

微小径ドリルによる穴あけ加工の自動化

——適正切削条件について——

星野英夫*・安沢勝昭**・豊山 晃*・柳 和久*

Automatic Small Hole Drilling
——Optimum Machining Conditions——

Hideo HOSHINO, Katsuaki ANZAWA, Akira TOYAMA and Kazuhisa YANAGI

This report describes the technical improvement on the small hole drilling by Numerical Control and the experimental procedure to get the optimum machining conditions such as speed of revolution and feed rate per revolution. As an experimental installation, the special NC drilling machine and the cutting forces measuring device were manufactured for trial. Through the experimental study of small hole drilling by twist drills (SKH 9) of 0.2 and 0.3 mm in diameter, some quantitative optimum conditions for SS41 carbon steel, SUS304 stainless steel and C2081 P brass were obtained from the view point of thrust and cutter tooth wear. Then the successful step feed-cycle for NC drilling was established that prevents a drill breakage by detecting the excessive thrust and then pulling the drill out.

Key words: small hole/drilling/numerical control/optimum condition/feed-cycle

1. 諸 言

昨今の先端技術分野における機械加工の高精度化は著しく、特に微小規模の精密加工技術は不可欠なものとなってきた。とりわけ電子・光通信分野のエレメント部品における微小深穴加工はますます高精度な技術が要求されている。

微小穴あけは従来レーザー加工や電解加工等で試みられているが、生産性や形状精度の面で必ずしも満足できる結果が得られず、機械加工法である微小径ドリルを用いた穴あけ加工の需要は依然として多い。しかしながらドリル加工に関する研究は切削機構、切屑処理、工具寿命などの見地から数多くされているが、そのほとんどが通常寸法のドリル加工に関するものであり、微小径ドリル（直径0.3 mm以下）による切削特性・最適切削条件などについては不明な点が多い。従って生産工程では熟練者の技能に頼る割合が高く、加工能率は非常に低いものとなっている。

本研究は微小径ドリルによる穴あけ加工の自動化が今後すすめられていくことを考慮して、微小径ドリル用NCボール盤、および切削力計を製作し、切削力とドリ

ル摩耗の観点から加工条件の最適値を求めた。また、加工中の切削力を検知することにより、ドリルの折損防止を自動的に行えるシステムを試作した。文献4)の報告ではドリル径0.1 mm以下のものを対象に30,000 r.p.m.以上の回転数で穴あけ加工を行ったが、本報告は0.2 mmと0.3 mmのドリルについて実験解析し、加工条件と切削性能の定量的関係を得たので報告する。

2. 実験装置

図1に実験装置の概略を示す。

スピンドルはローラーテーブル上に固定されており、ドリルの回転は、DCモーターによりフレキシブルシャフト、プーリー、タイミングベルト、スピンドルを通して行われる。スピンドルにはころがり軸受を使用した。ドリルの送りもローラーテーブルのボールねじをステッピングモーターによって回すことにより行う。

図2は、実際の穴あけ加工と切削力の検出装置を示す。

切削力については板バネ上にひずみゲージを貼ることによりトルク、スラストを検出している。切削力計からの信号はアンプを通してコンパレータにはいり、しきい値（設定力）と比較される。しきい値は可変抵抗で任意に設定することができる。比較した結果は、TTLレベルの“High”か“Low”の信号としてマイコンに送られ“High”の時（切削力がしきい値よりも大きい時）はドリ

