TiN コーティングドリルによる純チタンの微細穴加工の切削挙動

櫻井 恵三*・澤井 猛*・李 林英**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 55, No. 5 (2005), pp. 204-209

Cutting behavior of TiN coated micro-drills in microscopic hole drilling of pure titanium

Keizo SAKURAI*, Takeshi SAWAI* and Linying LI**

In this study titanium nitride coated high speed steel drills of diameter 0.3 mm are employed to clarify the behaviors of titanium coated micro drill during the drilling of minute holes, the geometrical relationship between the cutting edge and feed, wear of the cutting edge, chip shape, cutting edge movement in quick stop test and burr shape are investigated. Results reveal that a plane about 10 μm in diameter exist at the cutting edge of a micro drill at the portion connecting the face and the flank, and that the edge of this plane is responsible for the cutting action. The cutting mechanism is indicative of the resulting large negative rake angle created across the entire cutting edge which as is evident in the study greatly influences chip shape, cutting edge wear and peeling off of the coating layer.

(Received September 27, 2004)

Keywords: micro-drill, titanium, microscopic holes, chip shape, cutting mechanism

1. 緒 言

紡糸ノズル、燃料噴射ノズル、油圧部品などの穴あけは、高精度で高品質な穴内面品位を要求されるため、マイクロドリルによる加工が主流である。また、使用される材質は、耐熱性、耐食性、耐摩耗性などを考慮して、チタン、ステンレス、Ni 基合金などの難削材が使用されるようになってきている¹⁾。このような難削材の穴あけには、通常のドリル加工と同様にマイクロドリル加工においても、生産効率向上のためコーティングドリルや超硬ドリルが用いられている。

通常のドリル加工においては、HSS に TiN コーティングを施したドリルは、超硬ドリルやダイヤモンドコーティングドリルなどに比べて安価で、かつステンレス鋼のような延性の大きな難削材の穴あけに適している²⁾。また、ステップ送り加工や増減送り加工³⁾などの切削温度の上昇が抑制される加工法では、チタンおよびチタン合金の穴あけにも TiN コーティングドリルを用いると、HSS ドリルに比べてドリル寿命が大幅に延びることが明らかにされている⁴⁾。その一方で、コーティングドリルは、コーティング膜によって切れ刃の丸みが増し⁵⁾、鋭さが損なわれることにより切れ味が鈍化することが指摘されている。ただし、通常のドリル加工では、送り量に比べて切れ刃の丸みが無視できるほど小さい。そのため、TiN コーティングによる耐摩耗性の向上や摩擦係数の低下などの効果の方が大きく現れるため各方面で多用されている。

しかし、マイクロドリルは、その強度的な制限から送り量が約 0.5~2 μm と極めて小さく、切れ刃稜の鋭利さは通常のドリルに比べて相対的に劣るものと考えられる。このような

マイクロドリルにコーティングを施した場合の切削挙動に、上述のような通常のドリル加工の切削理論をそのまま適用することはできない。

そこで、マイクロドリルに TiN コーティングを施した場合、通常のドリル加工のように切削性能を向上させる効果があるのかを明らかにするため、各種ノズルに多用されるようになってきた純チタンを被削材とし、直径 0.3 mm の HSS 材に TiN コーティングを施したドリルを用いて穴あけを行い、チタンのマイクロドリルによる微細穴加工の切削挙動について検討したので報告する。

2. 実験装置および実験方法

穴あけ実験には、マイクロドリル加工専用開発した CNC 高速微細穴加工機を使用した⁶⁾。また、刃部の観察には、走査型電子顕微鏡 (JEOL 社製 JSM-5300) およびレーザ顕微鏡 (キーエンス社製 VK-8500) を用いた。

また、実験には市販ドリルを用い、その材質は HSS (SKH55) に TiN コーティングを施したもので、Table 1 にドリル各部の形状・寸法を示す。なお、TiN コーティング膜の

Table 1 Drill dimensions

Drill diameter	0.3 mm
Overall length	25 mm
Flute length	1.9 mm
Point angle	118 deg.
Helix angle	27 deg.
Major cutting edge length	0.1 mm (about)
Web thickness	0.07 mm (about)

* 大阪産業大学工学部機械工学科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)。Department of Mechanical Engineering, Osaka Sangyo University (3-1-1 Nakagaito, Daito-shi, Osaka 574-8530).

