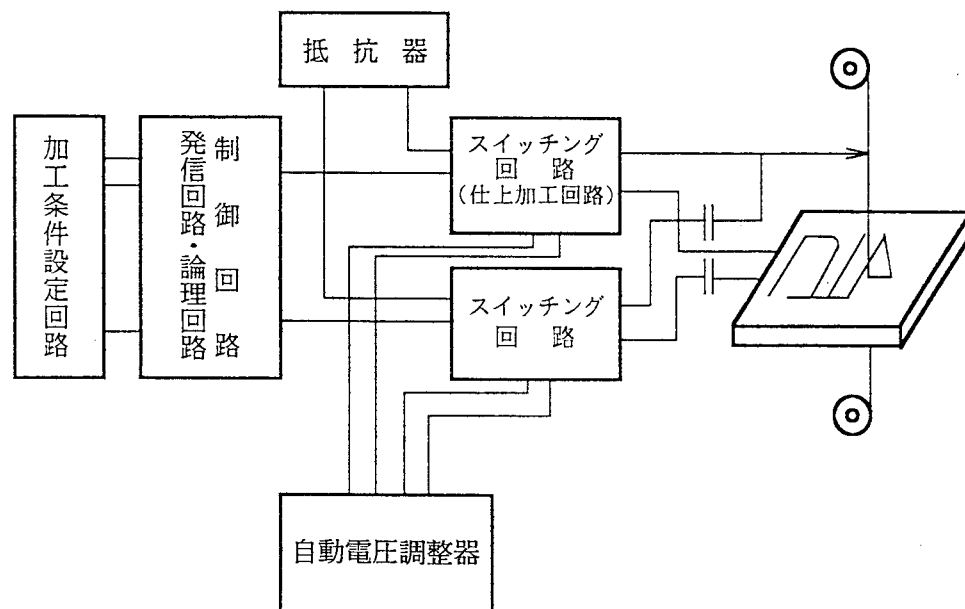


図8 ワイヤ放電加工用電源の構成

次に、極間に供給する放電パルスは、仕上面あらさの良い状態で加工速度の高い波形が好ましく、それにはパルス幅が狭く電流ピーク値の高いパルス電流を用いる方がよい。またこの場合の極性は、正極性（ワイヤ、陰極、工作物、陽極）である。現在のワイヤ放電加工用電源の構成は図8のようになり、トランジスタのスイッチングによってのみ制御されている。

(2) 加工特性の一般的傾向

① 加工速度

ワイヤ放電加工は溝幅そのものの加工であり、加工速度の定義は、単位時間当たりの加工断面積

をとる場合が多い、すなわち、加工速度 (mm^2/min) = 加工送り速度 (mm/min) \times 工作物厚さ (mm) となる。時として送り速度 (mm/min) に厚さ (mm) を付記する場合もある。

a. ワイヤ径と加工速度

ワイヤ電極に使用される材質は主に銅と黄銅が使われ、特殊な場合タングステンも使われている。ほかにモリブデンや鉄も使われる場合もあるが一般的ではない。銅ワイヤと黄銅ワイヤは入手が容易かつ経済的で、しかもほかの材質に比べ加工速度が速くなる特徴がある。しかしながら、本来抗張力が低いため、ワイヤ径が $\phi 0.1\text{mm}$ 未満では強度が低く使用には適さず、一般に銅ワイヤは $\phi 0.15\sim\phi 0.25\text{mm}$ 、黄銅ワイヤは $\phi 0.1\sim 0.25\text{mm}$ が使用されている。逆にタングステンワイヤは抗張力が高いため線径が細くても使用でき、一般に $\phi 0.05\sim 0.1\text{mm}$ が使用されている。ワイヤカット放電加工の加工量は、加工溝幅と加工物厚さとの積であるが、加工溝幅はワイヤ径と放電によるクリアランスによって決まるため、ワイヤ径が細いほど加工量は少なくてすむ。しか

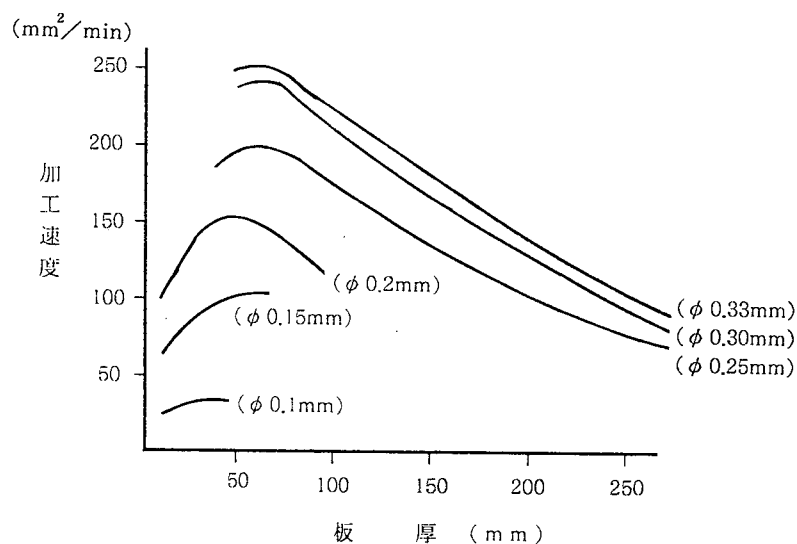


図9 ワイヤ径に対する加工速度

しながらワイヤ径が細くなると電流容量が少なくなるため、加工速度はワイヤ径が細くなるにつれて遅くなる。一方ワイヤ径を太くすると電流容量は多くなるため加工速度は速くなるが、加工溝幅が広くなる分の電流を増す必要がある（電流容量はワイヤ直径の2乗に比例し、加工溝幅はワイヤ直径に比例）。結局、加工速度は直径に比例して増大することになる。電流の増加は、放電痕の大きさを支配する放電エネルギーを大きくすることになるので加工面の面あらかさが悪くなり、また最小コーナーRが大きくなる。図9はワイヤ径に対する加工速度を示してある。図で見られるようにワイヤ径が太いほど加工速度は速くなっている。また、ワイヤ径が太くなるほど、工作物が厚いところで有利になってくることがわかる。

b. 加工速度と面あらしの関係

加工速度は、面あらしの粗い条件で加工するほど速くなる傾向がある。加工面は一発一発の放電によって形成される放電痕の重なりであり、面あらしはその個々の放電痕大きさによって決まる。放電痕の大きさは、個々の放電のエネルギーが大きいほど大きくなる。加工速度と面あらしとの関係を図10に示す。図で見られるように、加工速度を速くしようとするすると面あらしが犠牲になり、面あらしを良くしようとするすると加工速度が犠牲となる。

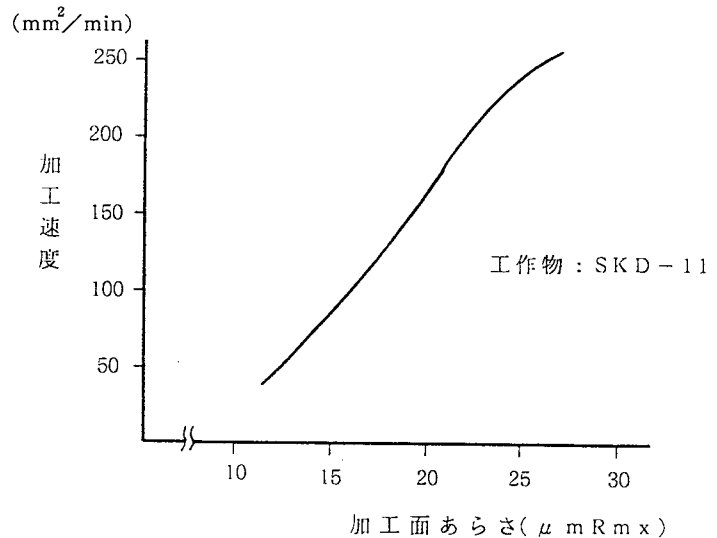


図10 加工速度と面あらしの関係

② 加工精度

ワイヤカット放電加工機の加工精度を大別すると、次の4項目に分けられる(図11参照)。

- a. 加工体寸法精度〔形状精度、真直精度(太鼓形状)〕
- b. ピッチ間寸法精度
- c. 位置決め寸法精度(穴基準、端面基準)
- d. コーナ形状精度

a. 加工体寸法精度

加工体寸法精度には i) 形状精度、ii) 真直精度(俗称:太鼓形状)、iii) 面あらし等に分けて考えることができる。一般に形状寸法は、オフセット量(ワイヤ径の半分に、放電間隙を加えた値、工具補正量ともいう)によって決められる。工作物にひずみや変形がなく、室温や液温、比抵抗の変化、および加工状態に変化がないとすれば、形状精度は機械精度を含む数値制御の精度によって決められることになる。通常ワイヤ放電加工機の精度は、0.005mm内外で、高精度ワイヤ放電加工機と呼ばれるものは、0.001mm程度の静的送り精度を有する機械もある。形状寸法に影響を及ぼす要因の1つに、加工中における加工溝幅のばらつきがある。加工溝幅は、一定条件下では、加工速度および加工電圧と密接な関係がある。

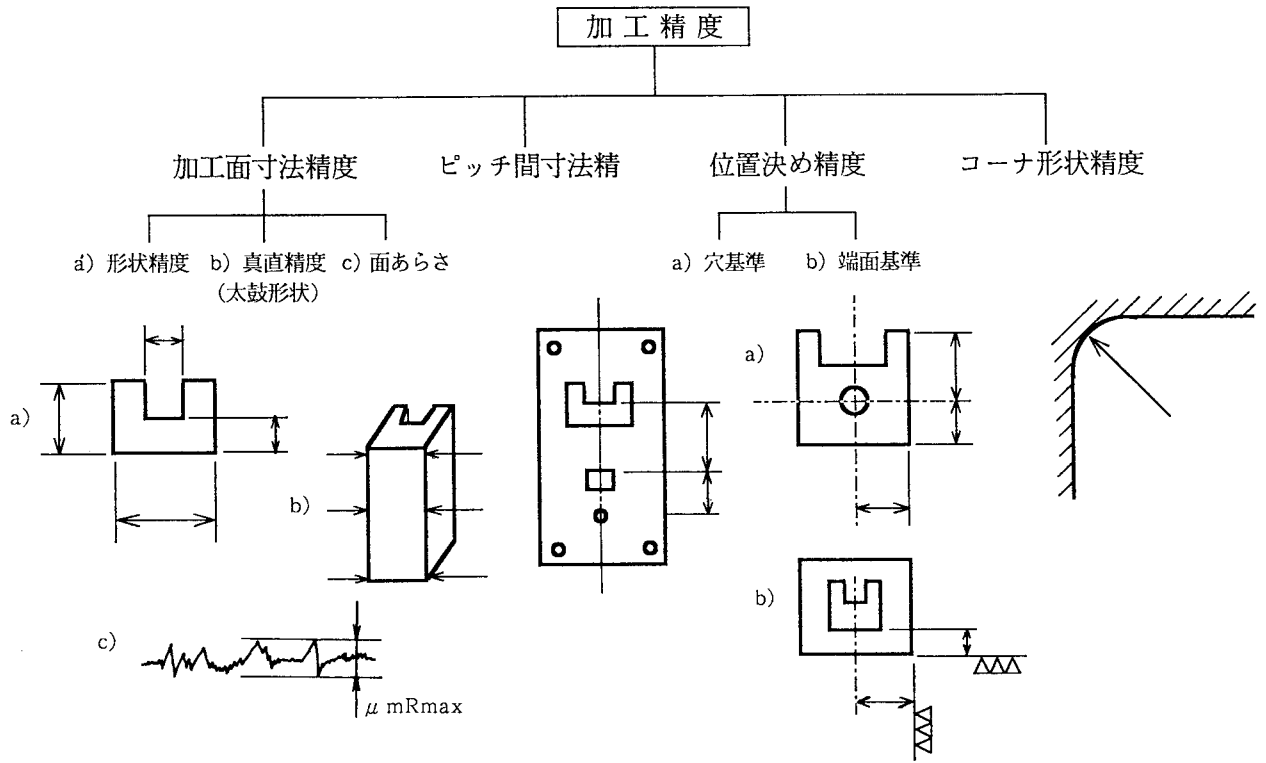


図11 ワイヤ放電加工での精度

図12に加工溝幅と加工速度の関係を示す。ここでの加工速度はサーボ送り方式と呼ばれる加工電圧を一定に制御する方法を用い、加工電源の電気条件を大幅に変化させた場合の加工溝幅の変化を示しているが、加工速度を大幅に変化させても、加工溝幅の変化は、 $8\mu\text{m}$ 程度である。これに反して図13には、定速送り方式による加工速度、加工電圧における加工溝幅が示されているが、加工速度、 $F=0.7$ 、 $1.2\text{mm}/\text{min}$ の2通りを用い、それぞれに対して加工電源の電気条件を変化させた場合、加工溝幅は、 $16\sim 18\mu\text{m}$ 程度変化しており、サーボ送り方式の方が、定速送り方式に比べ、電気条件、加工速度の変化に対し加工溝幅への影響が少ないことがわかる。また加工溝幅は、

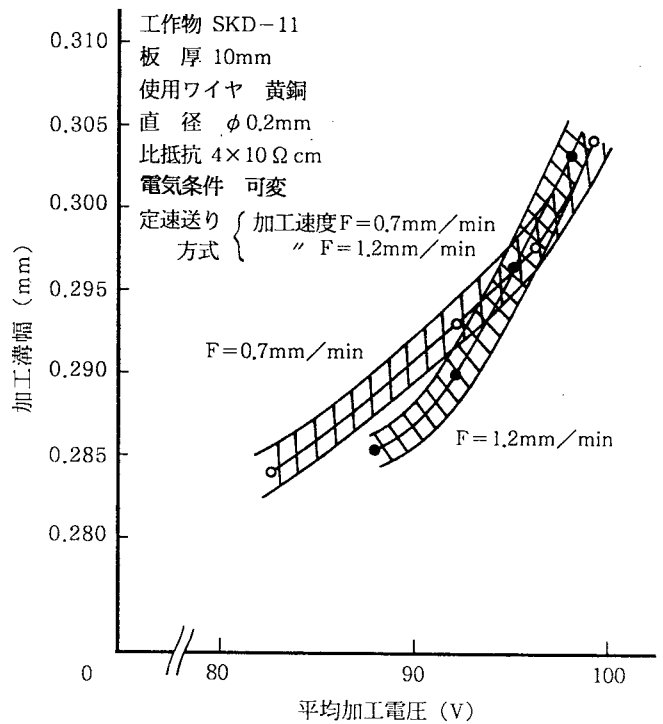


図12 加工溝幅と平均加工電圧の関係

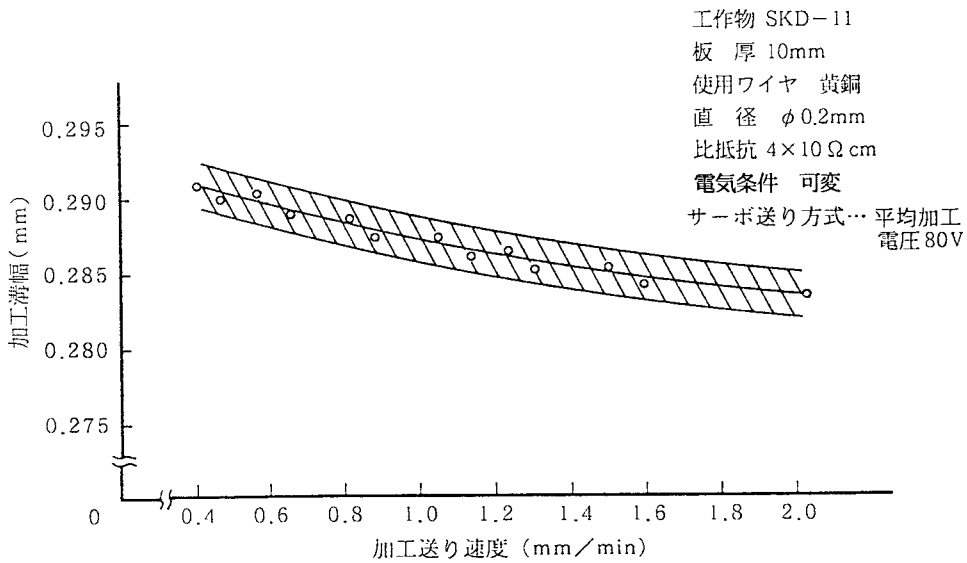


図13 加工溝幅と加工送り速度の関係

加工電圧の変化に大きく影響されることがわかる。上記の事項から形状精度向上のためには、加工速度を速く、加工電圧を低くすることにより加工溝幅を狭くし、ばらつき量を減少することが有利であることがわかる。

真直精度（太鼓形状）に与える要因は、ワイヤの振動、加工液比抵抗、加工粉による2次放電、加工条件（加工速度、無負荷電圧）等がある。図14に示すように、ワイヤ張力が強いほど、放電によるワイヤの振動が少なく、また真直精度が良く、ワイヤ張力の弱い方が、真直精度が悪くなる傾向がある。

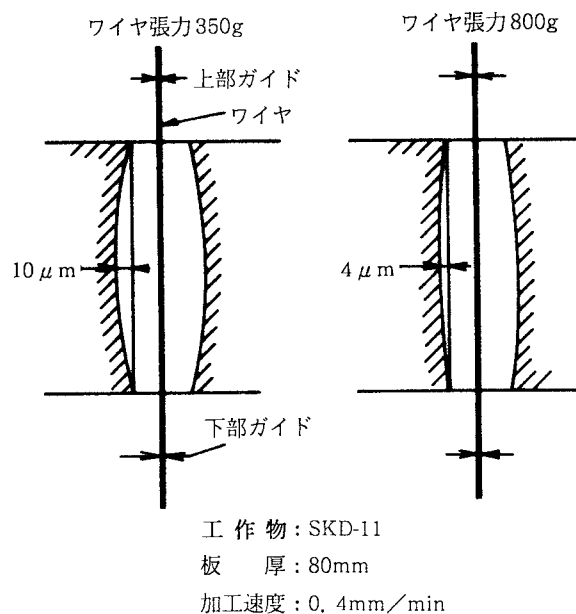


図14 ワイヤの振動

真直精度を向上させるには次の手法が有効である。加工液比抵抗を低め、ワイヤを支える上下

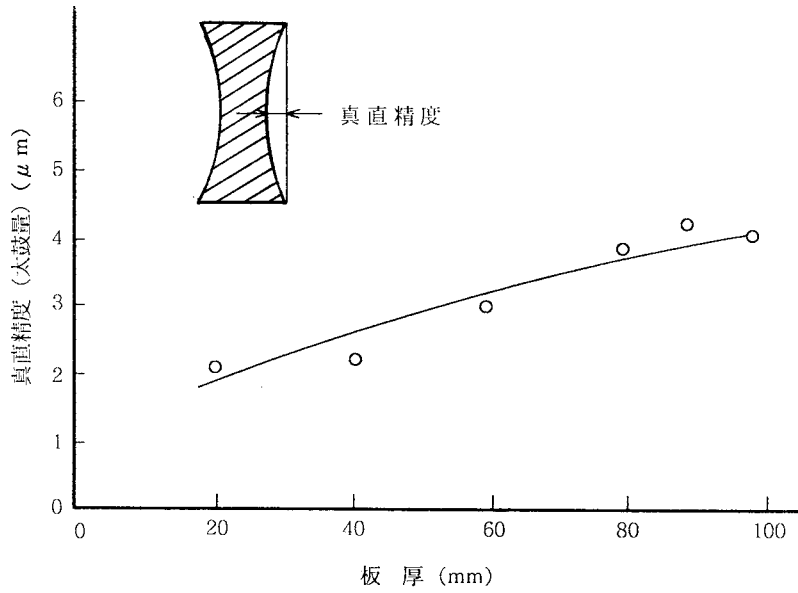


図15 加工板厚と真直精度

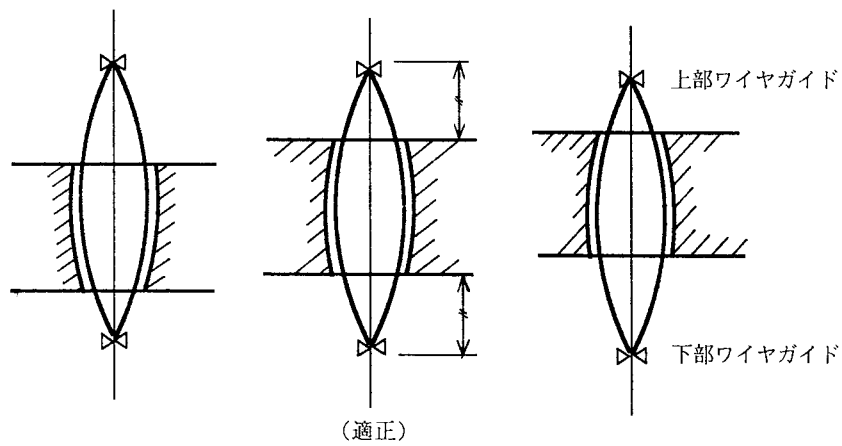


図16 上下ワイヤガイド位置と真直精度

のワイヤガイド距離と工作物との相対的位置設定に留意しなければならない。図16に上部ワイヤガイド位置と加工溝幅の傾向を示す。

b. ピッチ間寸法精度

順送り型や複合型では、ピッチ間の寸法精度（ピッチ精度）が非常に大切であり、順送り金型の主流が入れ子方式であるため、パンチプレート、ストリップ等の加工では、ピッチ間寸法精度が重視されている。最近の高精度ワイヤ放電加工機では、位置決め精度が $2\mu\text{m}$ 以内であり、高精度ジグ研削盤と同様の使い方がされ始めている。ワイヤ放電加工機により製品形状をはじめとして、パイロット穴、位置決め用穴まですべて加工する方式が普及しつつある。高精度ワイヤ放電加工機は、恒温室に設置され、室温のほか、加工液温の制御や、加工中の工作物の温度上昇をも考慮されている。図17に実際に加工したサンプル品のピッチ精度を示す。工作物の表裏ともピッチ間寸法精度は $\pm 5\mu\text{m}$ 以内であり、形状精度も $\pm 5\mu$ を充足している。ピッチ間寸法精度を満足するには、下記の点に注意が必要である。

