

NCワイヤカット放電加工に関する考察

—ワイヤ電極の許容加工時間およびブ レス抜き型シャープエッジ部の加工—

技術第2部開発技術課 吉田三郎, 三輪政司

まえがき

NCワイヤカット放電加工は、うなぎ登りの勢いで、著しい普及を示しているようである。特に、加工機のもつ適用域の広さは、金型の加工にとどまらず、さまざまなユーザのニーズに答えている。また、加工性能向上のための改良も積極的に行われ、よみみがかれた魅力が普及に拍車をかけているようでもある。

加工はNCで、そしてNCテープの作成は自動プログラミングで行われ、担当作業者の機械や電気の高さや、作業の熟練度は重要視されない。この点もまた加工機導入の安易さでもあり、加工機メーカーのセールスのキャッチフレーズでさえもある。

それには、加工作業全般に関して作業者がなんの抵抗もなく取り組むことができ、かつ、自主性の高い作業判断ができる体制に完備されている必要があろう。

その意味では、加工機の出現からの歴史が浅く、幾多の点で不足した項目があり、いうなれば、「使いやすい」加工機としての完備さには欠けている点を、まだまだ持っているといえるのではないだろうか。

本報では、こうした点にかんがみ、NCワイヤカット放電加工の活用性向上を目的として、その一端となる

- ・ワイヤ電極の累積許容加工時間
- ・プレス抜き型シャープエッジ部の加工限界域

の二つの項目について考察し、その結果を報告するものである。

1 ワイヤ電極の累積許容加工時間に関する考察

1.1 ワイヤ電極における問題点

ワイヤカット放電加工に用いられるワイヤ電極は、放電により消耗するが、連続した加工を継続させるために無限の長さをもつ新しいワイヤ電極を順々に供給することによって、この消耗を無視している。

しかし、加工機の物理的構造上、あるいは経済的活用の設計上、ワイヤ電極は、ある有限な長さに納めたリールに巻かれている。写真1はワイヤ電極、写真2は加工機〔ジャパックス特製 L250A 第30号機〕のワイヤ電極走行系を示す。

1巻のワイヤ電極をセットして、幾つかの加工を累積

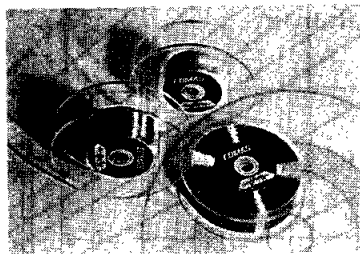


写真1 ワイヤ電極

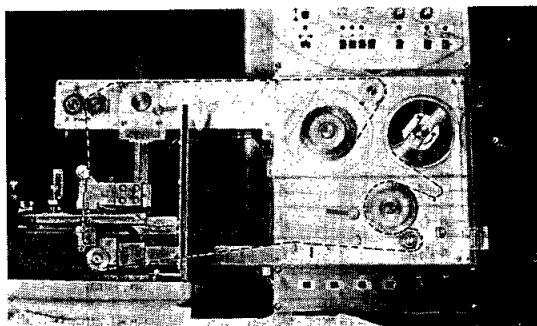


写真2 ワイヤ電極走行系

していけば、中途まで使用したワイヤ電極を用いて加工が行われる場合、その加工途上で供給ワイヤ電極が残り少なくなったり、なくなってしまって当惑することがしばしば起こり得る。加工途上でワイヤ電極がなくなれば、新たに代わりの新しいワイヤ電極リールと取り替える必要があるが、このときワイヤ電極の接続が困難である。特に、深夜など作業者が加工機から離れて、無人で自動運転中にワイヤ電極がなくなった場合、加工が中断し、発見が遅れ、加工時間のロスになる。また、これらの結果は加工精度を維持するにも、決して好ましい条件とはいえず、逆に精度を落とす原因になるとともに、工程の面からは予定の狂いや変更を生じることになる。

この悪影響をさけるために、ワイヤ電極量の許容加工時間がワイヤ電極を一見してわかればなら困ることはない。

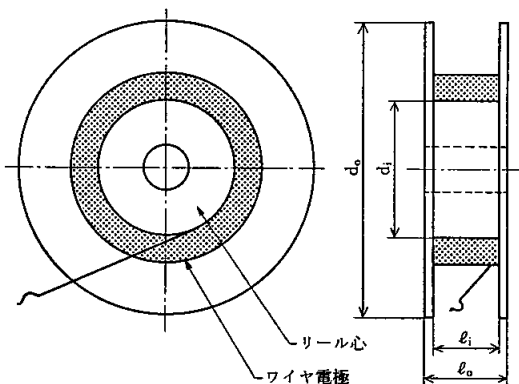
すなわち、ワイヤ電極量がどの程度の許容加工時間を有しているかわかれば、この問題を解決できる。そこで、ワイヤ電極の送り速度とワイヤ電極量の関係から許容加工時間を求める方法について検討した。

1.2 ワイヤ電極の長さ

ワイヤ電極の累積許容加工時間を求めるのに対象としたワイヤ電極は、イーデーエム周辺機器販売㈱製で、その仕様は図1に示す。

ワイヤ電極リール1巻の長さは重量に比例し、かつ一様に同一径なので体積に比例する。

今、図2のごとくワイヤ電極リールの断面を考え、体積関数を求めれば、ワイヤ電極体積 $D_a(\text{mm}^3)$ は、 $r_{\min} \leq r_a \leq r_{\max}$ において、



リール外径	d_o	$\phi 130\text{mm}$
リール心径	d_i	$\phi 60\text{mm}$
リール内幅	l_i	28.3mm
リール外幅	l_o	36.1mm

(イーデーエム周辺機器販売(株)製、ワイヤ電極径 $\phi 0.2\text{mm}$)

図1 ワイヤ電極リールの仕様

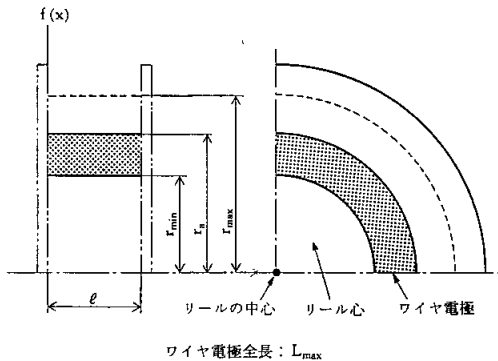


図2 ワイヤ電極のリール格納状態における諸寸法

$$D_a = \pi \int_0^L r_a^2 d\ell - \pi \int_0^L r_{\min}^2 d\ell \dots \dots \dots (1)$$

$$D_a = \pi (r_a^2 - r_{\min}^2) \cdot \ell \dots \dots \dots (2)$$

となる。

したがって、このときのワイヤ電極長さ $L(\text{mm})$ は、ワイヤ電極最大径におけるワイヤ電極長さを L_{\max} 、ワイヤ電極体積を D_{\max} とすれば、

$$L = \frac{D_a}{D_{\max}} \cdot L_{\max} \dots \dots \dots (3)$$

となる。

1.3 ワイヤ電極供給速度と供給速度タップの関係

ワイヤ電極の供給速度は、一般に放電による消耗で線径が細くなって断線することのないように供給されるように設定される。そして、経済的観点からも供給速度は必要最低速度におさえるのが望ましい。

