回転プラグ形工具による内周切削加工法の研究*

加藤 仁**, 山口勝美**, 中村 隆**
Shinobu KATO, Katsumi YAMAGUCHI, Takashi NAKAMURA**Key Words:** Cutting, Boring, Plug-Type Rotary Cutting Tool, Experimental Study, Cutting Force, Characteristics of Machined Surface

1. 緒 言

ダイス形工具によって、丸棒材の外周を表皮をはぐように軸方向に切削する加工法において、ダイス形工具に回転運動を与えたときの切削特性、および最大可能切込み量の変化については、前報⁽¹⁾⁽²⁾ですでに実験的な検討および力学的な考察について報告した。本文ではこの切削法を丸穴の内周切削に適用し、プラグ形工具に回転を与えて内周を切削する新たな加工法について検討する。

機械部品における丸穴は、多くの場合その位置、真円度および円筒度に高い精度が要求される。ドリルによる加工では十分な仕上げ精度が得られ難いため、何らかの内面仕上げ加工が必要となる。現在行われている内面仕上げ加工としては、中ぐり加工、リーマ加工、ブローチ加工などがあり、それぞれ状況に合わせて使い分けられる。特にリーマ加工は、工具自体の精度と自己案内性に基づいて行われるため、必ずしも高価な工作機械を必要としない利点があり、小径の穴に対して広く実用されている。本文では、プラグ形工具による内周回転切削加工法により、比較的小径の穴を加工し、その切削特性と仕上げ面性状を調べ、さらにこれらの実験結果に基づいて本加工法の特性を生かす最適な工具形状についても検討を加えた。

2. 回転切削の理論

図1はすでに報告した外周回転切削の概念図である。 V_w の速度で送られる丸棒被削材に対し、ダイス形工具は切れ刃部分での周速度が V_r で回転運動する。この工具の回転が切削機構に及ぼす影響は工具す

くい面での摩擦係数が大きい被削材料ほど大きく、工具を軸方向に送る力(切削力 F_c)は工具の回転速度 V_r を増すとともに急激に減少する。また、滑らかな仕上げ面となる流れ形の切削が行われる最大可能切込み量は工具の回転とともに増大し、たとえば被削材がアルミニウムで工具のすくい角を -5° としたとき、工具に回転を与えない場合に比べ $V_r/V_w=5$ で5倍以上の切込みが可能となった。このような特性を持つ回転切削法を丸穴の内面仕上げに応用したのが、今回のプラグ形工具による内周回転切削である。

図2がその概念図であり、あらかじめドリルなどで加工された下穴に対し、下穴径よりわずかに大きい外径を持つプラグ形工具を、刃先部での周速度 V_r で回転しながら V_w の速度で送り込む。図1の外周切削に比べ、内周回転切削は切りくずの受ける制約が大きく、また工具形状にも制約が多いため、この加工法の

図1 外周回転切削

図2 内周回転切削

* 昭和54年10月13日 第57期全国大会において講演・原稿受付 昭和56年9月21日。

** 正員、名古屋大学工学部 (〒464 名古屋市千種区不老町)。

最適切削条件、最適な工具のすくい角、にげ角を実験によって検討してみる。一方、円周の一部をとり出して切れ刃曲率を無視し、最も単純化した切削モデルで考えた回転切削の理論は、基本的な工具形状を考えるとき、および実験結果を考察するとき十分に参考となる。そこで回転切削に要する全動力が最小になる条件から導かれ、前報⁽²⁾でその妥当性が確かめられた切削理論で計算した結果を図3に示す。図は工具すくい角を -15° とし、(a)はすくい面摩擦係数 $\mu=0.7$ の場合、(b)は $\mu=1.1$ の場合を示し、それぞれ速度比 V_R/V_W の増加に伴う切削力 F_c 、回転力 F_R 、および背分力 F_v の変化を示したものである。切削力 F_c は工具軸方向に働く力、回転力 F_R は円周方向に働く力であり、また背分力 F_v はプラグ形工具の中心方向に働く力となる。なお、これらの各分力は切削面積に被削材の最大せん断応力を乗じた値を用いて無次元化した値で示してある。図3(a)のすくい面摩擦係数 $\mu=0.7$ の場合、切削力 F_c は工具に回転を与え V_R/V_W が増加するに従って急激に減少するが、 V_R/V_W が3以上ではその減少傾向が少なくなり、次第に一定値に近づくことがわかる。回転力 F_R は工具の回転に伴って増加し、 $V_R/V_W=2$ 付近で最大値を示すが、その後 V_R/V_W の増加とともに漸減し、ほぼ一定値に漸近する。