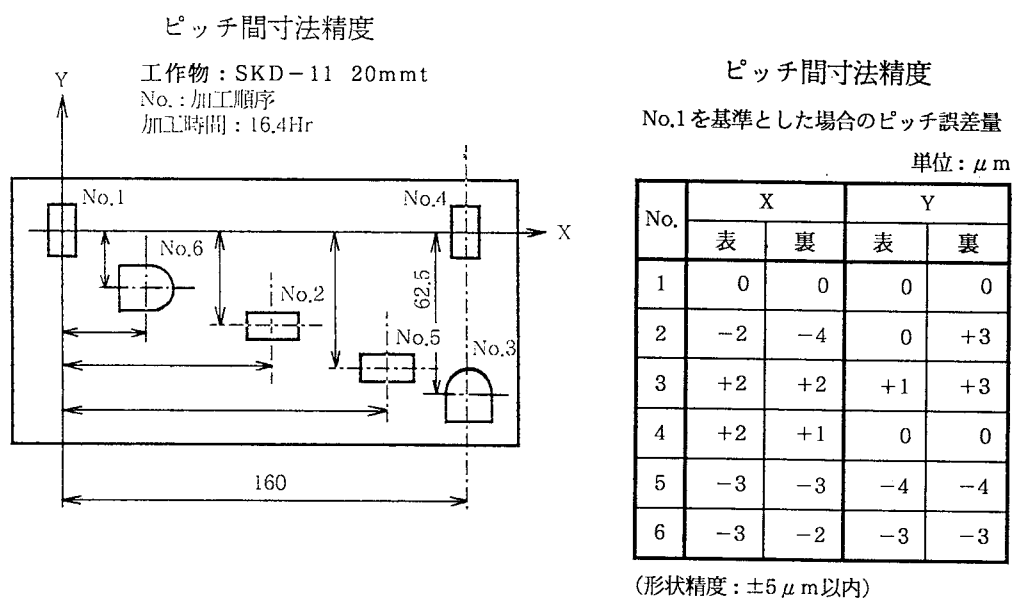


図17 ピッチ間寸法精度

- i) 室温と加工液温を一定にすることが重要である。
- ii) 加工により発生する工作物の残留応力解放による変形を除くため、セカンドカット法を用いる。
- iii) 加工中の加工液比抵抗、電圧等の状態を一定に保つ。

c. 位置決め精度

位置決め方法には、穴基準による方法と工作物の端面を基準とする方法がある。通常、位置決めはワイヤ電極と工作物を電氣的に接触させる方式が採用されており、自動化されている。(図18参照)

- i) 穴基準

ジグ研削盤にて仕上げられ、接触部の寸法を3~5mm、R面取りを行なった工作物での穴基準は、5 μ m 以内の精度が得られる。

ii) 端面基準

工作物の板厚や基準面の状態により異なるが、5~10 μ m の位置決めが可能である。端面基準による位置決めでは、一方向だけの位置決めのため、穴基準の両側面からの位置を拾って中心を求める基準のとり方と比べ相対的に誤差が生じやすいため、端面基準方式の方が穴基準方式に比べ精度が出しにくい。一般に位置決め時においては、工作物の材質や板厚、位置出し面の

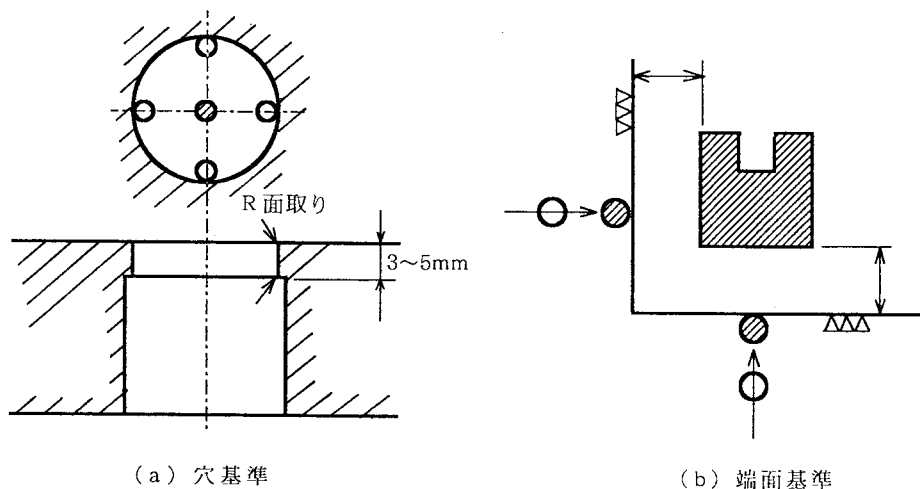


図 18 位置決め精度

酸化被膜の有無、加工液の有無、ワイヤ張力の条件などによって誤差を生じるので数回、位置決めを行うことが好ましい。

d. コーナ形状精度

ワイヤ放電加工機においては、本質的にコーナ部の輪郭精度がくずれやすく、時計部品、バネ板等、微細形状を加工する際、コーナ部における加工現象に留意する必要がある。

コーナ部における加工面積の変化について考えてみると、図 19 (a) に示す直線加工での単位時間における加工面積 S_1 と、図 19 (b) に示すコーナ部での加工面積 S_2 は、直線部の加工面積 S_1 より少なくなり、その分だけ薄い板を加工すると同様に加工溝幅が広くなる。また、 S_3 の部分は放電しないために、ワイヤが放電圧力の反力によって S_3 方向に押され、結局コーナ部の形状が、だれる形状に加工されることになる。図 20 にコーナ部角度 θ と“ダレ”寸法の関係が示されている。図より明らかのように θ が小さくなるほど、ダレ寸法の値は大きくなる。また、コーナ部形状悪化の要因の1つに、ワイヤの加工進行方向への遅れがある。図 21 に示すように、ワイヤガイドは正規の軌跡を描いていても、実際に加工しているワイヤの位置は放電の反発力によりたわみを生じ、張力が小さい場合は特に遅れとなり、自動車の前輪と後輪の関係のように、ワイヤはイ

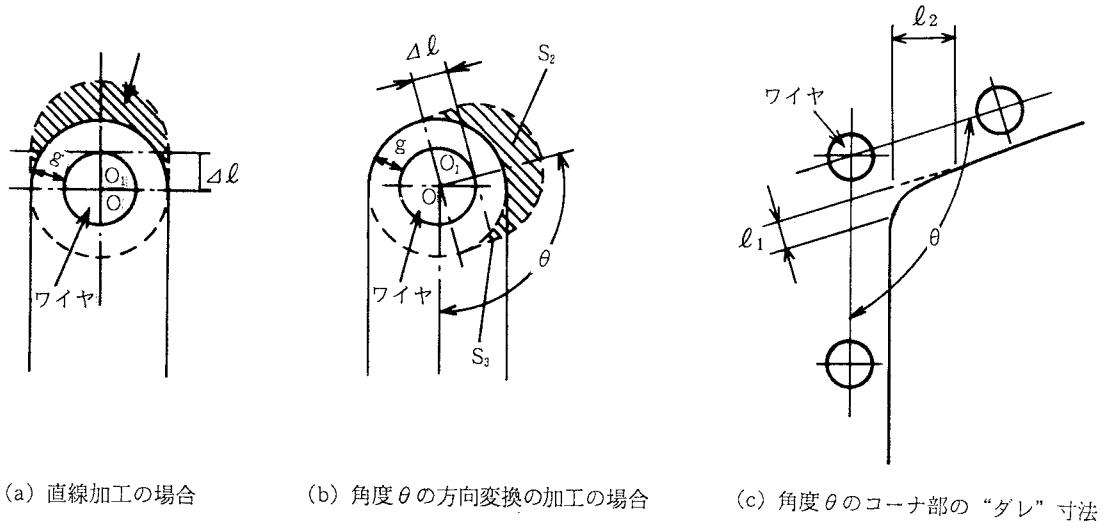


図19 コーナ部加工

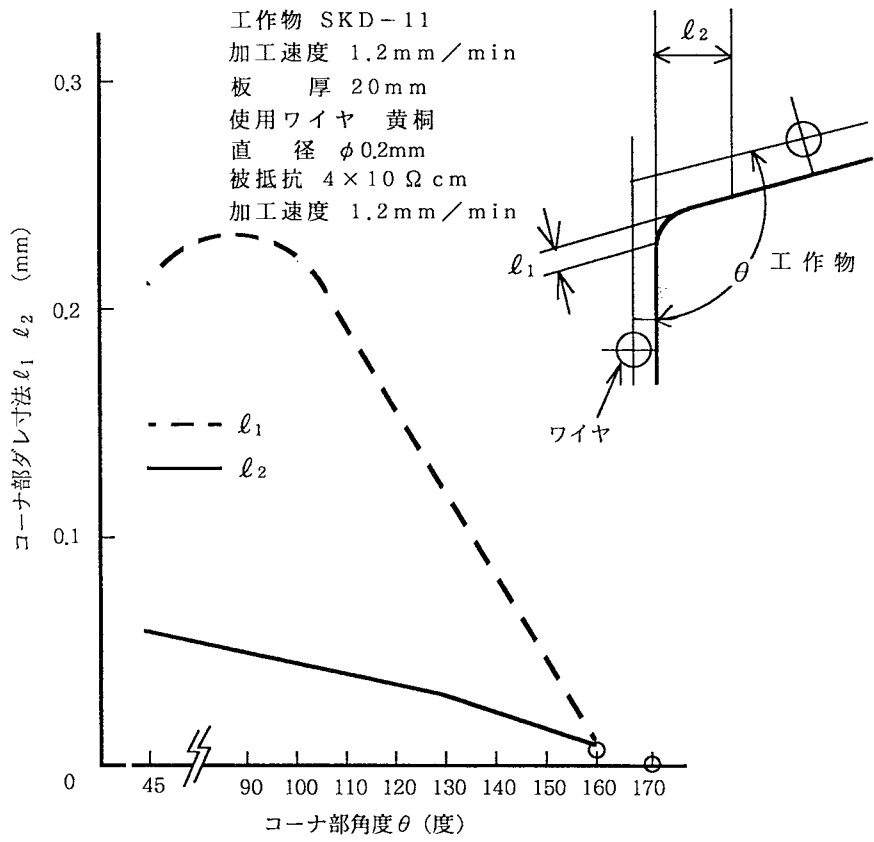


図20 コーナ部のダレ寸法

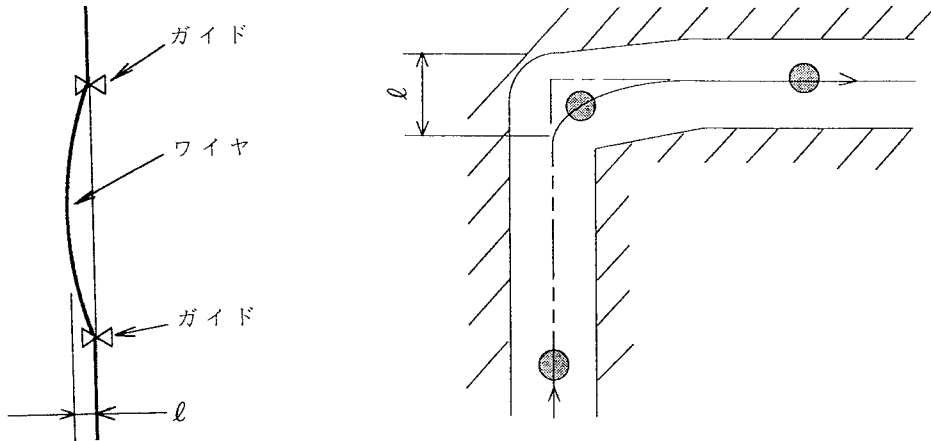


図21 ワイヤの遅れ

微小円弧部の場合には、図22に示すように直線部と円弧部ではワイヤの進行方向に対する左右の加工面積に差が生じるため、結果としてコーナ形状精度の悪化を招いている。直線部では、単

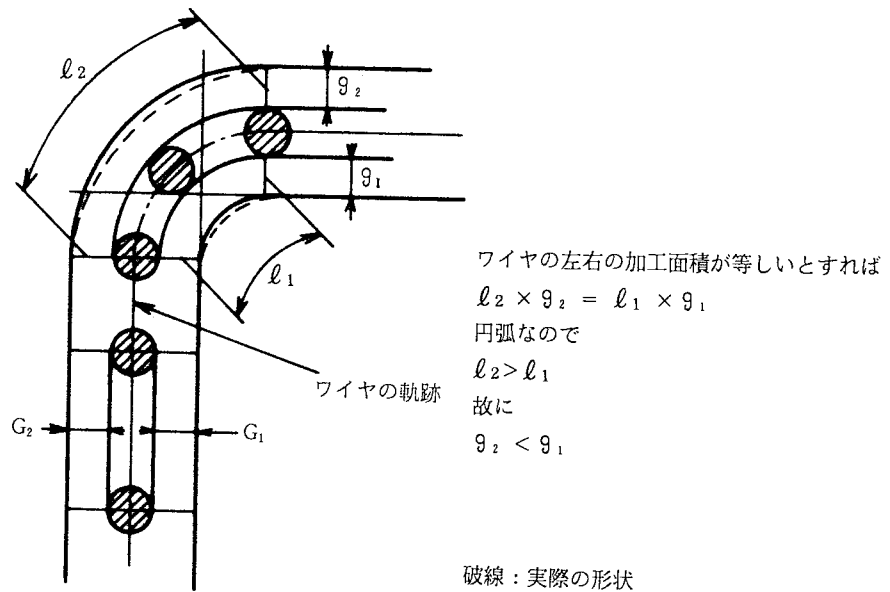


図22 微小円弧部の加工

位時間における放電時間が同一のため左右の加工面積は同一となり、放電間隙G1 とG2 は同一になるが、円弧部においては、内側のコーナ部の放電間隙g1の方が、外側のコーナ部の放電間隙g2より大きくなるため、やはりコーナ形状に変化を生じさせることになる。

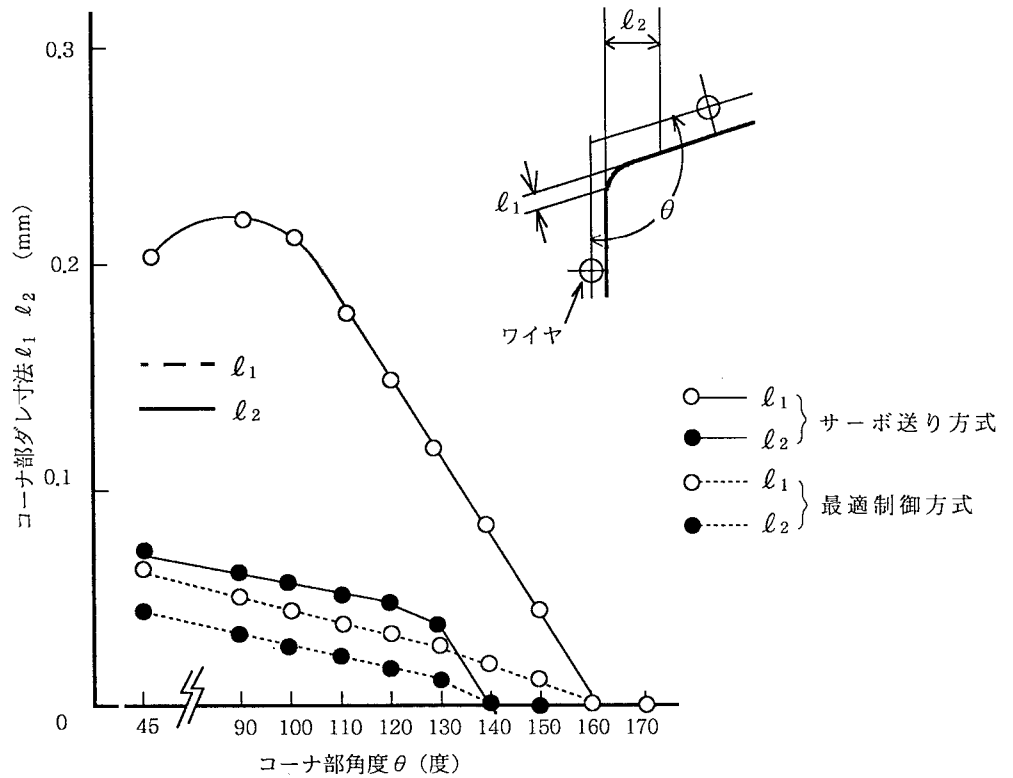


図23 適応制御による加工

現在では自動的にコーナ部の変化をコンピュータ制御により、加工速度や、電気条件（ピーク電流、パルス幅、休止幅）を最適に制御する適応制御が開発され、コーナ部のダレ寸法を極力押える方式が確立している。図23に適応制御した場合のダレ寸法を示す。コーナ部のダレ寸法が大幅に低下していることがわかる。

(3) セカンドカット法

ワイヤ放電加工機におけるセカンドカットとは、形彫り放電加工機の寄せ加工と類似した加工方法で、あらかじめ仕上げ代を残して一次加工を行い、その後残された仕上げ代に対して電気条件を仕上げ加工条件に切り換え、オフセット量を段階的に小さくして加工する方法である。回数は2~8回に分けて行うが、この方法を総称してセカンドカット加工と呼んでいる。

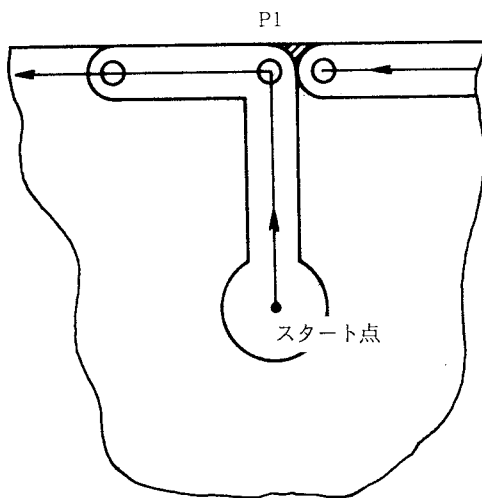


図24 ヘソの発生状態を示す

① ダイ形状におけるヘソ取り

ワイヤカット放電加工機における加工では、図24のように材料の切り落とし部に必ずヘソと称する突起物が残る。パンチ形状は材料が切り落ちてしまうため、ワイヤカットでのヘソ取りはほとんど行われぬ。