したがって、薄物加工のごとくワイヤ電極消耗の少ない加工には遅い供給速度に選ばれ、厚物加工のごとくワイヤ電極の消耗の多い加工には速い供給速度に選ばれる。

実用上、この供給速度は写真3に示すつまみによりリニアに変化させることができ、例えば、使用ワイヤ電極 $\phi 0.2\text{mm Cu}$ の被加工物 SKD11 については、板厚の変化に対して図3に示すワイヤ電極供給速度を用いている。

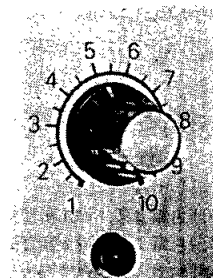


写真3 供給速度調節つまみ

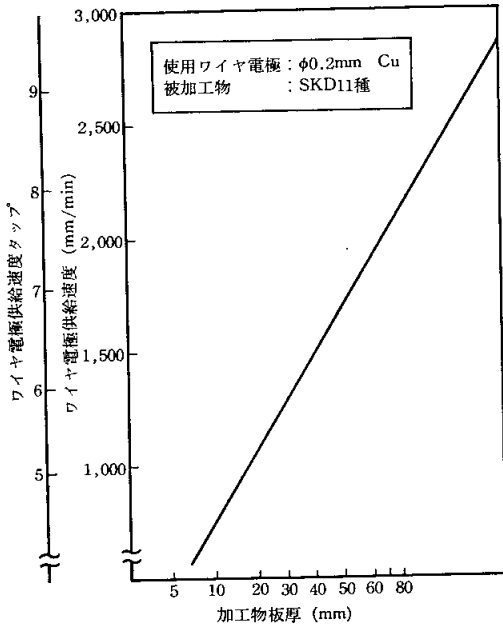


図3 加工物板厚とワイヤ電極供給装置の関係

また、このワイヤ電極供給速度の読み取りとして、1～10の供給速度タップを付しており(図3縦軸左側)、両者の関係は、ワイヤ電極供給速度をV(mm/min)、供給速度タップレンジをtとすれば、

$$V = 437.5(t-4) + 500 \dots\dots\dots(4)$$

$$t = \frac{V-500}{437.5} + 4 \dots\dots\dots(4')$$

となっている。

1.4 ワイヤ電極量の供給速度タップに対する許容加工時間

任意に選定された供給速度に対するワイヤ電極量の許容加工時間は、上述算出式をもとに得ることができるが、実用的には、任意なワイヤ電極量および供給速度タップに対してワイヤ電極量の許容加工時間が得られることが望ましい。

そこで、許容加工時間 T(min) は、

$$T = \frac{L}{V} \dots\dots\dots(5)$$

で求まるから、

$$L = T \cdot V \dots\dots\dots(5')$$

を得る。

ここで、任意ワイヤ電極量 r_a (mm) とワイヤ電極供給速度の関係は、式(3)を式(5)'に代入して、

$$\frac{D_a}{D_{max}} \cdot L_{max} = T \cdot V \dots\dots\dots(6)$$

より、

$$D_a = \frac{D_{max} \cdot T \cdot V}{L_{max}} \dots\dots\dots(7)$$

であるから、式(2)(4)を式(7)に順次代入すれば、

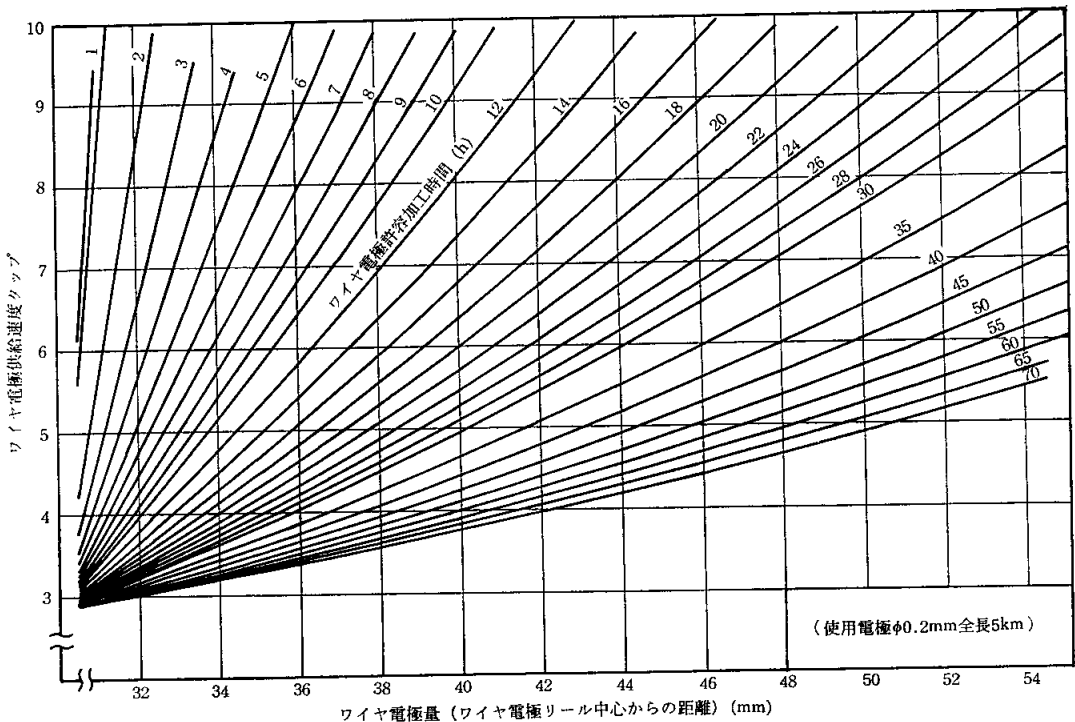


図4 ワイヤ電極の許容加工時間図

$$\pi(r_a^2 - r_{min}^2)\ell = \frac{D_{max} \cdot T \cdot V}{L_{max}}$$

$$r_a = \sqrt{r_{min}^2 + \frac{D_{max} \cdot T \cdot [437.5(t-4) + 500]}{\pi \cdot \ell \cdot L_{max}}}$$

.....(8)

となる。

図2において、 $r_{min}=30\text{mm}$ 、 $r_{max}=55\text{mm}$ 、 $\ell=28.3\text{mm}$ 、 $L_{max}=5 \times 10^6\text{mm}$ とすれば、

$$r_a = \sqrt{30^2 + \frac{2125 \times (437.5t - 1250)T}{5 \times 10^6}}$$

.....(9)

