深穴加工における穴の曲がり (第1報)*

——アライメント誤差の影響——

佐 久 間 敬 三** 田 口 紘 一*** 甲 木 昭 雄**

Axial Deviation of Hole in Deep Drilling
(1st Report)

—Influence of Misalignments in
Drilling System—

Keizo SAKUMA, Koichi TAGUCHI
and Akio KATSUKI

The deep-hole axis deviates from the setting axis in drilling operations, and this dominant problem occurs frequently. In the present paper, the influence of pilot bush, bar support and tool holder (or spindle) on the hole deviation is investigated and the mechanism of the formation of that deviation is analysed theoretically and verified experimentally. It is made clear that the machined hole tends to deviate towards the direction of the inclination of tool head in tool rotating system. It is also observed that if the pilot bush or bar sup-

port (e. g. oil seal in BTA tool) deviates from the setting axis, the bar bends, makes the tool inclined, and as a result, the machined hole runs out from the setting line. If the process goes on, the rate of deviation becomes larger. On the contrary, in workpiece rotating system, the inclination of tool head usually doesn't keep any constant direction on the co-ordinates fixed to the workpiece. So it will move nearly through the setting axis even if there is any misalignment. Therefore the magnitude of hole-deviation is smaller than that in tool rotating system.

Key words: deep drilling, hole accuracy, axial deviation of hole, influence of misalignment, mechanism of formation of hole deviation, pilot bush, bar support, tool-rotating machining, work-rotating machining.

1. 緒 言

深穴の加工精度として、穴径、表面粗さ、真円度があり、既報^{1)~3)}でいくつかの影響因子について述べてきた。しかし深穴加工（ガンドリルやBTA方式の加工など）独特の問題となる穴精度に真直度および目標軸からの偏心誤差がある。すなわち穴の「曲がり」あるいは「倒れ」とも称されるものである。特に加工深さ/直径比(l/D)の大きな深穴になると加工先端位置の目標からの変位量が大きくなり無視できなくなる。この加工穴の曲がりや倒れの因子として、機械主軸・工具軸・案内ブッシュなどのアライメント不良、工作物食付面の傾き、取付け時の変位、工作物形状および工作物材料の不均質など⁴⁾⁵⁾があると見られているが、各因子の影響する機構はもちろん加工穴偏心量へ及ぼす影響の程度など具体的な面に関しては従来、報告はほとんどなされていない。また工作物回転・工具送り方式の方がその逆の工具回転・工作物送り方式よりも加工穴の曲がりが少ないというこ

とも経験的には知られているが、その機構あるいは原因についても明らかでない。

本研究では穴の曲がりについて、その傾向を調べ、穴が曲がる場合の工具姿勢の変化を考察し、工作機械のアライメント誤差による穴の曲がりの機構を明らかにし、関連して工作物回転と工具回転方式の差異についても言及している。

2. アライメント誤差と切削始めの工具姿勢

深穴工具はシャンクが長いので曲げ剛性が非常に小さく、食付き始めにおいて切削荷重を工具シャンクで支えることは困難である。このため加工箇所にはブッシュを置き、工具にかかる半径方向切削分力を支えなければならない。工具の種類にはロングツイストドリル、ガンドリル、BTA方式工具などがあるが、ガンドリル、BTA工具は基本的には一枚刃で、工具ヘッドの外周に半径方向切削力を支えるための案内パッド部が設けてあり、半径力はこの案内部が自らの加工穴に接することにより支えられる。

ガンドリルでは中空シャンクより工具先端へ切削油を供給し、切りくずとともに外側V形溝と加工穴壁で囲まれたすきまを通して排出されるため、加工穴入口にはブ

* 原稿受付 昭和57年12月18日。昭和55年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和55年9月30日）にて発表。

** 正 会 員 九州大学工学部（福岡市東区箱崎6-10-1）

*** 正 会 員 有明工業高等専門学校（大牟田市東萩尾町150）

(a) Gun drilling (Tool rotating system)

(b) BTA system drilling (Work rotating system)

Fig. 1 Deep hole drilling machine

シュとともにその後方に切りくず箱 (Chip box) が設けられる。BTA 方式工具では刃部外周から給油するので加工穴入口には油圧ヘッドが取り付け、いずれも工具は先端ブッシュ部と後方のオイルシール部で支えられる。