しかし、ヘソは必ず形状の外側にできるため、研削、手仕上げ等で除去することが可能である。ダイ形状での手仕上げ等でヘソ取りを行うことのできる形状もあるが、工具の入らないような小さな形状では、ワイヤカットによるヘソ取りの仕上げが必要となってくる。図24を見てもわかるとおり、ヘソと称する突起物は、形状の加工開始点P1を少しずれた位置に残る。通常ワイヤカットの加工は、ワイヤの半径と放電ギャップのためにP1まで戻りきらないうちに内側のワークが落下するため、ワイヤとワークが短絡して停止する。この状態ではヘソはかなり大きく残っている。内側のワークを取り出しプログラムの最後まで加工を行うとかなり小さくなる。さらに小さくするには、形状全体のセカンドカットを行うとほとんど無視できる量になる。

② 面粗度向上と加工面異常軟化層の除去

荒加工条件は、加工速度が優先した加工を行うため、そのままの面粗度では金型として使用できない場合がある。そのため面粗度を向上させるために仕上げ加工を行う必要がある。仕上げ加工の方法は、ミガキ、ショットピーニング、エクストロードホーンなどがあるが、形状が複雑になると面全体を均一に仕上げるのは非常に困難な作業になる。また荒加工後の加工面は材料母材に比べ、表面から10~15 μ mの深さまで軟化することが知られている。加工表面の硬度低下はワイヤ放電加工後の磨き作業を考えたときは非常に効果は大きく、油中放電加工機のそれと比較して仕上げ工程の工数短縮に寄与するところが大きいわけである。ただし、磨きを行わず金型として使用する場合は、初期異常摩擦の原因となるため、あらかじめクリアランスを小さく仕上げておき、試し抜きの段階で軟化層を除去してしまうなどの工夫が必要である。超硬合金の加工においては通常の電気条件では、クラックやボイドを発生し、金型として使用する際の割れや異常摩擦の原因となる。また、低い比抵抗の溶液(5 \times 10⁴ Ω cm以下)では表層面の異常軟化現象を生じ、母材硬度よりも約10%程度低下する。これを解決するため加工液の比抵抗を10 \times 10⁴ Ω cm以上まで高めること、および交流高周波電源を用いたセカンドカット加工が有効である。

③ 工作物内部応力開放後の形状修正

ワイヤ放電加工では、一度ワイヤ電極で加工された経路は、あと戻りすることなく一回で工作物が完成するのがふつうである。ところが工作物は熱処理の有無にかかわらず多少の内部応力があり、それが平衡した状態で安定している。ワイヤカットの加工はこの安定した状態を壊すような加工をするため、内部応力が開放されひずみが発生する。ところがこのひずみは、ワイヤ電極がその点を加工中もしくは通過後に発生することが多く、精度誤差として残るわけである。極端に大きなひずみの発生が予想される場合、例えば板厚の厚いSUS304等のステンレス鋼の加工は、取り代を2~3mm残して荒加工を行い、その後もう一度荒加工条件で適正なセカンドカットの取り代を残して加工し、以後セカンドカットで希望寸法に仕上げていく。荒加工後のひずみの量が50 μ m程度以内であれば通常のセカンドカットの方法で差し支えない。

④ コーナ部のエラー(ダレ)、真直精度(太鼓量)の修正

荒加工条件では、ワイヤ電極自体の振動、放電チップ等の2次放電、ワイヤ電極のコーナ部での遅れが大きく、コーナのダレや太鼓量も大きくなっていく。そのためパンチ、ダイのクリアランスの均一性、工作物の真直精度を重視する場合は、セカンドカットで修正する必要がある。コーナダレは外側コーナのオーバーカット(取れすぎ)、内側コーナのアンダーカットがあるが、ダレの量以上

を段階的に取り去る必要がある。したがって、荒加工時にコーナダレの少ない加工をすれば、セカンドカットの取り代も少なくすむことになる。荒加工時にコーナダレが $30\mu\text{m}$ 発生した場合は、直線部分も $30\mu\text{m}$ 以上取り去る必要があるわけである。荒加工時のワイヤ電極の振動や放電チップの2次放電等による、中へこみ現象（太鼓形状ともいう）もセカンドカットにより修正することができる。太鼓形状の修正はセカンドカット時の放電ギャップを小さく（ $10\sim 15\mu\text{m}$ 程度）にすることにより、 100mm の板厚でも片側数ミクロンになる。

(4) ワイヤ放電加工機の構成

ワイヤ放電加工機のシステム構成は①機械本体、②加工液供給装置、③加工電源装置、④制御装置、⑤NCテープ自動作成装置に分類される。

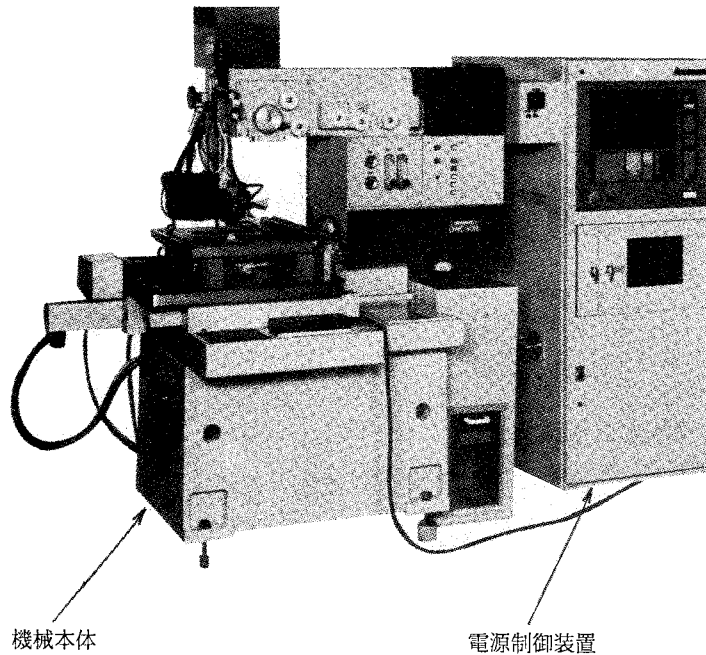


図25 ワイヤ放電加工機

① 機械本体

機械本体はワイヤ電極を、一定のテンションおよび一定の送り速度のもとに送り出す機能と、XYテーブルを数値制御（NC）の指令にしたがって正確に駆動する必要がある、駆動用のボールねじにエラーがある場合にNCによる補正等を行う必要がある。また加工液供給に当たっては、加工液の比抵抗、温度等を一定にすることが加工精度を保つうえで重要である。

ワイヤ放電加工機の機械本体の構成を大別すると、

- a. XYテーブル部
- b. ワイヤ駆動部
- c. その他の部（ヘッド部、コラム部、加工槽部等）

に分類できる。

a. XYテーブル部

XYテーブル部は工作物を搭載し、ワイヤ電極に対して相対運動を与える部分で、通常テーブル駆動部があり、この駆動部と送りねじ（一般的にはボールねじが使用される）が連結され、X軸、Y軸方向の高精度なローラーガイドに沿って移動する。この部分の駆動に用いられる制御系としては、NC工作機と同様にクローズドループ方式、オープンループ方式の制御系がある。図26はセミクローズドループ方式を示したものである。

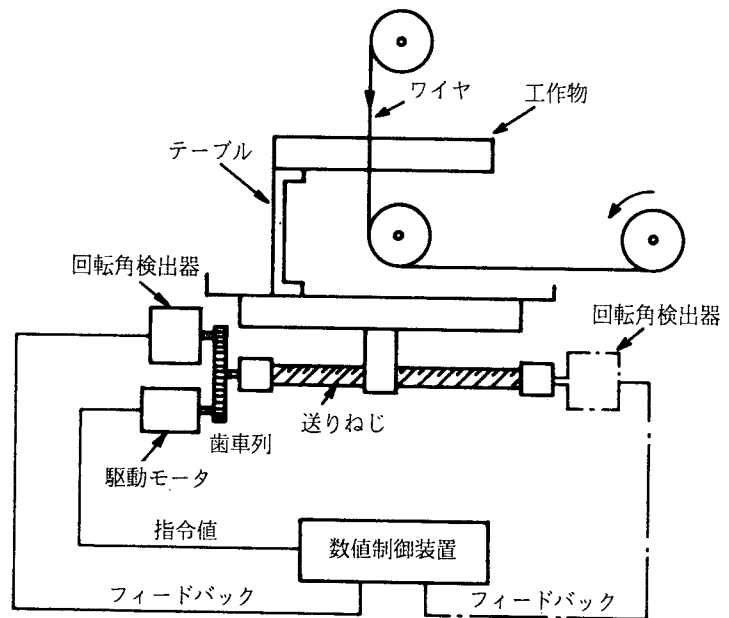


図26 セミクローズドループ方式
(テーブルの位置を回転角などの中間量で検出し、位置制御する)

b. ワイヤ駆動部

ワイヤ放電加工機におけるワイヤは、一般工作機械の工具に相当するものであり、加工精度を向上するためにはワイヤに均一な張力を与えつつ、均一に走行させる機能が必要となる。

図27は、ワイヤ駆動部分の一例を示すもので、ワイヤ供給ボビン（通常1~3kgのワイヤが巻

かれている)よりワイヤを巻き戻し、ワイヤ巻上げローラとピンチローラで挟み、巻上げローラを定速回転させることにより、ワイヤを一定速度走行させている。さらにワイヤに所定の張力を与えるため、機械式あるいは電磁式のブレーキローラがワイヤ走行経路に付加される。またワイヤ

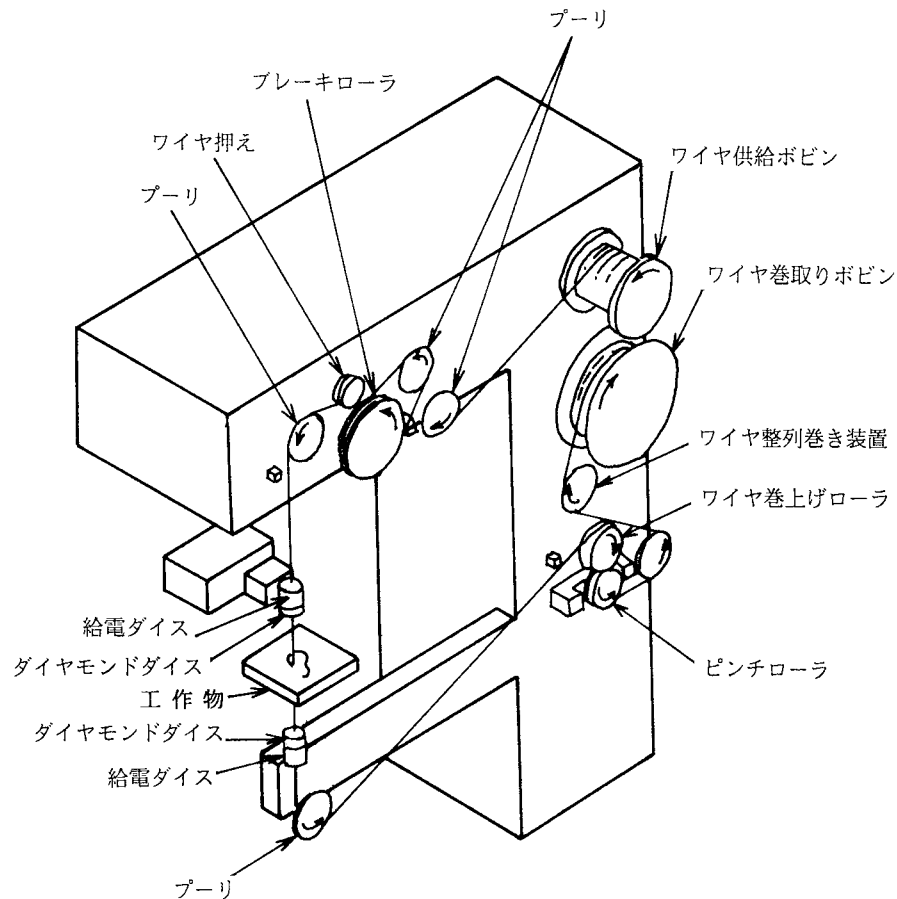


図27 ワイヤ駆動部分

と工作物間での放電により、ワイヤは複雑な振動を繰り返すため、工作物の近傍でワイヤをできるだけ短いスパンになるように摺動保持することが加工精度維持のために必要である。このため通常は工作物の上下にV溝状ガイドあるいはダイス状ガイドがワイヤ保持のために使用される。こうしたガイドに要求される機能は、加工方向によってワイヤの拘束条件が変化しないで、この意味ではダイス状ガイドが最も望ましいガイドといえる。

② 加工液供給装置

a. 加工液の役割

加工液の働きとして、(i) 極間の絶縁回復、(ii) 放電爆圧発生、(iii) 放電加工部分の冷却、(iv) 加工粉の除去の4つの作用がある。両極間、つまりワイヤと工作物間で放電が起こると、放電点は急速に熱せられて蒸発と溶融を起こし、放電爆発力で蒸発および溶融部分が飛散し、加工が進行するものである。放電終了後、加工液は加工部分を急速に冷却し、極間の絶縁回復を行う。また、ワイヤ放電熱および加工電流によるジュール熱により高温となり、切れやすくなるが、加工液によって冷却し断線を防ぐ。通電部ワイヤおよび加工極間の冷却が不十分(例えば気中放電)

な場合はワイヤ切れの原因となるため、その区域にあるワイヤは十分加工液に覆われていることが必要となる。

放電により発生した加工粉はできるだけ速やかに除去する必要がある、この除去効率が悪い場合、ワイヤ、工作物間が加工粉を介して短絡状態となり、放電回数の減少、加工速度の低下につながる。加工液の流し方が重要である。

b. 比抵抗制御

ワイヤ放電加工の加工液は一般に水を使用するが、ある程度の絶縁性を与えて、加工液の絶縁破壊による放電を発生させるために純水化して使用する。純水化のために純水器（イオン交換樹脂）を通し、水中のイオンを除去する。

純水は非常に電気が通りにくい（比抵抗が高い＝導電率が低い）ものであるが、この純水の中に電解質が含まれると、それが電流を流す媒体となるため、その量により比抵抗値に変化を示す。水の絶縁性を表示する尺度として加工液に流れる微弱な電流値を測定することにより比抵抗値または導電率を測定する。

図28に水の比抵抗値または導電率を示す。ワイヤ放電加工では、一般に10～100k Ω cm程度の比抵抗値の範囲で、使用目的によりある値に一定化して使用する。すなわち比抵抗値は加工性能（放電間隙幅、加工速度、面粗度等）に影響を及ぼすため、工作物、または板厚等に対して最適な一定値に制御する必要がある、これを比抵抗制御装置によって行っている。

比抵抗を高くする場合は、加工液を純水器に通しイオンを除去するが、逆に低くする場合は、加工液の中に電解質の比抵抗調整液を投入するか、または所定の比抵抗より低い一般の水道水を加えることにより行っている。

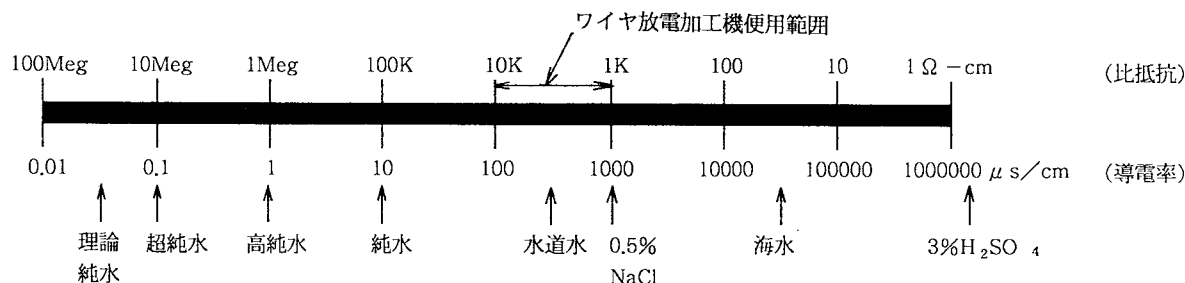


図28 水の比抵抗値, 導電率

比抵抗値が低過ぎると、放電に供する電流が減少し、逆に漏れ電流（電気分解作用を起こす）が増加して加工速度は低下する。また、比抵抗値が高過ぎると、放電間隙が狭くなり、放電効率が低下するため、この比抵抗制御は加工性能上重要な役割をもっている。

c. 加工液回路

図29に加工液回路を示す。加工液はポンプP2により加工域およびワイヤ部へ噴出される。加工後の加工液は加工槽に集められ、加工液供給装置の汚液槽へ回収される。汚液はポンプP1によってろ過フィルタへ加圧送給され、加工粉を除去する。フィルタの目づまり度合いは圧力計にて監視する。ろ過後、純水器を通過した清浄液は、ポンプP2により加工部へ送給される。この時加

工液は比抵抗検出電極を通り、この電極により検出された比抵抗値が比抵抗制御装置にて設定した値より低下したとき、この装置より電磁弁へ作動信号を送り、ろ過液の一部を純水器へ送ることにより比抵抗を上げる。以上の動作によって比抵抗値が設定したレベルに達したときは、電磁弁をオフにし、純水器への流入をストップして設定した比抵抗値へ一定化制御する。

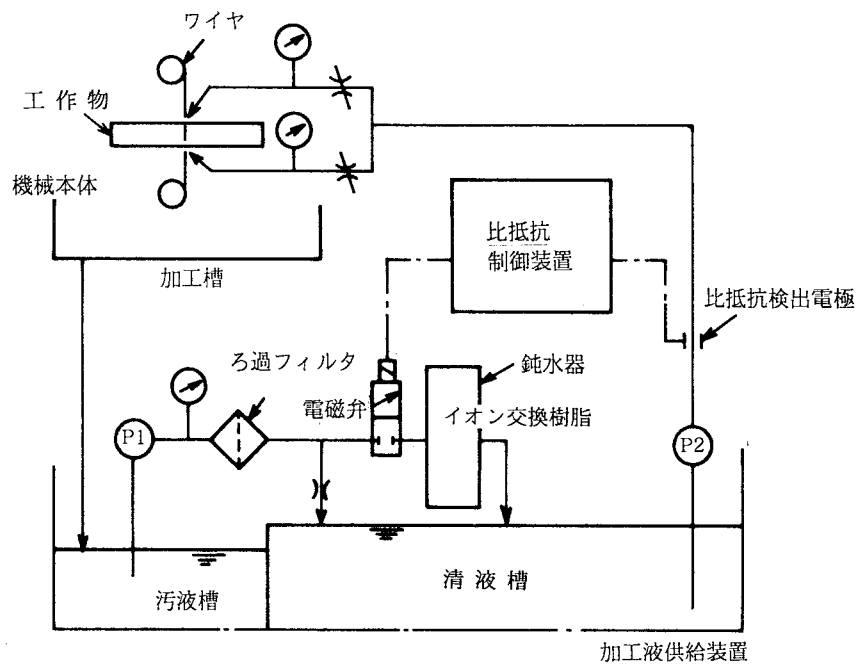


図 29 加工液回路図

純水器（イオン交換樹脂）はその純水化能力に限度があるため、比抵抗が上昇しない場合（飽和状態）は、新しいイオン交換樹脂に取り換える必要がある。

③ 加工電源装置

加工電源装置は、仕上げ面あらさの良い状態で高い加工速度を得るために、パルス幅が狭く電流ピーク値の高いパルス電流を、単位時間にできるだけ多くの放電発生回数を得るように発振することが、加工速度および加工形状精度を向上させるために必要である。

ワイヤ放電加工機は形彫り放電加工機と異なり、仕上げ面の良い状態で加工速度を高めるために、パルス幅の狭い電流ピーク値の高いパルス電流を極間に発生させることになる。それを実現するためのワイヤ放電加工機の電源装置の回路方式として図 30 に示すものが用いられている。