を得る。式(9)を用いて、ワイヤ電極およびワイヤ電極供給速度タップから許容加工時間を求めたのが図4である。

この図から、ワイヤ電極量と供給速度タップがわかれば、ワイヤ電極量の許容加工時間を得ることができる。

1.5 許容加工時間の直読方式の検討

さらに、より端的にワイヤ電極量から各供給速度タップに対する許容加工時間を得るために、ワイヤ電極リールもしくはワイヤ電極リール格納ケースなど、関係箇所

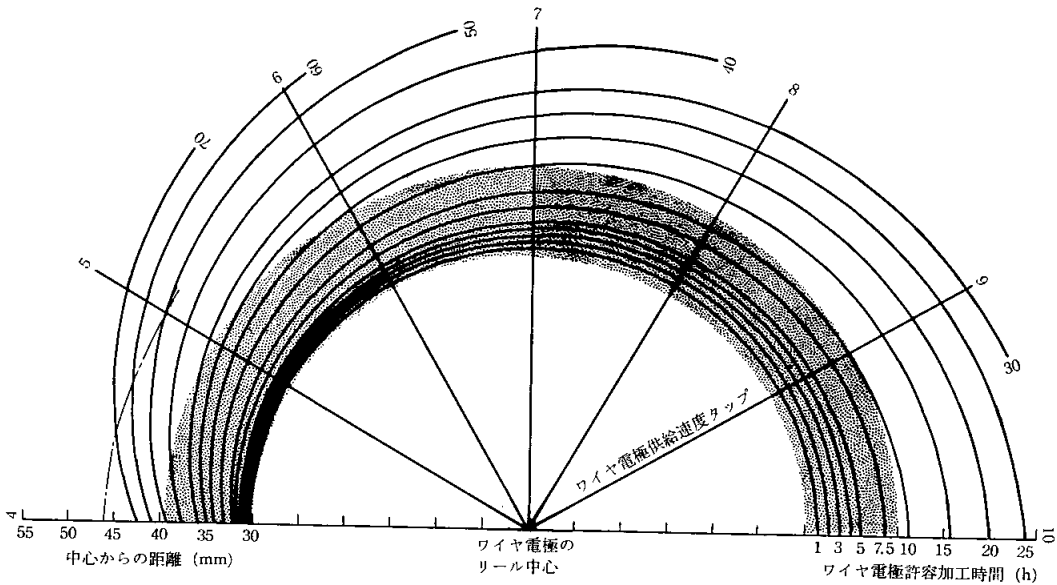


図5 ワイヤ電極の許容加工時間図 (ワイヤ電極量が40mmある状態)

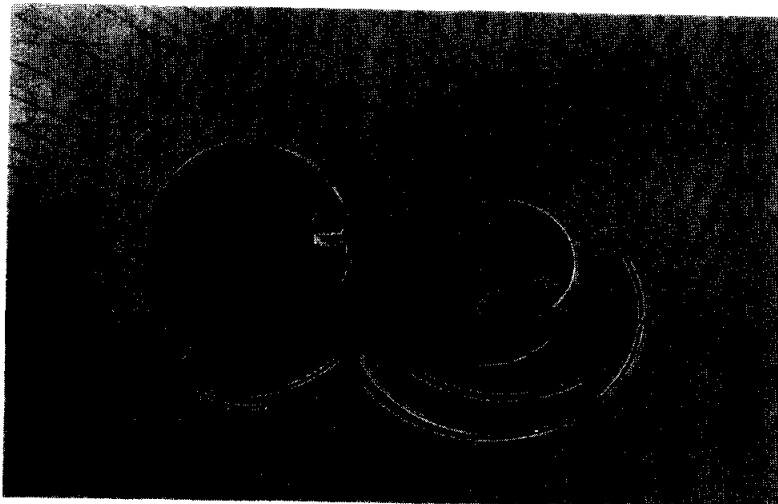


写真4 ワイヤ電極の許容加工時間直読スケールを付したワイヤ電極リール

で直読できる方法をとるべく検討した。

すなわち、許容加工時間を得るためのわずらわしさを排除するため、供給速度タップレンジにおける許容加工時間に要するワイヤ電極量を求めるという観点から、ワイヤ電極リール側面に、供給速度タップレンジおよび、許容加工時間を示すラインを付した。

図5にその様式の一例を示すが、供給速度タップ軸は4～10の7本とし、各軸は30°間隔で分割し、また、許容加工時間を示すラインは1～70時間とした。この図により、例えば、ワイヤ電極量が40mmある場合を想定すれば、供給速度タップ5でワイヤ電極を供給すれば、29.5時間以内の許容加工時間を、また供給速度タップ7でワイヤ電極を供給すれば、15時間以内の許容加工時間を有していることがわかる。一方、供給速度タップ5において50時間の加工を行おうとするならば、このときワイヤ電極量は46mm以上なければならないことを示している。

1.6 まとめ

以上の方法で作成したワイヤ電極の許容加工時間直読スケールを、ワイヤ電極リールに付した状態を写真4に示す。この方法により、ワイヤ電極量と使用する供給速度タップを知れば、許容加工時間を得ることができ、ワイヤ電極供給量の十分さ、不十分さを判読できる。

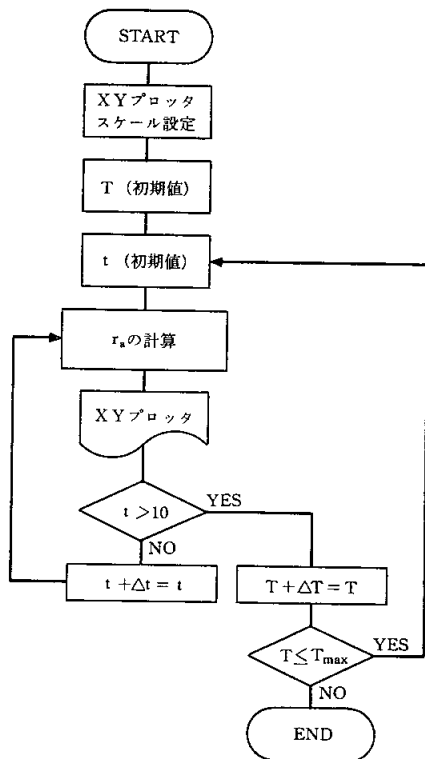


図6 フローチャート

ワイヤ電極リールへの目盛の付け方は、リール形状の大小や幅の広さにより異なってくるであろうが、スケールの目盛の算出法には、データの蓄積による実績から求める経験的な方法や、上述の理論的方法により容易に行うことができる。(特許申請中)

なお、本法の計算処理はNCテープ作成用自動プログラミング装置 (JAPT 2) を活用して行った。計算処理フローチャートは図6に示す。

2 シャープエッジ部を有する プレス抜き型部品の加工に 関する考察

2.1 プレス抜き型部品のシャープエッジ部加工

プレス抜き型による二次加工製品にシャープエッジ部を必要とする場合は多々存在する。図7はシャープエッジ部を有する製品例であるが、このような場合、プレス抜き型のパンチ、ダイなど各部品は、この抜き製品形状を呈している必要があり、シャープエッジ部の加工をも