また背分力 F_v は、工具すくい角 $\alpha=-15^\circ$ であることに起因して、工具に回転を与えない場合には切削力 F_c よりも大きい値を示すが、工具に回転を与えると急激に減少する傾向を示す。切削力 F_c と背分力 F_v の工具の回転による減少の割合は $V_R/V_W=0$ と $V_R/V_W=5$ の場合を例にとって比較すると、 F_c が約 $1/3$ 、 F_v は約 $1/6$ となる。図3(b)のすくい面摩擦係数 $\mu=1.1$ の場合、速度比 V_R/V_W の増加に伴う切削抵抗の変化はきわめて顕著となり、上記の場合と同様に $V_R/V_W=0$ と $V_R/V_W=5$ の場合を比較すると F_c が約 $1/6$ 、 F_v は約 $1/15$ となる。このように、背分力 F_v は工具の回転に伴って一般に急激に減少する傾向が認められるが、図3($\alpha=-15^\circ$)の場合には F_v の値は正の値を保っている。この背分力 F_v は工具の中心方向に働く力であり、従って下穴の中心に工具を保つ効果を持つと考えられるが、 F_v の値が負になるとこの働きが無くなり、工具はいずれかの方向に食い込むことが予想され、安定な切削は期待できないことになる。工具すくい角を大きくとり、正の値にまで増加すると、背分力 F_v は工具の回転により負の値にまで減少することが確かめられている。このことからプラグ形工具のすくい角は 0° かむしろ負の値をとることが望ましいことがわかる。

3. プラグ形工具の形状および実験方法

本実験に用いた各種形状のプラグ形工具を図4に示す。(a)の工具は、逃げ角を 6° で一定とし、すくい角

(a) すくい面摩擦係数 $\mu=0.7$ とした場合

(b) すくい面摩擦係数 $\mu=1.1$ とした場合

図3 動力最小の条件から導いた理論計算結果

(a) すくい角を変えた工具

(b) 逃げ角を変えた工具

(c) 案内を持ち、油剤が供給できる工具

図4 プラグ形工具形状

が -5° 、 -10° 、 -15° 、 -20° の4種類を用意した。(b)の工具は工具(a)と同形状であるが、すくい角は -15° で一定とし、逃げ角を 6° 、 4° 、 2° 、 0° と変えた工具である。また(c)の工具は、良好な切削性能を期待して製作したもので、その形状の詳細については後述するが、逃げ面に潤滑油を供給するように工夫した工具で、すくい角は -15° である。(a)~(c)いずれの工具も切れ刃頭部は超硬合金(PT 20)であり、シャンク部(SCM 4)にトリメタルでろう付けされている。

プラグ形工具による切削実験は、図5に示すように旋盤を用いて行った。すなわち工具⑥は薄肉円筒にひずみゲージをはった動力計②に取付け、これを心押し台③に装着した。プラグ形工具は、無段階変速の可能な直流電動器により心押し軸を速度 V_w で駆動して切削を行う。一方、被削材は種々の回転速度 V_R (直径12 mmの位置での周速)を与えた。

