

プラスチックの穴あけ加工に関する研究 (3)

(逃げ角が加工精度におよぼす影響)

加畑 信一*・佐藤元太郎**・田野口 睦***

(昭和45年10月31日受理)

1 緒 言

プラスチックの穴あけ加工におけるドリル切刃の摩耗状況を観察すると、すくい面摩耗に対して逃げ面摩耗がいちじるしく大きい場合がある。このような現象は金属切削の場合、切削厚さがきわめて小さい場合かあるいは刃先がはなはだしく鈍化している場合を除いてはほとんど見られないことである。このように逃げ面摩耗が大きいことの理由としてはプラスチックの機械的性質が粘弾性的であることがあげられる。すなわち材料の弾性変形、弾性回復がいちじるしいために切削時に切刃の逃げ面が加工面によって拘束されるためと考えられる。

1～2報¹⁾でものべたようにプラスチックの穴あけ加工においては特に加工熱の発生が加工精度におよぼす影響は顕著であるため、逃げ面と加工面との不必要な摩擦をさげ摩擦熱の発生をおさえることは加工精度をよくするうえからも大切なことである。そこで本報ではまず逃げ面に作用する力が金属切削の場合とプラスチック切削の場合とではどのような差異を示すかについてドリル切刃を単純化したバイトを使用し、二次元切削によって比較検討し、さらにプラスチックを穴あけ加工する場合のドリル切刃の逃げ角が加工精度におよぼす影響について実験的な研究をおこなったので報告する。

2 逃げ面に作用する力の検討

従来逃げ面に作用する力はほとんど考慮されずに切削機構の解析あるいは切削時の摩擦問題が取り扱われてきた。しかしながら最近では切り込みや送りの小さい軽切削が重要性を増し、また金属にかわる工業材料としてその需要の多いプラスチックの切削がさかんにおこなわれるようになった現在、当然のことながら逃げ面に作用する力の考慮が必要となる。以下金属においておこなわれている理論²⁾をもとに、これをプラスチック材の場合に理論を拡大して逃げ面に作用する力についての検討をすすめる。

ドリルによる切削過程をバイトによる二次元切削に近似すると切刃に作用する力は図1に示すようになる。すなわちすくい面には垂直力 N 、摩擦力 F が、また逃げ面には面に直角に N_1 、面に沿って摩擦力 F_1 、が作用する。すくい面に作用する力はすくい面の摩耗を

* 機械工学教室，教授

** 機械工学教室，助手

*** 機械工学教室，技官

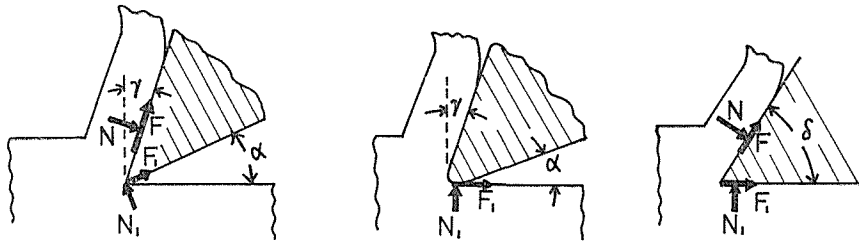


図 1 刃面に作用する力 図 2 逃げ面に作用する力 図 3 刃面と逃げ面に作用する力

ひきおこし、またこの力に抗して刃面から切屑の方向に作用する力は切屑の変形と切屑前方の切削面の小部分に変形をおこさせる。一方逃げ面に作用する力はずねに逃げ角のついた逃げ面と切削面とを弾性的かつ塑性的に接触させ、いかなる場合においても接触をまったくなくすることはできない。したがって逃げ面と切削面との接触の程度は刃先の丸味、あるいは被削材の機械的性質などの違いによってことなり逃げ面における力の作用状態は一般的には図 2～3 に示すように考えた方が妥当である。すなわち N_1 は切削面に直角にまた F_1 は切削面に平行に作用するものと考えられる。プラスチックのような比較的弾性回復の多いと思われるものについては図 3 の力の配置が適当であろう。したがって図 3 に示したような状態のもとの切削においては逃げ面に作用する力はかなりの値であることが予想される。

逃げ面に作用する力の存在は金属切削においては A. M. Rosenberg³⁾ あるいは H. H. Zolev⁴⁾ らによって確かめられ作用する力の決定もすでに実験的にこなわれている。しかしながらプラスチックを供試材とした場合についての報告はいまだないようである。以下 A. M. Rosenberg の提案にしたがって理論を展開し、さらに実験によって逃げ面に作用する力を決定してゆくことにする。