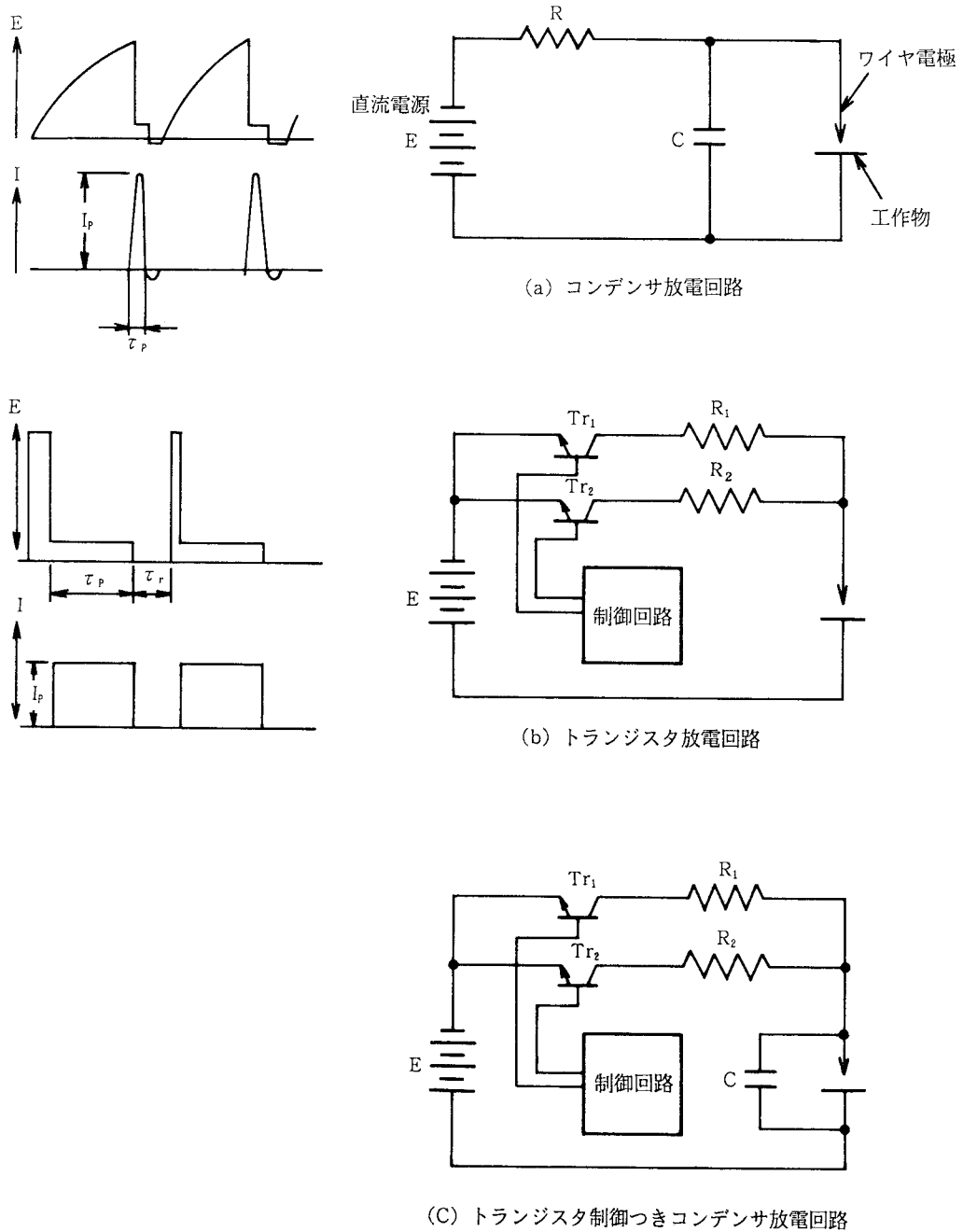


図30 電源装置の回路方式

④ 制御装置

制御装置は、加工の自動化、高精度化、最適化（最もよい条件を機械自体で適応）、加工能力（機械）の拡大、加工機のなんらかの事故による加工の失敗の防止、制御装置故障個所の迅速発見のための自己診断（サービス技術効率化）、加工の便利さの拡大のための種々の機能をもつ。

最近のワイヤ放電加工機用の制御装置は、CNC方式が主流となっている。図31はCNC制御装置の一般的な構成を示す一例で、ミニコンピュータなどを内蔵した演算制御部、プログラムなどを記

憶するメモリ部、必要な情報を数値化したNCテープからのデータを読み取るテープリーダ部、テーブルの駆動を制御するサーボ系、機械、電源の操作を制御する入出力インターフェース部などから構成されている。指令テープ入力、制御装置操作部のキーボードよりの手動データ入力（MDI：Manual Date Input）、またはあらかじめメモリに記憶されたNCデータ等の入力情報により、テーブルの送り制御はむろんのこと、機械・電源の操作（加工液、ワイヤの供給と停止、電源の入切など）を自動で行うことができる。またこれらの制御の大半は、メモリ内部に記憶された制御プログラム（ソフトウェア）で行われている。

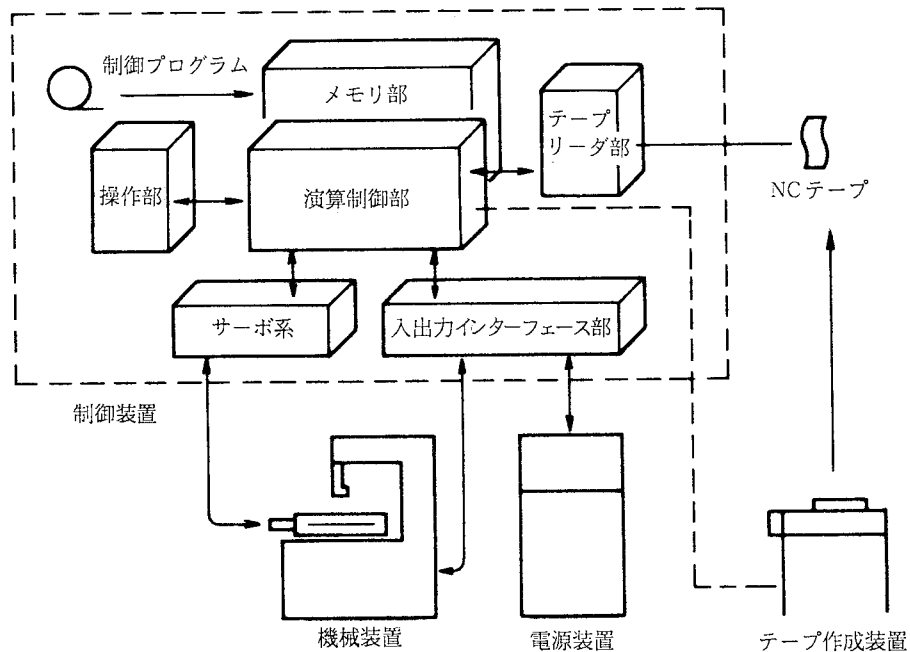


図31 CNC制御装置の構成

⑤ NCテープ自動作成装置

NCテープ自動作成は、容易に、しかも間違いを少なくNCテープを作成できるようにするため、ワイヤ放電加工に最適な簡易APTが日本の放電加工機メーカーによって開発され、これがワイヤ放電加工の普及に著しく貢献している。

自動プログラミングによるプログラム例を図33、図34に示す。自動プログラミングでは、図のようなデータ（パートプログラムという）を計算機に入力させ、NCテープを作成したり、プロッタに図を描かせたりする。こ

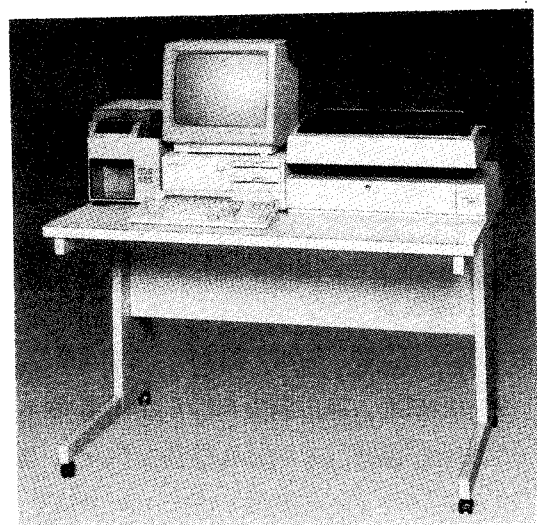


図32 NCテープ自動作成装置

のパートプログラムは、図形を定義する部分とワイヤの加工経路を指示する部分とに分かれており、図の例では0100の行までが図形定義部である。この内容は、例えば点1 (P1) は X 座標が -40、Y 座標が 30 の点である (P1=X-40/Y30) とか、直線1 (L1) は点1 (P1) と原点 (P0) を通る直線である (L1=P1/P0) というように、シンボリックな人間にとってある程度覚えやすい言葉を入力するようになっており、手計算等はしなくても自動的に NC テープが作成できる。また、パートプログラムを入力していく過程で誤りや不足情報があれば、自動的に計算機より問いかけが行われ、その問いに答えていくだけで正しいプログラムができるようになっていく。このような処理方法を会話型処理という。

さて、0110以下は経路定義部であり、0100行までに定義した図形を使い、実際にワイヤをどのように動かし、加工を進めていくかを決定している。まず点1 (P1) を加工のスタート点とし、オフセットを右側にかける (SET/P1, R)。つづいて直線1 (L1) にそって動かす (L1)、円1 (C1) にそって反時計回りに動かし、そのとき直線1 (L1) から、円1 (C1) に移るとき2つある交点の左側から円1 (C1) に乗り移る (C1, CC, L)。次に……という形で順にワイヤの動く経路を書いていくわけである。なお、0120行のMINR/0.2は、コーナーに0.2のRをつけるという指示である。本例では使用していないが、このほかに座標の回転や繰返し、変数機能、演算機能等の便利な機能が準備されており、複雑な形状の加工でも容易にNCテープができるよう工夫されている。

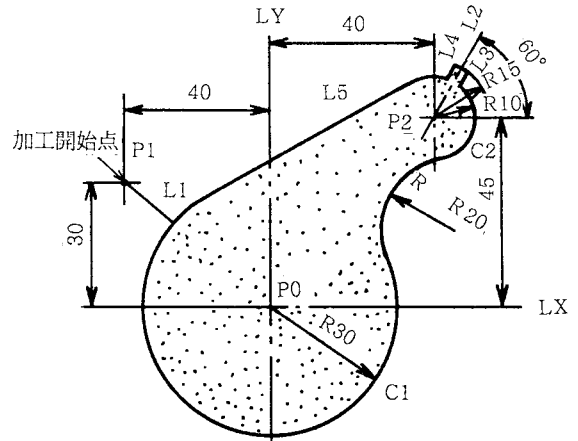


図33 プログラム形状

```

$ NEW
$ KEY
0010 P1=X-40/Y30
0020 L1=P1/P0
0030 C1=P0/R30
0040 P2=X40/Y45
0050 C2=P2/R30
0060 L2=P2/60
0070 L3=L2, R/D2
0080 C3=P2/R15
0090 L4=L2, L/D2
0100 L5=C1, L/C2, L
0110 SET/P1, R
0120 MINR/0.2
0130 L1;C1, CC, L;R;C2, CC;L3, U;C3, CC, U
0140 L4, U;C2, CC, U;L5;C1, CC;L1, L
0150 END
0160 MEND
$ MTN. LO

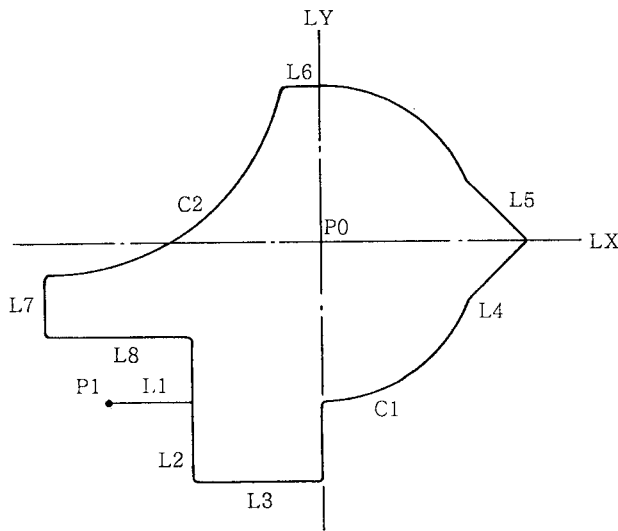
```

図34 図33のためのパートプログラム例

(点の座標値データの与えた例)

NCテープ自動作成装置のプログラム例

a. 基本形状



```

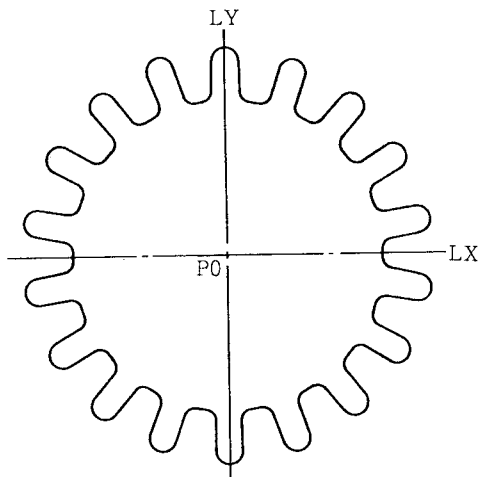
0010 PL : X-13/Y-10
0020 L8,1,3,6 : LX,D/D6,10,15,-10
0060 L2,7 : LY,L/D8,17
0080 L4 : X13/Y0/A45
0090 L5 : X13/Y0/A-45
0100 C1 : P0/R10
0110 C2 : X-17/Y13/R15
0120 SET/P1,R
0130 L1 ; L2 ; R ; L3 ; R
0140 LY ; R ; C1,CC,R ; L4,R
0150 R ; L5 ; R ; C1,CC,R ; L6
0160 R ; C2,CW,R ; R ; L7,D ; R
0170 L8 ; R ; L2 ; L1
0180 END
0190 MEND
    
```

図形定義

経路定義

図35 プログラム形状

b. 繰返し形状



```

0010 P1 : X0/Y40
0020 L1 : LY,R/D2.5
0030 C1 : X0/Y37.5/R2.5
0040 C2,4 : P0/R30,40
0060 L3 : P0/A70
0070 L2 : L3,L/D2.5
0080 C3 : L2,R/C4,I,U/R2.5
0090 P2 : L3/C3,U
0100 SET/P0/R
0110 MINR/2.5
0120 P1
0130 LOOP/18PO ←繰返し命令
0140 C1,CW ; L1 ; R ; C2,CW,U ; R
0150 L2,U ; C3,CW ; P2
0160 TURN
0170 END
0180 MEND
    
```

\$

図36 プログラム形状

c. テーパー加工 (シャープエッジ)

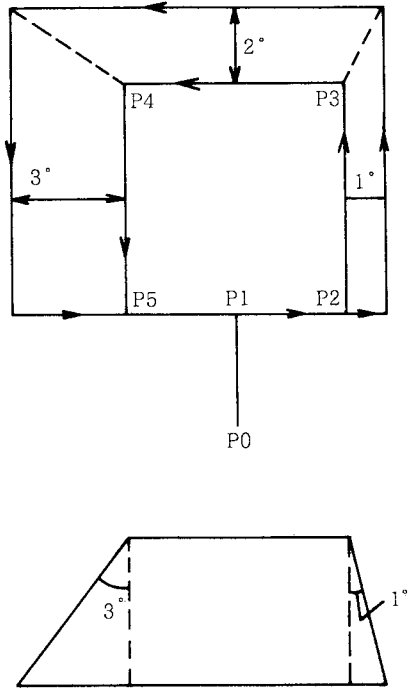


図 37 プログラム形状

```

P1=X0/Y5.          M80
P2=X5./Y5.         M82
P3=X5./Y15.        M84
P4=X-5./Y15.       G90
P5=X-5./Y5.        G92X0Y0
                    G42X0Y5000
                    G01X5000Y5000
                    A-10000
P1                  G01X5000Y5000
P2                  G01X5000Y5000
INST/A-10000       A-20000
P3                  G01X-5000Y-15000
INST/A-20000      A-30000
P4                  G01X-5000Y5000
INST/A-30000      A0
P5                  G01X0Y5000
INST/A0            M00
P1                  G01X0Y0G40F10.
STOP               M02
INST/G40F10 ;     %
P0
END
MEND
    
```

d. テーパー加工 (コーナR)

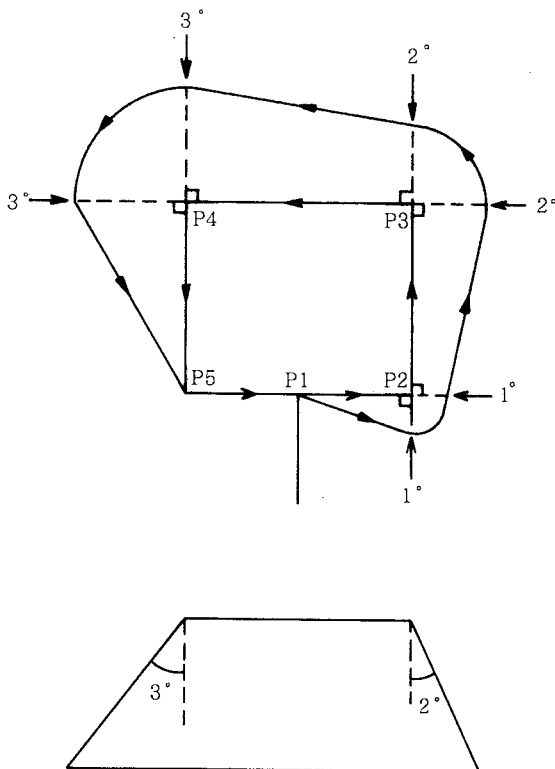


図 38 プログラム形状

```

P1=X0/Y5.          G88
P2=X5./Y5.         M80
P3=X5./Y15.        M82
P4=X-5./Y15.       M84
P5=X-5./Y5.        G90
INST/G88           G92X0Y0
SET/P0.R           G42X0Y5000
P1                  G01X5000Y5000
P2                  A-10000
INST/A-10000      G01X5000Y15000
P3                  A-20000
INST/A-20000     G01X-5000Y15000
P4                  A-30000
INST/A-30000     G01X-5000Y5000
P5                  A0
INST/A0           G01X0Y5000 ;
P1                  M00
STOP               G01X0Y0G40F10.
INST/G40F10 ;     M02
P0                  %
END
MEND
    
```

e. 上下任意形状

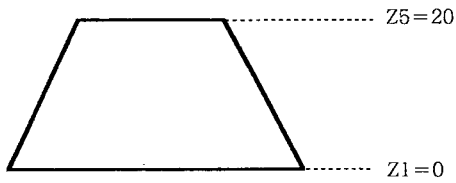
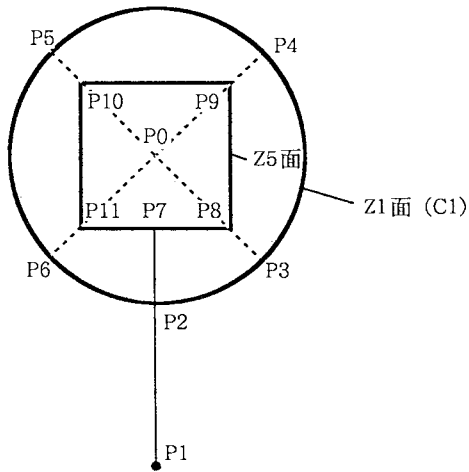


図39 プログラム形状

```

C1=PO/R10
P1=X0/Y-20
P2=X0/Y-10
P3=P0/R10/A-45
P4=P0/R10/A45
P5=P0/R10/A135
P6=P0/R10/A-135
L1=LX,D/D5
L2=LY,R/D5
L3=LX,U/D5
L4=LY,L/D5
P7=X0/Y-5
P8=X5/Y-5
P9=X5/Y5
P10=X-5/Y5
P11=X-5/Y-5
INTP/100
SET/P1,R
Z1 ^ Z5
C1,CC ^ L1
P3 ^ P8
C1,CC ^ L2
P4 ^ P9
C1,CC ^ L3
P5 ^ P10
C1,CC ^ L1
P2 ^ P7
STOP
INST/G40F10, ;
P1
END
MEND
    
```

3. 導電性セラミックス

セラミックスは、耐摩耗性、高強度、低変形性、潤滑性等の機械的特性及び耐熱性、断熱性、伝熱性、高温強度・耐蝕性等の熱的特性において優れた性能を持ち、新設計の構造部材として様々に応用がはかられている。しかしながら、加工の点からすれば、これらの機械的特性は短所となっている。セラミックスの加工方法には、ダイヤモンド工具による研削・研磨による方法が一般的であるが、加工速度が遅く、加工できる形状に制限があり、複雑形状部品になると加工コストが著しく高くなるという問題がある。