原稿受付 昭和80年4月4日

*長岡技術科学大学工作センター

**同、現在三豊製作所

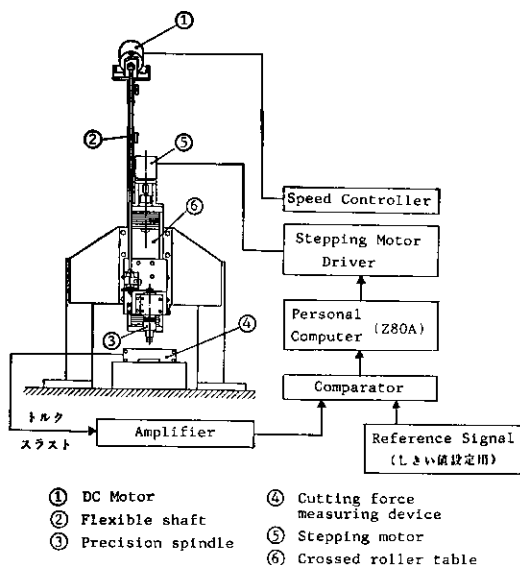


Fig. 1 A schematic view of the experimental apparatus

をいったん後退させるようになっている。このようなシステムにすることにより、ドリルに過負荷が作用した場合折損に至る前にドリルを後退させることができる。

スピンドルの回転速度は 1,000~20,000 r.p.m. の範囲で無段変速が可能である。図 3(a), (b) にそれぞれ静的な回転振れ、送り方向の取り付け精度を示す。図 3(a) は、直径 3.90 mm ($\pm 1 \mu\text{m}$) のピンゲージをコレットチャックでスピンドルに取り付け、ピンゲージの各位置での静的な回転振れ量を接触圧の小さな電気マイクロメータにより測定したものである。実験ではドリル突出し長さをコレット端からはば 5 mm としたため、回転振れは $6 \mu\text{m}$ 程度である。他の誤差要因がなく、外乱も受けないとすれば回転時にはこの量が低下するものと考えられる。

図 3(b) は、ローラーテーブルの垂直方向運動軸とスピンドルの回転中心軸との傾きを示す。縦軸は、主軸部の垂直方向運動量であり、横軸は水平面内の 4 方向から測定したピンゲージの相対変位量である。微調整機構を採用することにより $6 \mu\text{m}/20 \text{ mm}$ の取り付け精度が得られたが、本研究での全切込み量は 1 mm 以下であるので、実際の垂直方向運動精度は $1 \mu\text{m}$ 以下であると考えられる。

3. 実験方法

切削方法として切屑排除としてステップフィードサイクルを取り入れた。ステップフィードサイクルとは図 4 に示すような切削方法である。あらかじめマイコンに 1 ステップ量 Q 、逃げ量 d 、全切込み量 Z 、送り速度 f を入力しておく。切込み原点から f の速度で加工を始め Q

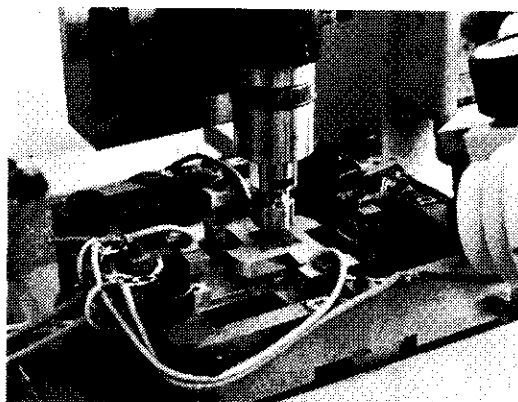
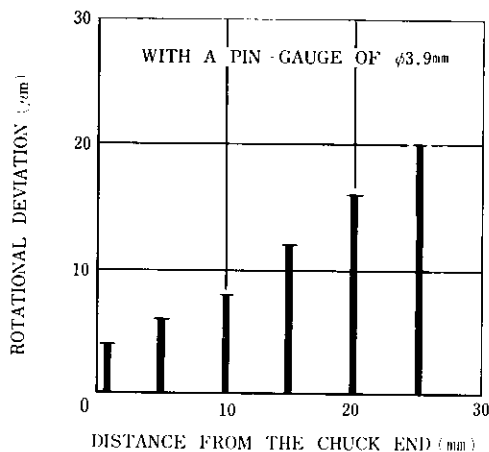
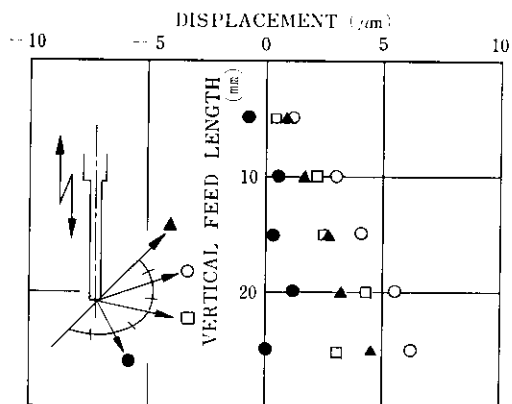


Fig. 2 A scene of small hole drilling with the cutting forces measuring device



(a) Accuracy of rotatory motion



(b) Accuracy of vertical movement

Fig. 3 Accuracy performance of the spindle motion

だけの深さに達したら、いったん切込み原点まで早送りして戻り切屑を排除し、 $Q-d$ の深さまで早送りして進み $Q+d$ 量だけ f の送りで加工を進める。以上をくり返した

