深穴加工における穴の曲がり*

— 曲がり抑制型BTA方式工具の開発 —

甲木 昭雄*¹ 鬼鞍 宏猷*¹佐久間敏三*²Development of BTA Tools to Reduce Axial Hole Deviation
in Deep Hole Drilling

Akio KATSUKI, Hiromichi ONIKURA and Keizo SAKUMA

The influences of guide pad length of a BTA tool, a longitudinal groove on a rake face of a gun drill and additional rear guide pads of a BTA tool on axial hole deviation are examined. Two new tools to reduce the axial hole deviation are designed, and one of them is produced and used in the experiment to examine the effects. As a result, the following are clarified. The guide pad length is little related to the hole deviation. The longitudinal groove on a rake face of a gun drill reduces the axial hole deviation. The additional rear guide pads of a BTA tool reduce the axial hole deviation. Three rear guide pads are more effective than four in improving hole accuracy. As the new BTA tool is complex in shape and difficult to produce, sufficient accuracy in shape could not be obtained. Therefore, the desired effect that the axial hole deviation is reduced by this tool was not apparent.

Key Words: Cutting, BTA Boring Tool, Gun Drill, Guide Pad Length, Additional Rear Guide Pads, New Tools.

1. 緒 言

深穴加工工具（BTA方式工具、ガンドリル、ロングドリル）に関するこれまでの研究から、穴の曲がりが少ない工具を製作するためには、工具にかかる切削力をできるだけ減らすかバランスさせれば良いが、穴拡大量は、逆に、大きくなる傾向にあることがわかった^{1)～3)}。

穴の曲がりを減らし、穴拡大量も小さくするためには、工具にかかる半径力をできるだけ小さくし、何らかの方法で工具の半径方向の動きを拘束すればよい。この1つの方法として、切れ刃すくい面上に凸部を作る方法がある⁴⁾。

さらに理想的な工具として、工具にかかる主分力方向の力もバランスさせれば、穴の曲がりが減ると考えられる。この工具として二枚刃ガンドリルがあるが、ガイド部が小さいために、穴拡大量が大きくなる⁵⁾。

工具にかかる切削力の合力をある程度バランスさせ、穴の曲がりおよび穴拡大量も小さくできる工具として分割型BTA方式工具がある⁶⁾。

またボーリングバーにかかる軸力を減じるという点からスラストもできるだけ小さくなるように製作することが好ましい^{7)～9)}。

本研究では、工具の半径方向の動きを止める効果があると考えられる、ガンドリルすくい面上の溝の効果および工具の案内作用を高めると推定されるBTA方式工具の後方案内部の効果について調べる。そのうち、穴の曲がりが少なく、穴拡大量、真円度、表面粗さが良くなるような工具の設計について述べる。

2. ガンドリルのすくい面上の溝の効果

曲がりの少ない工具の開発のため、標準ガンドリルの切れ刃に縦に溝を施した工具を用いて穴加工を行い、縦溝が加工穴精度、特に穴の曲がりに及ぼす影響について調べた。

2・1 実験方法 使用工具：標準ガンドリル（SG）、凹型ガンドリル（VG）（図1）。工具材種はSG工具が超硬K10で、VG工具が超硬のK10～K20に相

* 原稿受付 平成元年12月5日。

*¹ 正員、九州大学工学部（〒812 福岡市東区箱崎6-10-1）。*² 正員、（〒813 福岡市東区八田3-4-5）。

当するものである。

実験はすべて工具回転、工作物送りで行った。切削条件は $N=2200\text{rpm}$ 、 $f=0.04\text{mm/rev}$ で切削油として不溶性硫化塩素化油 (DS50, JIS2種13号) を使用した。油圧および油量はそれぞれ 5.0MPa 、 24L/min であった。工作物は S35C (HB175) を使用した。

切削力は SG 工具の場合モデルバイトで、VG 工具の場合シャンクの一端に切れ刃部を固定した工具で動

力計 (佐藤マシンナリ AST-TTM6709) を用い普通旋盤 (大阪工作所製, 360HB-X) で切削実験をして求めた。

2.2 実験結果および考察 図2に2種のガンドリル (SG, VG) で穴加工を行ったときの穴の曲がりを、図3に切れ刃にかかる切削力を示す。

SG 工具はむく材の時の X 方向の穴の曲がりは少ないが、偏肉材の場合、薄肉の影響を強く受け、+X 方向へ曲がる。一方 VG 工具は、むく材のときも偏肉材のときもほぼ同じ方向へ曲がり薄肉の影響が少なくなっている。一方、穴の曲がりに影響を及ぼす半径力は SG 工具より VG 工具で大きくなっている (図3)。半径力 F_R の増加にもかかわらず、VG 工具で、X 方向

