曲がり制御深穴あけ法の開発*

(ピエゾ素子を用いた制御パッド駆動法による変位機構と変位能に及ぼす諸因子)

田口 紘一^{*1}, 明石 剛二^{*1}Control System for Axial Deviation of Holes in Deep Drilling
(Deviation Mechanism and Various Factors for Deviation Ability
with Control Method of Using Piezo Actuator)

Koichi TAGUCHI and Kouji AKASHI

Axial deviation of holes is a serious problem in deep drilling operation. As the results, the control system for axial deviation of holes in deep drilling was developed. The guide-pad on the new drilling tool head, the control pad, slightly moves up and down by piezo actuator in radial direction with each tool revolution. The axial deviation of the tool head is measured by in-process sensing system with laser and corner cub prism. This paper presents the development of the control method of pad using piezo actuator and the axial deviation mechanism by control pad is clarified. And it is verified various factors for deviation ability.

Key Words: Deep Drilling, Deviation of Holes, Control Pad, Oil Clearance, Piezo Actuator

1. 緒言

昨今、深穴加工の分野においても、高精度特に曲がりの少ない真直度のよい深穴の加工が要求されるようになってきているが、現状の加工技術では加工途中の工具先端の姿勢制御がなされていないため、かなり大きな曲がり誤差を生じる場合がある。たとえば、直径100mm、深さ5mの穴加工では最深部の穴の半径方向位置誤差は数mmを覚悟しなければならない。

著者らは深穴加工における、穴の曲がり誤差をなくするために、案内パッドの作用に注目し、加工中に工具の進行方向を制御できる工具ならびに制御システムの開発を行ってきている。すでに加工中の工具先端位置の光学的オンライン測定法および工具の進行方向を制御できる特殊カム機構を有するくさび式パッド駆動

法工具を開発し、加工中の工具先端位置測定法とその修正機構を連動させ、目標軸へ向かって加工穴を強制シフトさせることができている^①。

本研究では、実用化の第一歩としてBTA方式深穴あけ盤により穴径60mmの加工を行う場合に生じる曲がりを $\pm 0.05\text{mm}$ の許容範囲内に収め、なおかつ修正シフト機構をより実用化し易い機構とするために、特殊カムを有するくさび駆動方式に対して、積層型ピエゾ素子を用いた方式に変更するとともに、制御パッド法による曲がり制御深穴加工における工具半径方向および軸方向の変位機構を明らかにし、曲がり制御の変位能に及ぼす因子を求めた。

2. くさび式パッド駆動法の問題点

図1にくさび式パッド駆動法工具を示す。本くさび式パッド駆動法では実用化に対し、次のような不利な点がいくつかある。

* 原稿受付 1998年1月9日。

*¹ 正員, 有明工業高等専門学校(☎836-8585 大牟田市東萩尾町150)。

- 1) くさび駆動のための制御バーを内蔵させたため、シャンクが二重になる。そのためシャンク内の切りくず排出路が非常に狭くなること
 - 2) 深穴になる程、制御バーの剛性が低下するので主軸台後方からのバー駆動量、力、応答性が非常に不安定であり、遅れが大きいこと
 - 3) くさびでは微少量の駆動精度を求めることが難しいこと
- などである。

Fig.1 Tool head

そこで実用化し易い機構として、積層型ピエゾ素子をパッドの下に設け、素子の電圧による伸縮を利用することを考えた。

3. 穴シフトのメカニズム

図2に半径方向に関する変位機構を示す。図において工具の制御パッドは半径方向に微少に出入りできるようになっている。図は加工しながら工具を右にシフトさせる場合を示している。

同図(a)において切れ刃が右にきたときに、反対側にある制御パッドを δ だけ押し出し、工具先端部を右に移動させると切れ刃は右側の壁を δ だけ過切削する。

同図(b)のように工具が半回転し、切れ刃が左側にきたときに制御パッドを引き込める。パッドには切削力が加わっているので、パッドを引き込めた分だけ右に寄ることになる。1回転の修正量を小さくし、連続的に行えば、穴径をほとんど変化させることなく加工位置を目的方向へ移動させ得る。