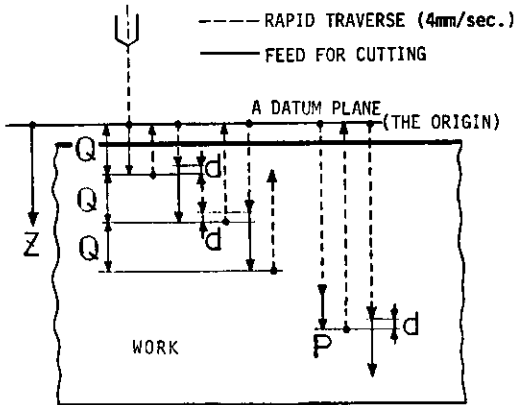


Fig. 4 An explanation of the vertical feed cycle

が全切込み量 Z まで加工を続ける。なお Z/Q が割り切れない場合、その余り量だけ最終行程で加工をするようにしている。また、加工途中で切削力がしきい値に達した場合（図4中のP点）切削を中止し切込み原点に戻る。その際には加工を中止するか、繰り返すかをプログラムで選択するようになっている。

実験に使用したドリルはSKH9種のルーマシャンク型ツイストドリルである。ドリル先端部の摩耗量を調べるために、品質にバラツキの少ないと思われる市販のドリルをそのまま使用した。

被削材はSS41, SUS304, 黄銅 (C2801P) の3種で厚さは各0.5mmの板材を使用した。切削油は、ドリル先端部の摩耗変化を著しくするために、ここでは使用しないことにした。

切削時のトルク・スラストの波形記録にはトランジェントメモリーおよびXYレコーダを用いた。

4. 実験結果

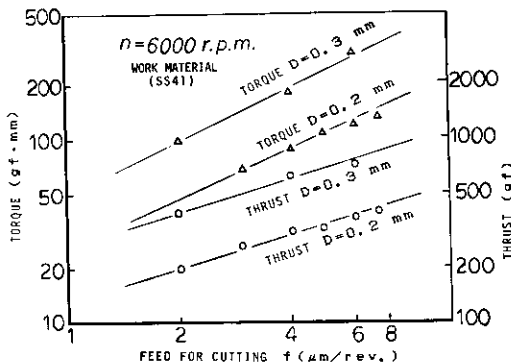


Fig. 5 Relationship between vertical feed speed and cutting forces

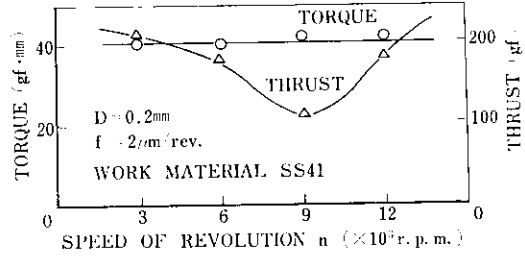


Fig. 6 Relationship between speed of revolution and cutting forces

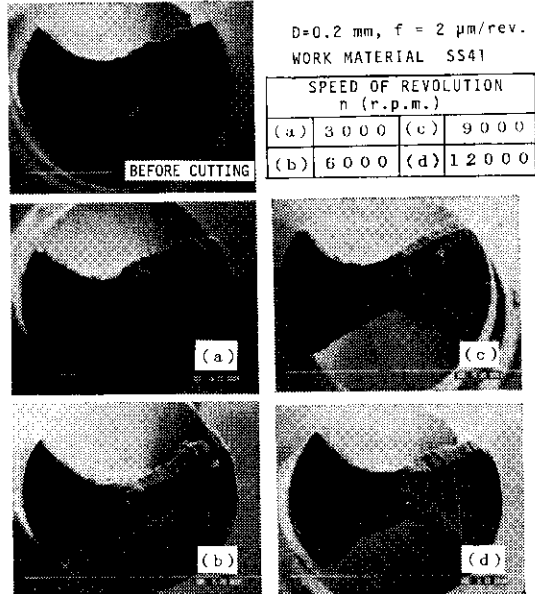


Fig. 7 External appearances of drills after making 20 holes

図5は被削材をSS41とし、ドリル径 $D=0.2$ mm, 0.3 mmで回転数を $n=6000$ r.p.m.に固定した場合の送り f とトルク・スラストの関係を示す。これらの実験結果から、微小径ドリルにおいても次式で表される通常ドリルによる送り f とトルク、スラストの関係が成り立っていることがわかる。