図5 切りくず形状

穴の曲がり（偏肉材でのX方向穴の曲がりの平均値からむく材の場合を差し引いた値）が小さいのは、切れ刃上の凹部が工具の半径方向の動きを拘束しているためと推定される。

穴の曲がりを減らすためには溝をアベックスポイント近くに配置し半径力の増加が起こらないようにすることが好ましい。

穴拡大量、真円度、表面粗さはV G工具の方がS G工具より悪くなっている（図4）。これは、V G工具での切りくずの分断が困難となり、穴壁をいためたためと考えられる。図5に切りくずの写真を示す。V G工具では切りくずが長くなっている。

3. B T A方式工具の後方案内部の効果

B T A方式工具やガンドリルで l/d （穴長／穴径）が非常に大きい工具ではボーリングバーやシャンクが自重の影響を受けてたわみ、穴の曲がりを増加させる¹²⁾。このためB T A方式工具ではリングをいれてバーのたわみを防いでいる。ガンドリルに関してはヘッドのかかなり後方にガイドを設置することによってシャンクのたわみを減らし穴の曲がりが減少したという報告がある¹³⁾。

したがって、B T A方式工具ヘッドの後方に案内部を設けると工具の姿勢が一定に保たれ案内効果が増加すると考えられる。この効果を調べるために次の二つの項目について調べた。始めに、標準B T A方式工具で、案内部を削ぎ落とし短くして実験し、どれほどの長さで案内効果が失われるか調べた。次に、マージンおよび案内部を標準工具より短くし、後方に案内部を設けると案内効果がどれほど増加するかを調べた。標準B T A方式工具（S T）の後方に案内部を設けて実験した方が好ましいが、マージンおよび案内部の短い工具を用いて調べたのは現在使用している装置では長いガイドブシュを使用できず案内部を長くできなかったためである。使用したガイドブシュの長さは38mmである。

3・1 案内部長の影響

3・1・1 実験方法 標準B T A方式工具（S T）（図8（a）でマージン長 $M=10\text{mm}$ 、案内部長 $l_G=16.5\text{mm}$ ）の l_G が穴の曲がりに及ぼす影響を調べるために、第一、第二の両案内部を標準の長さ $l_G=16.5\text{mm}$ から6.0、2.5、0.85mmに削ぎ落としながら実験をした。工具材種は超硬P10である。

実験は工具回転・工作物送りとし回転数 $N=1600\text{rpm}$ 、送り $f=0.06\text{mm/rev}$ で行った。切削油は不水溶性硫化炭素油（ユシロカットDS50、JIS2種13号）を使用し、

油量 73L/min 、油圧 2.2MPa とした。被削材はS35C（HB170）で、穴加工後一部が薄肉（ $t=3\text{mm}$ ）となる材料も使用した。

3・1・2 実験結果 図6に、案内部長 l_G と穴の曲がりの関係を示す。X-Y座標での穴の曲がりの方向は第一象限にあり、偏肉材の場合、むく材より+X方向（薄肉側）となっている（図6（a））。図6（b）は、各案内部長において、むく材のX方向曲がりの平均値を $X=0$ にとりそこからの偏肉材における穴の曲がりを示す。また、図6（c）は、むく材の穴の曲がりの絶対値を示す。

全体的にグラフの傾向をみると、 $l_G=16.5\text{mm}$ までは

(a) X-Y座標における穴の曲がり

(b) X方向曲がり (c) $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$

図6 案内部長 l_G と穴の曲がりの関係（測定長は200mm）

図7 案内部の当たり

案内部の長さが変わっても穴の曲がりに変化がない。
 $l_G = 2.5\text{mm}$ で穴の曲がりが小さくなっているが、つねにこのようになるという根拠はない。

案内部の当たりを調べてみると図7のようになる。
 図7は $l_G = 6.0\text{mm}$ の実験の後、工具の摩耗状態をスケッチしたものである。この当たりから判断すると、案内部長 l_G が 2.0mm より小さくなると第一案内部で面圧が高くなる。穴の曲がりに直接影響するのは、穴の曲がりのメカニズムから判断すると、第二案内部であるので、 $l_G = 0.85\text{mm}$ の場合も極端な変化はない⁴⁾。