図 4 は二次元切削の場合の切刃に作用する力のベクトル図である。図よりあきらかのように切削抵抗の水平成分 P_z および垂直成分 P_x は次式で示される。

$$\begin{aligned} P_z &= N \operatorname{cosec} \gamma + (F - N \tan \gamma) \sin \gamma + F_1 \\ &= N \cos \gamma + F \sin \gamma + F_1 \end{aligned} \quad (1)$$

$$P_x = F \cos \gamma - N \sin \gamma + N_1 \quad (2)$$

ここで二次元切削においてはバイトに作用する全合成力 R_0 は刃先に直角な平面上に作用しているから摩擦係数 μ は Amontons の式を適用すれば次式で与えられる。

$$\mu = \frac{F}{N} = \tan \eta = \tan(\omega + \gamma) \quad (3)$$

ただし

$$\tan \omega = \frac{P_z}{P_1} = \frac{P_x - N_1}{P_z - F_1} \quad (4)$$

したがって摩擦力 F 、および垂直力 N は次式で示される。

$$F = P_1 \frac{\sin(\omega + \gamma)}{\cos\omega} = P_1 \frac{\sin\eta}{\cos(\eta - \gamma)} \tag{5}$$

$$N = P_1 \frac{\cos(\omega + \gamma)}{\cos\omega} = P_1 \frac{\cos\eta}{\cos(\eta - \gamma)} \tag{6}$$

ここで与えられたすくい角において切削厚さ a を大にすれば (1) 式における P_x は大となり、すくい角が小さいときには P_x は切削の厚さとともに増大する。すなわち (2) 式から $F\cos\gamma + N_1 > N\sin\gamma$ が成立することになる。またすくい角の大きいときには反対に切削厚さが大になるにつれてこの力は減少する。この場合には $F\cos\gamma + N_1 < N\sin\gamma$ の関係が成立し、したがってすくい角を種々変化させ次式が成立するように選定することが可能である。

$$F\cos\gamma = N\sin\gamma \tag{7}$$

$$\frac{F}{N} = \mu = \tan\gamma \tag{8}$$

したがって (2) 式は $P_x = N_1$ となる。

これはすくい角を適当に変えて、しかも切削厚さを増しても切削力 P_x が変化しないことを意味しこの場合の P_x が逃げ面に作用する垂直力 N_1 である。この方法にしたがうと面に沿って作用する力 F_1 の決定はできない。そこで F_1 , N_1 の決定を次のような考えをもとにしておこなった。

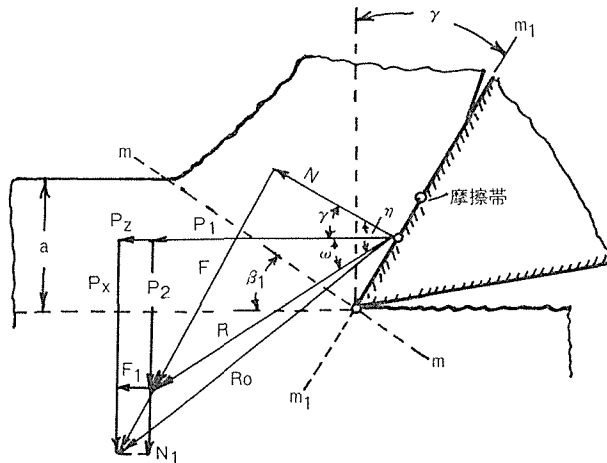


図4 切刃面に作用する力のベクトル図 (二次元切削)

いま各種の塑性圧縮、引張り、あるいは単純剪断変形について考えると、この変形がそれぞれ断面積は異なるがすべて同一の変形をするものとするとき温度速度条件が同一である場合には断面積の異なる各部分において変形応力はみな等しくなり、変形力は各部分の断面積

に比例することになる。同様のことが変形過程の一つである切削過程においても見られなければならない。すなわち切屑の縮みが同一であれば温度速度条件が一定の場合、刃面に作用する力(変形力)は刃先の形が同じ場合には切屑の断面積(厚さと幅)に直線的に比例しなければならない。したがってこの場合必要なのは刃面における温度を一定に保つことである。この条件が満足された場合においてのみ刃先には同一の摩擦係数、切屑の縮みが得られ、切屑厚さが変わっても切屑の剪断面には同一の応力が作用することになる。