次に加工の進行に伴う、軸方向の変位機構を明らかにするため、工具先端部における穴加工時の状態を工具先端位置と穴軸断面形状により検討した。

Fig.2 Deviation mechanism (radial)

Fig.3 Pad driving amplitude δ , Oil clearance C and Back taper ζ

図3にパッド駆動量 δ 、オイルクリアランス C および工具のバックテーパ ζ を示す。

図4はパッド駆動量およびバックテーパ($\delta = C/4$, $\zeta = 0.5$)を誇張して描いている。

- ① 加工始めにおいて(同図(a))、回転角 0° で制御パッドが δ だけ押し出されることにより、切れ刃はその δ 分だけ加工穴壁に食い込んで削ることになる。半回転してパッド駆動量が0になった時に制御パッドは δ の食い込みにより拡大された穴面には当たらず、それ以前にあけられた穴壁に接することになり、この位置での余分の切り込みや切り残しはない。
- ② 加工深さ L が $(C - \delta / \zeta)$ に達するまでは、(同図(b))①の状態が続く。
- ③ L が $(C - \delta / \zeta)$ を越え C に達するまでは、半回転した時、制御パッド先端が①において加工された斜面に接するようになるので、その分半回転側に切り残しを生じる。(同図(c))

- ④ L が $(2C - \delta/\xi)$ (同図(d)) を越えると、半回転側に切り残した斜面上に、制御パッドが乗り上げるので、さらにその乗り上げた分だけ 0° 側の穴壁を過切削することになる。
- ⑤ L が $2C$ に達した時 (同図(e))、半回転側に切り残し分 δ だけ制御パッドが乗り上げるので、 0° 側は新たな δ の食い込みにより、加工始めから計 2δ だけ 0° 側の穴壁に食い込んでいる。
(すなわちシフトしていることになる)
- ⑥ L が $(3C - \delta/\xi)$ に達した時の状態 (同図(f)) は、 L が $(C - \delta/\xi)$ (同図(b)) の時と同じである。

したがって、加工穴は加工深さ L が $2C$ ごとに δ だけシフトされることになる。すなわち、穴のシフト加工中の傾斜は ϕ は次式のように表される。

$$\phi = \delta / (2C) \quad \dots (1)$$

式 (1) は、図解より明らかなように $\delta/\xi \leq C$ の範囲で成立する。また、 $\delta/\xi > C$ の場合、穴壁面に直角な段が発生し、特に $\delta/\xi > 2C$ では外周切れ刃が全域にわたって当たることになるが、穴のシフト加工中の傾斜は式 (1) に従うことになる。

4. ピエゾ駆動式工具システムの設計

4.1 制御システム 図5にピエゾ素子を用いた駆動システムを示す。工具先端位置測定法は、工具先端部に装着したコーナキューブプリズムに当てたレーザの反射光の位置変位をポジションセンサー (PSD) により X, Y 方向の電圧変位として感知する。それをアンプ・A/D 変換ボードを通して計測用パソコンに取り込む。それと同時に主軸後方に取り付けた円板に設けたスリットとフォトインタラプタで主軸の回転位置を感知する。

プログラムでは、これらの信号により工具の先端位置変位量と変位方向の計算を行い、加工始めの基準位置からの変位が、ある一定の値を超えたときに、RS232C によって制御用パソコンへ変位方向値を送り、工具回転に合わせて変位を戻すための正弦波駆動電圧を発生させる。それをピエゾドライブ装置で増幅してピエゾ素子を駆動させる。このピエゾ素子の伸縮により、切れ刃に対し反対側位置にある制御パッド (このパッドと切れ刃外周で工具の直径が定義される) が半径方向に工具回転に合わせて正弦波駆動することによって、工具回転軸に対し傾斜した方向に穴加工できる。

Fig.4 Deviation mechanism (axial)