ここではマージンを削いでいないが、マージンの長さも案内部と同様短くすれば穴の曲がりに変化が生じ

ると考えられる。このことは3・2項の案内部および案内部の短い工具での実験で加工穴の曲がりが大きいこと、マージンの後方に案内部を追加すると工具の安定性が高まり穴精度が良くなることから推定される。

3・2 後方案内部の影響

3・2・1 実験方法 標準型BTA方式工具(S：案内部長およびマージン部長がそれぞれ $l_G = 7.8\text{mm}$ 、 $M = 5.9\text{mm}$ で標準工具より短い)と後方案内部付きBTA方式工具を使用した。後方案内部付きBTA方式工具では、S工具の後方に4個(A工具)または3個(B工具)の案内部を設置し、直径すきまを各々4種類変えた(図8)。切れ刃および案内部の材種は超硬P20を使用した。

切削条件は回転数 $N = 1600\text{rpm}$ 、送り $f = 0.06\text{mm/rev}$ で切削油として不水溶性硫化塩素化油(DS50, JIS2種13号)を使用した。油圧および油量は 2.3MPa 、 83L/min とした。

(b) 後方案内部付きBTA方式工具(AおよびB)

図8 BTA方式工具

図9 後方案内部の穴の曲がりに及ぼす影響

図10 X, R方向における穴の曲がり

工作物はS35C(HB175)である。実験は、工具回転、工作物送りで行った。

3・2・2 実験結果

(1) 穴の曲がり 図9に測定長200mmにおける穴の曲がりを入力を原点としてX-Y座標で示す。いずれの工具でも穴はY方向へ60~100 μ m曲がり、偏肉材の場合、薄肉の方向(+X)へ曲がっていることがわかる。A、Bタイプおよび直径すきまの影響を明らかにするため、各直径すきまにおいて、むく材のX方向の曲がりの平均値をX=0とし、そこからの偏肉材でのX方向の穴の曲がり ΔX を図10(a)に、穴の曲がりの絶対値RおよびX方向のみの曲がりをむく材に関して図10(b)、(c)に□、△印で示す。いずれの値も各工具で穴あけした2~3個の穴の曲がりの平均値である。

図10(a)は、各工具の薄肉の影響の受け易さを示す。したがってA工具が最も薄肉の影響を受けることになる。加工穴は、入口付近で比較的加工軸に平行であるが、すぐに指数関数的に曲がっていく。図9および図10(c)からS工具ではむく材の場合、-X方向へ大きく曲がっていることがわかる。A、B工具と同じブシュで同一条件で実験を行っているため、S工具では食い付き時に、ブシュによる案内が十分に行われなかったものと推定される。一方、A工具の場合X=-5 μ m、近傍B工具の場合X=-10 μ m近傍になっている。

Rに関しては、S工具が大きく、A、B工具で小さい。S工具との差は、直径すきまがA工具の20 μ m以下とB工具の30 μ m以上で大きい(図10(b))。

(2) 穴拡大量、真円度、表面粗さ 穴拡大量は、A工具とB工具を比較した場合、A工具が小さく精度よい穴があいている(図11)。B工具では直径すきまが小さくなると拡大傾向の穴があく。S工具では縮小穴があいている。

真円度は、薄肉部が弾塑性変形する偏肉材の場合が、むく材より悪く、むく材に関しては、直径すきまが小さくなるほど悪くなっている(図12)。真円度が悪くなるのは、後方案内部が常に穴壁をパニシするようになり、工具に無理な力がかかるため工具の半径方向の振動が大きくなることによるものと考えられる。

表面粗さRaは0.5~0.7 μ mで工具による差は明らかでなかった。

(3) 案内部の当たり 実験終了後、後方案内部の当たりを調べてみると、A工具では図8(b)で、G5が最も強く、続いてG6になっている。したがって、加工時に工具は、切れ刃にかかる主分力によって

G1の先端を支点にして傾き、半径力によってG2の先端を支点にして傾くものと推定される。この当りは直径すきまが増すにつれて小さくなる。B工具でも、G4の当たりが最も強く、直径すきまが増すにつれて小さくなる。

しかし、他のG3、G5では、直径すきま7 μ mの工具でG5にかすかな当たりがみられるが、直径すきまが17 μ m以上になると、ほとんど当りはみられない。

切れ刃が材料に食いつく時、A、B工具の案内部はすでにブシュの中に入っている。これらのことから、後方案内部が切れ刃の食い付き時や加工中に穴精度に重要な役割を果たしていることがわかる。