そこで逃げ面に作用する力が切削厚さに無関係である(A. M. Rosenberg の実験により確認されている)とすれば、切削厚さを変化させた場合の切削力を測定しこれを座標で示せば、この直線は原点を通らない一つの直線となるはずである。すなわち $P_x = f(a)$ および $P_x = f(a)$ の関係を図示し外挿法により $a = 0$ とした場合に対する P_z , P_x を求めれば縦軸を切る切片の値が逃げ面に作用する力 F_1 , N_1 となる。

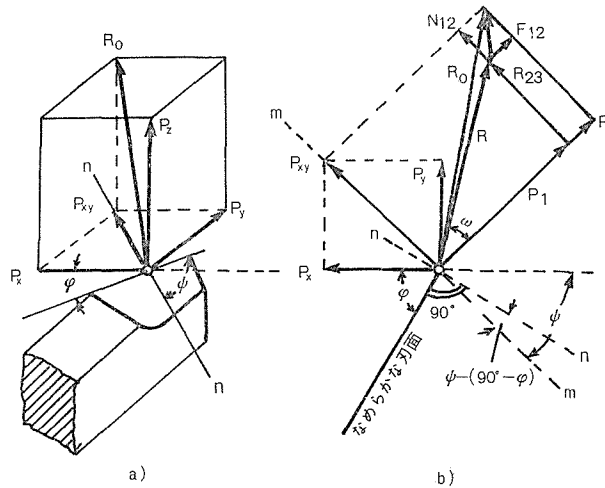


図5 切刃面に作用する力のベクトル図(三次元切削)

また三次元切削の場合の逃げ面に作用する力の決定は、切削厚さと切削力の関係を実験により求めて図示することについては二次元切削の場合と同様である。この場合異なることは図5よりあきらかのように二次元切削の場合の水平切削力の代わりに、この面に作用する2分力の合力 R_{xy} を求めて図示することである。すなわち $R_{xy} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$ が縦軸を切る値が逃げ面に作用する力 N_1 となる。

なお刃面の摩擦係数は、図5(b)より次式で示される。図5(b)は図を見やすくするために垂直力を P_x , P_y , R_{xy} が作用する水平面に合致するよう回転したものである。図4, 図5(a, b)より

$$\mu = \tan \eta = \tan(\omega + \gamma') \quad (9)$$

ここで γ' は全合力 R_0 の作用面においてはかったすくい角である。

$$\tan \gamma' = \tan \gamma \cos[\phi - (90^\circ - \phi)] \quad (10)$$

$$\tan \omega = \frac{R_{2,3}}{P_1} = \frac{P_2}{P_1 \cos \phi} = \frac{P_x - N_1}{(P_x - F) \cos \phi} \quad (11)$$

3 二次元切削による実験方法

後述するドリルの穴あけ加工において使用する供試材と同一のフェノール樹脂を使用し二次元切削をおこなった。普通ドリルのねじれ角は標準のもので大体 30° であるからドリル

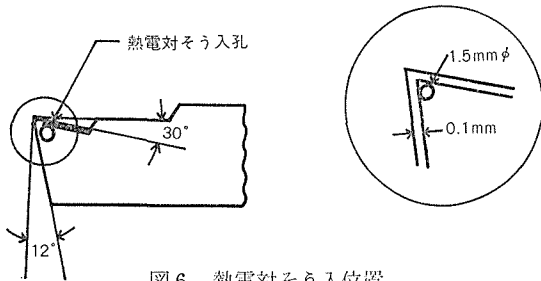


図6 熱電対そう入位置

ル切刃と近似させるためにバイトの刃先諸角のうちすくい角 γ を 30° とし、また逃げ角を 12° とした。温度測定は図 6 に示すようにバイトの側面に小穴をあけ熱電対 (Cu-コンスタント) を挿入しておこなった。なおさきのべたように刃先の温度を一定に保つことが重要な条件であるので本実験で

は切削厚さを変化させた場合の (他の切削条件は一定とする) 切削温度と切削抵抗とを連続的に記録測定し、同一切削温度に対応する切削抵抗を取り出し、所定の切削厚さにおける切削抵抗の値としてまとめた。なお切削速度は 35m/min 一定とし、すべて乾式切削によった。

4 実験結果と考察

図 7 は A. M. Rosenberg によっておこなわれた実験結果の一例で切削温度一定の条件にしたがってマイクロ速度 $V=0.035\text{m/min}$ で鋼を切削したときの切削厚さと切削抵抗との関係を示したものである。この場合に切削速度をきわめておそくすることによって切削温度は切削厚さ a のいかにかわらず一定であると考えられることができる。したがって