実験は次の手順で行った。まず被削材にドリルにより穴明け加工を行い、さらにリーマにより所定の内径に仕上げ加工を施した。実用上はドリル加工された下穴のままプラグ形工具による加工を行うべきであろうが、今回の実験は切削抵抗の測定を主な目的としているため、リーマ仕上げによって被削材の寸法精度を確保した。次に被削材、プラグ形工具ともに十分な量の切削油剤を塗布した後、切削実験を行った。図2の内周回転切削概念図では、プラグ形工具を回転させながら押込むように描いているが、実験ではプラグ形工具には送り速度だけを与え、回転速度は被削材に与えた。被削材の回転速度 V_R は0、0.9、1.7、2.9 m/minで段階的に変えたのに対し、プラグ形工具の送り速度 V_w は0.3 m/minから0.5 m/minまで無段階に変化させ、速度比を0から9まで任意に選ぶようにした。加工中の切削抵抗は、工具の送り速度の測定値をも含めて電磁オシログラフに記録した。また被削材材質として、高張力アルミニウム合金(ジュラルミン A 2017)、鈍アルミニウム(A 1050)、および軟鋼(S 25 C)の3種の引き抜き丸棒材を用いた。

図5 実験装置概要

4. 実験結果と考察

4.1 工具の回転が切削抵抗に及ぼす影響 まずプラグ形工具による内周回転切削の切削過程に工具の送りと回転を急停止し、被削材を軸方向に切断して切りくずの変形状態を観察した。図6(a)は工具に回転を与えない場合、(b)は $V_R/V_w=5$ の回転を与えた場合であり、これらはアルミニウムを図4(a)のすくい角 -15° の工具で加工したときのものである。工具に回転を与えない(a)の場合は、切りくずがすくい面上に堆積し、非常に大きな切削力を必要とすることが推察される。これに対し工具に回転を与えた(b)では切りくずが比較的早い時点ですくい面から離れ、切りくずの厚さも薄く、良好な切削状態であるといえる。

次に被削材にジュラルミンおよびアルミニウムを用い、切込み量を0.05 mmとして実験を行い、工具の回転による切削力 F_c および回転力 F_R の変化を求めたものをそれぞれ図7および図8に示す。ここで、リーマ加工で準備された被削材の内径はドリル加工の状態などに影響され、ある程度のばらつきは避けられないので、切削力、回転力などの測定結果は毎回測定される内径によりすべて単位切削面積当たりの値で表示することにする。図7のジュラルミンでの実験結果を図3(a)に示すすくい面摩擦係数 $\mu=0.7$ としたとき

(a) $V_R/V_w=0$ ($V_w=0.4$ m/min)

(b) $V_R/V_w=5$ ($V_w=0.4$ m/min)

被削材：アルミニウム、すくい角： -15° 、切込み：0.15 mm

図6 切りくず変形状態

の計算結果と比較すると、切削力 F_c が V_R/V_W の増加とともに減少しほぼ一定値に収束する傾向、および切削力 F_c と回転力 F_R の収束値の比がよく類似している。図8のアルミニウムでの実験結果は、工具に回転を与えない $V_R/V_W=0$ では切削力の測定値にかなりのばらつきが認められるが、工具の回転が増すとともに安定し、図3(b)に示すすくい面摩擦係数を1.1としたときの計算結果と類似した特性を示す。このように、工具に回転を与えない場合と回転を与えた場合の実験結果を比較検討することは、単純二次元切削と回転切削との切削機構の相違を比較することができ興味深い。本実験では低速度切削 (V_W が比較的小さい) である上に工具すくい角が負であるために、図6(a)にも認められるように工具に回転を与えない場合は一般の切削とはかなり異なった切りくず変形状態になる。そこで以後の実験では特別な場合を除き主として速度比 $V_R/V_W=2\sim9$ の範囲において行った。

4.2 工具すくい角の影響 図4(a)のプラグ形工具を用い、ジュラルミン、アルミニウム、および軟鋼の被削材について、速度比 V_R/V_W による切削抵抗の変化を求めた実験結果の一例を図9～11に示す。各図とも上図が切削力 F_c 、下図が回転力 F_R である。

すくい角: -15° , 切込み: 0.05 mm

図7 切削特性 (ジュラルミン)

すくい角: -15° , 切込み: 0.05 mm

図8 切削特性 (アルミニウム)

逃げ角: 6° , 切込み: 0.10 mm

図9 すくい角による切削特性の変化 (ジュラルミン)

逃げ角: 6° , 切込み: 0.10 mm

図10 すくい角による切削特性の変化 (アルミニウム)