Fig.5 Control system

4.2 ピエゾ駆動式工具ヘッド 制御を行わず加工実験を行うと、穴深さ 100mm につき 0.2~0.3mm の曲がりが発生する。この曲がりを制御するための駆動パッドの必要制御量は目標軸から外れるのを戻さなければならぬので、シフト加工中の穴の傾斜は曲がり量以上、実用的にはその2倍程度は必要である。

式(1)より ϕ を 0.6/100, C を 5mm とすると δ は 60 μm となる。ピエゾ素子の伸びは長さ 1mm 当たり 1 μm 程度であるので、直接駆動パッドを動かすためには、長さ 60mm の素子が必要になり、これを直径 60mm の工具の半径方向に組み込むことはできない。そこで、パッドの直接駆動ではなく、変位の増幅機構を持ったものを設計した。

図6に増幅機構を持たせた駆動パッド部を示す。10mm 角 20mm 長のピエゾ素子を2個軸方向に直列に並べ、変形してこの機構でピエゾ素子の軸方向伸びを半径方向変位に変増幅しようとするものである。

電圧によってピエゾが伸び、左端のボルトを押すと左端から長さ L の位置にあるヒンジ部を支点にして駆動パッドが上方に動く。 L はピエゾに接しているボルトの端からヒンジ部までの距離で、ボルトの中心からヒンジ部支点までの高さ H (10.5mm) の2倍(21mm), 2.5倍(26mm), 3倍(31.5mm)のものについてその性能を実験した。

L による変位の変化を表1に示すが、荷重 100N の場合、およそピエゾの伸びの L/H 倍の伸びが得られた。パッドの駆動量は約 80 μm 程度であり、実用上 80 μm の駆動量が得られれば十分であると考えられる。

試作工具では L を 25.4mm とし工具設計をした。図7に工具ヘッド形状を示す。

くさび形式からピエゾ形式に変更したことにより、ヘッド内部の切りくず排出空間は普通の BTA 工具とほとんど同じにできる。シャンク部もくさび形式のように2重管にしなくてよかったため、切りくず排出空間が大きくなった。

5. ピエゾ駆動式工具の評価

穴加工後の形状を測定するために、図8に示すような測定システムを用いた。測定管の先端に測定子(ひずみゲージを貼付した板ばね)を取り付け、テーブルを送ることにより加工穴形状の測定を行った。

図9に増幅機構を有する工具による穴加工中に目標軸を変更した場合の加工穴形状を示す。

Fig.6 Control pad with amplitude mechanism

Table1 Relation between the distance of supporting point and displacement of pad

Load $F=100\text{ N}$			
distance of supporting point L	displacement at 150V $\delta 150$	L/H	$\frac{\delta 150}{32} \times 1$
21.0 mm	65 μm	2.0	2.0
26.25	85	2.5	2.7
31.5	100	3.0	3.1
Load $F=300\text{ N}$			
21.0 mm	63 μm	2.0	1.9
26.25	59	2.5	1.8
31.5	60	3.0	1.9

*1 $\delta 150/32 : \delta 150$ divided by 32,
32:extension of piezo at 150V (no-load)

Fig.7 Tool head

Fig.8 Measuring system

250mm で 1.65mm のシフトが得られている。すなわち 100mm あたり約 0.7mm のシフトが可能であり、実際の穴加工の曲がりを想定しても十分なものである。

図 10 には曲がり制御システムを用いた穴あけ加工の実験結果を示す。制御内容は穴加工開始後 100mm の深さでの工具先端位置を基準にして、PSD で工具先端位置を測定し続け、X,Y 方向のどちらかの値が基準値より $\pm 0.05V(0.05mm)$ を越えた場合に、変位のベクトル方向と反対方向へシフト運動を開始する。

すなわち、X 方向または Y 方向が許容範囲を外れると制御が開始され、基準位置における許容値内に戻ると制御が終了することが繰り返し行われている。

加工深さ 250mm で強制的に制御を中止させ 50mm 加工を行った。制御を行っていないため穴は下方へ向かっている。再び制御を開始すると基準軸に沿った穴あけを行う。500mm で制御を終了させた。