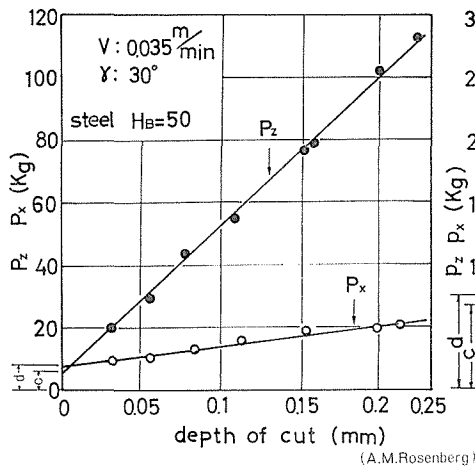


図7 逃げ面に作用する力の決定

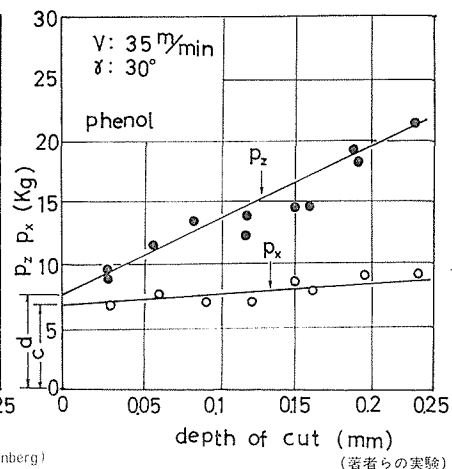


図8 逃げ面に作用する力の決定

切削抵抗 P_z , P_x は正しく直線によってあらわされ、この直線は座標軸をそれぞれ c , d の長さで切りとっている。この場合もし逃げ面に作用する力が存在しないとすれば直線は原点を通るはずである。この座標軸を切る長さ c , d が求める作用力である。

一方図8はプラスチックを供試材とした場合の実験結果である。切削速度は 30m/min であるため、当然切削温度は切削中に上昇してかつ変動する。実験方法の項でのべたように P_z , P_x を同一切削温度に対応する値として整理したので近似的には切削温度一定の条件を満たしているものと考えられる。実験結果は実験値にかなりのバラツキがあるが、切削厚さ a に対応する値を結ぶとほぼ直線によってあらわすことができる。実験値にバラツキが出る原因としては、切削温度の測定装置の応答特性が十分に理解されていないために、温度と切削抵抗との間の対応が十分に一致していないためと考えられる。この問題については今後十分の検討が必要である。さらに考えられることは切刃形状を各実験ごとにまったく同一に研磨することができないためのものである。

しかしながらいづれにしても鋼の場合と比較して全切削力に対する逃げ面に作用する力の割合はかなり大きなものである。これはさきの図3に示したように、切削面の弾性回復が鋼の場合よりはるかに多いため、逃げ面と切削面の接触領域が大きいためと考えられる。

以上の実験よりプラスチック切削の場合においては逃げ面に作用する力を無視しては切削過程の正しい理解はなされないものと結論することができる。

5 穴あけ加工の場合の逃げ角が加工精度におよぼす影響

プラスチックを穴あけ加工する場合に逃げ面摩耗が大きくなることについては前項の実験によってある程度解明されたが、ドリリングの場合にはバイト切削よりもその切削過程が複雑であるため、逃げ面に作用する力は必ずしも一様でなく解析を困難にしている。

本項では実際面に即して穴あけ加工をおこない、とくに逃げ角と加工精度との関連について実験的に検討を加えた。

5-1 ドリルの逃げ角について

ふつう逃げ角としては切刃と外周との境界エッジの値をとっているが実際には切刃各点の逃げ角は外周から内部に向かって次第に大きくなっている。すなわち図9よりあきらかのようにドリル各部の逃げ角は次式で示される。

$$\beta_x = \tan^{-1} \left(\frac{h_x}{\pi D_x} \right) \quad (12)$$

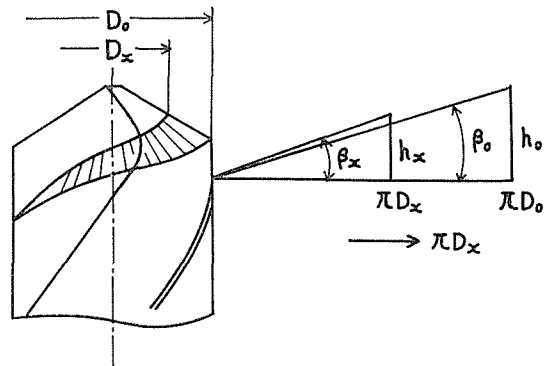


図9 ドリル逃げ角の説明

また逃げ角は先端角に関係し、逃げ面研削にあたって先端角の値による研削可能な範囲が存在する。すなわち逃げ角をある限度より小さくつけると切刃のヒールが切刃外端よりも下り切削時に切刃よりもヒールが先に穴壁にあたり切削不能となる。