逃げ角: 6° , 切込み: 0.05 mm

図11 すくい角による切削特性の変化 (軟鋼)

実験はすくい角 $\alpha = -5^\circ, -10^\circ, -15^\circ, -20^\circ$ の4種類の工具について行ったが、これらの図には $\alpha = -5^\circ$ および -20° の測定結果が示してある。各図をみると、いずれの被削材においてもすくい角が -5° の方が切削力、回転力ともに小さい値を示しているが、その差は少ない。特に図9の被削材がジュラルミンの場合の回転力 F_R は、すくい角による差がほとんど認められない。すくい角を -5° よりも大きい値とすることは、先にも述べたように工具の安定の点から問題があり、またすくい角を -20° よりも小さくすると、背分力の増大により被削材に大きな残留変形が生ずる可能性がある。よって -5° から -20° の範囲のすくい角はプラグ形工具として一応適切であると考えられるが、特に加工初期の工具と下穴のなじみを円滑にすることを考え合わせ、ここでは -15° を本加工法の基準のすくい角として採用することにした。

4.3 逃げ角の影響 切削工具の逃げ角は通常 $3^\circ \sim 10^\circ$ とされている。一般に仕上げ面と工具逃げ面との接触は、被削材の弾性回復および塑性流れによって生じ、特に工具すくい角が小さく背分力が大きいような切削工具では逃げ角を大きくする必要がある。しかしたとえばフライス工具やリーマなどのように、工具の種類や形状によっては研削代を設けると同時に切削中の振動を防ぎ、加工精度を向上することなどを目的として、逃げ面の一部が仕上げ面と接触するような刃形の工具を用いることもある。本研究の回転切削では、工具すくい角が負であるにもかかわらず、背分力 F_V は図3に示すように工具を回転させることによって急激に減少する。一方プラグ形工具はその形状の制約から剛性が低く、リーマと同様に工具自体に自己案内性を持たせることが望ましい。そこで図4(b)に示した逃げ角を $6^\circ, 4^\circ, 2^\circ, 0^\circ$ と減少させたプラグ形工具で回転切削したときの切削抵抗と仕上げ面性状を調べてみた。3種類の被削材について、速度比による切削抵抗の変化を図12~14に示す。図12(a)の被削材がジュラルミンの場合、切削力 F_c は逃げ角が $6^\circ, 4^\circ, 2^\circ$ においてはほとんど差が認められないが、逃げ角が 0° の場合だけは工具の回転による F_c の減少傾向が大きく、速度比の大きい範囲では F_c の値が他の場合より小さくなり、興味ある特性を示すことがわかる。(b)の回転力 F_R は、逃げ角が 6° のとき全速度比にわたって逃げ角 $4^\circ, 2^\circ$ より大きい値を示し、また逃げ角が 0° では低速度比で大きな値を示すことがみられる。図13(a), (b)のアルミニウムの場合には、切削力 F_c 、回転力 F_R いずれも逃げ角が $6^\circ, 4^\circ, 2^\circ$ においてはほぼ同様の特性を示すが、逃げ角が 0° の場合だけは全速

度比にわたって大きな値を示す。特に速度比が小さい範囲での F_c, F_R の値がともに大きく、 $V_R/V_W=2$ では他の逃げ角の場合に比べ2倍以上の値となっている。このように、逃げ角が 0° の工具を用いた場合、低速度比において F_c, F_R が大きくなることは被削材がジュラルミンの場合にも、とくに F_R について認められたが、これは図3からもわかるように、 $V_R/V_W=2$ 前後では背分力 F_V が非常に大きく、加工中に押し広げられた被削材が弾性回復によって逃げ面と強く接触し、このため F_c, F_R が大きくなったものと考えられる。図14(a), (b)の軟鋼の場合には、速度比が5を超えた範囲で逃げ角 0° の切削抵抗とくに F_R の値が他の逃げ角の場合よりも大きいことがわかる。これは逃げ面と加工直後の仕上げ面は、速度比が大きいほど長い距離にわたって接触することになり、その結果焼付きのような状態になったのではないかと考えられる。