したがって工作機械のアライメント精度として、工具駆動軸、工具軸、ブッシュ中心、オイルシール中心が一直線上にあること、および工作物送り方向がそれに平行なことが必要である。これらのどれかに誤差があると、工具シャンクは曲げられ、工具ヘッドは加工始めにおいて目標軸からはずれたり、傾いたりする。たとえば案内ブッシュが偏心している場合、工具ヘッドは後出図 4 (a) のように目標軸からはずれると同時に工具シャンクは曲げられるため軸に対して傾く。

3. 実験方法および装置

深穴加工機械： 直径 25 mm までの ガンドリル加工および BTA 方式のソリッドボーリング加工の両者へ可能のように研究用に設計された深穴加工機を用いた。本機は図 1 の略図に示すように、ベッド、主軸台、テーブルおよび油圧ヘッド (ブッシュ台) からなる。工作物回転方式で加工を行う場合には主軸に取り付けたチャックで工作物端をつかみ、他端をブッシュ台で支える。工具はテーブル上に取り付けられ、送り運動を行う。工作物固定、工具回転方式の場合は逆に主軸に工具を取り付ける。ガンドリルの場合は主軸後方より主軸穴を通して切削油の供給を行う。BTA 方式ではいずれの場合も油圧ヘッド

Fig. 2 Measuring method of alignment

Fig. 3 Geometry of workpiece

より給油する。

アライメントの測定： 機械のアライメント測定はこの研究の目的上特に重要であり、精度よく測定せねばならない。先端にインジケータを取り付けた円筒を主軸につかみ、それを回転させて測定する方法は、インジケータの自重によるたわみがかかなり大きく、十分な精度を期待できない。そこで著者は図 2 に示すような円筒の先端に板ばねを設け、それにひずみゲージを貼り、先端のたわみ量をゲージのひずみ量で測定する測定具を考案した。先端の板ばねは軽いので、測定具全体のたわみが少なく、拡大率も高い。また板ばねの自重による影響はこれを一端固定、他端単純支持、長さ l のはりと考えると固定端より $0.25l$ の位置では等分布荷重によるひずみ量は 0 となるので、この位置にひずみゲージを貼ることにより、板ばねの回転による自重の影響を最小にすることができる。製作した測定具の自重による理論的たわみ量は $0.6 \mu\text{m}$ 、感度は 0.86×10^{-6} ストレイン/ μm 、記録紙上で約 500 倍の拡大率で使用した。この測定具を主軸に取り付け、主軸軸心と油圧ヘッドのブッシュ穴、オイルシール部 (BTA 工具ではこれが中間サポートとなる) の偏心量を測定した。工作機械の主軸とテーブル移動方向の平行度および加工中のテーブルの傾きは微小であった。

加工穴の真直度の測定： 穴の曲がりや倒れを測定するために、図 3 に示すように工作物に 4 つの基準面を設け、各断面の基準面からの穴位置を測定した。加工穴深さは 200 mm とし、加工後 50 mm ごとに工作物を切断し、定盤上に基準面を接して乗せ、電気マイクロメータで 5 mm ごとに両基準面から穴壁までの厚さを測定することにより穴中心を求め、入口を基準として軸方向の穴中心の変位をプロットした。

(a) Misalignment of pilot bush

Deviation of pilot bush : A : -97 μm , B : +93 μm ,
 Tool : 20 mm dia. Gndrill, Shank length : 695 mm,
 Spindle speed : 1600 rpm, Feed : 0.04 mm/rev,
 Work material : S35C.

(b) Experimental and theoretical values

Fig. 4 Influence of positional error of the pilot bush on hole deviation for tool rotating system

4. 実験結果

4.1 ブシュ偏心の影響

工具回転軸に対してブシュ軸が偏心している場合 (図4) の穴の曲がりへ与える影響を調べた。工具にはグンドリルを使い、ブシュ台 (チップボックス) をスピンドル軸に対して約 100 μm 偏心させる。この場合装置の構造上ブシュ台は平行移動となるが、後方の油切りは ± 0.5 mm 程度の半径方向の自由度があり、実験の偏心量の範囲ではこの油切りが工具シャンクの支点となるおそれはない。またブシュ軸もスピンドル軸に対して平行に偏心し、したがって工具先端はブシュに進入したときに傾いているが、ブシュと工具のクリアランスの関係からブシュにより工具先端の傾きが拘束されることはない (10 μm のクリアランスがあるとき、工具が傾き得る角度は $\pm 3 \times 10^{-4}$ rad, ブシュを 100 μm 偏心させたときの工具の傾きは 2.2×10^{-4} rad)。測定し得ないほかの因子の影響を後で除くことができるようにブシュ台は水平方向に機械の手前側 (+) と向こう側 (-) に各々約 100 μm 偏心させて実験した。