5-2 実験方法

供試材および実験装置は前報と同一のものを使用した。ドリルの逃げ角は、切刃の先端逃げ面をドリルポイントにより所定の値に研磨し、さらに万能投影器により切刃形状を拡大し、正確な研磨がなされているかを確かめて実験に供した。図10にドリル切刃の説明図を、また表1に実験条件を示す。

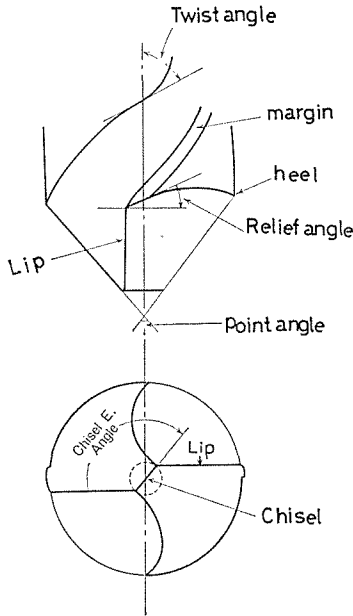


図10 ドリル切刃説明図

表-1 Experimental condition

| | | |
|--------------------------|------------------------|--|
| Used drill Dimensions | Diameter of drill (mm) | 6 φ |
| | Point angle (deg) | 70, 100, 118, 140 |
| | Twist angle (deg) | 30 |
| | Chisel E. angle (deg) | 130 |
| | Relief angle (deg) | P. A 70(22.5~32.5) P. A100(15 ~25) P. A118(10 ~20) P. A140(7.5~17.5) |
| Drilling condition | Cutting speed (m/min) | 10.5 23.0 |
| | Feed (mm/rev) | 0.05 0.10 0.15 |

5-3 実験結果および考察

5-3-1 切削抵抗について

図11は切削速度 23m/min, 送り速度 0.15mm/revでフェノール樹脂を穴あけ加工した場合の逃げ角とトルクとの関係について求めた実験値である。これによると逃げ角の影響はあらかじめ先端角 70°を除くといずれの先端角の場合にも、トルクの値が極度に高くなっている逃げ角が存在する。たとえば先端角 140°の場合は逃げ角 12.5°でトルクの値はピークに達し、また先端角 118°では逃げ角 17.5°で最高値を示している。このような現象はバイトによる二次元切削の過程では見られないことであり、穴あけ加工の切削過程が複雑であることを意味するものである。バイトによる逃げ角の影響については、逃げ角と切削抵抗とはほぼ逆比例の関係にあるはずである。したがって図11より先端角 70°の場合が、バイト切削の場合にもっとも近い切削状態であることが予想される。