** 大阪産業大学大学院 (大東市)。Graduate School, Osaka Sangyo University (Daito-shi, Osaka).

Table 2 Cutting conditions

Rotational speed	20,000 min ⁻¹
Feed per revolution	1.0 μm/rev
Drilling depth	1.0 mm
Cutting fluid	dry, wet

Table 3 Mechanical properties of workpiece

Tensile strength	351 MPa
Yield strength	233 MPa
Elongation	48%
Hardness	149 HV

Table 4 Chemical composition of workpiece (mass%)

N	C	H	Fe	O	Ti
0.003	0.008	0.0016	0.035	0.038	99.91

硬さは、2200HV（メーカーのカatalog値）である。

Table 2 に切削条件を示す。また、被削材は、2種 TP340C (JIS H 4600) の純チタン材で表面あらし 0.4Ra の長方形板材 (25×50mm, 厚さ 1.0mm) を用いた。**Table 3**, **Table 4** に被削材の機械的性質および化学組成をそれぞれ示す。

3. 実験結果および考察

3.1 切れ刃稜と切れ刃直角断面からみた切取り厚さの関係

Fig. 1 に使用前のマイクロドリルを樹脂に埋込みドリル軸に平行な面で切断・研磨し、切れ刃部の断面をレーザ顕微鏡によって撮影した写真を示す。なお、この切断箇所は、比較的外周部に近い部分を示している。この図から、切れ刃にはすくい面から逃げ面につながる部分に A, B で示すような約 10 μm の幅をもつ平面（以後、この面を稜面と呼ぶ）が存在することが判明した。

Fig. 2 は、同図 (a) に示す円で囲んだ箇所の切れ刃稜面をすくい面側から斜め方向に撮影した SEM 写真を同図 (b) に示す。SEM による観察の結果、同図 (b) に示すようなほぼ一定幅の稜面の存在がドリル外周部からチゼル近傍までの切れ刃全般にわたって確認された。このことから、切れ刃稜と被削材との接触状況を幾何学的に考察すると次のようになる。

Fig. 3 のモデル図に示すように、ドリルのねじれ角が 27°, 送り量が 1.0 μm/rev（正味切取り厚さ 0.43 μm）であることを考慮すると、同図 (a) に示すドリル外周部近傍（①-①断面）では被削材と切れ刃稜面との接触は、**Fig. 1** から推定すると実質のすくい角が約マイナス 75° 程度と考えられ、上述の切取り厚さを考慮すると切りくずが通過する際、エッジ B 点に比べてエッジ A 点に強い接触力が作用すると考えられる。また、ドリル中心に向かうほど見掛けのすくい角が小さくなるので切れ刃長さの中央部近傍（②-②断面）では強い接触力の作用点が B 点方向に移動していき、AB 面で接触力を均等に受けるようになる。さらに、チゼル近傍の切れ刃部（③-③断面）では見掛けのすくい角がマイナスとなり、B

Fig. 1 Laser microscope photograph showing cutting edge (vertical view against cross section).

(a) Illustration of TiN coated HSS drill.

(b) SEM photograph

Fig. 2 SEM photograph showing cutting edge plane.

点近傍に強い接触力が作用する。このように今回用いたような切れ刃稜面をもつドリルでは、切取り厚さから考えて切れ刃先端部の稜面やそのエッジが切削作用に直接かかわって

Fig. 3 Illustrations in cutting process of respective cross-section of the cutting edge.

Fig. 4 SEM photograph showing flank and cutting edge after 1 hole.