$$\text{スラスト } P = C_1 f^\eta \quad C_1, \eta: \text{定数}$$

$$\text{トルク } M_d = C_2 f^\epsilon \quad C_2, \epsilon: \text{定数}$$

次に、ドリル径 $D=0.2$ mm, 被削材SS41において送り一定 ($f=2 \mu\text{m/rev.}$)とした場合の回転数 n とトルク、スラストの関係を図6に示す。トルクは回転数 n に関係なく一定であるが、スラストは $n=9000$ r.p.m.付近で最小となっている。このような現象は通常のドリルでは見られず、微小径ドリル特有の現象であると思われる。

また、スラストの変化がトルクに比べて大きいことから切削条件の微妙な影響をスラストで検出することに

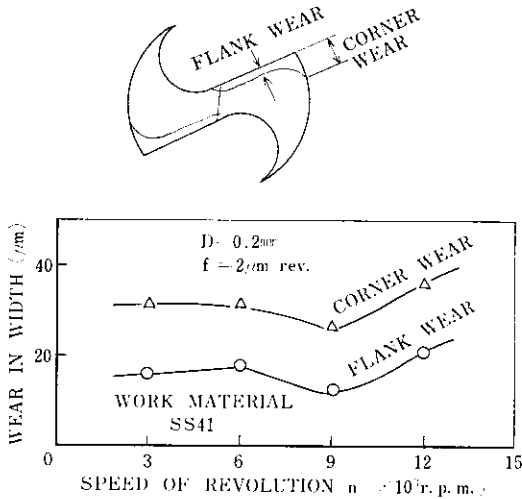


Fig. 8 Relationship between speed of revolution and wear rate

し、比較切削力のしきい値にもスラストを採用することとした。

図7に図6と同一条件($D=0.2\text{ mm}$, $f=2\text{ }\mu\text{m/rev.}$, 被削材SS41)で20個の穴あけ加工をした後のドリルと、

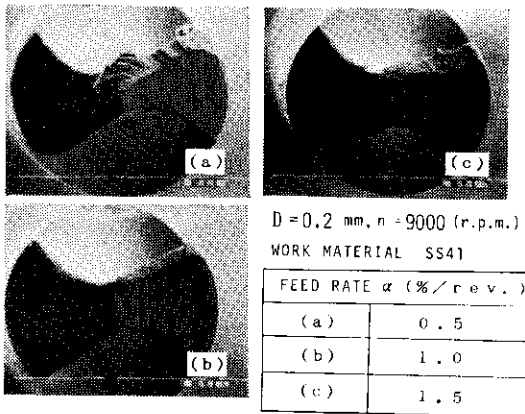


Fig. 9 External appearances of drills after making 20 holes

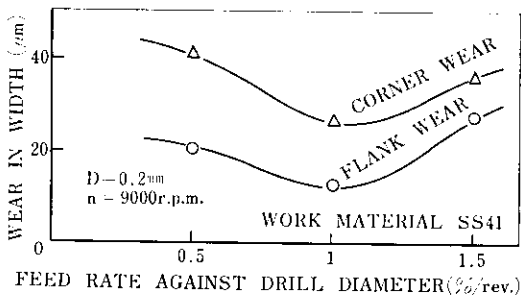


Fig. 10 Relationship between vertical feed rate α and wear rate of the cutter teeth

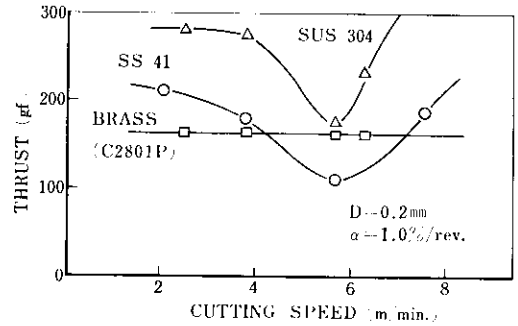


Fig. 11 Relationship between cutting speed and the thrust

未使用ドリルの先端の走査型電子顕微鏡写真を示す。図8はこの時のドリル摩耗量をグラフにしたものである。回転数は $n=9000\text{ r.p.m.}$ の時が摩耗量が最小になっており図7と比べるとスラストとドリル摩耗量是对応していると思われる。