次に、逃げ角を変えたときの仕上げ面性状を触針式表面あらさ計で調べてみた。測定は軸方向に行い、うねりも測定されるようにスキッドは付けず、基準平面との相対変位で測定した。図15は、それぞれの被削材を速度比 $V_R/V_W=5$ で加工したときの仕上げ面性状を示す。(a)のジュラルミンでは、逃げ角が 6° のとき規則的で大きなうねりが認められ、このうねりの振幅は $20 \sim 25 \mu\text{m}$ 、ピッチは約 7.5 mm であり、工具の送り方向にねじられたらせん状となっている。またそのピッチはプラグ形工具の1回転当たりの送り量と一致する。工具切れ刃の真円度は $2 \mu\text{m}$ 以下であり、工具形状精度によるうねりではないと判断されるから、プラグ形工具の中心が被削材の回転中心と心ちがいをして加工していることがわかる。すなわち本実験の切削方法においては回転せずに送られるプラグ形工具の中心が被削材の回転中心に対し心ちがいが存在すると、その結果得られる仕上げ面には工具の送りに等しいピッチで正弦波に近い形のうねりを生ずることになる。プラグ形工具を取付けたときの工具の中心と旋盤主軸の中心とは 0.05 mm 程度の心ずれは避けられなかったが、剛性の低いプラグ形工具をさらに薄肉円筒からなる動力測定器を介して心押し台に取付けていることを考慮すると、切削中に数 kN の切削力が加わる工具刃先は容易に変位し、被削材に対して相対位置が変わりやすいと考えてよい。旋盤主軸回転中心に対し、工具が一方方向に心ちがいをしたのは、切削過程に切れ刃円周で切削作用が一樣でなく、背分力が一方方向にかたよったためと推察される。逃げ角が 4° と 2° の場合には、うねりのピッチは逃げ角が 6° の場合と同じであるが、その振幅は小さい。図12(b)において逃げ角

が 6° の場合だけ回転力 F_R が大きいことと関連があるものと推察される。次に逃げ角が 0° の場合は、うねりはほとんど認められないが、他の逃げ角の場合と比べ仕上げ面あらさが著しく大きくなっている。図15(b)のアルミニウムでは不規則なうねりが生じ、逃げ角が減少してもうねり振幅は必ずしも減少しないことがわかる。しかし、逃げ角が 0° の場合はジュラルミンのときと同様にうねりは少ないが仕上げ面あらさはやはり

大きいことがわかる。(c)の軟鋼では、すべての逃げ角でうねりがほとんど認められないが、全般に表面あらさが大きく、うろこ状のむしれが観察された。特に逃げ角が 0° の場合この傾向が著しいことがわかる。

このように、プラグ形工具で回転切削したときの仕上げ面性状は、被削材によって様々な特性を示すが、逃げ角が 0° の場合だけはいずれの被削材でも同じようにうねりは少ないがあらしい仕上げ面となる。逃げ角

すくい角: -15° , 切込み: 0.10 mm

図12 逃げ角による切削特性の変化 (ジュラルミン)

すくい角: -15° , 切込み: 0.10 mm

図13 逃げ角による切削特性の変化 (アルミニウム)

すくい角: -15° , 切込み: 0.05 mm

図14 逃げ角による切削特性の変化 (軟鋼)

切削条件は図 12~14 と同じ

図 15 逃げ角による仕上げ面性状の変化

が 0° のプラグ形工具の逃げ面には、加工後凝着物が多く見られることから、逃げ面と仕上げ面がかなりの高圧下で接触し、凝着によるむしれを生じ仕上げ面性状を悪くしていることが推察される。

4.4 案内を持つ工具による実験結果 上述の実験結果に基づき、うねりを少なくかつ滑らかな仕上げ面を得ることを目的として、逃げ角 0° の工具の逃げ面に油剤を供給できるよう工夫した工具を新たに試作した。すなわち、図 4(c)に示すようにすくい角 -15° 、逃げ角 0° のプラグ形工具の切れ刃直後に油溝