と考えられる。

なお、Fig. 1は、白黒写真なので判別が不明瞭であるがカラーの原画で測定した結果、TiNコーティング膜厚は約2~3 μm であった。

3.2 ドリル逃げ面摩耗およびすくい面摩耗

Fig. 4は、乾式で1穴加工後の切れ刃部を逃げ面側から撮影したSEM写真である。切れ刃中央部にエッジAおよび稜面によって切削されたと思われる切りくずの付着が観察される。一方、ドリル切れ刃逃げ面全般にわたって摩耗痕がほとんど見られない。このことから、幾何学的な考察をしたように、稜面を構成するエッジ部および稜面が切削に関与しているものと考えられる。

Fig. 5は、不水溶性油剤を点滴法で給油しながら乾式と同一の切削条件で300穴加工後、同図(a)中の円で囲った外周コーナ部を逃げ面側から撮影したSEM写真を同図(b)に示す。なお、給油法に点滴法を採用したのは、切削油剤を被

(a) Illustration of TiN coated HSS drill.

(b) SEM photograph of outer corner.

Fig. 5 SEM photograph showing flank wear after 300 hole.

削材表面に点滴すると表面張力により油溜まりが形成し、切りくずが排出されるときに加工穴内部が負圧となり油剤が加工穴内部に吸引され、潤滑効果が向上するためである⁷⁾。

同図から、外周部の逃げ面側のコーティング膜が大きく脱落し、基材のHSSが現れていることが確認される。この原因は、送り量が1 $\mu\text{m}/\text{rev}$ すなわち1刃の正味切り取り厚さは理論上0.43 μm であり、コーティング膜の厚さ2~3 μm より小さい。このような微小送り領域では比切削抵抗も大きくなることから⁸⁾、Fig. 4に示す外周コーナ部の切削速度はとくに速く、Fig. 3(a)で示したように外周コーナ部の稜面A点側エッジに切削抵抗が集中し、コーティング膜と基材との密着強度を超える負荷が膜部に作用し、大きく剥離したのと考えられる。

これらのことから、微小送り領域での加工に耐えるコーティングの最適な膜厚を追及することは、今後重要な課題になる。

一方、Fig. 6は乾式で一穴加工後の切れ刃稜をすくい面側から撮影したSEM写真である。図からわかるように、切れ刃の稜面に切りくずの付着が観察されるがすくい面に切りくずが擦過した痕がまったく見られない。これはFig. 1からもわかるように、すくい角は外周部近傍では実質的に約マイナス70°~75°と大きな負のすくい角となっており、稜面のエッジA、Bおよび稜面全体で切削が行われるため被削材表面を切削するというよりは、稜面のエッジによって被削材表面を掘起こすか、またはウェッジを形成するような切削機構⁹⁾で

Fig. 6 SEM photograph showing face after 1 hole.

(a) SEM photograph of chip.

(b) High magnification SEM photograph of figure (a).

Fig. 7 Example of SEM photographs of chip.

あることが、この図からも証明される。

3.3 切りくず形状

Fig. 7 の SEM 写真は、加工時に排出された切りくずの一例を示す。同図 (a) よりわかるように、切れ刃の長さとはほぼ同じ約 $100\mu\text{m}$ の一定幅のジグザグ形の切りくずである。

前述のように、今回用いたドリルのような刃部での切削は、切れ刃外周部からチゼル近傍まで、切れ刃稜面のエッジ A, B および稜面で切削されるため、見掛け上は外周部から中心部に沿ってすくい角は小さくなる。しかし、上述のように実質上は、切れ刃全長にわたって負のすくい角による被削材表面を掘起こすか、ウェッジを形成するような切削と考えられる。

Fig. 8 SEM photograph showing of chip form (Case of carbide drill with drilling).

一方、マイクロドリルは、その剛性を高めるため心厚が直径の約 $1/3$ を占め、溝空間が通常のドリルに比べて非常に狭い。このような狭い溝空間を薄くて延性の大きな切りくずが通過する場合、排出抵抗が大きく後から来る切りくずがその上にた積みこまれ、ほぼ一定幅のジグザグ形の切りくずとなったものと考えられる¹⁰⁾。

Fig. 7 (b) は、同図 (a) の A 部を拡大したものである。切りくずのすくい面側は、滑らかな面であり稜面のエッジ部で切削されたものと思われる条痕が認められる。また、自由面はチタンの切りくず特有の鋸歯状をしているのがわかる。