図9にドリル径 $D=0.2\text{ mm}$, 回転数 $n=9000\text{ r.p.m.}$, 被削材SS41の条件で送りを変えて20個の穴あけ加工をした後のドリル写真を示す。図10はドリル摩耗量と送りの関係である。送りはドリル径に対する1回転当りの割合(以後送りの割合という) α

$$\alpha = f/D \times 100 (\%/rev.)$$

をパラメータとして与えることにした。図10の場合 $\alpha=1.0\%/rev.$ 程度が最良の切削速度であると思われる。

以上のことより、ドリル径 $D=0.2\text{ mm}$, 被削材SS41での適正切削条件はドリル回転数 $n=9000\text{ r.p.m.}$ (切削速度 $V \approx 5.7\text{ m/min.}$) 送りの割合 $\alpha=1\%/rev.$ (送り速度 $f=2\text{ }\mu\text{m/rev.}$)程度であるといえる。

図11は被削材の違いによる影響を調べた結果を示す。ドリル径 $D=0.2\text{ mm}$, 送りの割合 $\alpha=1.0\%/rev.$ でドリル回転数を変化させ、被削材SS41, SUS304, 黄銅(C2801P)の3種について同様の実験を行った。縦軸にスラストをとり、横軸には回転数を次式のように切削速度に変換して表示した。

$$V = \pi \cdot D \cdot N / 1000 (\text{m/min})$$

被削材SS41とSUS304はともに切削速度 $V=5.7\text{ m/min.}$ (回転数 $n=9000\text{ r.p.m.}$)付近でスラストが最小値を示している。ドリル摩耗量もその条件下で最小となる傾向を示した。一方黄銅(C2801P)については、切削速度に関係なくスラストはほぼ一定であった。

次にドリル径 $D=0.3\text{ mm}$ についても $D=0.2\text{ mm}$ の場合と同様の実験を行った。

図12にドリル径 $D=0.3\text{ mm}$, 被削材SS41で切削速度を変化させ、送りの割合 $\alpha=0.5, 1.0, 1.5\%/rev.$ について行った。切削速度 $V=8.5\text{ m/min.}$ の時にいずれもス

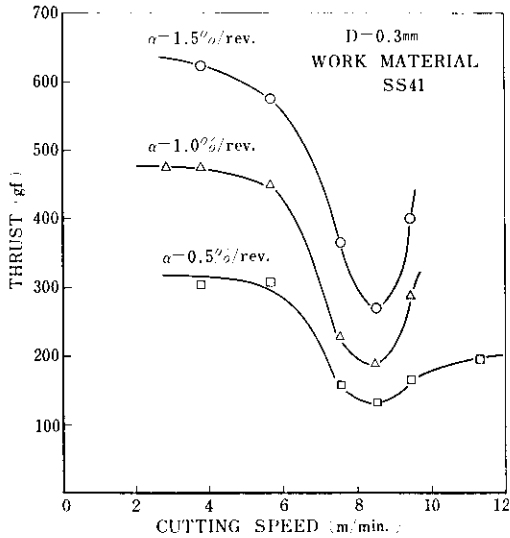
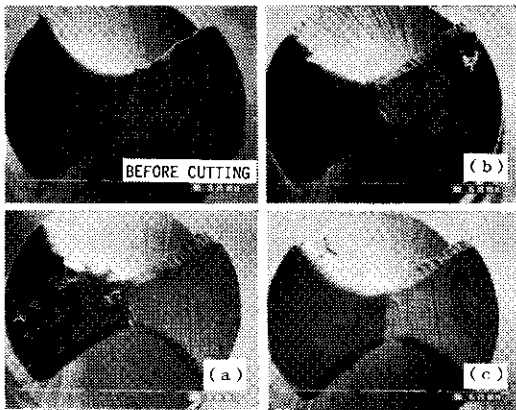


Fig. 12 Relationship between cutting speed and the thrust



$D = 0.3 \text{ mm}$ $V = 8.5 \text{ m/min.}$
WORK MATERIAL SS41

FEED RATE α (%/rev.)			
(a)	1.0	(b)	1.5
(c)	2.0		

Fig. 13 External appearances of drills after making 20 holes

ラストが最小値を示した。この条件における適正切削速度は $V = 8.5 \text{ m/min.}$ である。また、いずれもこの切削速度でドリル摩耗量が最少であった。しかし、送りの割合 $\alpha = 0.5\%/rev.$ 時のスラストが最小であり、ドリル摩耗の点でも一番少ないと予想されたが必ずしも対応しない結果が得られた。