(a) ジュラルミン, 切込み: 0.10 mm

(b) アルミニウム, 切込み: 0.10 mm

(c) 軟鋼, 切込み: 0.05 mm

 すくい角: -15° , 供給油剤圧力: 1.4 kPa

図 16 案内を持つ工具による切削特性

(a) ジュラルミン

(b) アルミニウム

(c) 軟鋼

切削条件は図 16 に同じ

図 17 案内を持つ工具による仕上げ面性状

を付け、工具の中心を通して 4 箇所油穴から油剤が供給される構造とした。油溝の後部には仕上げ面のうねりを少なくする効果をもたせるため幅 3.5 mm の案内部を設け、その角には丸みをもたせた。案内部を設ける位置は、刃先から案内部中央までの距離が図 15(a)に見られるうねりのピッチの 1/2 になるようにした。また刃先には幅 0.5 mm のランド部を残し、切れ刃外径と案内部外径とが同じになるよう同時に研削仕上げをほどこした。

図 16 は、上述のプラグ形工具を用い、供給油圧 1.4 kPa とした場合について、速度比による切削抵抗の変化を示したものである。(a)のジュラルミンを被削材とした場合の実験結果を、図 12 の逃げ角が 0° の場合と比較すると、切削力 F_c はほぼ同様の値を示すのに対し、回転力 F_R は逃げ面を潤滑した方がわずかながら大きな値を示している。(b)のアルミニウムの場合は、図 13 の逃げ角 0° の場合と切削力、回転力ともにほぼ同じ値を示すことがわかる。また軟鋼の場合には、図 14 の逃げ角 0° の場合に見られたような V_R/V_W が 5 以上で切削力、回転力が増加する傾向は認められず、逃げ面と仕上げ面との焼付きをある程度防ぎえたと考えられる。

次に、この逃げ面を潤滑する工具で加工した仕上げ面の表面性状を調べた。図 17 は、それぞれの被削材を速度比 $V_R/V_W=5$ で回転切削したときの仕上げ面性状を示す。図 15 の逃げ角が 0° の場合と比較すると、表面あらさが著しく減少していることがわかる。

以上のことから、逃げ面に案内部を設けさらに油剤を供給する工具は、うねりの発生を著しく抑制することができ、かつ仕上げ面と逃げ面との凝着によるむしれの発生を防ぐ効果があり、実用的な立場からプラグ形工具による内周回転切削の一つの方向を示すことができたと考える。今後の課題としては、本加工法で仕上げられた仕上げ穴の内径拡大量、寸法精度、さらに円筒度の評価を通じて最適工具形状（例えばランド幅、切れ刃と案内との外径差など）および加工条件を選定する必要があり、リーマ加工あるいはブローチ加工との比較検討によって本加工法の特徴および適用範囲がよりいっそう明確になると考えられる。

5. 結 言

プラグ形工具を用いた新たな内周回転切削により、ジュラルミン、アルミニウム、軟鋼の切削実験を行い、その特徴を明らかにするとともに、その特性を生かすような形状をもつプラグ形工具を試作し、これによる切削実験に基づき次のような結論を得た。

(1) プラグ形工具を用いた内周回転切削においてもダイス形工具による外周回転切削の場合と同様に、工具の回転によって切削力が著しく減少する。この切削力の特性は主として被削材の工具との摩擦係数によって異なる。

(2) プラグ形工具による切削においては、工具の回転によって軸の中心方向に働く背分力が著しく低下するため、工具すくい角を小さくすることが可能であり、加工中の工具の安定性を考えるとすくい角は負とするのが望ましく、 -15° 前後が適切であると考えられる。

(3) プラグ形工具の逃げ角は $6^\circ, 4^\circ, 2^\circ$ では切削抵抗、仕上げ面性状にはほとんど差が認められないが、この工具に特有のうねりを生じやすい。逃げ角を 0° とした場合にはこのうねりの発生は認められないが、低速度比での切削抵抗が増加し、また仕上げ面あらさも大きくなる。

(4) 逃げ面に案内部を設けかつ油剤を供給するプラグ形工具は、切削抵抗を減少する効果は少ないが、仕上げ面と逃げ面との凝着によるむしれを抑制し、良好な仕上げ面を得ることができ、プラグ形工具による内周切削の実用性を示唆することができた。

文 献

- (1) 加藤・ほか 2 名, 機論, 47-417, C (昭 56), 692.
- (2) 加藤・ほか 2 名, 機論, 47-421, C (昭 56), 1200.