このように加工困難なセラミックスを構造材料としてその実用性を高めるために、特殊加工には重要な役割を受けもつと考えられる。たとえば導電性材料に対する放電加工の応用は、高温で腐食性の雰囲気で使用される複雑形状の機械部品製作などに試みられている。

(1) 導電性セラミックスの種類

現在、材料メーカ各社から数種類の導電性セラミックスが発売されているが、その主なものは、ZrB₂ (旭硝子)、Si₃N₄ (住友電工)、SiC (信越化学)、SiALON (日立金属) であり、いずれもワイヤ放電加工を可能にするために、TiN、TiCなどの導電性物質を添加したものである。

それぞれの比抵抗、熱伝導率、融点 (昇華温度) の物性値、またワイヤ放電加工での加工性について表5に示す。

表5 導電性セラミックスの物性値⁽⁵⁾

セラミックスの熱伝導率 (λ) と融点 (昇華) (θ_m)

セラミックス	メーカ	板厚 (mm)	比抵抗 (μcm)	λ (W/m °C)	θ _m (°C)	λ × θ _m (W/m)	ワイヤEDM
SiALON (サイアロン)	日立金属	11	3.6~5×10 ⁻⁴	21.3	1,900 (以下)	4.05×10 ⁴ (以下)	加工されやすい 140~190mm ² /min
		62					
Si ₃ N ₄ (窒素珪素)	住友電工	17	5.7×10 ⁻⁴	20.9	1,900	3.97×10 ⁴	(40~60mm ² /min)
		65					
ZrB ₂ (ホウ化ジルコニウム)	旭ガラス	13	4×10 ⁻⁵	85.8	2,220	1.90×10 ⁵	加工されにくい 50~70mm ² /min
		39	(カタログ値)				
SiC (炭化ケイ素)	信越化学	13	1×10 ⁻¹	73.3	3,200	2.35×10 ⁵	(50~70mm ² /min)
		50					

セラミックスの種類にもよるが、加工速度は金属 (Fe、Cu 等) と同等かむしろ速いといえる。

これは表の物性値の中で、熱伝導率 (λ) と昇華温度 θ_m をかけ合せた λ・θ_m が加工の難易と対応していることからいえる。その値はSiALON、Si₃N₄ 群が λ・θ_m ÷ 4×10⁴ (W/m) であり、ZrB₂、SiCが λ・θ_m = 2×10⁵ である。また金属では、Fe が λ・θ_m = 1.23×10⁵ (W/m) で、Cuが λ・θ_m = 4×10⁵ (W/m) である。これらの中でSiALON、Si₃N₄ 群の λ・θ_m がとりわけ小さい。

(2) 導電性セラミックスの加工時性

① 放電加工が可能なセラミックス

放電加工が可能なセラミックスには、セラミックス自体に本来導電性のあるものを焼結したものと、主体をなすセラミックスには導電性はなくとも導電性のある物質を助剤として焼結したものとに分けられる。

セラミックス自体で導電性をもつものは、次のような炭化物、硼化物、窒化物である。

- a. 炭化物ではTiC、ZrO、WC、TaCなどが導電性をもつ。SiCは反応焼結の場合に $0.08 \sim 10^{-1} \Omega \text{ cm}$ 程度の比抵抗があり、放電加工可能であるが、比抵抗が $10^4 \Omega \text{ cm}$ 程度と高い通常のSiCは不可能である。
- b. 硼化物では、 TiB_2 、 ZrB_2 などである。
- c. 窒化物では、TiN、ZrNなどである。

なお、酸化物には通常導電性のないものが多い。

上記の導電性セラミックスを助剤として混合焼結したものには Si_3N_4 -TiNやサイアロン(SIALON、 Si_3N_4 、 Al_2O_3 などの混合物に、TiNなどを混合)がある。

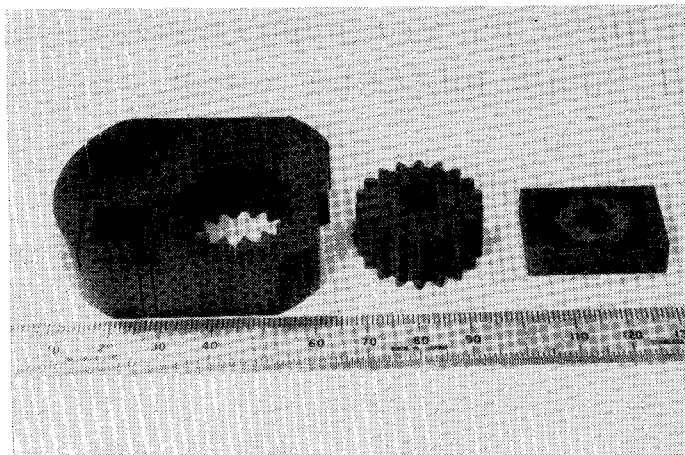


図40 セラミックスの放電加工例

② 放電加工特性

セラミックスは熱伝導率(λ)が金属にくらべて小さく、銅にくらべれば $1/10$ 以下、鉄にくらべても $1/2 \sim 1/3$ のものが多い。一方、融点(θ_m)もしくは昇華温度は鉄よりも高く、鉄の 1539°C にくらべ、 $1900 \sim 3000^\circ\text{C}$ のものが多い。このことは次のような加工特性を生ずる。

表 6 (8)

材 料	昇 華 温 度 または融点 θ_m (°C)	$\lambda \cdot \theta_m$ (W/cm)
Si_3N_4	1,900	397
SiAlON	1,900	405
ZrB ₂	2,220	1.900
SiC	3,200	2.350
W	3,377	4.940
Cu	1,084	4.000
Ag	960	3.890
Mo	2,577	3.730
Al	659	2.740
Ta	2,997	2.093
Pt	1,770	1.556
Fe	1,539	1.230
Ni	1,455	600
ステンレス鋼	1,425	520
Ti	1,672	315

λ : 材料の熱伝導率 (W/cm·°C)
 θ_m : セラミックスは昇華温度/金属は融点

- a. 材料の高温強度が高く、熱伝導率が低いため、放電点における温度こう配が大きくなり結局応力こう配が大となる。放電点が冷却された後は、材料表面が冷却され材料内部は温度が表面よりも高くなり、表面に引張応力、内部に圧縮応力を生じ、表面応力が材料の引張応力よりも高くなると表面にクラックを生ずる。

材料表面から内部に向けての温度分布と圧力分布を概念的に示したものを図41に示す。

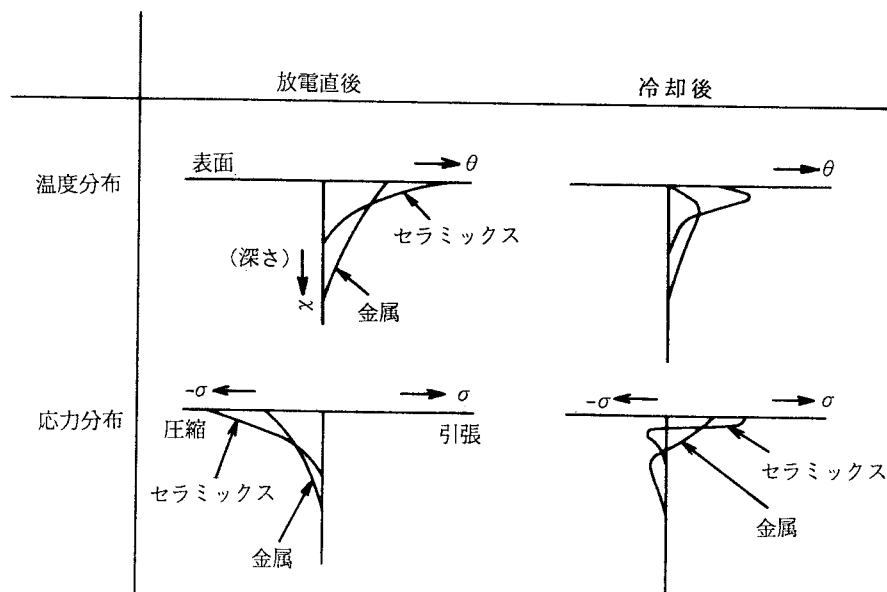


図41 放電点の温度・応力分布概念図

- b. 熱伝導率の良好な銅のような電極を用いれば、低消耗加工は得られる。
 ($\lambda \cdot \theta_m$ の積の値が小さいほど、低消耗加工が容易である。)
- c. 融点が高く、熱伝導率が低いことは、放電点が冷却されにくいことを意味し、そのため、放電点は絶縁回復が遅くなる。放電休止時間の割合が小さい場合は (デューティファクターが大きい) つぎつぎに発生する放電が同一放電点に集中し、いわゆるアーク放電となり、欠陥を残しやすい心配がある。したがって、加工条件として休止時間を長くとるか適応制御の必要がある。
- d. 放電の集中によるいわゆるアーク放電を生ずる場合や、パルス幅の長い場合および放電痕の深くなるような荒加工条件では、クラックを生じやすい。仕上げ面を微細に加工する必要がある。

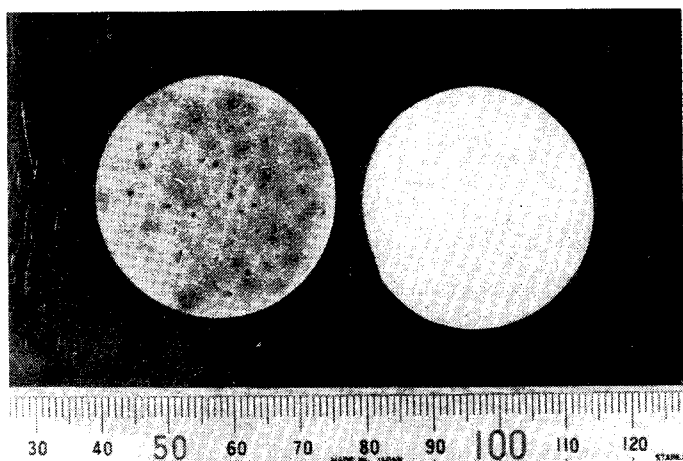


図42 左：アーク放電加工面
 右：正常放電加工面
 (材料：炭素鋼、電極材：銅)

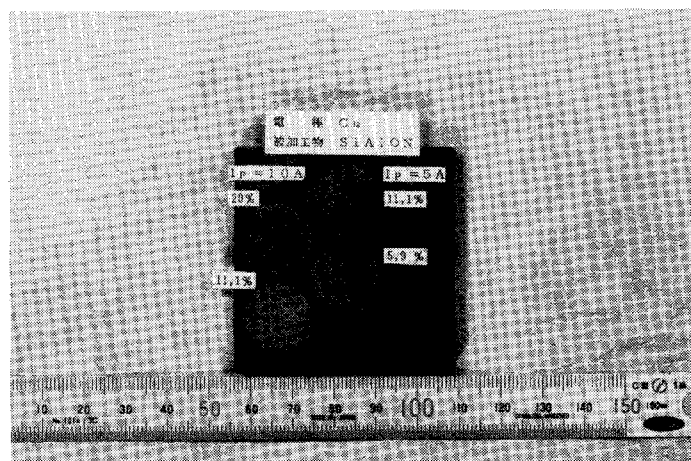


図43 アーク発生の判定基準

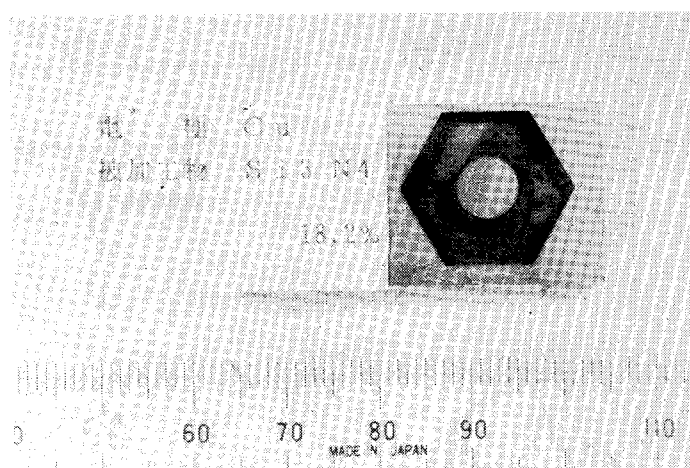


図44 セラミックスのアーク痕
 (Cu 電極、 Si_3N_4 系セラミックス / デューティファクタ : 18.2%)

- e. 多くのセラミックスは放電加工によって強度が低下し、 $R_{max}=0.8\ \mu\text{m}$ 以下とすることが必要であるが、サイアロンは $R_{max}=7\sim 8\ \mu\text{m}$ でも、素材強度よりもあまり低下しない。

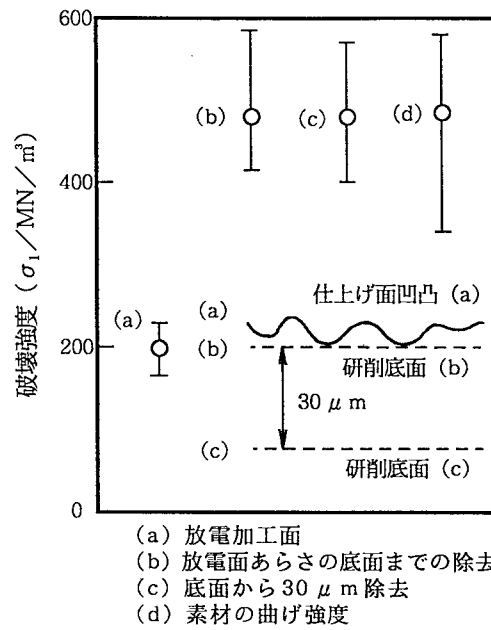


図45 ダイヤモンド砥石研削による強度の回復

4. ワイヤ径の選択

ワイヤ電極は主に黄銅線（硬）を使用し、表7に標準的な張力設定値を示す。

実際の加工時に設定する張力は、それぞれのワイヤ電極の破断荷重の30～50%が適当である。この張力以下に設定すると、ワイヤ断線は発生しにくくなるが、加工中の短絡現象や、加工速度低下、加工精度不良の原因になり、逆に、標準張力値よりも高く設定すると、コーナ部分の精度や真直精度はよくなるが、反面ワイヤが切れやすくなる。

次に使用ワイヤの選定であるが、加工目的、主にコーナR（加工形状のコーナ部の半径）の制約によって選ぶ必要がある。ワイヤ電極は丸いため図46に示すようなコーナR部では、ワイヤ径の半分を放電ギャップ量を加えた値を半径とするコーナRができる。そのため、コーナRを小さくするには、細いワイヤ電極を選び、放電ギャップを小さくする必要がある。しかし工作物の板厚が厚くなると、細いワイヤでは通電できる電流源が制限され、加工速度が遅くなると同時に放電ギャップも大きくなる。つまり、コーナRの大きさは、ワイヤ径だけでなく、工作物の板厚にも制約を受けることになる。表8にコーナRの大きさと使用ワイヤ、そして適切な板厚の範囲を示す。

表7 標準的なワイヤ張力設定値

ワイヤの材質	ワイヤ径	加工時の張力設定(g)
黄銅	φ0.3	2,000～2,200
	φ0.25	1,500～1,900
	φ0.2	950～1,300
	φ0.15	700～750
	φ0.1	350～400

表8 コーナRの大きさ、使用ワイヤおよび適切な板厚

コーナRの大きさ(mm)	使用ワイヤ径	適切な板厚(mm)
0.3 以上	φ0.3	0～250
0.25 ～ 0.3	φ0.25	0～250
0.2 ～ 0.25	φ0.2	0～100
0.15 ～ 0.2	φ0.15	0～60
0.1 ～ 0.15	φ0.1	0～30

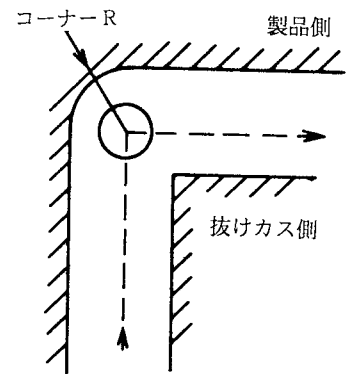


図46 コーナ形状

5. 加工条件の選択

図47にワイヤ放電加工における加工特性要因図を示す。これらの要因から判断し、最適な加工条件を選択する。

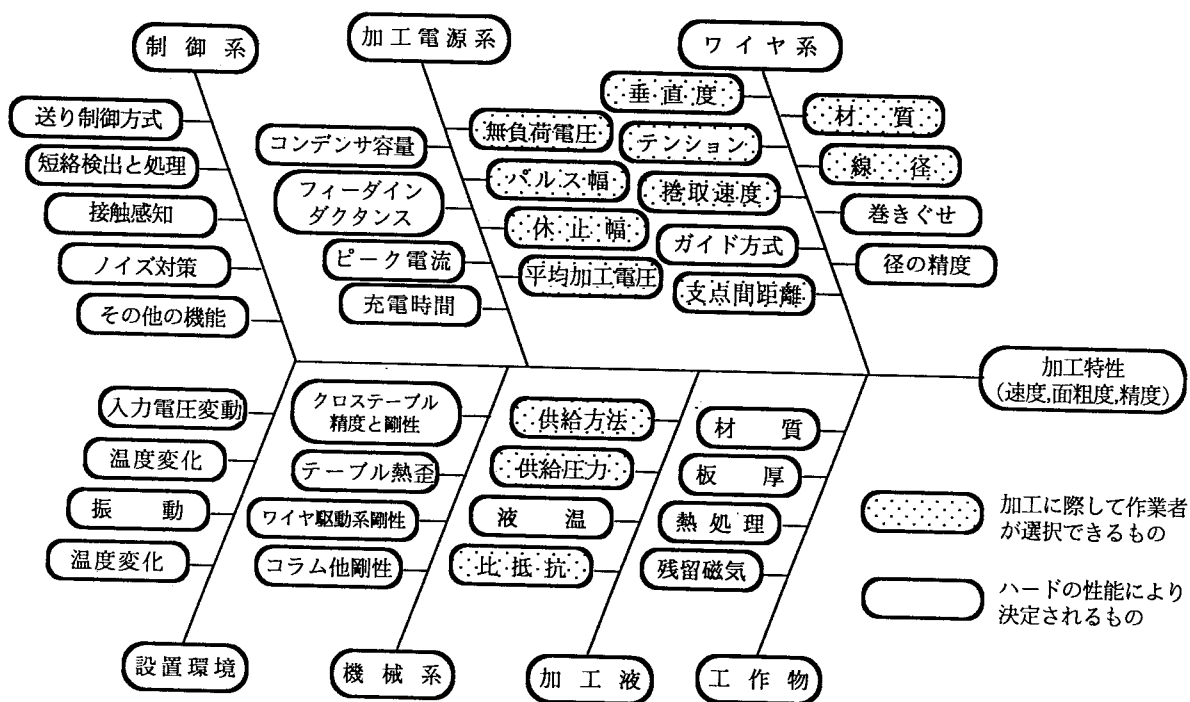


図47 加工特性要因図

6. 体積加工速度と仕上げ面あらさ

図48には、加工速度と加工体積で表示した体積加工速度 W [mm^3/min] と、最初に溝加工をした後 (1stCut)、わずかの仕上げ代を与えて仕上げ加工 (2ndCut、3rdCut、etc.) を行う仕上げ工程における仕上げ面あらさの変化を SiAlON 、 Si_3N_4 、 SiC について行った結果を示す。加工速度は Si_3N_4 、 SiAlON が高く、 SiC 、 ZrB_2 は低い。

さらにこのデータを用いて体積加工速度 W と仕上げ面あらさの関係を求めたものを、図49に示す。これにより Si_3N_4 、 SiAlON がよい仕上げ面あらさのもとに早く加工できることが理解される。