図12はスライトと逃げ角との関係を示したものであるが、これはバイトによる二次元切削の場合と同様な考察が可能である。

逃げ角が大きくなるにつれてスラストの値は減少しているがこれは逃げ面と切削面の接触領域が逃げ角の大小により異なるためと考えられる。

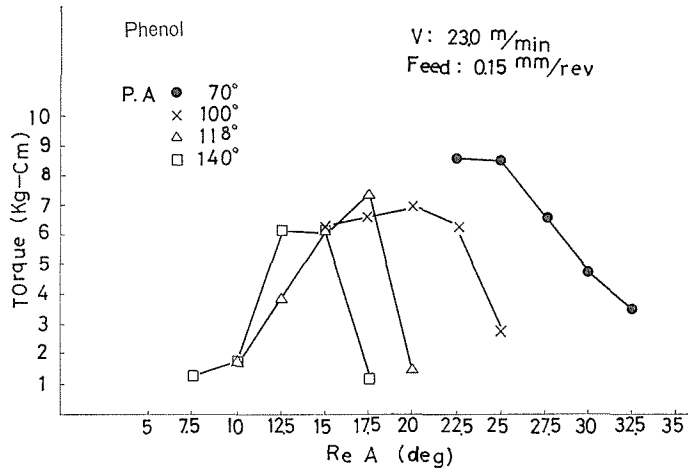


図11 逃げ角がトルクにおよぼす影響

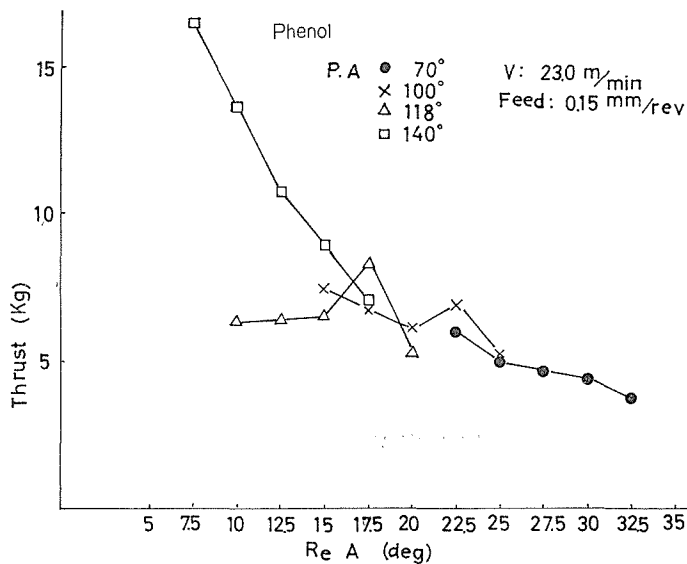


図12 逃げ角がスラストにおよぼす影響

5-3-2 穴の寸法精度について

図13は穴の寸法精度および切削抵抗が逃げ角によってどのような影響をうけるかについて示したものである。これによると穴の寸法精度が逃げ角によって変化する傾向が切削抵抗の変化とまったく対応していることがわかる。これは穴の寸法精度が切削抵抗と密接な関係にあることを示唆するものである。すなわち穴寸法がドリル径より **over size** 場合はトルクは相対的に非常に小さな値を示し、逆に **Under size** の場合にはその値はいちじるしく増大している。このことからトルク上昇の原因としては穴径が **Under size** になる

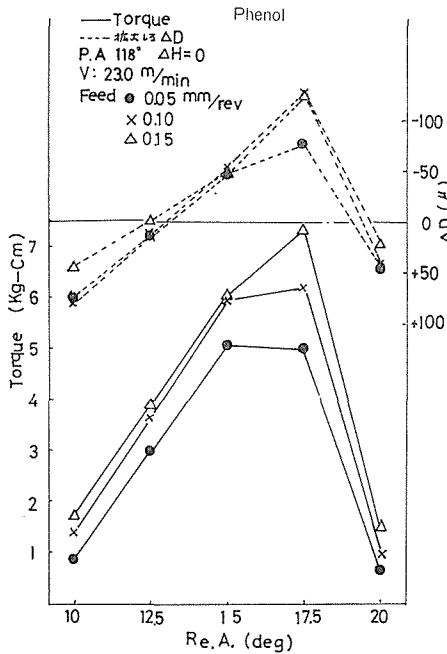


図13 逃げ角がトルクと拡大しる
 におよぼす影響

ためにドリルマージン部が穴壁によってしめつけられるためと考えられる。しかしながら逃げ角が穴の寸法精度に直接関与しているのか、あるいは切削抵抗に直接影響をおよぼし、その結果切削抵抗の上昇→切削熱の発生→材料の熱的変形→寸法精度、のような過程を経て間接的に関与しているのかについては不明の点が多く今後の課題である。

5-3-3 穴内面の精度について

穴あけ加工の場合ドリルの進行に伴って切削状態が変わることは旋削などでは見られない現象である。これは切屑の排出状態が穴の深さにしたがって変化すること、さらに切削熱が穴の深さの関数として被削材内部に蓄積されるために、材料の剪断抵抗あるいは材料と工具刃面との摩擦抵抗が変化するためと考えられる。プラスチックの場合金属などと比較してとくに熱伝導性が悪い

ため、切削熱の大部分は穴表面に沿った極めて薄い層に蓄積され、その結果その部分の温度のみが局部的に上昇する。したがって切削面の融着状態は容易に起り、仕上面は悪化する。