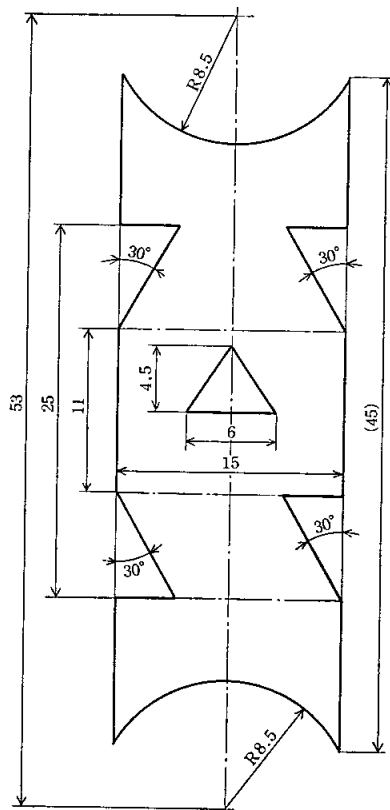


図7 シャープエッジを有する製品例

要求される。

プレス抜き型部品の抜き型形状をワイヤカット放電加工で行えば、マクロ的な見地からは各部品のシャープエッジ部の加工を無難に処理しているかのように見える。特におうシャープエッジ形状は、他の機械加工では不可能な見方が一般的であり、必然その加工はワイヤカット放電加工など特殊な加工法の適用を必要とする。ここでは、シャープエッジ部加工について、プレス抜き型部品のクリアランスとのかねあいの点から考察した。

2.2 シャープエッジ角

2.2.1 シャープエッジ角の構成状態

シャープエッジ部は、図面上2本の線分で構成されるシャープエッジ角をなしている。その構成状態は線分の種類によりいろいろ考えられようが、ここでは図8に示す、

(A) 直線—直線



(A) 直線—直線 (B) 直線—円弧 (C) 円弧—円弧

図8 シャープエッジの構成3態

(B) 直線—円弧

(C) 円弧—円弧

で構成されるシャープエッジ角について検討した。

(A)については、単純に2本の直線で構成される角度であり、この角度の読み取りは容易である。(B)(C)については構成シャープエッジ角の読み取り方法は次のように考え得る。

2.2.2 直線—円弧によるシャープエッジ角

直線と円弧で構成されるシャープエッジ角は図9のような場合であり、直線 \overline{ab} と半径 r なる中心 o の円弧に

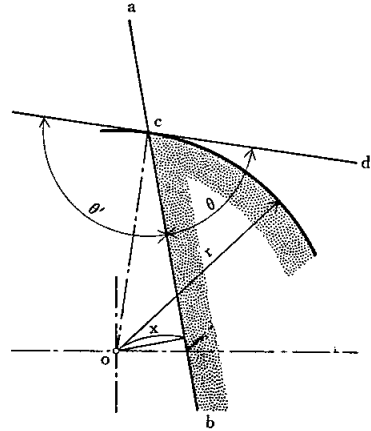


図9 直線—円弧によるシャープエッジ角の解析

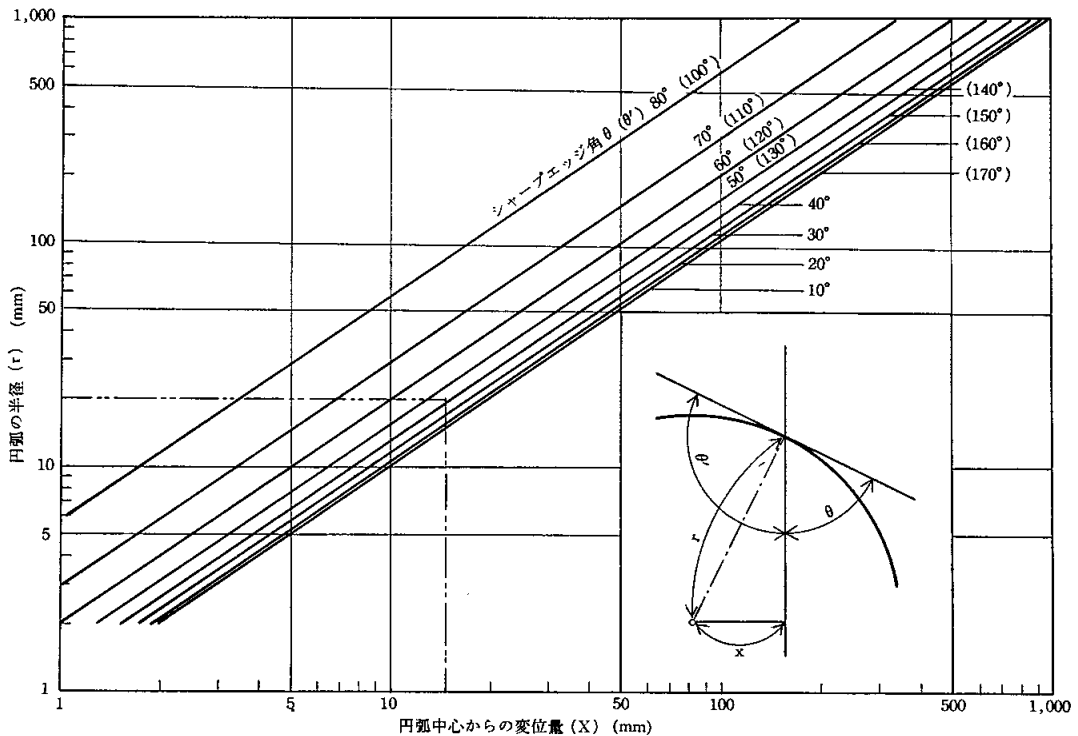
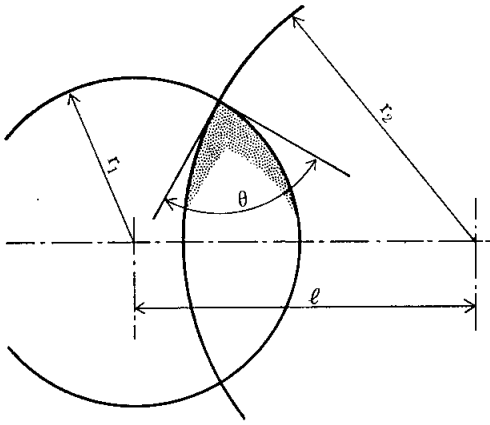


図10 直線—円弧がなすシャープエッジ角



より、点cにおける円弧接線を \overline{cd} とすれば、シャープエッジ角 θ は、ほぼ $\angle bcd$ をなしているといえる。

直線 \overline{ab} の円弧中心oからの距離を x とすれば、シャープエッジ角 θ, θ' は、

$$\theta = \cos^{-1} \frac{x}{r} \dots\dots\dots(10)$$

$$\theta' = 180^\circ - \theta \dots\dots\dots(11)$$

で表わされる。

式(10)(11)によって得られる関係を図10に示す。この図から変数 x, r の値に対するシャープエッジ角を読み取ることができる。例えば、 $x=15\text{ mm}$ 、 $r=200\text{ mm}$ とすれば、シャープエッジ角 $\theta=41^\circ$ 、 $\theta'=139^\circ$ （正確には $\theta=41.4^\circ$ 、 $\theta'=138.6^\circ$ ）となる。