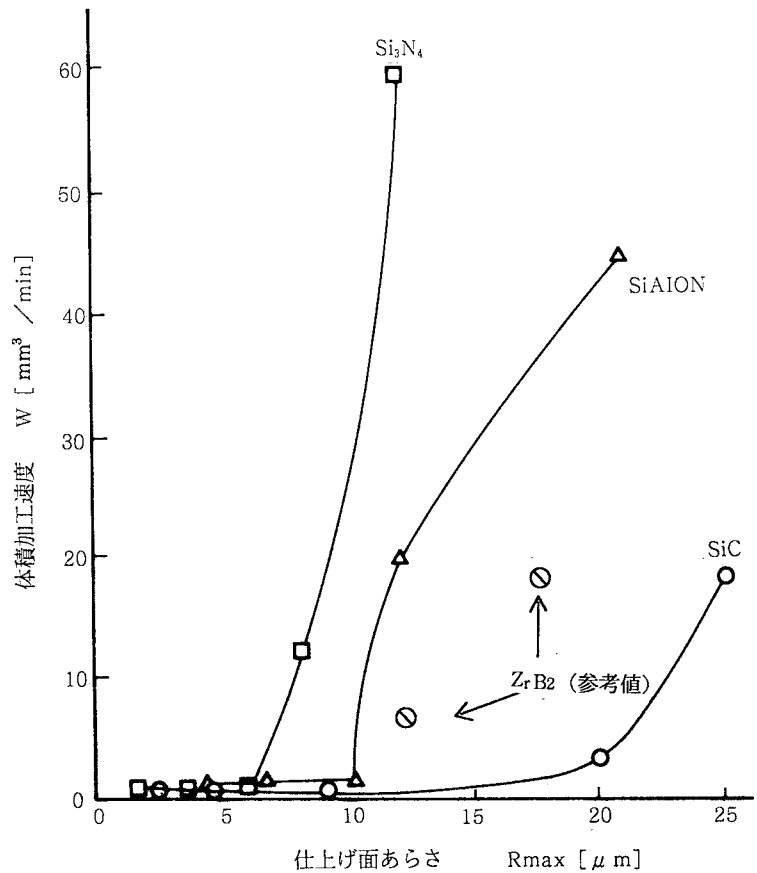


図48 仕上げ面あらさと体積加工速度

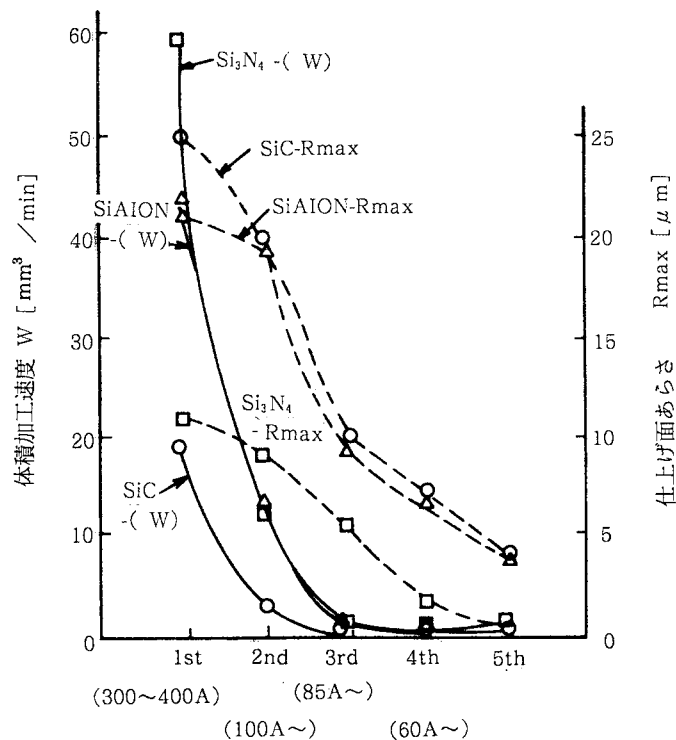


図49 体積加工速度と仕上げ面あらさ

図50から図53にホウ化物系のセラミックスの1つであるセラボレックスのセカンドカット面を示す。

2000倍

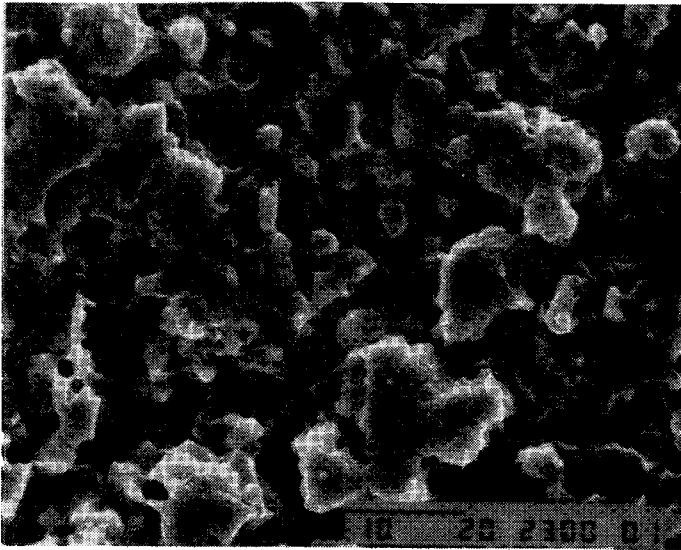


図50 1st-Cutの面 (8.9 μ mRmax)

2000倍

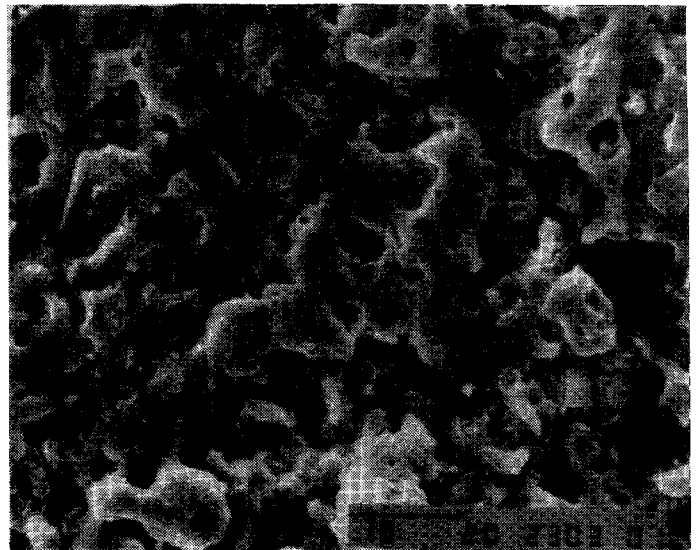


図51 2nd-Cutの面 (6.4 μ mRmax)

2000倍



図52 3rd-Cutの面 (3.7 μ mRmax)

2000倍

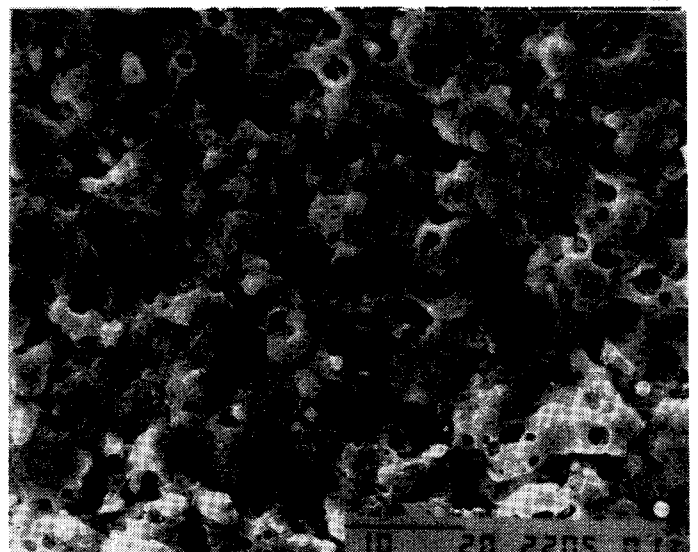


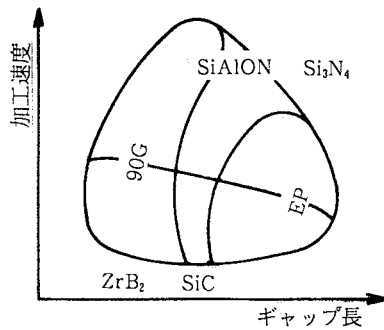
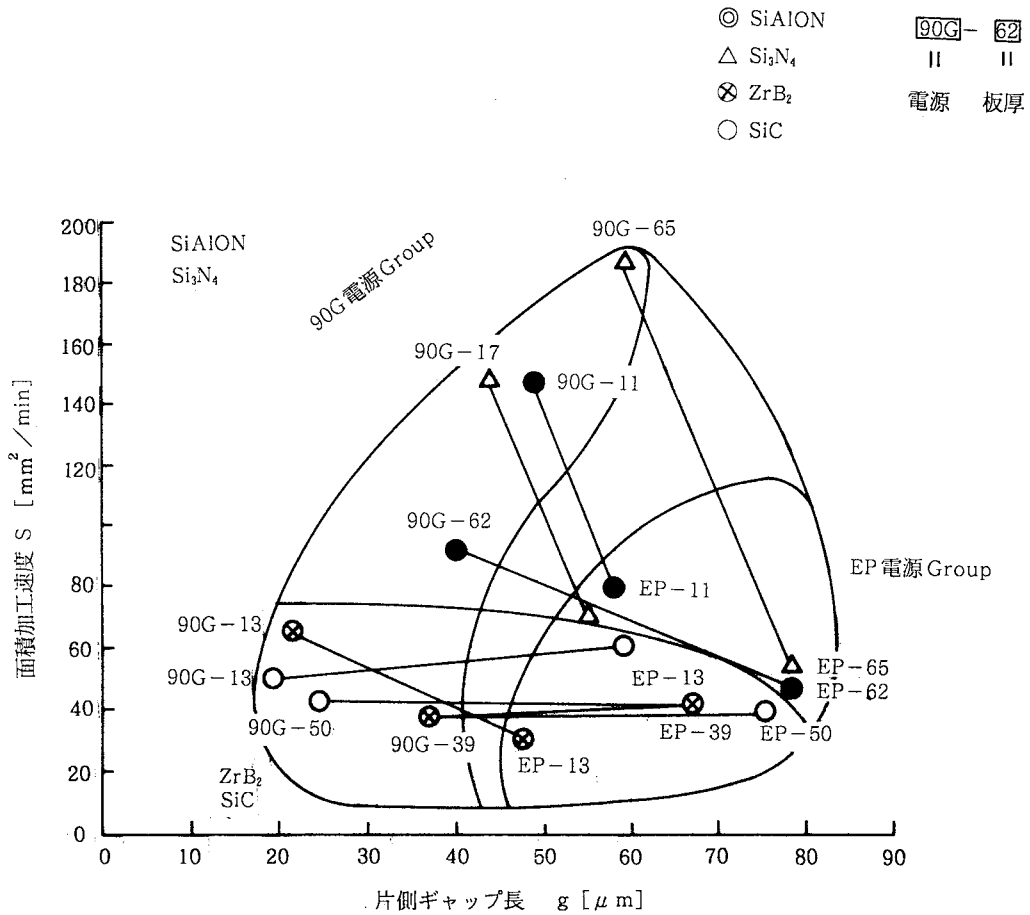
図53 4th-Cutの面 (3.3 μ mRmax)

7. 加工速度とギャップ長g

加工によって形成されるワイヤ寸法からの拡がり（放電ギャップ g [μm])は、加工後の寸法精度を支配するものであり、きわめて重要なファクターである。通常は、これが均一でさえあればよいとしているが、 g が小さい程、誤差も小さくなるわけであり、できるだけ小さく加工できる方がよい。

図54は、1stCutの最高速度における片側放電ギャップ g [(溝幅 - ワイヤ直径) / 2] と面積加工速

度との関係を求めたものである。図に見られるように、加工されやすい素材は、同一ギャップ長でも加工速度が大きく、加工されにくい素材は小さい。また、加工機械の性能の違いによって、2つのグループに分けられ、同一ギャップ長でも加工速度の大小があり、加工速度の大きい方が、加工性能が真の意味で良いということになる。



[注]

体積加工速度 $W = b \times S$ [mm³/min]
 b ; 溝幅 [mm], S ; 面積加工速度 [mm²/min]
 面積加工速度 $S = h \times F$ [mm²/min]
 h ; 板厚さ [mm], F ; 送り速度 [mm/min]

(5)
 図54 最高速度における片側放電ギャップ

8. 電気条件の一般的な選び方

ワイヤ放電加工における電圧波形および電流波形を図55に示す。図中の I_p 、 V_p 、OFFとは、ピーク電流値、印加電圧、休止時間である。これらの要因は、加工に対して、次のような影響を与える。

(1) ピーク電流値： I_p

ピーク電流が大きいほど、加工速度は速くなる。しかし、面あらかさが悪化し、ワイヤ切れも起こりやすくなる。

(2) 印加電圧： V_p

印加電圧が高いほど、加工速度は速くなる。しかし、加工が不安定になり、ワイヤが切れやすくなる。

(3) 休止時間：OFF

休止時間が長いほど、ワイヤ切れはなくなる。しかし加工速度は遅くなる。

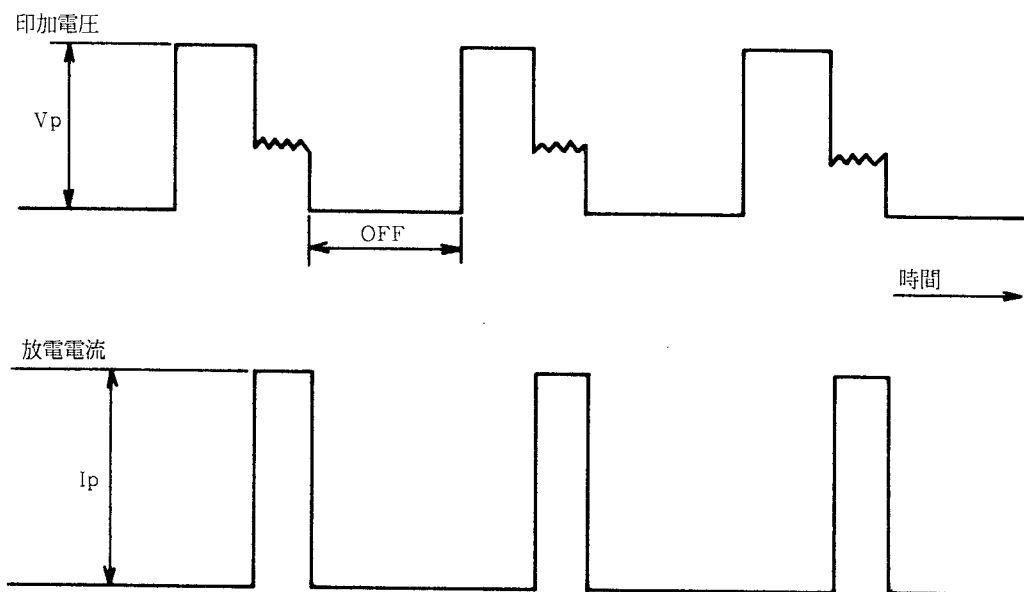


図55 電圧波形と電流波形

これら3つの要素の中で、加工に最も影響を与えるのがピーク電流値である。図56にピーク電流値と面あらかさの関係を、図57にピーク電流値をパラメータにした板厚と加工速度の関係を示す。ただし、ピーク電流値を加工セッティングというノッチで表すものとする。

また加工状態は、加工液のかかり方に大きく左右される。工作物、ワイヤ径が同一であっても、その状態に応じた電気条件を選ぶことにより、ワイヤ切れなく、加工速度を向上されることが出来る。その一例を図58に示す。次に図59にセラミックスの形状加工を行った例を示す。

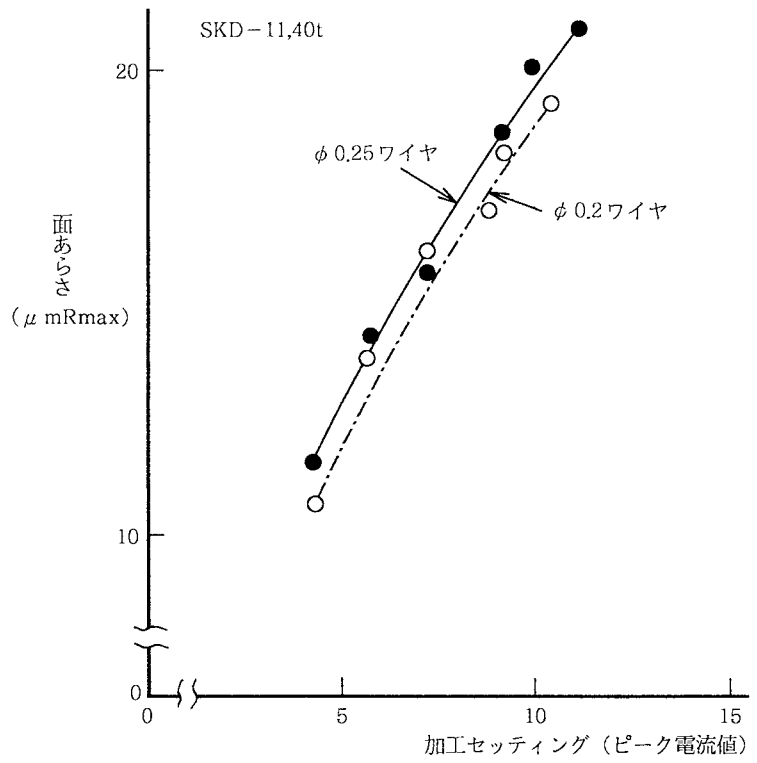


図56 ピーク電流値と面あらし

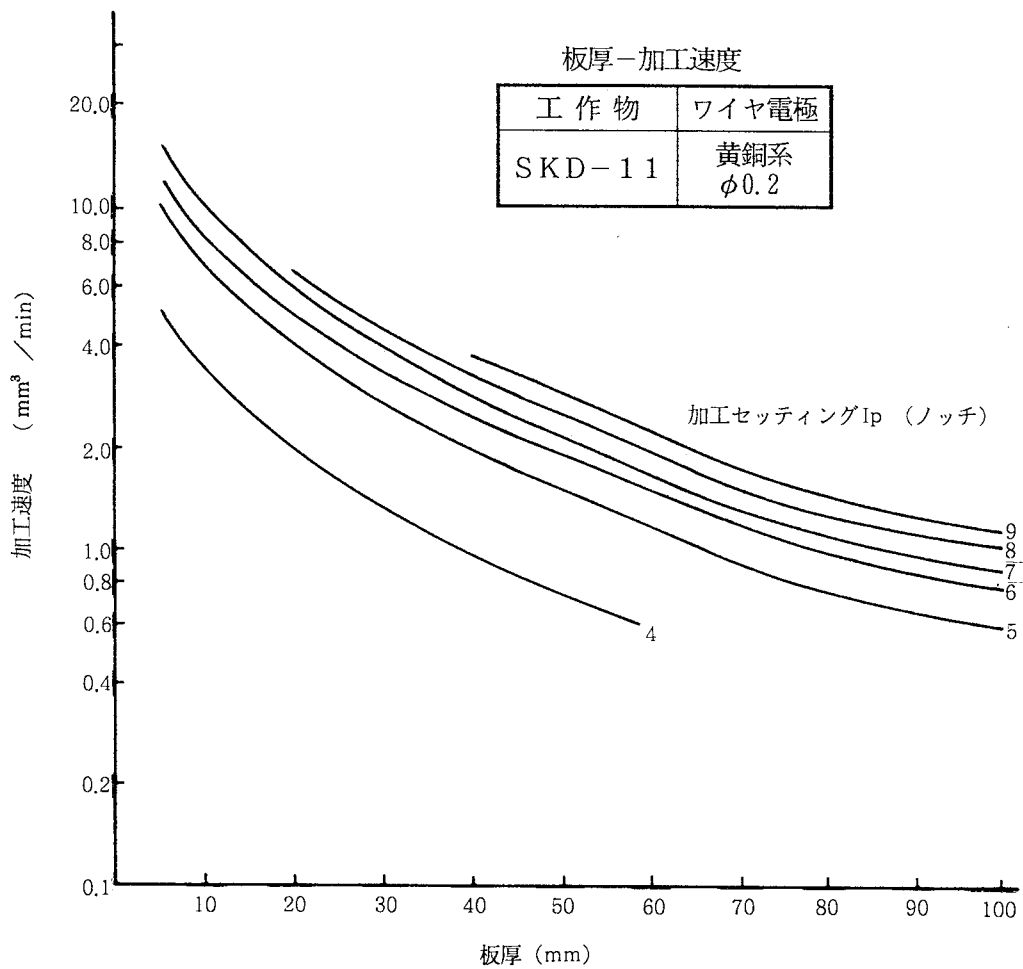
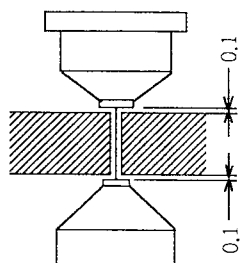