図14は塩化ビニール樹脂を供試材としたときの穴深さと切削抵抗との関係について示したものである。融着が発生し始めるとトルクは急上昇し、それに対応してスラストはやや

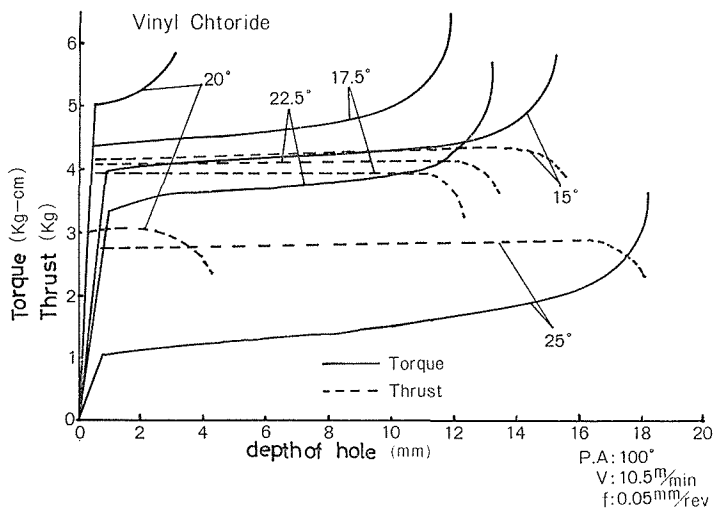


図14 穴深さと切削抵抗との関係

減少の傾向を示す．そこで本実験では切削抵抗が急激に変動し始める点をもって融着発生点とし，逃げ角が融着発生点におよぼす影響について検討した．その結果を図15～18に示す．これによると先端角70°の場合には逃げ角の影響は少なく，この場合融着の発生はいづれの逃げ角においても穴深さ15mmまではほとんど発生していない．しかしながら先端角100°，118°，140°の場合には逃げ角の影響はあきらかで，融着の発生しやすいプラスチック材の穴あけ加工の場合には逃げ角の選定をあやまらないようにすることが良好な仕上面を得るために重要なことである．先端角が大きくなるにつれて仕上面を良好ならしめる逃げ角の範囲は狭められ，とくに140°の場合には融着領域が図の下方に広がるために逃げ角の値に十分注意することが必要である．

なお本実験の切削条件の範囲内では切削速度および送り速度の影響はほとんどあらわれていない．実験装置の都合で本報では高切削速度，高送り速度での実験はできなかったがこれらについては今後の問題としてとりあげたい．