本加工実験では穴深さを穴径の 10 倍までとしたが、さらに深い穴でもレーザ光の広がりによる制限は受けるが、シフト加工能力は穴深さに関係しないと考えられる。

また、工具径を 100mm にすることによって、レーザ光の広がりを考慮しても、穴深さ 5 m までは十分に適用できると考えられる。

穴壁面の形状については、穴シフトのメカニズムによれば壁面に段々ができることになるが、パッド駆動量およびバックテーパーを適切な関係にすることで、ほとんど問題にならないようにでき、またこの種の工具では案内パッドでのバニシ作用^②もあるので、加工表面粗さに大きな影響を与えることはないと推測される。加工実験でも穴壁面には明白な段は確認できなかった。

6. 曲がりの変位能に影響を及ぼす因子

曲がり制御に影響を与える因子を検討するため、基礎実験を行った。基礎実験は工具回転式深穴加工ができるように往復台上の工具台を取り外し、代わりに工作物取付台を設置した旋盤を用い、下穴のある加工物を曲がり制御カウンターボーリングすることで行った。切りくずは下穴を通して前方に排出した。

図 11 は目標軸を変更し、強制的に新しい目標軸へシフトさせた実験結果の加工穴形状を示す。

加工深さ 100mm でシフト量は 0.83mm であり、理論値とほぼ一致する。

Spindle speed:360rpm,Feed:10mm/min
Tool diameter:60mm,Work material:AC3A

Fig.9 Deviation of machined hole when changing the target axis

(a) Detected value by sensing system

(b) Machined hole with control system

Spindle speed:360rpm,Feed:10mm/min
Tool diameter:60mm,Work material:AC3A

Fig.10 Deep drilling with control system

図 12 はパッドの駆動量を変化させて強制シフトを行った結果を示す。

図 13 はオイルクリアランスを変化させた実験結果を示している。オイルクリアランスも小さくなると、シフト量が大きくなっている。これは軸方向変位機構で示される理論値とかなりよく一致している。

また、理論式には出てこないが、切削送りによる影響も検討した。図 14 に切削送りを変化させた場合の変位に対する結果を示す。切削送りは変位能にあまり影響を及ぼさないことが示された。

7. 結 言

ピエゾ素子を用いた曲がり制御深穴あけ法を確立させるために、制御パッド駆動量を増幅させる機構を有する工具を開発・試作した。その効果を確認するため、曲がり制御深穴あけ加工に試作工具を適用した。さらに、曲がり制御による穴のシフト機構理論を明らかにするとともに、曲がり制御の変位能に及ぼす諸因子の検討も行った。

本研究での成果を以下に示す。

- 1) ピエゾ駆動方式に変更することにより、くさび駆動方式に比べ、切りくず排出空間・応答性などが改善できた。
- 2) パッド駆動量を増やすための増幅機構を開発し、強制シフト加工実験の結果、実際の穴加工における曲がりを想定しても十分制御可能なことが確認できた。
- 3) 穴径 60mm に対して、設定した基本軸に沿って $\pm 0.05\text{mm}$ の許容誤差範囲で曲がり制御を行うことができた。
- 4) 制御パッドの操作による穴の変位機構を明らかにした。

変位量は理論的に $\delta / (2C)$ となる。

δ : パッド駆動量 C : オイルクリアランス

- 5) 変位能に大きく影響を及ぼす因子はパッド駆動量のほか、オイルクリアランスの量であることが分かった。また、切削送りによる変位能へ及ぼす影響は小さい。特に、穴の曲がりの変位能に関して、オイルクリアランスが大きな影響を与えることから、工具設計に対して新しい指針が得られた。

文 献

- (1) 田口・近藤・松野・明石・佐久間,
機論, 56-524, C, (1990), 1017-1021
- (2) 佐久間・田口・甲木,
機論, 46-403, C, (1980), 327-334

Fig.11 Hole profile when change of target axis

Fig.12 Relation between pad driving amplitude and deviation

Fig.13 Relation between oil clearance and deviation

Fig.14 Relation between cutting feed and deviation