図57 ピーク電流値をパラメータにした板厚と加工速度の関係

(a) 最適状態

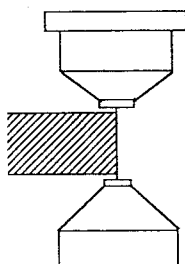


加工分類	1
EパックNo	124
電圧切換 V _o (ノッチ)	4
加工セッティング I _p (ノッチ)	10
休止時間 OFF (ノッチ)	8~9
安定回路A SA (ノッチ)	2
安定回路B SB (ノッチ)	5~6
ワイヤ速度 WS (ノッチ)	10
ワイヤ張力 WT (ノッチ)	8
プリテンション PT (ノッチ)	14
加工液流量 LQ (ノッチ)	2
加工液比抵抗 LR (ノッチ)	17
平均加工電圧 VG (V)	40~44
安定回路C SC (ノッチ)	1

(工作物 …… SKD-11
ワイヤ電極 …… 黄銅系φ0.2
板厚 …… 40mm)

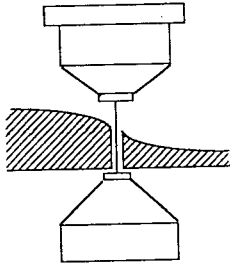
※最適状態に対して太枠内の条件がそれぞれ変更したノッチである。

(b) 助走加工

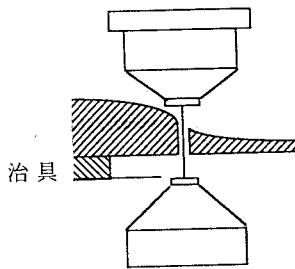


加工分類	30
EパックNo	129
電圧切換 V _o (ノッチ)	4
加工セッティング I _p (ノッチ)	5
休止時間 OFF (ノッチ)	14
安定回路A SA (ノッチ)	2
安定回路B SB (ノッチ)	16
ワイヤ速度 WS (ノッチ)	8
ワイヤ張力 WT (ノッチ)	7
プリテンション PT (ノッチ)	14
加工液流量 LQ (ノッチ)	2
加工液比抵抗 LR (ノッチ)	17
平均加工電圧 VG (V)	50
安定回路C SC (ノッチ)	1

(c) 段差加工1



(d) 段差加工2



(e) テーパー加工

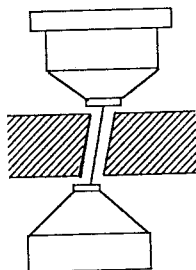


図58 加工液のかかり方と加工条件

加工分類	20
EパックNo	128
電圧切換 Vo (ノッチ)	4
加工セッティングIp (ノッチ)	9
休止時間 OFF (ノッチ)	8~9
安定回路A SA (ノッチ)	2
安定回路B SB (ノッチ)	9~10
ワイヤ速度 WS (ノッチ)	10
ワイヤ張力 WT (ノッチ)	8
プリテンション PT (ノッチ)	14
加工液流量 LQ (ノッチ)	2
加工液比抵抗 LR (ノッチ)	17
平均加工電圧 VG (V)	45~49
安定回路C SC (ノッチ)	1

加工セッティングIp (ノッチ)	7
休止時間 OFF (ノッチ)	8~9
安定回路A SA (ノッチ)	2
安定回路B SB (ノッチ)	9~10
ワイヤ速度 WS (ノッチ)	10
ワイヤ張力 WT (ノッチ)	8
プリテンション PT (ノッチ)	14
加工液流量 LQ (ノッチ)	2
加工液比抵抗 LR (ノッチ)	17
平均加工電圧 VG (V)	45~49

加工分類	10
EパックNo	127
電圧切換 Vo (ノッチ)	4
加工セッティングIp (ノッチ)	9
休止時間 OFF (ノッチ)	8~9
安定回路A SA (ノッチ)	2
安定回路B SB (ノッチ)	9~10
ワイヤ速度 WS (ノッチ)	10
ワイヤ張力 WT (ノッチ)	7
プリテンション PT (ノッチ)	14
加工液流量 LQ (ノッチ)	2
加工液比抵抗 LR (ノッチ)	17
平均加工電圧 VG (V)	45~49
安定回路C SC (ノッチ)	1

加工形状

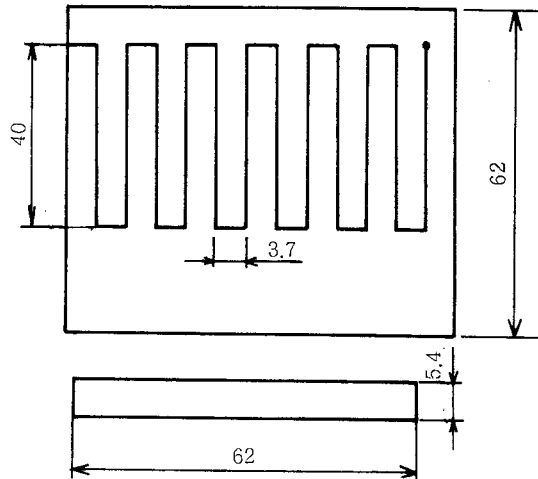


図59

表9 加工条件

品名(周長)		試験片加工(約524mm)				
工作物 材質/板厚		SiALON/5.4t				
テーパ角度		-				
ワイヤ	径(φ)	0.2				
	材質	DZ				
加工回数		1st	2nd	3rd	4th	5th
電圧切換	Vo	3	3	3	7	16
加工セッティング	IP	5	4	3	2	-
休止時間	OFF	12	16	16	5	-
安定回路	A SA	2	2	-	-	-
	B SB	16	16	-	-	-
	C SC	1	1	1	1	-
仕上げ回路	FS	1	1	1	1	3
ワイヤ	速度 WS	14	14	14	14	14
	張力 WT	8	8	11	11	11
プリテンション	PT	14	14	14	14	14
加工液	流量 LQ	1	1	1	1	1
	比抵抗 LR	7	7	7	7	7
平均加工電圧(V)	VG	50	55	45	45	-
加工速度(mm/分)		3.5	12.0	10.0	13.0	10.0(定速)
寄せ量(mm)		-	0.065	0.015	0.020	0.020
加工面あらさ(μmRmax)						3.5~4.5
加工時間(時間:分)						
合計加工時間					5時間0分	

9. 加工変質層およびその修復

ワイヤ放電加工による加工面は、加工液として脱イオン水を用いている関係上、油中放電加工によるものとはかなり異なったものとなる。SKD-11を加工した場合の両者の比較を示した例を図60に示す。この図から明らかのように、油中放電加工による面が溶融再凝固層で母材に比べて極めて硬度の高い値（Hv 900～1000）を示しているのに比べ、ワイヤ放電加工によるものでは、かえって母材よりも低い値を示していることがわかる。

また、超硬合金の加工において、通常の電気条件（加工液比抵抗 $1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ ）では表面層の異常軟化層を生じ、母材硬度よりも約10%程度低下する。これを解決するには加工液の比抵抗を $1 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ まで高めなければならない。

このような加工面の変質層はセカンドカットを行うことにより、除去することができ、その層は加工面あらし程度になる。

さてセラミックスについてであるが、加工面に同様な溶融再凝固層を生成する。ただし超硬のような異常軟化層が生じないという利点はある。そしてこの溶融再凝固層は母材に比べ、軟化するが、この場合もセカンドカットを実施することにより除去され、加工面あらしを約 $3 \mu\text{mRmax}$ に仕上げた段階で、平滑な素地面が出始める。（図61に示す。）

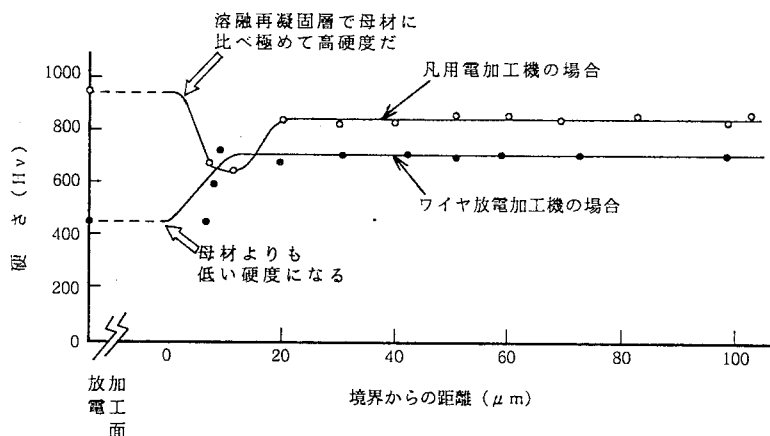


図60 電圧波形と電流波形

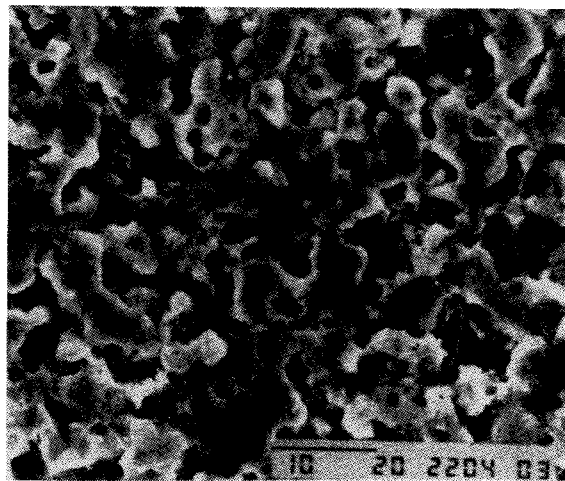


図61 セラミックスの加工表面
($3 \mu\text{mRmax}$)

10. 加工データ表のまとめ方

ワイヤ放電加工において、加工条件の選択は最も重要な仕事となる。加工速度、寸法、面あらかさはすべてこの加工条件で決まり、本加工前にテスト加工が必要となる。

表10のようなデータシートを作ると便利である。電気条件、オフセット量、面あらかさ、および加工結果に対するコメントを記入する。そして、この結果をもとにさらにテスト加工を行い、目標とする面あらかさ、寸法に対して適切な加工条件を決定し、本加工を行う。

次に、テスト加工から本加工までのすべてのデータを残し、材質（セラミックスの種類）、板厚、ワイヤ径、面あらかさの各項目ごとに整理する。その結果、すべての加工は、ノウハウとして蓄積され、テスト加工という段階を省略することができる。

表10 データシート

客先名								
加工者名	加工日付							
加工機種	70H	90H	110H	200H	90PH	SK		
工 作 物	板厚 (mm)	ワイヤ電極	特殊治具					
加工回数	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th	7 th	8 th
E パ ッ ク								
電 圧 切 換								
VO (ノッチ)								
加工セッティング								
IP (ノッチ)								
休 止 時 間								
OFF (ノッチ)								
安 定 回 路 A								
SA (ノッチ)								
安 定 回 路 B								
SB (ノッチ)								
ワ イ ヤ 速 度								
WS (ノッチ)								
ワ イ ヤ 張 力								
WT (ノッチ)								
プ リ テ ン シ ョ ン								
PT (ノッチ)								
加 工 液 流 量								
LQ (ノッチ)								
加 工 液 比 抵 抗								
LR (ノッチ)								
設 定 加 工 電 圧								
VG (V)								
平 均 加 工 電 圧								
V (V)								
安 定 回 路 C								
SC (ノッチ)								
仕 上 回 路								
FS (ノッチ)								
設 定 加 工 速 度								
FA (mm/min)								
実 加 工 速 度								
FC (mm/min)								
オ フ セ ッ ト 値								
(μ m)								
加 工 面 あ ら さ								
(μ m _{max})								

単位mm					
寸法測定結果	上	X	Y1	Y2	誤差
	中				
	下				
	上下寸法差				
誤差					

加工面あらかさ測定結果	加工結果コメント

資料 1. ワイヤ放電加工機の主な仕様

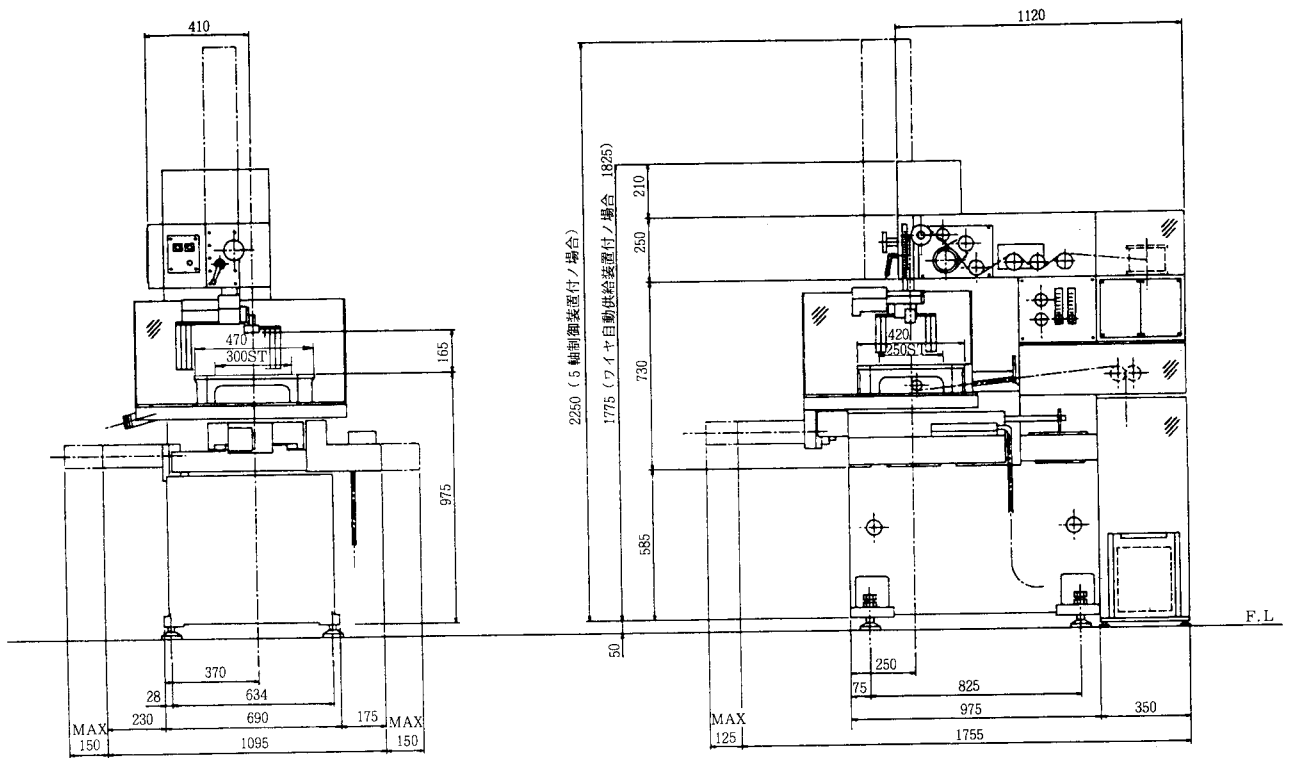


図 62 ワイヤ放電加工機外形図

仕様項目	DWC70H
最大工作物寸法 [mm] (参考、巾×奥行×高さ)	350×400×160
工作物最大重量 [kg]	175
テーブル寸法 [mm]	420×510
加工範囲 (X-Y) [mm]	250×300
テーブル早送り速度 [mm/min]	800
使用ワイヤ径 φ [mm]	0.05~0.33
最高ワイヤ送り速度 [mm/sec]	250
ワイヤ張力 [g]	200~2500
外形寸法 [mm] (巾×奥行×高さ)	1755×1095×1775
機械本体重量 [kg]	1100

加工液タンク容量 [ℓ]	260
ろ過精度 [μ]	3
フィルタエレメント	カートリッジ式紙フィルタ
純水器	イオン交換樹脂 (5ℓ)
加工液比抵抗制御 [Ωcm]	(0.5~100)×10 ⁴
外形寸法 (巾×奥行×高さ) [mm]	900×820×1125
重量 (乾燥時) [kg]	200

表 12 加工液供給装置

資料 2. 点検表

表 13 日常点検 (始業点検)

点検者 _____ 年 月 日

項 目		内 容 及 び 処 置	チェック
機 械	テーブル潤滑油	注油、油量チェック	
	Z軸スライダ潤滑油	注油	
	上・下セラミック絶縁板	清掃	
	ワイヤ断リミットSW機能	リミットSW動作確認	
	上・下部ノズル	キズ、破損の確認	
	ワイヤ垂直度計	コネクタ部清掃、キズ、破損の確認	
	下部ローラ	前・後・左・右のブレ、スムーズな回転	
電源	冷却ファン	吸・排気確認	
N C	テープリーダー	清掃	
タンク	加工液	水量確認 (減量時は補給する)	
タイプ	テープリーダー	清掃	

表 14 1週間点検

項 目		内 容 及 び 処 置	チェック
機 械	給電ダイス	ワイヤとダイスの接触位置を変える (給電ダイス部でワイヤ切れが多発又は加工速度が上昇不可の時、新品交換)	
	人工芝	清掃	
機 械	下部ノズルギャップ	下部ノズルとワークとのギャップ 0.05mm 程度確認	
	ワイヤ回収ローラ	キズ、破損の確認	
タンク	フィルタ	新品交換	

表 15 1カ月点検

項 目		内 容 及 び 処 置	チェック
機 械	ダイヤモンドダイス	清掃	
電 源	エア・フィルタ	清掃	
N C	冷却ファン	清掃	
タ ン ク	イオン交換樹脂	警告ランプ確認 (不良時には新品交換、又この時フィルタも同時に交換)	
	比抵抗センサ	清掃	
	タンク内	水交換又は清掃	
タイプ	N C テープのケバダチ	ケバダチが出る場合、パンチブロック交換	

表 16 6ヶ月点検

項 目		内 容 及 び 処 置	チェック
機 械	テーパ加工装置	グリスアップ	
	XY駆動ギヤボックス	グリスアップ	
	テーブルボールネジ	グリスアップ	
N C	バッテリーハンドラ	端子部清掃 注油	
タンク	ラジエタ・ファン	清掃	
	ろ過ポンプストレーナ	清掃	
タンク	プリンタリボン	新品交換	

表 12ヶ月点検

項 目		内 容 及 び 処 置	チェック
機 械	モータブラシ	清掃又は新品交換	
	Z軸支持ロープ	グリスアップ	

資料 3. 給油

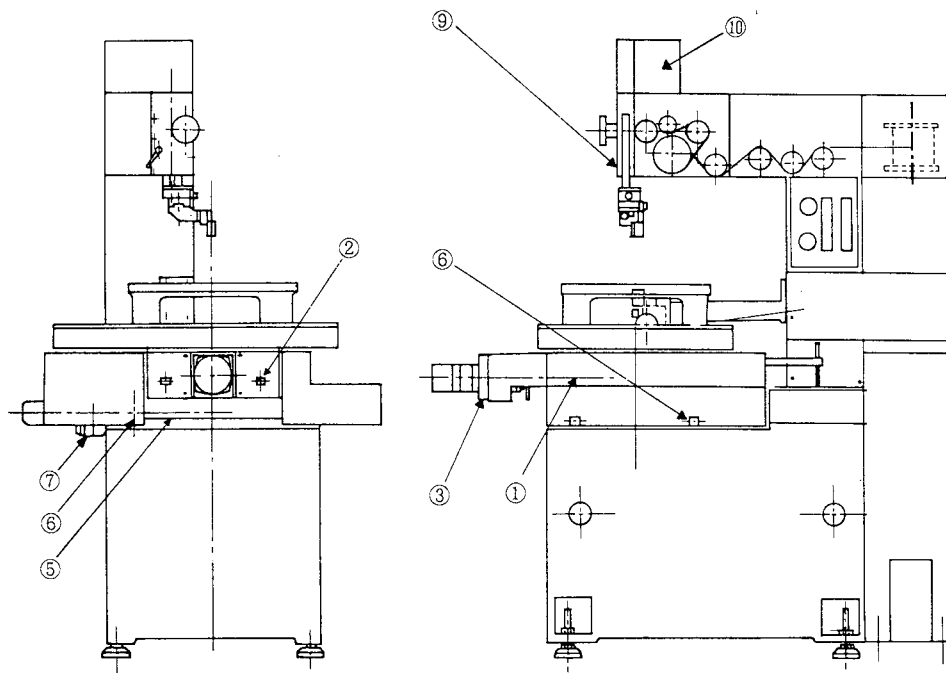


図63 給油箇所

表17 給油法

番号	給油箇所	タンク容量 (ℓ)	使用油名	油量点検周期	更油周期	備考
1	X 軸 ボールネジ		グリース	毎月	1年	
2	X軸クロスローラ (2本)		〃	毎月	1年	
3	X 軸 ギャボックス		〃	毎月	6 カ月	
5	Y 軸 ボールネジ		〃	毎月	1年	
6	Y軸クロスローラ (2本)		〃	毎月	1年	
7	Y 軸 ギャボックス		〃	毎月	6 ヶ月	
9	Z 軸ガイドスライダ		摺動面用潤滑油	毎日	毎日	
10	Z 軸支持ロープ		グリース	毎月	1年	