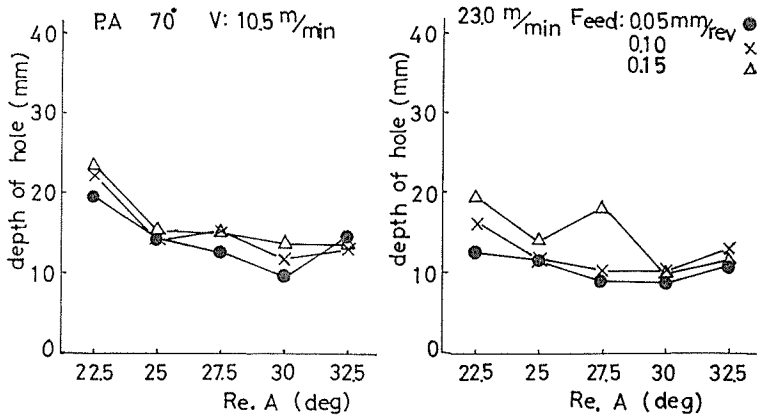


図15 逃げ角が融着発生におよぼす影響

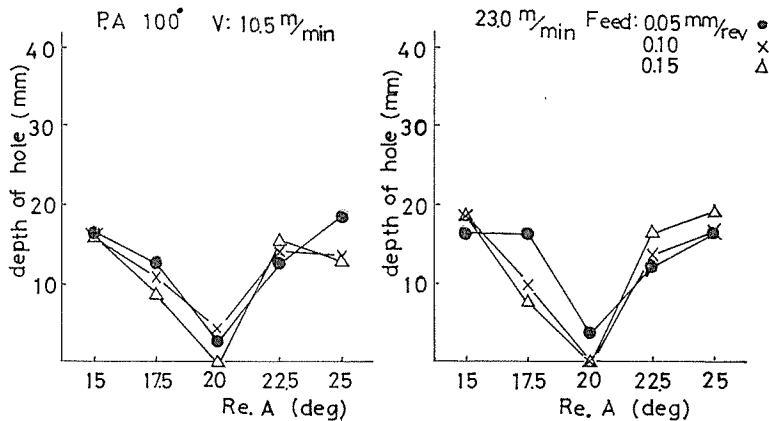


図16 逃げ角が融着発生におよぼす影響

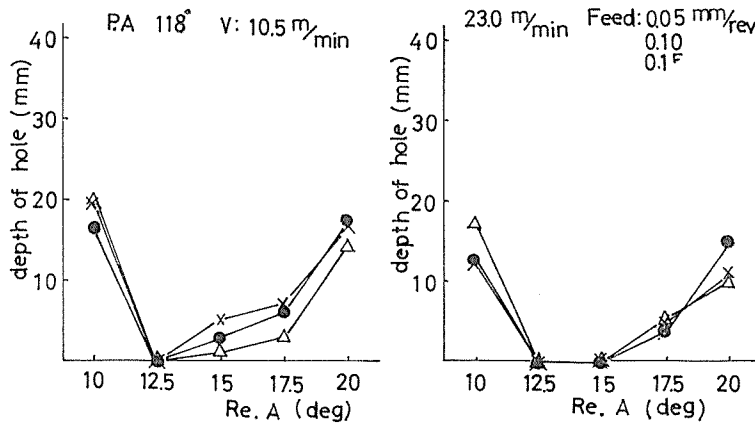


図17 逃げ角が融着発生におよぼす影響

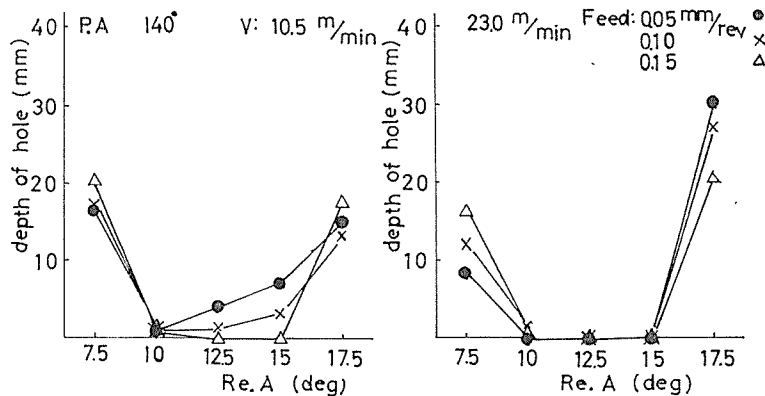


図18 逃げ角が融着発生におよぼす影響

6 結 論

以上逃げ面に作用する力について金属の場合とプラスチックの場合とを二次元切削により比較検討し、さらにプラスチックの穴あけ加工の場合に逃げ角が加工精度におよぼす影響についても実験的な研究をおこない若干の考察を加えた。その結果次のような点があきらかになった。

(1) プラスチック切削の場合、全切削力に対する逃げ面に作用する力の割合は鋼の場合と比較してかなり大きなものであることを確認した。これは切削面と逃げ面との接触領域が鋼の場合より大きいことを示唆するものである。

(2) 穴あけ加工の場合、逃げ角が切削抵抗、あるいは加工精度におよぼす影響はあきらかであり、とくに軟化温度の低い材料で、しかも深穴加工をおこなう場合には逃げ角の値に十分の検討が必要である。

終りに本研究をおこなうにあたり試料の提供および有益な御助言をいただいた吉野工業所鈴木研究部長、さらに実験に協力された当時卒研生の杉山曉男君（現在岡村製作所K.K.）と山村清君（現在吉野工業所）に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 加畑, 佐藤, 田野口: 信大工学部紀要, No.26, 51 (1969).
- 2) A.M. Rosenberg・長谷川一郎訳: 金属切削理論, 東京図書, (1965) 第3章.
- 3) A.M. Rosenberg: フライス切削の力学, ソ連科学出版所 (1945).
- 4) H.H. Zolev: 切削過程の力学要素の研究, 国立出版所, 1952.

Summary

Study on Drilling of Plastics (3rd Report)

Shinichi KABATA, Mototaro SATO, and Mutumi TANOGUCHI

(Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering)

The analysis of cutting resistance and friction in metal Cutting has so far been discussed without regard to the rubbing force which acts upon the clearance flank of cutting edge.

But the rubbing force is very important factor in the study on the plastics drilling phenomena. So this paper describes about the values of rubbing force obtained by orthogonal Cutting in steel and plastics. Furthermore the accuracy of drilled holes on plastics were discussed in connection with the rubbing force.

The Results were summarized as follows.

In the orthogonal Cutting Test, the values of Rubbing force were rather greater in plastics than steel. These results may be mainly due to the fact that in the contact area between the Clearance flank of cutting edge and material, there is difference between steel and plastics. In the drilling of plastics, the relation between the relief angle and the accuracy was remarkable particularly, the decrease of torque had good effects on the accuracy.