同図から切りくずの厚さはほぼ $10\mu\text{m}$ 程度であり、このような薄い切りくず厚さの切削においては、その切削消費エネルギーから考えて切削温度の上昇はほとんど考えられない。チタンの穴あけに TiN コーティングドリルを用いることは、通常のドリルと同様なコーティング効果が発揮されているといえる。しかしそれに反し、切れ刃稜におけるコーティング膜厚が切削挙動に大きく影響を及ぼしていることがわかった。

そこで、このような切りくず形状になる原因が切れ刃稜のコーティング膜厚の影響によるものかを確かめるため、切れ刃形状はコーティングドリルと異なるが、切れ刃のもっと鋭利な超硬ドリルを用いて同一切削条件で穴あけを試みた。そのとき排出された切りくずの SEM 写真を Fig. 8 に示す。典型的な円すいらせん形切りくずである。このことから、通常のドリルと同様の効果を求めてマイクロドリルにコーティングを施すと、コーティング膜厚が切れ刃の丸みに比べて相対的に大きくなり、切れ味が鈍化するなど、切削挙動に大きく影響を及ぼしていることが明らかになった。

一方、コーティングドリルによる穴あけ実験では、各種の回転数で予備実験を行ったが、回転数が 25000min^{-1} 以上になるとドリル折損が激しくなり、穴あけが急速に困難になることを確かめている。これは、実質的には負のすくい角による切削機構となるため回転数の増大に対して切削抵抗が急激に増す。さらに回転数が増すことにより切りくずの排出抵抗が増大し、切りくずの折りたたみが起こりやすくなり、切りくず詰まりを起し折損するものと考えられる。したがって、このようなコーティングドリルの場合は、切削速度を速くすることはあまり得策でないと思われる。

3.4 急停止実験

さらに切削機構を詳しく検討するため、切削の急停止実験

(a) SEM photograph of whole cross section during drilling with quick-stopping device.

(b) High magnification SEM photograph of cutting edge.

Fig. 9 SEM photograph of cross section during drilling with quick-stopping device.

を行った。急停止実験はつぎのような方法で行った。被削材を穴あけに影響を及ぼさない程度の力でジグに固定し、穴あけ開始からドリルが被削材中央部まで切削する時間を目安に、被削材側に衝撃を加えドリルを折断する方法で切削を急停止した。その後のドリルと被削材を樹脂に埋込み、主切れ刃にほぼ垂直でドリル軸に平行な面で切断した。

Fig. 9 は、ドリル半径のおよそ 1/2 の位置で切断した断面の SEM 写真を示す。すなわち、切れ刃長さの中央部近傍の切断面である。同図 (a) からドリル溝に Fig. 7 で示したような折りたたみ形の切りくずが排出される様子が確認される。また、同図 (b) は、主切れ刃部近傍を拡大したものである。急停止実験の衝撃で刃先が被削材から少し離れているが、同図の矢印部 (図中の下部に示す黒色の矢印) に被削材と切れ刃稜面が接触していた凹状のくぼみが確認される。

このくぼみ側面には、切削方向に向かって傾斜が観察され、負のすくい角 (実質上は、エッジ B および稜面によるすくい面の角度) で切削が行われていたものと考えられる。

前述の超硬ドリルのような鋭利な刃部で切削が行われる切削機構と異なり、Fig. 9(b) のように実質上、負のすくい角で切削されると被削材表面が掘起こされ、すくい面前方に盛上がり生成され、そこからクラックが生じる。さらに切れ刃が進行するとすくい面下に滞留層が生成され、切れ刃のよ

Fig. 10 SEM photograph of cross section during drilling with quick-stopping device (near chisel edge corner).

(a) Inlet burr

(b) Outlet burr

Fig. 11 Examples of SEM photographs of drilled hole and burr shape (1st hole).