4. 新型高能率工具

前記および既報¹⁾の実験から切れ刃すくい面に凹部や凸部を設けるとそれらが工具ヘッドの半径方向の動

図11 穴拡大量

図12 真円度

図13 新BTA方式工具 (NT)

図14 新BTA方式工具 (写真)

きを拘束し穴の曲がりが減ることがわかった。また、工具にかかる切削力をバランスさせれば穴径は拡大ぎみになるが穴の曲がりが減ることもわかっている。スラスト力は小さくなるほど穴の曲がりが減る傾向にある。これらのことを基底とし、既報^{9)~10)}および文献(9)、(10)を参考にし新しい工具を設計製作した。

図13に新しく開発したBTA方式工具の設計を、図14に製作した工具の写真を示す。工具にかかる切削力を、切れ刃を2枚対称につけることによってバランスさせる。切削力がバランスすることによって生じる工具の不安定性を切れ刃上の凸部と凹部およびガイド部でとめるようになっている。また、スラストを減じるためにチゼル部を除いている。

標準BTA方式工具(ST)と新二枚刃BTA方式工具(NT)の比較実験を行う。

4・1 実験方法 主軸回転数 $N=1600\text{rpm}$ (切削速度 $V=100\text{m/min}$)、送り量はST工具で $f=0.04\text{mm/min}$ 、NT工具で $f=0.08\text{mm/min}$ で切れ刃一枚当たりの送りを同じにした。切削油はユシロンカットDS50(JIS2種13号)で、油圧2.2MPa、油量73L/minで同じである。

4・2 実験結果

4・2・1 穴の曲がり 図15に加工穴の曲がりを示す。図15(a)はX-Y座標における穴の曲がりを示す。加工穴はすべて+Y方向へ曲がる傾向にある。この原因としてはボーリングバーの自重の影響、オイルプレシャヘッドから高圧の油を供給する際ボーリングバーにかかる油圧の影響、アライメントの影響などが考えられる。

図15(b)は、むく材における穴のX方向の曲がりの平均値を原点とし、その位置からどれほどX方向へ曲がっているかを示す。新二枚刃BTA方式工具(NT)が標準BTA方式工具(ST)よりばらつきが大きくなっている。

図15(c)のRは、むく材では両工具ともほぼ同じ大きさであるが、偏肉材の場合NT工具で大きくなっている。

NT工具で穴の曲がりが減らない原因の一つに、製作が困難なため工具の加工精度が十分でないことが上げられる。

図16にガイド部先端近くでの二つのマージンおよび二つのガイド部の配置を示す。真円度測定器で調べたものであるが、切れ刃での径が案内部の径より24 μm 小さくなっている。このため先行する切れ刃であけられた穴が後続するガイド部で押し広げられる結果となる。すなわち工具の穴壁からの拘束力が非常に増

加し穴の曲がりが大きくなっていることが推定される。

4・2・2 穴拡大量、真円度、表面粗さ 穴拡大量、真円度、表面粗さをそれぞれ図17、図18、図19に示す。

穴拡大量に関してNT工具はST工具よりばらつきおよび平均穴拡大量で幾分悪くなっている。この穴拡大量は案内部が無理に先行切れ刃によってあけられた

図15 穴の曲がり

図16 切れ刃および案内部の配置状況

小さい穴にはいるため工具が不安定な動きをし穴が拡大気味になったものと推定される。

ここで、NT工具の案内部と穴拡大の関係について調べてみる。二枚刃ガンドリルで鋼材S35Cを切削速度 $N=1600\text{rpm}$ 、送り $f=0.12\text{mm/rev}$ で穴加工した場合穴拡大は平均値で約 $50\mu\text{m}$ と大きかったが穴の曲がりもX方向で $\pm 50\mu\text{m}$ 以内であった。この二枚刃ガンドリルにはチゼルはあるがガイド部はマージンだけである。NT工具では穴の曲がりも $-125\sim 90\mu\text{m}$ で、穴拡大量はばらつきを除いた△印と▲印のすべての値の平均値は

図17 穴拡大量

図18 真円度誤差

図19 表面粗さ

図20 加工穴表面

$12\mu\text{m}$ で工具径に近い。したがって、広い案内部が穴拡大の減少に寄与しているものと推定される。

真円度および表面粗さに関しては、ST工具とほぼ同じ精度が得られる。

図20に加工穴を粗さ計でトレースした結果を示す。ST工具での加工面が平滑であるのに対し、NT工具での加工面にはうねりが生じている。すなわちNT工具ヘッドのガイド部が先行切れ刃による小さな穴に無理にはいつていることがわかる。