資料 4. CRT 設定表示装置

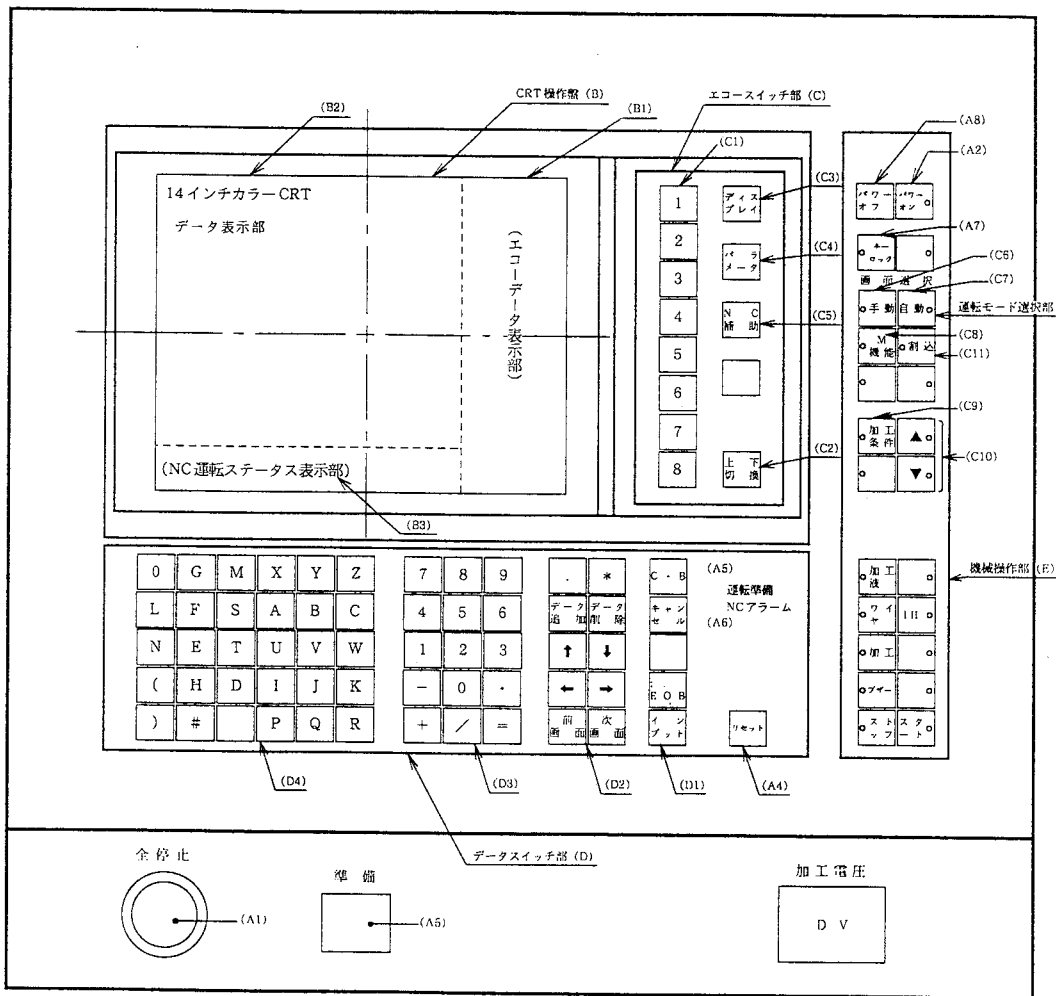


図 64 CRT 設定表示装置



(A) 制御部基本操作部

- | | |
|----------------|---|
| (A 1): 全停止 | 電源制御装置の電源以外はすべて「切」 |
| (A 2): パワーオン | 電源制御装置の電源を「入」 |
| (A 3): パワーオフ | 電源制御装置の電源を「切」 |
| (A 4): リセット | 電源制御装置をリセットする。 |
| (A 5): 準備 | 電源制御装置を運転可能状態にする。 |
| (A 6): NC アラーム | 電源制御装置にアラームが発生した時、点灯する。 |
| (A 7): キーロック | CRT 設定表示装置の全停止 (A1) パワーオフ (A3) キーロック (A7) 準備 (A5) のスイッチ類以外の全てのキーをロックする。 |

(B) CRT表示部

- (B 1) : エコーデータ表示部 各種機能を動作させるためのメニューを表示する。
- (B 2) : データ表示部 現在位置表示、加工モニタ、プログラム編集等に使用する。
- (B 3) : ステータス表示部 電源制御装置の現在動作中のステータスを表示する。

(C) エコースイッチ部

- (C 1) : メニュー選択スイッチ エコーデータ表示部 (B1) に示されるメニューを1~8の番号対応で選択するキー
- (C 2) : 上下切換 エコーデータ表示部 (B1) に示されるメニューは上下段に分れて最大16まで表示されるが、これをメニュー選択スイッチ (C1) に8コずつに分けて対応させるキー
- (C 3) : ディスプレイ エコーデータ表示部 (B1) にデータ表示部 (B2) に表示する画面の選択メニューを表示させるキー
- (C 4) : パラメータ エコーデータ表示部 (B1) にNCプログラム関係のパラメータのメニューを表示させるキー
- (C 5) : NC補助 エコーデータ表示部 (B1) に機械を動作させる時の状態設定するパラメータのメニューを表示させるキー
- (C 6) : 手動 エコーデータ表示部 (B1) に手動モードの動作のメニューを表示させるキー
- (C 7) : 自動 エコーデータ表示部 (B1) に自動モード運転のメニューを表示させるキー
- (C 8) : M機能 エコーデータ表示部 (B1) にM機能のメニューを表示させるキー
- (C 9) : 加工条件 エコーデータ表示部 (B1) に加工電気条件のメニューを表示させるキー
- (C10) :   加工電気条件 (C9) によって (B1) に表示された電気条件を変化させるためのキー
- (C11) : 割込 加工中にデータの参照および変更を行うための割込画面を選択するキー

(D) データスイッチ部

- (D 1) : 編集およびデータ入力 編集およびデータ入力に使用する。
- (D 2) : データおよび編集 画面やカーソルの制御を行う時に使用する。
- (D 3) : 編集用数字および記号 画面に数字や記号データを設定する時に使用する。
- (D 4) : 編集用アドレスおよび記号 画面にアドレス・記号データを設定する時に使用する。

(E) 機械操作部

機械の制御を直接キーによって行う場合に使用する。

資料 5. 加工条件の設定画面

「加工条件」スイッチを押すことにより、図65に示すメニューがエコーデータ表示部に表示される。このメニューにより設定可能な項目について以下に説明する。










		〈加工条件設定〉			
データ表示部	1	V _o  ()	1	加工 条件	○
		LQ  ()			
	2	I _p  ()	2		
		LR  ()			
	3	OFF ()	3		
		VG ()			
	4	SA  ()	4		
		SC ()			
	5	SB  ()	5		
		FS ()			
	6	WS  ()	6		
		SD ()			
	7	WT  ()	7		
NC運転ステータス表示部	8	PT  ()	8	上下 切 換	
		E OFFLINE			

図65

- ① 設定したい加工条件をエコースイッチ (1 ~ 8) で選択する (必要であれば上下切換スイッチを用いて上下段を切替える。)
- ② ▼ ▲ スイッチによって現在出力中の値を増加または減少させる。

〔上段〕

1 $V_o \sim$ (**)

電圧切換 …………… 無負荷時の極間の電圧の高さを選定するためのスイッチで、ノッチは1～16の16段階あり、番号が大きいくほど電圧は高くなる。板厚が厚いほど大きなノッチを必要するが、あまり大きなノッチで加工すると不安定となり、ワイヤ切れ等を起こしやすくなる。

2 $I_p \square\square$ (**)

加工セッティング …………… 極間に流れるピーク電流の大きさを選定するためのスイッチで、ノッチは1～16の16段階あり、4～16まではファーストカット用、1～3まではセカンドカット用。ノッチの番号が大きいくほど、大きな電流が流れるので、それにしたがって加工速度は速くなるが、反面、面あらし、クリアランス等が大きくなる。また、あまり大きな加工セッティングを設定すると、ワイヤ切れを起こすので、加工物、ワイヤの種類に応じた設定を必要とする。

3 OFF (**)

休止時間 …………… 放電が終了してから再び電圧を抑制するまでの時間を選定するためのスイッチ。ノッチは、1～16段階あり、小さくするほど休止時間は短くなり、それにしたがって加工速度は速くなる。しかし加工が不安定になり、ワイヤ切れや短絡の原因となる。

4 $SA \curvearrowright$ (*)


安定回路 A …………… 加工をより安定なものにするためのスイッチで、1～6までの6つのノッチがある。番号を大きくするほど加工速度は速くなり短絡が減少し、加工は安定するが、大きすぎるとワイヤ切れが続出するので注意する。主にワイヤ径に応じて選択し径が小さくなるほど、ノッチを小さくする必要がある。


5 $SB \curvearrowright$ (**)

安定回路 B …………… Aの場合と同様に加工を安定させるためのスイッチで、1～16までのノッチがある。番号が大きくなるほど加工速度は遅くなるが、工作物の材質を考慮して選択する。休止時間のノッチと同様な効果を持つ。


6 $WS \rightarrow$ (**)


ワイヤ速度 …………… ワイヤ送り速度を調節するためのスイッチで、1～16までのノッチがある。番号が大きくなるほどワイヤ送り速度は速くなる。

7  (**)
 ワイヤ張力 …………… ワイヤ張力(メンテナンス)を調節するためのスイッチで、1~16
 (メンテナンス) …………… までのノッチがある。番号が大きくなるほど張力は強くなる。

8  (**)
 ワイヤ張力 …………… ワイヤ張力(プリテンション)を調節するためのスイッチで1~16ま
 (プリテンション) …………… でのノッチがある。番号が大きくなるほど張力は強くなる。主に細線
 使用の時使用する。

[下段]

1  (*)
 加工液量 …………… 加工液量を調節するためのスイッチで1~2のノッチがあり、1で弱、2
 …………… で強となる。

2  (**)
 水質 …………… 加工液比抵抗を調節するためのスイッチで~20のノッチがあり、番号
 …………… が大きいほど比抵抗は小さくなる。

3 VG (***)
 平均加工電圧 …………… 最適送りで加工する場合の目標値となる平均加工電圧を設定するた
 …………… めのスイッチで1~150 (V) の範囲。

4 SC (*)
 安定回路C …………… 仕上げ回路用の加工を安定させるためのスイッチで1~4までの3つの
 …………… ノッチがある。

5 FS (*)
 ファインサーフィス …… 超仕上げ加工に使用する (オプション)。

6 SD (*)
 安定回路D …………… (粗加工時1、仕上加工時2を選択する)で仕上げ加工をさらにこまか
 …………… くできます。

7 未使用

8 E OFFLINE …………… 一度押すと `E ONLINE` (背景色赤色)と変化して、NCプログラ
 …………… ム上で指令された加工条件指令が有効となる。再度押すと `E
 …………… OFFLINE` (背景色黒色)となりNCプログラム上で指令された加工
 …………… 条件指令 (E指令)が無視される。

資料 6. アドレスコード一覧表

表 18

アドレス	単 位	最大値	略 記	備 考	少数値 有 効	データ 絶対値
A	0.0001° または 1"	600000	A +54	テーパ角度指定、ユーザマクロ	○	
B				ユーザマクロ	○	
C				ユーザマクロ	○	
D						
E	整 数		E 4	電気加工条件 指定数値以外プログラムエラー		○
F	0.001 mm /分 0.0001 inch /分	9999999	F 53	加工速度指令他	○	○
G	整 数		G 3	準備機能 指定数値以外プログラムエラー		○
H	"		H 4			○
I	0.001 mm 0.0001 inch		I +53	円弧 X 軸補助軸	○	
J	"	±99999999	J +53	円弧 Y 軸補助軸	○	
K	0.0001°	±1800000	K +53	座標回転角度	○	
L	整 数	9999	L 4	プログラム番号 (L 番号)		○
M	"		M 2	補助機能 指定数値以外プログラムエラー		○
N	"	9999	N 4	シーケンス番号		○
P	"	30000	P 5	メモリサイクル繰返し回数	○	○
Q	0.001mm または 0.0001 inch	99999999	Q 53	テーパ Z 5 面円弧半径	○	
R	"	±99999999	R +53	R 指定円弧半径	○	
S	0.001 倍	99999999	S 53	加工倍率	○	○
T				使用禁止アドレス		
X	0.001 mm 0.0001 inch	±99999999	X +53	移動座標値	○	
Y	"	"	Y +53	"	○	
U		"	U +53	"	○	
V		"	V +53	"	○	
Z	"	"	Z +53	テーパパラメータ、移動座標軸	○	

資料 7. 準備機能 (G 機能) 一覧表

表 19

Gコード	グループ	機能	Gコード	グループ	機能
G 0 0	A	位置決め	G 8 8	B	コーナRモード
G 0 1	A*	直接補間	G 8 9	B	交点計算モード
G 0 2	A	円弧補間CW/ヘリカル補間CW/R指定円弧補間CW	G 9 0	H	絶対値指令
G 0 3	A	円弧補間CCW/ヘリカル補間CCW/R指定円弧補間CCW	G 9 1	H*	相対値指令
G 0 4	※1	ドウェル	G 9 2	※2	原点プリセット
G 1 4	※1	現在値読み	G 9 3	I	—
G 1 5	※1	プリントアウト	G 9 4	I	—
G 1 7	※3	—	G 9 5	I	—
G 2 2	D	サブプログラム呼出し/図形回転/ユーザマクロ	G 9 6	I	—
G 2 3	D	サブプログラム復帰/図形回転/ユーザマクロ	G 9 7	※1	XY軸交換
G 2 5	※2	—	G 1 0 1	J	$a = b$
G 2 7	※1	原点照合	G 1 0 2	J	$a = b + c$
G 2 8	※1	自動原点復帰	G 1 0 3	J	$a = b - c$
G 2 9	※1	自動端面位置決め	G 1 0 4	J	$a = b * c$
G 3 0	※1	自動中心位置決め	G 1 0 5	J	$a = b / c$
G 3 2	※1	—	G 1 0 6	J	$a = \sqrt{b^2 - c^2}$
G 3 9	※3	—	G 1 0 7	J	$a = b * \sin c$
G 4 0	E*	ワイヤ径補正キャンセル	G 1 0 8	J	$a = b * \cos c$
G 4 1	E	ワイヤ径補正 (左)	G 1 0 9	J	$a = \tan^{-1} b / c$
G 4 2	E	ワイヤ径補正 (右)	G 1 1 0	J	$a = \sqrt{b^2 - c^2}$
G 4 3	※1	プログラムワイヤ径補正正量設定	G 2 0 0	J	無条件分岐
G 4 4	※1	プログラムワイヤ径補正正量転送	G 2 0 1	J	零条件分岐
G 4 6	※3	マイクロジョイント機能	G 2 0 2	J	負条件分岐
G 4 8	※1	メモリ式自動原点 (第2、第3、第4) 原点復帰	G 2 0 3	J	ビットテスト
G 6 0	※1	ドグ式原点復帰			
G 6 2	※1	G指令ミラーイメージ			
G 6 9	※3	円弧終点エラーチェック解除			
G 7 0	G	インチ指令			
G 7 1	G*	メトリック指令			
G 8 7	※3	上下同一R			

- (注) 1. 電源投入時、M02、M30およびM00 (リセット選択時) 実行後の各グループの初期状態は、準備機能一覧表の各グループにおいて * 印の G 機能となる。ただし、G70/G71およびG90/G91はパラメータにより選択可能。
2. * 印を除く各グループは各々モードであり、一度指令すると、同一グループの他の G コードが指令されるまで有効。
各モードグループは、リセットにより * 印のモードとなる。ただし、G22、G23、の D グループは W7 リセットにより解除される。
3. ※印の G コードはモードでなく、指令されたブロックでのみ有効。
4. 同一ブロック内における G コードの指令順序は任意ですが、同一モードグループのものを 2 個以上指令すると、後から読み込まれた指令が有効となる。
5. モードでない G コードのうち、G04、G27、G28、G48、G60、G92、G97 が同一ブロックに 2 個以上指令すると、後から読み込まれた指令が有効となる。

資料 8. 補助機能 (M機能) 一覧表

表 20

Mコード	名 称	機 能
M 0 0	プログラムストップ	自動運転の停止
M 0 1	オプションナルストップ	オプションナルスイッチ入の時のみM00と同じ
M 0 2	プログラムエンド	自動運転終了及びリセット
M 0 3	電極回転入	イニシャルホール用電極を回転させる
M 0 5	“ 切	“ “ 停止させる
M 2 0	ワイヤ挿入	SK装置でワイヤを挿入する
M 2 1	“ 切断	SK装置でワイヤを切断する
M 2 2	テスト挿入	SK装置でパイプガイドを下げて上げる
M 2 3	定位置戻し	SK装置でパイプガイドを定位置にセットしなおす
M 3 0	プログラムエンド	自動運転終了及びリワインド及びリセット
M 4 6	スタート穴補正1	ダイ加工 補正量分逆移動
M 4 7	スタート穴補正2	ダイ加工 補正量分移動 (補正プロット時補正量記憶)
M 4 8	スタート穴補正3	ポンチ加工 補正量分移動
M 4 9	スタート穴補正4	ポンチ加工 補正プロット時補正量記憶
M 6 0	外部信号出力1入	電源制御装置外部出力端子1がON
M 6 1	外部信号出力1切	“ OFF
M 6 2	外部信号出力2入	電源制御装置外部出力端子2がON
M 6 3	外部信号出力2切	“ OFF
M 6 4	外部信号出力3入	電源制御装置外部出力端子3がON
M 6 5	外部信号出力3切	“ OFF
M 6 6	外部信号出力4入	電源制御装置外部出力端子4がON
M 6 7	外部信号出力4切	“ OFF
M 6 8	外部信号出力5入	電源制御装置外部出力端子5がON
M 6 9	外部信号出力5切	“ OFF
M 7 0	イニシャルホールモード入	イニシャルホールモード入
M 7 1	“ 切	“ 切
M 7 4	液準備入	加工液準備入
M 7 5	液準備切	“ 切
M 7 6	液循環入	加工液循環入
M 7 7	液循環切	“ 切
M 7 8	急速充満	急速に加工液を充満させる
M 8 0	加工液入	加工液を出す
M 8 1	“ 切	“ 止める
M 8 2	ワイヤ入	ワイヤ送りを始める
M 8 3	“ 切	“ をやめる
M 8 4	加工入	加工電源をONにする
M 8 5	“ 切	“ OFFにする
M 8 8	加工液弱	加工液量を弱にする
M 8 9	“ 強	“ を強にする
M 9 0	最適送り入	最適送り制御開始
M 9 1	最適送り切	最適送り制御停止
M 9 3	全停止	準備切
M 9 5	加工条件自動切換 入	加工条件自動切換を入にする
M 9 6	“ 切	“ 切にする

〈参 考 文 献〉

- (1) 谷口紀男；“超精密加工の動向” 日本能率協会及び日本工作機械工業会主催、
’80工作機械関連機器技術者会議
- (2) 斎藤長男；“図解 放電加工のしくみと100%活用法” (株)技術評論社
- (3) 斎藤長男；“ワイヤカット放電加工技術” 日刊工業新聞社
- (4) 万波和夫；“セラボレックスの放電加工特性 旭硝子(株)
- (5) 斎藤長男；ファインセラミックスの特殊加工の展望
- (6) 三菱電機ワイヤ放電加工機Hシリーズ取扱説明書
- (7) 尾崎好雄 鈴木俊雄 導電性セラミックスにおける放電加工特性 電気加工学会報告
- (8) 斎藤長男；セラミックス導電性材料に対する放電加工 精機学会講演（昭62.秋）