討 論

〔質問〕 白井英治〔東京工業大学〕

(1) V_R/V_W が変化してもすくい面の摩擦係数は一定としているが、

(i) 実測される摩擦係数は確かに一定となるのか。

(ii) また切削抵抗の実測結果にあうように仮定した摩擦係数の値は、実測値と一致するか。

(2) 工具に求心作用を持たせるために負のすくい角が不可欠であるが、図4(c)の案内を持つ工具を使用すれば正のすくい角も採用できるのではないか。

〔回答〕 (1)(i) 本研究で示した切削抵抗についての計算結果は単純な切削モデルを基にして、工具の回転が切削機構に及ぼす影響について概略的な説明を試みたものであり、すくい面での摩擦係数およびせん断面せん断応力は材料によって一定であるとして計算を進めた。本実験では背分力および切りくず流出方向が測定されていないため、速度比による摩擦係数の変化は明らかではないが、本研究の広範囲な速度比変化に対しては、ご指摘のように摩擦係数の多少の変動はあると考えられる。

(ii) 計算結果を実験結果と比較する場合は、まず速度比が大きい条件での F_c と F_R の比の値から摩擦係数を決め、続いて実験結果にあうよう材料のせん断応力を選定した。このときの摩擦係数の値が実際の値と一致するかどうかは確かめられていないが、特に工具すくい角が 0° の場合は、速度比が大きい範囲での F_R/F_c の値はほぼ摩擦係数と一致すると考えている。

(2) 案内付きプラグ形工具では、切れ刃の後ろに案内が設けられているため、工具が下穴に対し偏心して加工しはじめたときの求心作用は期待できない。しかし浅い穴の加工に対しては、加工初期の工具保持方法などを工夫することにより、正のすくい角も可能かと考えられる。

〔質問〕 山田卓郎

〔三菱重工業(株)京都精機製作所〕

(1) 切込み量 0.05 mm (半径にてと推定) に比して、工具の下穴に対する偏心量 0.05 mm は、本加工法を仕上げ加工を目的とする場合にはいかに工具の支持が弱いとしてもその影響は避けられず、穴の曲り、これに伴う仕上げ面の変化、びびりなどになって現れると考えるが、いかがか。

(2) 記載の被削材は、いずれも加工硬化が現れるものと考えているが、下穴加工時の条件によっては、切込み量 0.05 mm では、この加工硬化層を切削しており、これがむしろ、ひいては仕上げ面あらさに影響したと考えるがいかがか。

(3) 仕上げ面より判断すると、このツールはバーニッシュ加工していると考えているが、工具直径に比して、仕上げ穴の直径はどのような拡大もしくは縮小を示すのか。また工具寿命は他工具に比してどうか。

〔回答〕 (1) 本実験では毎回の工具セッティングに際し、 $0.03\sim 0.05\text{ mm}$ の偏心は避けられなかった。しかしセッティングの際の工具偏心は、加工初期に下穴にならう形で修正されることから、加工状態に本質的な影響を与えることは少ないと考える。

(2) ご指摘のとおり、本研究の実験条件では前加工の加工硬化層の影響を受けやすいと考える。したがって加工硬化層を切削することが仕上げ面あらさなどに及ぼす影響についても今後検討したいと考える。

(3) 案内付きプラグ形工具による仕上げ穴内径は、工具外径と比べ A2017 では $7\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 、A1050 では $0\sim 3\text{ }\mu\text{m}$ 小さくなった。そのため、切れ刃部と同径の案内部はご指摘のようにバーニッシュ作用をしているものと考えられる。また工具寿命に関しては、本加工法の場合、刃先が圧縮応力状態であること、工具すくい角が負であること、また中ぐり加工と比べ切削距離が極めて短いことなど利点が多く、長い工具寿命が期待できると考える。