うに作用し、切れ刃の進行とともに前方に排出され切りくずとなる^{9),11),12)}。前方に押出された切りくずは、見掛上のすくい面をほとんど擦過することなく溝空間や穴周壁の拘束を受けてジグザグ形の切りくずとなったものと考えられる。

Fig. 10 は、チゼル部近傍の切れ刃の切断面写真を示す。同図から明確に被削材とエッジの接触点は判別できないが、ドリル送り角度が大きくなることと送り量が $1 \mu\text{m}/\text{rev}$ であることを考慮すると、切りくず生成は切れ刃稜面のエッジ B 部で行われていると考えられる。また、切りくずの断面もほぼ $10 \mu\text{m}$ の厚さの折りたたみ形であることがわかる。

3.5 穴出入口のばりの形状

Fig. 11 は、穴の入口部および出口部に生成したばりの SEM 写真を示す。一般に延性材料の通常のドリル加工においては、ドリル出口部のばりが入口部より数十倍大きくなるが、今回用いたマイクロドリル加工では入口部にも大きなばりが生成した。同図に示す入口部のばりの最大高さは約 $14 \mu\text{m}$ 、出口部のばり最大高さは $20 \mu\text{m}$ であった。

このように入口部に大きなばりが生成する理由は、ドリル切れ刃全体が被削材に入るまでの間に、これまで述べたように、実質的には稜面のエッジおよび稜面によって切削され、負のすくい角による切削となるため、被削材表面が掘起こされる。切れ刃全体が被削材に入るまでは、穴周壁の拘束がないため、切りくずが穴の外周部へ押出されることによって、このように大きなばりが生成されるものと考えられる。

以上のことから、今回用いた市販の TiN コーティングドリルのように、切取り厚さと比べて無視できないような切れ刃に稜面を有するドリルによる切削は、切れ刃の稜面およびエッジが切りくず生成に関与し、切れ刃全長にわたって、実

質的には負のすくい角となる切削機構であることが明らかとなった。

4. 結 言

HSS (SKH55) に TiN コーティングを施した直径 0.3mm のマイクロドリルを用いて純チタンの微細穴加工を行った結果次のような結論を得た。

(1) 今回用いたマイクロドリルのように、切取り厚さと比べて無視できないような大きさの切れ刃稜面をもつドリルの切削は、切れ刃の稜面およびエッジが切りくず生成に大きく関与し、切れ刃全長にわたって、実質的には負のすくい角となる。

(2) 切取り厚さがコーティング膜厚より小さいため、特に切れ刃外周部では、稜面の逃げ面側のエッジに切削抵抗が集中し、コーティング膜の剥離が起こりやすい。

(3) 切れ刃全長にわたって実質的には、負のすくい角となるため、被削材表面を掘り起こすような切削機構になり、切れ刃長さに相当するほぼ一定幅のジグザグ形切りくずが生成する。

(4) 実質的には負のすくい角による切削機構のため、ドリル先端部全体が被削材に入るまでの間に、切りくずが穴外周部に押出され、出口部のばりに匹敵するような大きさのばり

が入口部にも生成する。

参 考 文 献

- 1) ツールエンジニア編集部：ツールエンジニア，2004 年 9 月号，50-53.
- 2) K. Sakurai, K. Adachi, K. Ogawa, R. Niba: Proceeding of CIRP Conference on precision engineering, (1991), 489-499.
- 3) 櫻井恵三，足立勝重，小川恒一，ラルフニバ：軽金属，**42** (1992)，389-394.
- 4) 櫻井恵三，足立勝重，亀川俊明，小川恒一，花崎伸作：軽金属，**46** (1996)，138-394.
- 5) 池永 勝，鈴木秀人：超硬質皮膜の原理と工業的応用，日刊工業新聞社，(2000)，20.
- 6) 鈴木敏之，櫻井恵三：軽金属学会第 103 回秋期大会講演概要，(2002)，157-158.
- 7) 坂田尚志，内山光夫：1996 年精密工学会秋季大会学術講演会公演論文集，(1996)，645-646.
- 8) 樋口俊郎：マイクロマシン技術総覧，産業技術サービスセンター，(2003)，215-223.
- 9) 加藤照子，堀切川一男，福田 努，篠岡正規，高橋 仁：トライボロジスト，**42** (1997)，454-461.
- 10) 小川 誠：ねじれ刃ドリルに関する研究，学位論文，(1990)，58.
- 11) 田中芳雄，喜田義宏，杉本正勝，宮本 勇，土屋八郎，後藤英和，杉村延弘：エース機械加工，朝倉書店，(1999)，116-119.
- 12) 喜田義宏，井戸 守，川崎直通：精密機械，**44** (1978)，1099-1104.