図21に切りくずの写真を示す。NT工具の切りくずはいくぶん長めになっている(図21(b))。これは、図14で切れ刃マージン後方の上部から切削油の一部が工具の中へ逃げるため刃先近くに十分な切削油が行かず切りくずにかかる圧力も十分でなかったためと推定される。切りくずは送りを高めると折れ易くなり小さくなるものと考えられる。

(b) NT工具

図21 切りくず形状

図22 段付きBTA方式工具

5. 段付きBTA方式工具

穴の曲がりを抑制する効果があると推定される工具として、さらに次のような段付きBTA方式工具が考えられる(図22)。この工具は先行するBTA方式ヘッドでパイロットホールを作り、後方ヘッドで穴を所定の大きさに拡大する構造となっている。先行する切れ刃と後方切れ刃の長さは両者にかかる主分力をバランスさせるため同じ長さに設計している。

薄肉部に穴をあける場合、先行ヘッドの部分がガイドの役割を果たし、穴が曲がりにくい。また、材料に硬度むらがある場合も、先行ヘッドまたは後方ヘッドがガイドの役割を果たすことになり、穴の曲がりは標準BTA方式工具と比較して小さいと推定される。

この工具は本研究室で実験可能な直径20mmの寸法では、製作が困難であった。しかし、直径が40~50mmの寸法では製作可能である。

6. 結 論

(1) ガンドリルの切れ刃すくい面に長手方向に溝をつけると工具の半径方向動きが拘束され穴の曲がりを減じる効果がある。

(2) マージンの長さ($M=10\text{mm}$)を一定とし、第一、第二案内部($\phi G=16.5\text{mm}$)を削いで短くしても穴の曲がりへの影響はほとんどなかった。

(3) マージンおよび案内部の短い工具($M=5.9$, $\phi G=7.8\text{mm}$)の後方に案内部を設けると穴の曲がりが減じた。また、後方に3個設けた場合が4個設けた場合より良好であった。

(4) 開発した新BTA方式工具は切れ刃間で測った直径が案内部間で測った直径より $24\mu\text{m}$ 小さく製作され、先行する切れ刃であけられた穴が後続する案内部で押し広げられる結果となった。このため工具の穴壁からの拘束力が非常に大きくなり、実験結果では穴の曲がりの減少は確認されなかった。

終わりに、実験用工具を提供し、新BTA方式工具または段付きBTA方式工具の製作に御尽力いただいた日本冶金会社、ユニタック会社、東芝タンガロイ会社、日本ピーターエー会社に深く感謝致します。

また、当時学生で実験に協力された明石忠雄氏(トヨタ自動車会社)、井浦嗣彦氏(京セラ会社)にお礼申し上げます。

文 献

- (1) Sakuma, K., Taguchi, K. and Katsuki, A., Self-Guiding Action of Deep-Hole-Drilling Tools, Annals of the CIRP, 30, 1(1981), 311.
- (2) 佐久間・田口・甲木, 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 —, 精密機械, 49-10(1983), 1379.
- (3) 田口・甲木・佐久間, 深穴加工における穴の曲がり(第2報) — 工作物形状の影響 —, 精密機械, 50-10(1984), 1634.
- (4) 甲木・佐久間・田口・鬼鞍, ほか2名, 深穴加工における穴の曲がり — 工具形状の影響(一枚刃と複切れ刃) —, 機論, 53-486, C(1987), 471.
- (5) 甲木・佐久間・鬼鞍, 深穴加工における穴の曲がり — 切れ刃形状の影響 —, 機論, 54-502, C(1988), 1350.
- (6) 甲木・鬼鞍・佐久間・田口, 深穴加工における穴の曲がり — 工具形状の影響(案内形状) —, 機論, 56-524, C(1989), 1010.
- (7) 甲木・鬼鞍・佐久間・田口, 深穴加工における穴の曲がり — ボーリングバーの影響 —, 機論, 56-527, C(1989), 1951.
- (8) 甲木, 鬼鞍, 佐久間ほか2名, 深穴加工における穴の曲がり — 傾斜端面および肉厚の影響 —, 機論, 56-531, C(1989), (掲載予定).
- (9) Stürenburg, H.O., Möglichkeit zur Verringerung der Mittenabweichung beim Tiefbohren mit Einlippen-Tiefbohrwerkzeugen, Industrie Anzeiger, 105-96, (1983), 64.
- (10) DeVries, M.F., Croscheck, M.K. and Negishi, H., An Investigation of the Cutting Mechanisms of the New Point Drill, Annals of the CIRP, 37, 1(1988), 73.