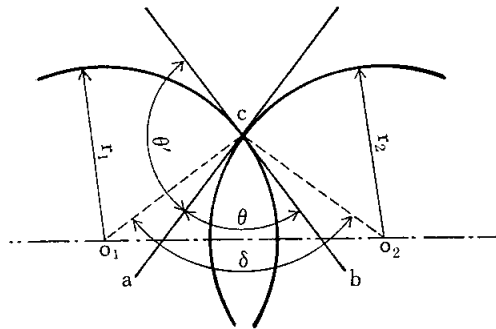


図11 円弧-円弧によるシャープエッジ角の解析

2.2.3 円弧-円弧によるシャープエッジ角

二つの円弧で構成されるシャープエッジ角は図11のような場合であり、二つの円弧半径を r_1, r_2 、中心間距離を l として、シャープエッジ角 θ, θ' を求めた。

まず、図12は、 $r_1=1$ に対する r_2 および l の長さ比を示すグラフである。

シャープエッジ角は、二つの円弧の交点における2接線が構成する角と考えられるから、この角度を求めればよい。図11によれば、構成角 θ, θ' は $\angle o_1cb = \angle o_2ca$ より、 $\angle o_1ca = \angle o_2cb$ となるから、

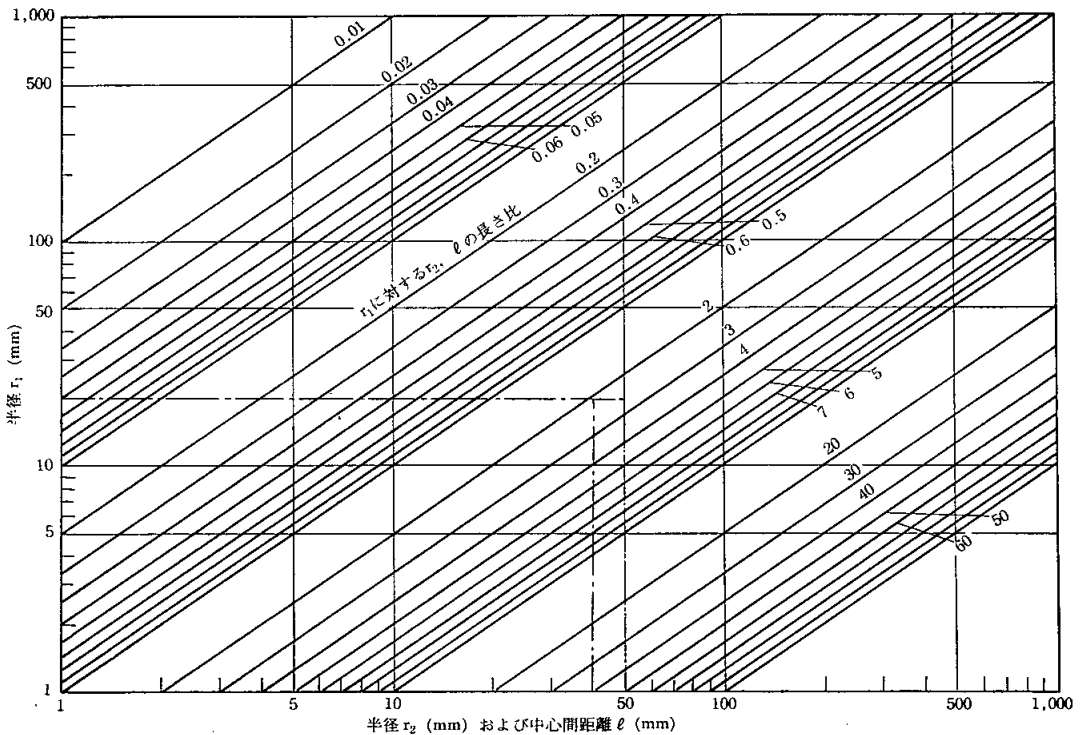


図12 長さ比読取り図

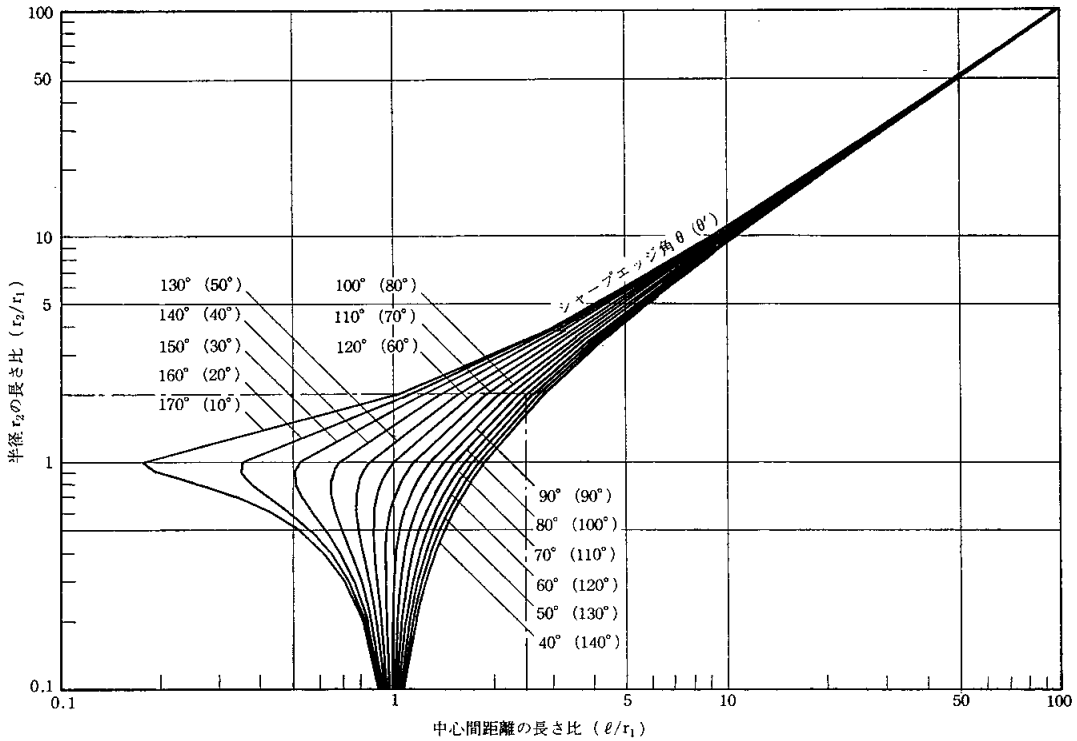


図13 円弧-円弧がなすシャープエッジ角

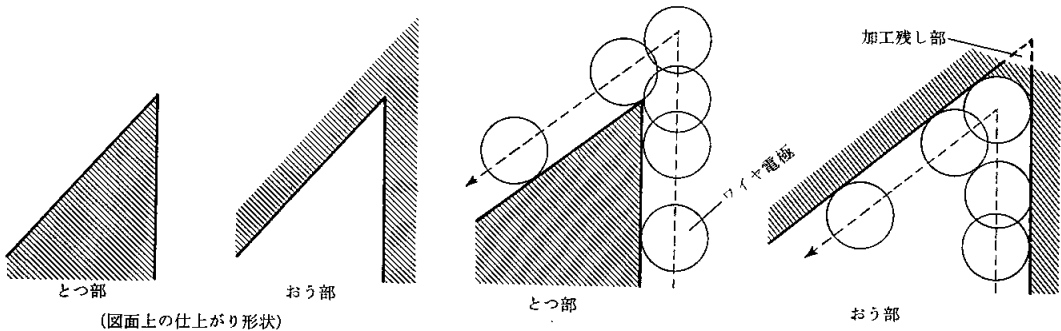


図14 シャープエッジ部のプレス抜き型部品加工状態

$$\theta = \angle O_1CO_2 - 2(\angle O_1CA \text{ or } \angle O_2CB) \dots\dots\dots(12)$$

$$\theta' = 180 - \theta \dots\dots\dots(13)$$

となる。

$$\text{ここで、} \\ (\angle O_1CA \text{ or } \angle O_2CB) = 90 - \theta \dots\dots\dots(14)$$