図13はドリル径 $D = 0.3 \text{ mm}$ 、切削速度 $V = 8.5 \text{ m/min.}$ 、被削材 SS41 で送りの割合 $\alpha = 1.0, 1.5, 2.0\%/rev.$ におけるそれぞれの場合の20個穴あけ後と未使用ドリルの

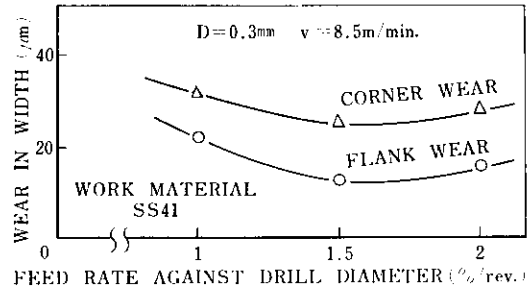


Fig. 14 Relationship between vertical feed rate α and wear rate of the cutter teeth

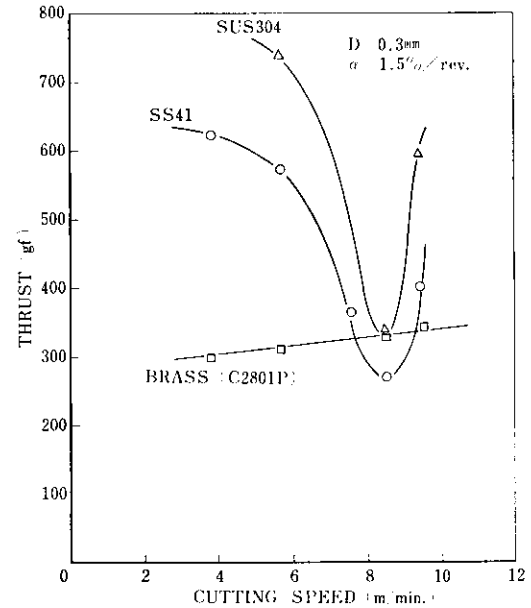


Fig. 15 Relationship between cutting speed and the thrust

走査型電子顕微鏡写真である。また、図14はドリル摩耗量と送りの割合 α の関係を示す。送りの割合 $\alpha = 1.5\%/rev.$ 時にドリル摩耗量が最少の値となっており、ドリル摩耗の観点からは送りの割合 $\alpha = 1.5\%/rev.$ が適正であると思われる。

以上のことから、ドリル径 $D = 0.3 \text{ mm}$ 、被削材 SS41 では、適正切削条件は切削速度 $V = 8.5 \text{ m/min.}$ 、送りの割合 $\alpha = 1.5\%/rev.$ 程度であるとして差支えない。

次にドリル径 $D = 0.3 \text{ mm}$ について被削材の違いによる影響を調べた。 $D = 0.2 \text{ mm}$ の時と同様に被削材は SS41、SUS304、黄銅 (C2801P) の3種とし、送りの割合 $\alpha = 1.5\%/rev.$ 、切削速度 $V = 8.5 \text{ m/min.}$ で実験を行った。図15にその結果を示す。ドリル径 $D = 0.2 \text{ mm}$ 時までの結果と同じように被削材 SS41 と SUS304 は共に切削速度 $V = 8.5 \text{ m/min.}$ でスラストが最小値を示しており、