実験結果を図4(b)に示す。図は入口より 5 mm の深さの穴位置を基準としてスピンドル軸に平行な軸からの偏心量を示したものである。明らかに加工穴はブシュ偏心方向へ傾いていることがわかる。図中の理論値については後述する。なお垂直面内ではブシュの偏心がなくても常に上向きの偏心が認められた。

4.2 パーサポートの偏心

この実験用機械で BTA 工具による穴加工を行う場合、圧力ヘッド後方のシャンク挿入部は O リングで油漏れを防いでいる。この O リングは強く工具シャンクに締め付けられており、シャンクの支点となっている。この O リングの偏心の影響について調べてみた。偏心の設定は圧力ヘッドがブシュ保持部と O リングの取り付けられている圧力油導入部とに分割される構造になっているのを利用し、O リングのみを水平方向に偏心させブシュはそのままとした。

図5に実験結果を示す。工具回転の場合、加工穴は O リングの偏心方向と逆の方向に傾いていることがわかる。またその傾きは深さとともにわずかながら大きくなっている。しかし工作物回転の場合は加工穴の曲がりは少なく、O リングの偏心の影響は現れていないように見える。

5. 穴の曲がり機構

5.1 工具回転方式の場合

ブシュやパーサポートに偏心があると加工穴の曲がりが生じ、それは工具回転の場合にはっきりと現れることが実験よりわかる。工作物回転方式の場合については次節で検討することとし、ここでは工具回転方式の場合についてブシュおよびパーサポートの偏心と加工穴の曲がり機構について考えてみる。

ブシュやパーサポートが偏心していると、工具シャンクは曲げられて支持されることになり、シャンクの回転はその曲げられたシャンクの軸心のまわりに回転することになる。すなわち曲げられた姿勢を維持しながら回転するのであって、なわとび運動にはならない。シャンク先端の工具ヘッド部は工具回転の際工作物の目標軸に対し常に一定方向を向いたまま回転する (図6参照)。この状態で工具ホルダ部が目標軸に沿って微量送られると、工具ヘッド部はその傾いた軸方向に微量移動することになる。すなわち加工始めにおいて初期の工具ヘッドの傾き i_0 の方向に穴がけられる。そのため加工が進むにつれ工具ヘッドの目標軸からの偏差は増大するので、それに伴い傾きも増大する。つまり加工穴の目標軸に対する傾斜は加工が進むにつれ大きくなる。次に各場合の曲がり機構の理論計算式を求め実験値と比較してみ

(a) Tool bend caused by deviated bar support

A & B : Tool rotating method,
C & D : Work rotating method

Deviation of bar support : A : 110 μm , B : -100 μm ,
C : 93 μm , D : -111 μm ,

Tool : 20 mm dia. BTA sys. tool, Shank length : 695 mm,
Spindle speed : 1600 rpm, Feed : 0.06 mm/rev,
Work material : S35C.

(b) Experimental and theoretical values

Fig. 5 Influence of positional error of the bar support on hole deviation **Fig. 6** Inclination and deviation of tool head caused by deviated bush

る。

ブシュ偏心の場合: Galloway⁶⁾はツイストドリルにおいて加工始めに偏心した穴がけられた場合, ドリルが曲げられ, その傾きの方向に加工が進むとし, ドリルと加工穴のクリアランスが大きくドリルが加工穴の拘束を受けずに曲がる場合(工具先端が単純支持状態)についてはのたわみの式より工具先端の進路を解析している。深穴工具での加工においてもブシュが δ_B だけ偏心していて食付位置がずれる場合について考えると, もし加工穴が工具径より大きくけられたり先端の案内パッドが短くて, 先端部の傾きが加工穴壁に拘束されな

い状態の場合は上記の Galloway の解析が適用される。すなわち工具先端の傾き i_0 (図4(a))は軸荷重 P を考慮して次式で表される。

$$i_0 = \frac{\delta_B}{L} \left\{ \frac{3}{2} + \frac{1}{40}(kL)^2 + \frac{1}{8400}(kL)^4 \right\} \quad (1)$$

$$k = \frac{4.493}{L} \sqrt{\frac{P}{P_c}}$$

P : 軸荷重, P_c : 座屈荷重

kL が小さい時(実際, シャンク長さ・直径比 L/d が30程度ならば微小である),

$$i_0 = \frac{3}{2L} \delta_B \quad (2)$$

加工穴は工具先端の傾きの方向に向かってあけられ, かつ工具先端は常に単純支持状態を保つとすれば, 加工深さ Z_n における穴底の目標軸からの変位 δ_{nn} (図6)は