また、 $\triangle O_1CO_2$ において $\angle O_1CO_2 = \delta$ とすれば、

$$\delta = \cos^{-1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - \ell^2}{2r_1r_2} \right) \dots\dots\dots(15)$$

したがって、式(12)(13)は、

$$\theta = 180 - \cos^{-1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - \ell^2}{2r_1r_2} \right) \dots\dots\dots(16)$$

$$\theta' = \cos^{-1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - \ell^2}{2r_1r_2} \right) \dots\dots\dots(17)$$

となる。

ゆえに、図12で得られた r_2 , ℓ の長さ比をもとに、シャープエッジ角を求めることができる。図13にこのシャープエッジ角を求めるグラフを示す。

ちなみに、 $r_1 = 20\text{mm}$, $r_2 = 40\text{mm}$, $\ell = 50\text{mm}$ の場合を考えれば、図12より、 $r_2/r_1 = 2$, $\ell/r_1 = 2.5$ であるから、この値を図13にとれば、 $\theta = 70^\circ$, $\theta' = 110^\circ$ (正確には $\theta = 71.8^\circ$, $\theta' = 108.2^\circ$) を得る。

2.3 ワイヤカット放電加工によるシャープエッジ部加工の問題点

シャープエッジ部を有するプレス抜き型部品の図面上の仕上がり形状は、パンチ、ダイのどちらかがとつシャ

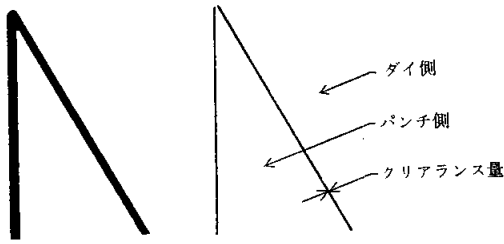


図15 パンチ、ダイのシャープエッジ部加工のクリアランスの状態

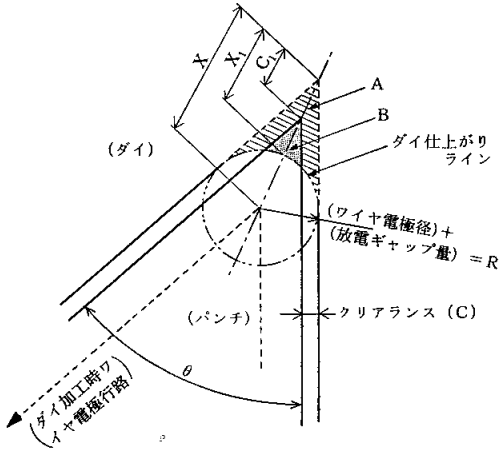


図16 シャープエッジ部加工の解析

ープエッジであり、他方がおうシャープエッジとなる。

この両者についてワイヤカット放電加工による加工結果は、使用するワイヤ電極の形状に依ることとなり、図14のような仕上がり状態を見せる。とつ部については、シャープエッジの見事な仕上がりを見せるが、おう部については、ワイヤ電極径（厳密にはワイヤ電極半径と放電ギャップ量の和）のRが付くことになり、図面上の仕上がり形状を得ることは物理的に不可能になる。すなわち、図14に示す加工残し部が生じており、この面積部分を加工するには、ワイヤ電極形状をこの形状に做わせるか、あるいは極細径ワイヤ電極を用いて、極力加工残し部面積を少なくするなどして、仕上げる方法を用いなければならない。

2.4 プレス抜き型部品シャープエッジ部の加工とクリアランス量との関係

現実のワイヤカット放電加工によるシャープエッジ部の加工では、とつ部はシャープエッジが立っていても、おう部には加工残し部が生じることがわかるが、この加工状態では、プレス抜き型部品のクリアランス量との関係で、図15に示すごとく、部品間が物理的に干渉することがある。つまり、図16に示すように、とつシャープエッジがパンチに付いているプレス抜き型の状態を考えれば、おうシャープエッジなるダイに加工残し部Aが存在