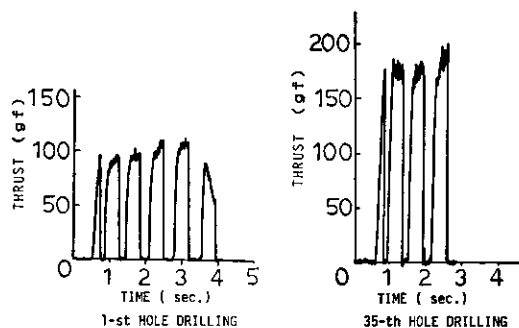


Fig. 16 Variations of the thrust

黄銅 (C 2801 P) については切削速度に関係なくスラストはほぼ一定であった。

本実験装置は、第2章で述べたように実切削力としきい値との比較によってドリルの折損防止を試みており、図bの結果から比較切削力としてスラストを採用している。

加工条件はドリル径 $D=0.2\text{ mm}$ 、切削速度、送りの割合は先に求めた適正值 $V=5.7\text{ m/min.}$ 、 $\alpha=1.0\%/rev.$ 、被削材 SS 41 である。しきい値は 200 gf を設定した。35個目の穴あけでスラストがしきい値に達したので加工を中止した様子を図16に示す。被削材の厚さが 0.5 mm 、1ステップ送り量 $Q=0.1\text{ mm}$ として加工しているため貫通するまでのステップ回数は5, 6回である。その様子が1個目の穴あけには5, 6個の山となって現われている。ところが35個目の穴あけの4ステップ目とスラストがしきい値 200 gf に達し、ドリルが後退している。この時のドリル先端は図17のように著しく摩耗しており、切削力比較方式がドリル損耗の予知に有利であることがわかる。

なお、一連の穴あけ実験はセンタ穴のない状態で行なったため、ドリル折損は加工途中よりも被削材にドリルが最初にくいつく時に多くみられた。これはドリルの切削位置が定まらずに穴あけを進めて行くため、そのためステップフィードサイクルの1ステップ目（最初の切込み Q ）を低い送り速度にし、案内穴をあけるサイクルとし、2ステップ目から実際の送り速度になるように改善した。また、ドリル取り付け時に突出し長さを可能な限り短くしたら、なお一層安定した加工ができた。微小径穴あけ加工特有の注意を要する点である。

本研究はドリル先端部の摩耗と切削力の観点から実験解析を行い、自動化のための適正な切削条件を一部ではあるが定量化した。しかしながら、図11や図15のように被削材 SS 41 と SUS 304 とでは同じような傾向となるのに対して、黄銅 (C 2801 P) が切削速度に依存しない原因は不明である。金属学的性質に加えて、スピンドル工具



$D=0.2\text{ mm}$ $V=5.7\text{ m/min.}$

$\alpha=1.0\%/rev.$

WORK MATERIAL SS41

Fig. 17 External appearance of a drill after making 35 holes

系の影響なども考慮する必要があるものと考えられる。

また、加工穴形状からみた適正切削条件やドリル先端形状の影響、切削油剤の効果なども今後の研究課題としてあげられる。

5. 結 言

微小径ドリル用 NC ボール盤、および切削力計を製作し、ドリル径 0.2 mm 、 0.3 mm について穴あけ加工を行った。本報告で得られた結果は以下のとおりである。

(1) 高速度工具鋼 (SKH 9 種) ルーマンク型ドリルの場合、被削材 SS 41 に対して適正切削条件は

a) ドリル径 $D=0.2\text{ mm}$ では切削速度 $V=5\sim6\text{ m/min.}$ ドリル径に対する1回転当りの送り速度の割合 $\alpha=1.0\%/rev.$ 程度である。

b) ドリル径 $D=0.3\text{ mm}$ では切削速度 $V=8\sim9\text{ m/min.}$ ドリル径に対する1回転当りの送り速度の割合 $\alpha=1.5\%/rev.$ 程度である。

(2) 被削材 SS 41 と SUS 304 は、切削速度とスラストの関係では同じような傾向を示した。また、黄銅 (C 2801 P) は切削速度に関係なくスラストは一定であった。

(3) 切削力のスラストを検出し、設定値と比較することによりドリルの折損を防止できるシステムを構成した。

(4) ドリルの突出しを可能な限り短くし、ステップフィードサイクルにおける1ステップ目を低い送り速度にし案内穴をあける程度にすることにより安定した加工ができることがわかった。

おわりに、本実験を進めるに当たり、東北大学科学計測研究所の菅原先生から貴重なご助言を頂いた。ここに感謝の意を表するものである。

参考文献

- 1) 機械振興協会技術研究所加工技術データファイル, 4
(1979) 002 N00.
- 2) 阿部邦夫, 菅原 章, 岩淵健二: 微小径ドリルによる
難削材 (sus 631) への穴あけ, 高エネルギー物理学
研究所技術研究会報 (1983).
- 3) 菅原 章: 小径ドリルによる精密穴加工, 機械の研究
第37巻第3号 (1985).
- 4) 柳 和久, 千島立男, 星野英夫: 微小径ドリルによる
数値制御穴あけ加工, 長岡技術科学大学研究報告第5
号 (1983).