$$\delta_{nn} = \delta_B e^{3Z_n/2L} \quad (3)$$

しかし加工穴と工具径のクリアランスが小さい(実際, 縮小穴がしばしば加工される)と工具ヘッドは外周面のマージン部と案内部のバックテーパーが小さいため加工穴の傾きに拘束される。この場合工具先端は単純支持の状態ではなく上記 Galloway の解析はあてはまらなくなり, 工具剛性が弱い場合には工具先端は加工穴に沿うことになる。すなわち加工穴入口部の穴の傾斜に工具が沿い, それが持続されることになる。この場合の加工深さ Z_n に対する変位量 δ_{nn}' は次式で表され, 加工穴は彎曲しない。

$$\delta_{nn}' = \frac{3}{2L} \delta_B \cdot Z_n + \delta_B \quad (4)$$

すなわちブシュ偏心に対して工具は加工穴に拘束された方が穴の変位量が小さい。このことは工具設計ではマージン部, 案内パッドの軸方向長さを大きくすることや, バックテーパーを小さくすることが有効となると考えられる。実際問題として拘束が完全でない場合は式(3), 式(4)の中間の値となるであろう。図4に式(3), 式(4)による理論値を併記しているが, この場合加工穴径は $-5 \mu\text{m}$ 程度の縮小穴が加工されており, 式(4)に近い一定の傾きを持った穴が加工されている。

バーサポート偏心の場合: バーサポートに偏心 δ_s がある場合も図7に示すように工具シャンクは曲げられ, したがって工具ヘッドは傾斜する。これを一端固定(工具ホルダ部), 他端単純支持(工具先端)およびバー支持部のあるはりと考えると, バー支持部および工具先端のたわみと工具先端の傾きの関係が求められる。すなわち穴深さ Z_n 加工時の工具先端の傾き i_n は次式で表される。

Fig. 7 Tool-bend caused by the deviated bar support

$$i_n = \frac{1}{2A} \left[\frac{\{2L^2(l_1 - Z_n) - A\}(3A\delta_{hn} + 6\delta_s L^3)}{(l_1 - Z_n)\{2L^3 - (1 + \frac{3(l_2 + Z_n)}{2(l_1 - Z_n)})A\}} - 6\delta_s L^2 \right] \quad (5)$$

$$A = 2L^3 - 3L^2(l_2 + Z_n) + (l_2 + Z_n)^3$$

ここで、 L : シャンク長さ、 l_1 : 加工始めにおける工具ホルダとサポート間距離、 l_2 : 同ブシュとバーサポート間距離、 δ_s : バーサポート偏心量、 δ_{hn} : 穴深さ Z_n 加工時の工具先端の偏心量。

バーサポートの偏心量 δ_s および工具先端の初期値 δ_{ho} (ブシュ偏心量) を与えると、次式により工具先端の軌跡すなわち加工穴の曲がりが出る。

$$\delta_{hn} = \delta_{hn-1} + i_{n-1} \Delta Z \quad (6)$$

ここで、 ΔZ : 微小工具移動量。

縮小穴が加工されて工具ヘッドが加工穴の傾きに拘束される場合は、

$$\delta_{hn}' = i_0 Z_n \quad (7)$$

ここで、 i_0 は式 (5) において $Z_n = 0$ の時。

図5の実験結果は案内部長さの短いBTA工具が使用され、また拡大穴があげられているため式(6)に近い外側にそりを持った穴が得られている。

5.2 工具回転方式と工作物回転方式の相違

工作物回転方式の方が工具回転方式よりも真直度が良いという報告はよくなされているが、その機構は明らかにされていない。ここでは両方式の加工穴真直度へ与えるアライメントの影響の相違について考察した。

目標軸に対して工具軸が傾斜しているとして加工穴が目標軸に対して傾斜してあげられるための工具姿勢を考えてみると、工作物基準の座標系に対して常に一定の方向に工具が傾いている必要がある。すなわち図8に示すように工具回転方式では工作物が静止しているので工具は一定方向の傾き、工作物回転では工作物の回転に伴い工具の傾きの方向の変化が要求されることがわかる。このことをアライメント誤差にあてはめると、例えばバーサポート偏心の場合(図5)、工具回転方式の時は工作物軸に対して工具先端は一定方向の傾きを維持するので、その傾きの方向に穴が加工される。しかし工作物回転方式の時は工作物基準の座標系に対してバーサポートの偏

Fig. 8 Condition for hole deviation from the setting axis

(a) Attitude of tool in the system with bar support

Tool : 20 mm dia. BTA tool, Work material: S35C, Spindle speed : 1600 rpm, Feed : 0.06 mm/rev.