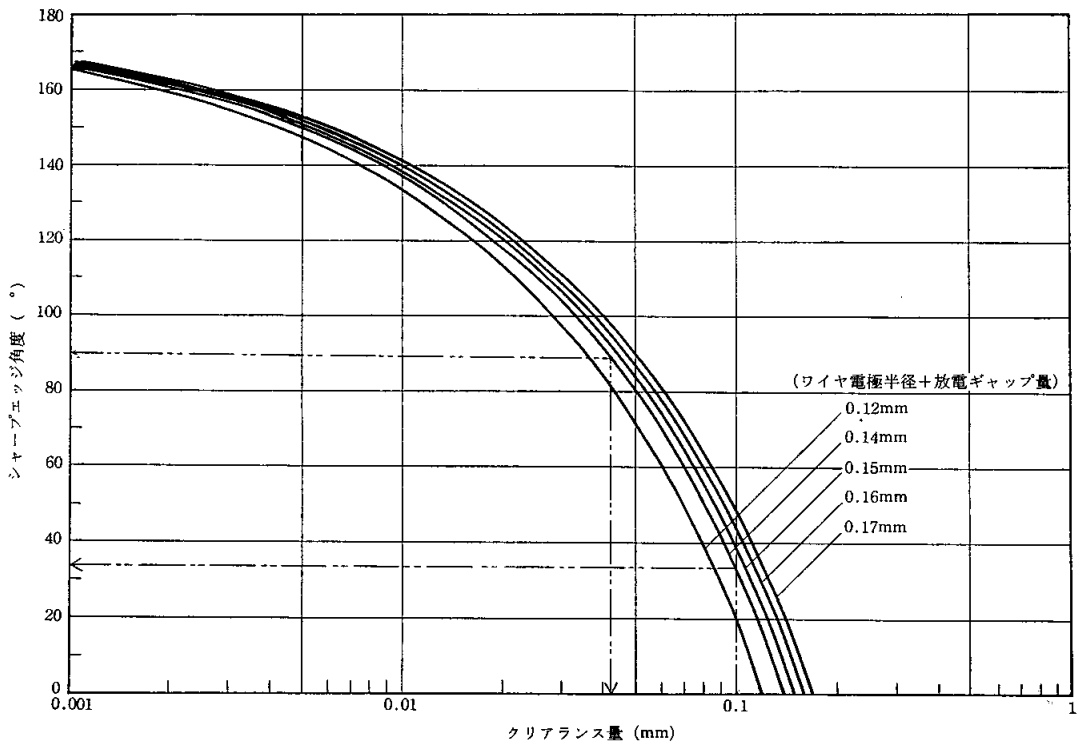


図17 シャープエッジ限界干渉角度

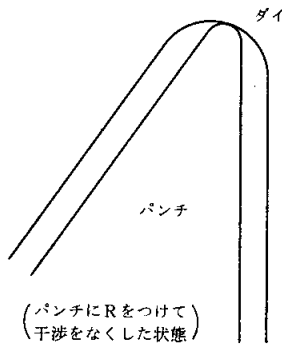


図18 シャープエッジとつ部にRを付して干渉を避ける場合の解析図

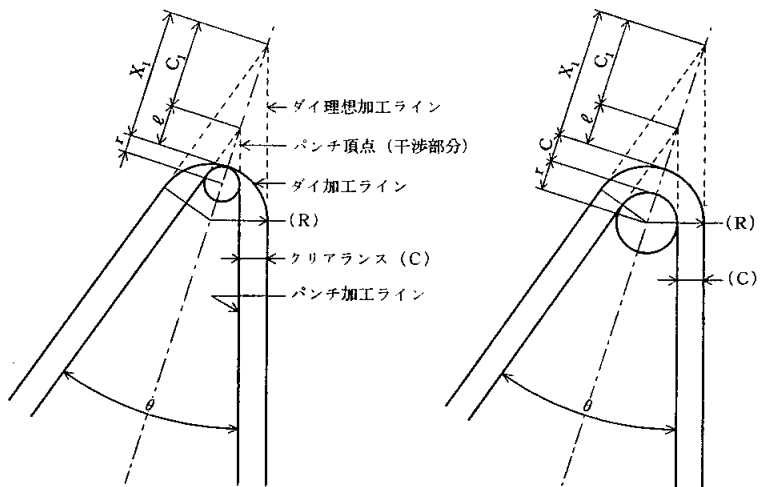


図19 シャープエッジとつ部が一樣なクリアランス量を保った状態の解析図

するので、パンチのB部が干渉することになる。

今、この図において、

θ : シャープエッジ角

R : ワイヤ電極半径と放電ギャップ量の和

C : クリアランス量

C_1 : シャープエッジ部のクリアランス量

X : ダイ加工におけるシャープエッジ部エッジ点での図面上の理想仕上がり点とワイヤ電極中心との差

X_1 : 加工仕上がりエッジ点と理想仕上がりエッジ点との差

とすれば、

$$C_1 = \frac{C}{\sin(\theta/2)} \quad (18)$$

なる関係があり、また、

$$X_1 = X - R \quad (19)$$

$$X_1 = \frac{R}{\sin(\theta/2)} \quad (20)$$

なる関係を得る。

つまり、シャープエッジ角 θ の大きさにより、 X_1 、 C_1 の値が異なるので、とりうるクリアランス量との関係から、 $C_1 > X_1$ となる場合に部品間のはめ合いがうまくいくことになる。

2.5 プレス抜き型部品間の干渉を避けるための検討

2.5.1 シャープエッジ限界干渉角度

式(18)(20)において、 $C_1 = X_1$ となる θ をシャープエッジ角の限界干渉角度と定め、 $0 < \theta < 180^\circ$ 、 $0.001 < C < 1\text{mm}$ において、 θ と C の関係をとれば、図17のようになり、任意なクリアランス量に対してとりうるシャープエッジ

角の限界干渉角度を示している。

例えば、 $R = 0.14$ (使用ワイヤ電極 $\phi 0.2\text{mm}$ 、放電ギャップ量 0.04)、 90° のシャープエッジ角に対しては、クリアランス量 0.041mm 以上をとらなければ干渉を起こすことになる。また、クリアランス量 0.1mm の場合、シャープエッジ限界干渉角度は 33° であり、この値以上でなければ、部品間で干渉を起こすことになる。

2.5.2 とつシャープエッジにRを付して干渉を避ける場合

プレス抜き型部品間の干渉を避けるために、まずとつなるシャープエッジ部にRを付す場合を検討した。

図18において、

ℓ : 干渉量

r : 干渉を避けるためにとつシャープエッジに付すべきR

とすれば、

$$\ell = X_1 - C_1 \quad (21)$$

$$r = \frac{\sin(\theta/2) \cdot \ell}{1 - \sin(\theta/2)} \quad (22)$$

を得る。

式(21)に式(18)(20)を代入すれば、

$$\ell = \frac{R}{\sin(\theta/2)} - R - \frac{C}{\sin(\theta/2)} \quad (23)$$

したがって、式(22)に式(23)を代入すれば、

$$r = \frac{R[1 - \sin(\theta/2)] - C}{1 - \sin(\theta/2)} \quad (24)$$

なる関係を得る。式(24)により、任意なシャープエッジ角、クリアランス量に対して、干渉を避けるためにとつシャープエッジに付すべき r の値を求めることができる。

抜き型部品間で一様にクリアランス量を維持していることになる。

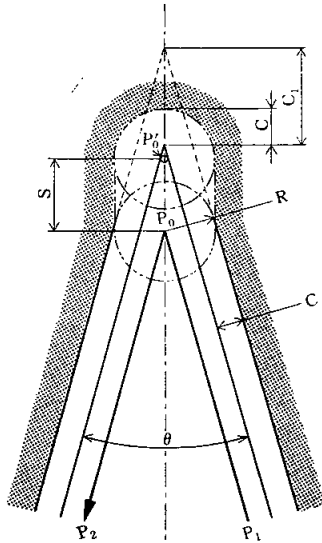


図20 シャープエッジおう部を逃がして干渉を避ける場合の解析図

次に、このシャープエッジ部で、クリアランス量を一樣に保った状態を考えれば、図19のごとくの形状になるが、この場合、とつシャープエッジに付すべきRは、おうシャープエッジに仕上げられる半径Rに対し、

$$r = R - C \dots\dots\dots (25)$$

なる半径を付す必要がある。この状態であれば、プレス

2.5.3 おうシャープエッジのプログラミングを変えて干渉を避ける場合

次に、プレス抜き型部品間の干渉を避けるために、おうシャープエッジについて検討する。すなわち、図20に示すごとくおう部加工用NCテープのプログラミングに一考を与え、おうシャープエッジを逃がす方法である。

普通、 $P_1 \rightarrow P_0 \rightarrow P_2$ あるいは $P_2 \rightarrow P_0 \rightarrow P_1$ とプログラミングを行っているが、シャープエッジ部のクリアランス量を保持するため、 P_0 からシャープエッジ角方向にS量だけ進んだ P_0' にワイヤ電極を進め、 $P_1 \rightarrow P_0 \rightarrow P_0' \rightarrow P_0 \rightarrow P_2$ あるいは $P_2 \rightarrow P_0 \rightarrow P_0' \rightarrow P_0 \rightarrow P_1$ とプログラミングすることで、とつシャープエッジ部品の理想形状をく