(b) Deviation of drilled hole versus deviation of pilot bush

Fig. 9 Influence of pilot bush deviation on hole deviation with work rotating system

心方向は工作物の回転とともに変化することになる。すなわち工具のそれでゆく方向が定まらないことになる。したがって工具はバーサポート偏心による傾きを維持したまま工作物の回転軸に沿って進む。

図9に工作物回転方式において回転ブシュの回転軸とブシュ穴軸に偏心がある場合について示す。一般に深穴加工ではブシュは工作物に密着させるので工作物回転方式では回転ブシュ、工具回転方式では固定ブシュとなる。工作物回転軸、ブシュ回転軸および工具ホルダのアライ

Fig. 10 Misalignment of tool

メントは正しいとしてブシュ穴に偏心があると、工具は目標軸から偏心した場所に傾斜して食い付く。そして工作物回転とともにブシュも工作物に密着して同速度で回転するので工作物基準の座標系では常に一定方向の変位と傾きを保つことになり、加工穴の変位は工具回転方式と相対的には同じ理論(式(3), 式(4))が当てはまる。

5.3 各部のアライメント誤差の影響

前述の原理に従い各部アライメント誤差の穴の曲がりへの影響を考えてみると、まずブシュに関してはブシュ穴に偏心や傾きがある場合(工作物回転の時はブシュ回転軸に対して穴中心が偏心や傾きを持っている場合)、ブシュに案内される工具先端の偏心や傾きは工作物系座標軸に対して一定方向になるので加工穴の曲がりが生じる。一方工具に関しては回転軸に偏心がなければ、工具取付けに偏心や傾きがあってもそのための工具軸の曲がりとは工作物系座標軸に対して方向性を持たないので加工穴の曲がりの原因とならない(図10)。パーサポートの偏心については工具回転の場合は穴の曲がりに影響し、工作物回転の場合は影響しないことになる。

以上のことより工作物回転方式ではアライメント誤差はほとんど加工穴の曲がりに影響を与えず、わずかにブシュ穴の偏心が加工穴を曲げさせる原因となる。このことが工作物回転の方が加工穴の曲がりが少ないということの主な理由であろう。

6. 結 論

主軸、工具、ブシュおよびパーサポートのアライメン

ト誤差が加工穴の曲がりへ与える影響について、実験と理論解析を行い、次の結論を得た。

- (1) アライメント誤差により工具先端が工作物系座標に対して常に一定方向に傾斜させられる場合、その加工穴は工具先端の傾斜方向にあげられ目標軸からそれる。
- (2) 工具回転方式の場合、ブシュやパーサポートの偏心により工具が曲げられた状態にある時、穴は工具先端の傾きの方向に加工されるが、加工中工具先端の傾きが変われば加工穴は曲がる。
- (3) 穴の拡大量により工具先端の傾きが加工穴壁に拘束されるか否かにより理論的に差があり、実験結果もその傾向が見られる。
- (4) 工作物回転方式の場合、アライメント誤差による工具の傾きは工作物系座標に対して方向性を持たない場合が多く、その場合は加工穴の曲がりには生じない。
- (5) 工作物回転方式でも始めに穴が偏心して加工されるとその偏心量が是正されることはない。
- (6) 工具の取付誤差(偏心や傾き)は加工穴の曲がりに直接的には影響しない。

文 献

- 1) 佐久間敬三, 田口紘一, 甲木昭雄: ソリッドボーリング工具(BTA方式)による深穴加工の研究——工具の挙動と加工穴の形状, 精密機械, **44**, 9 (1978) 1111.
- 2) 佐久間敬三, 田口紘一, 甲木昭雄: ソリッドボーリング工具による深穴加工の研究(工具案内部のバネ作用と加工穴精度への影響), 日本機械学会論文集, **46**, 403 (1980) 327.
- 3) 佐久間敬三, 田口紘一, 甲木昭雄: ソリッドボーリング工具(BTA方式)による深穴加工の研究——工具案内形状の加工精度へ及ぼす影響, 精密機械, **46**, 8 (1980) 1009.
- 4) 中村健三ほか: 穴加工ハンドブック, 切削油技術研究会 (1979) 336.
- 5) B. J. Griffiths: Axial Hole Runout during Deep Drilling (Self Piloting Drilling), Proc. 2nd Int. Conf. Deep Hole Drilling and Boring, (1977) 1.
- 6) D. F. Galloway: Some Experiments on the Influence of Various Factors on Drill Performance, Trans. ASME, **79**, (1957) 191.