表1 製品寸法への金型部品の影響

欲する寸法	製品形状	パンチ	ダイ
外径寸法		—	做う
内径寸法		做う	—

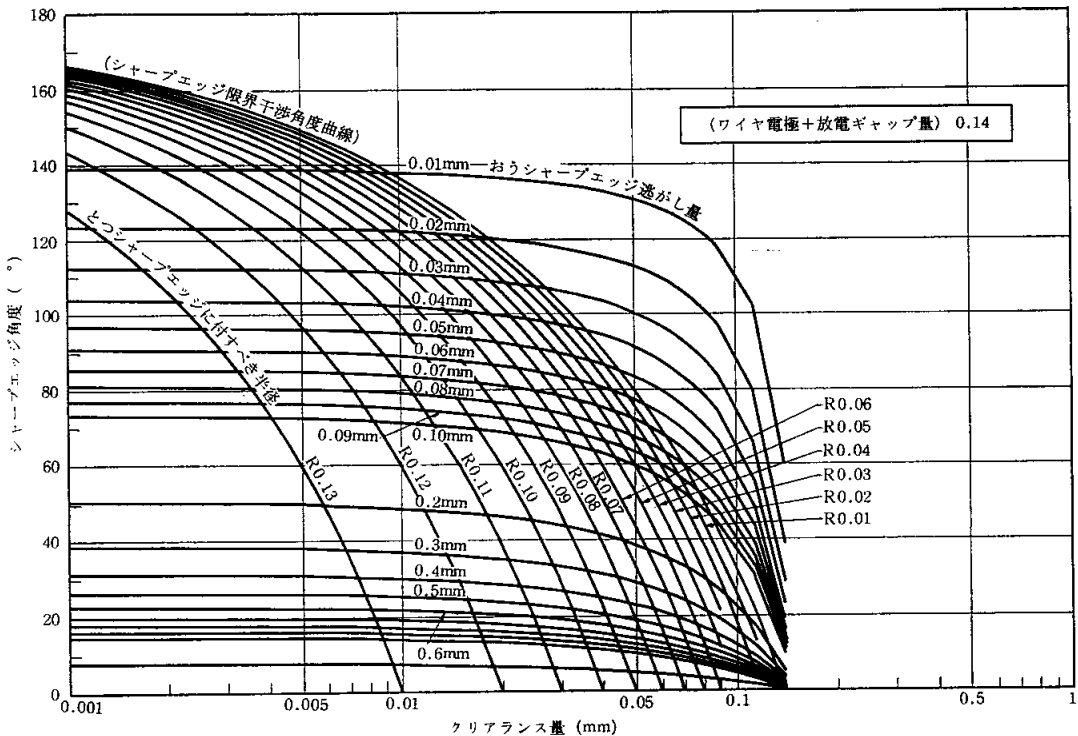


図21 シャープエッジ角とクリアランス量の関係図

ずすことなく、干渉を避けて仕上げることができる。

この場合、クリアランス量を一様値Cだけ保持するための $P_0 \rightarrow P_0'$ への進み量Sについて考えれば次のようになる。

$$S = \frac{R-C}{\sin(\theta/2)} + C - R \quad (R > C) \dots\dots\dots (20)$$

なお、おうシャープエッジ部のNCテーププログラミングに際しては、S量の入力にあたって、進み方向の算出、入力に十分注意を払わなければならない。

2.6 ま と め

以上の検討事項に関して、得られた結果図を集成した

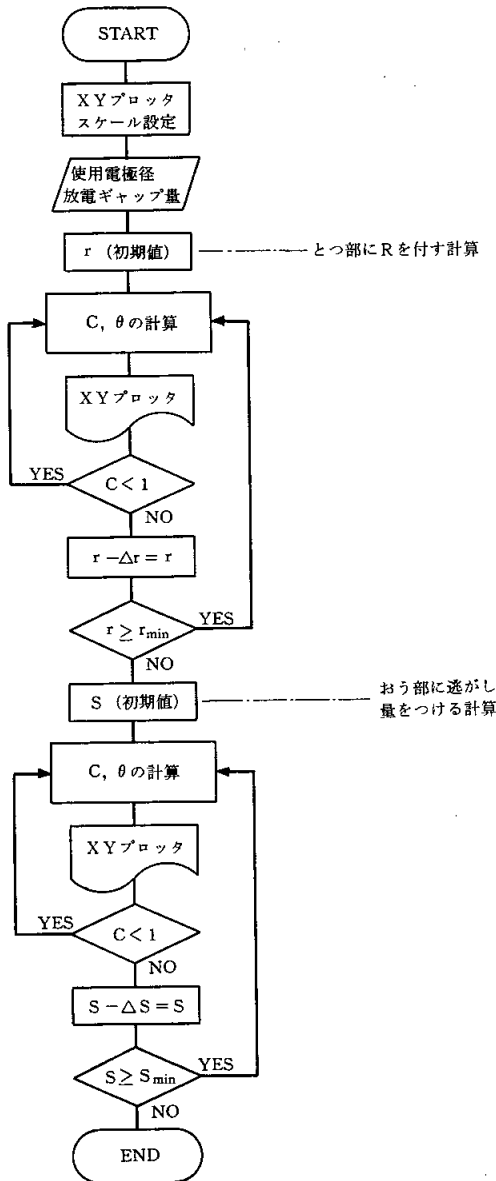


図22 フローチャート

のが図21である。本図作成の計算機処理フローチャートは図22に示す。図21により、プレス抜き型部品のシャープエッジ部加工に関して、部品間の干渉が起こりうるかどうか、また干渉が生ずる場合、干渉を避けるための手段をどうとるべきかの判断ができる。

特に、設計段階で吟味あるいは検討することが可能であり、加工形状に、より正確な詳細数値を記入でき、加工上は合理的な手段で対処できるであろう。

プレス抜き型による二次加工製品は、内径寸法が欲しい場合には、パンチ形状に倣うことになり、外形寸法が欲しい場合にはダイ形状に倣うことになる(表1参照)。したがって、クリアランス量と加工可能なシャープエッジ角との関係から、加工用図面は極力加工可能な範囲におさえる必要があると思われる。2.5.3項で示した対策は、抜き型部品加工におけるNCテープのプログラミングの合理化の鉄則を破ることになる¹⁾。これは二次加工製品の品質に重きをおいて、一面NCテープのプログラミングの合理化手段を犠牲にしているが、できれば製品設計に際して、例えばとつシャープエッジは許容される限り大きいRをつけるなど、より合理的加工を期待しての立場を尊重すべきではないかと思う²⁾。また、どうしてもあるクリアランス量を保って、シャープエッジ部が必要であれば(特に小物抜きに必要かと思われるが)、使用ワイヤ電極径を細くすることで、ある程度可能性を高められるであろう。

あ と が き

以上、2項目について、ワイヤカット放電加工の活用性向上のための useful な指南の一端に添えられるべく検討を加えた。「使いやすい」加工機であるためには、まだまだ多くの点で検討を加え、考察する必要がある。

本報においては、計算処理に、NCワイヤカット放電加工システムの中で、時間的拘束の短い自動プログラミング装置を計算機として多用したように、NCテープ作成用 only という域を脱して、さまざまな周辺アイデアや検討に利用することが可能であろう。

参 考 文 献

- 1) 三輪・吉田：NCワイヤカット放電加工の加工特性と金型加工への適用実例，自振協技術研究所報告，No. 9，1978. 3，120～121
- 2) Harry Kern; User benefits from improved wire EDM, Tooling & Production, 1978. 3, 72