超硬リーマによる加工精度に関する研究 (第5報)*

—高速加工における食付き時の工具挙動と前加工穴の入口部形状の影響—

佐久間 敬三** 清 田 宏**

Hole Accuracy with Carbide-tipped Reamers
(5th Report)—Tool Behavior and Effects of Entrance
Geometry in Pre-bored Hole on Stability
in High Speed Reaming—

Keizo SAKUMA and Hiroshi KIYOTA

This study deals with the characteristics of tool behavior in reaming hole, using standard type, carbide-tipped reamers under high cutting speed. When the cutting lips enter into the workpiece, chatter vibrations are excited with so large amplitude that the unevenness in hole profile at the entrance section can be observed, and frequently chipping and spalling of tool tips occurs. These

vibrations measured contains frequency components relating to the number of teeth (Z), which are near the natural frequency of spindle-tool system. The entrance geometry in the workpiece have a great influence on the tool behavior. Chatter vibrations can be avoided in reaming chamfered hole with smaller angles ($\alpha < 45^\circ$) at the entrance portion than the approach angle ($\lambda = 45^\circ$) of the cutting lips. Increasing the stability in reaming and controlling the direction of chip flow are very important for high speed reaming with carbide-tipped reamers.

Key words: carbide-tipped reamers, high speed reaming, chatter vibrations, workpiece entrance geometry, chip flow direction, reaming stability.

1. 緒 言

切れ刃材種に超硬合金を使用した標準設計のリーマによる鋼の加工は、従来、比較的低い切削速度域 ($V < 0.25$ m/s (15 m/min)) で、P 系合金に比べて、耐チップング性に強い K 系合金を用いて行われるのが普通であるが、合金材種の特質††を生かし、また加工時間の短縮を図る面からも、その高速化が望まれる。しかし、高速域での切削状態は低速域と異なり、食付き時、びびり振動を生じることが多く、それが激しい場合には、工具食付き部、特にコーナ部のチップング (または欠損) の原因になる等の現象‡‡がみられ、鋼に対しては、あまり実用されていないのが現状である。

本研究は、上記工具の高速域での使用を可能にすることを目的とし、食付き時の工具の挙動を調べ、びびり振動の特性を明らかにするとともに、前加工穴入口部の形状差の影響について調べ、案内用プッシュを使用しない場合のリーマ加工の安定性について検討したものである。

2. 実験方法

工具は標準設計の刃数 $Z=6$ (隣接切れ刃間角度 62° , 60° , 58° , 62° , 60° , 58°)、直径 $2r = \phi 20$ mm のモールステーパーチャッキングリーマで、その形状を図 1 に示す。切れ刃材種に主に K 10 の超硬合金 (P 系合金に比べてチップングしにくい) を使用し、食付き角 $\lambda = 45^\circ$ である。機械 (吉田 YUD 550 直立ボール盤) の主軸へは、工具先端部の振れ $2\epsilon_0$ が $30 \mu\text{m}$ 以下になるように取り付け、図 2 はその際の主軸-工具系の曲げ方向の動特性を周波数応答法で求めた結果で、1 次の固有振動数は約 120 Hz、2 次は約 420 Hz である。被削材の炭素鋼 S 55 C (H_b 2.1 MPa) は下穴をドリル加工後、リーマ加工 (HSS, $Z=8$ 工具) して、下穴径 ($\phi 19.6$ mm) の径差および粗さのばらつきを抑えた。それぞれの被削材入口部には、角度 $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 41^\circ, 43^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ の面取り (図 9 参照) をバイトで行い、2 回実験を繰り返した。加工中の工具軸心の変位測定は、インダクタンス型の非接触式

* 原稿受付 昭和 57 年 1 月 11 日。昭和 52 年度精機学会秋季大会学術講演会 (昭和 52 年 10 月 16 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)

† 切れ刃材種に P 10 合金を使用したリーマを切削速度 $V=1.7$ m/s (100 m/min) の高速で、鋼 S 55 C を加工した場合、K 10 合金リーマの低速 ($V=0.1$ m/s) 使用に比べて、加工面粗さに差はなく‡ (両者のパニシトルクは大きい) 切削長さ $L=2000$ mm で、工具コーナ部の摩耗幅は約 1/4 程度であった。

Fig. 1 Geometry of tested tool in experiment
B: Width of cylindrical margin

Fig. 2 Dynamic characteristics of spindle-tool system measured by frequency response method (upright drilling machine)

Fig. 3 View of upper face and hole wall surface at the workpiece entrance portion, when violent chatter vibration occurred
Tool: 6-teeth carbide reamer ($B=0.16$ mm, K 10),
Cutting velocity; $V=1.3$ m/s, Feed rate; $f=0.2$ mm/rev

変位計を, X, Y の直角 2 方向にセットし, 工具円筒シャンク部 (研削仕上) の外周のふれを計測して行った. またトルク, スラストは被削材保持具兼用切削動力計 (自製, 曲げの静剛性 48 N/ μ m) を使って計測した. 変位波形, 切削抵抗曲線はデータレコーダに入れた後, シンクロスコープ上で観察, 写真撮影するとともに, 振動スペクトル分析器で周波数分析を行った. 切削油には不水硫化塩素油 (ユシロ DS 50) を給油量 1.5 l/min で使用した.

3. 工具破損と食付き時の工具挙動

3.1 切れ刃の破損

案内用プッシュを使用しないリーマ加工の場合, 穴入口部にびびりマークを生じやすい. 図 3 はその例で, 切削速度 $V=1.3$ m/s, 送り $f=0.2$ mm/rev での極端に激しいびびり振動が生じた場合の穴入口部の状態である. 穴内周部の凹凸の大きさは目視で確認できる程で, 半径方向の工具振動の振幅が大きかったことを示している. 凹凸部付近を拡大して調べると, 切りくずが母材から離脱する途中の状態が観察され, 切れ刃での切りくず除去終了前にびびり振動により工具が半径方向に動き, 瞬間停

Fig. 4 Corner breakage of cutting edge, when violent chatter vibration occurred
Tool: 6-teeth carbide reamer ($B=0.26$ mm, P 10),
Cutting velocity; $V=1.3$ m/s, Feed rate; $f=0.1$ mm/rev

止装置で切削を中断したときと同様の現象がみられる. 更に凸部では上方にバリの発生が認められ, 金属組織は押しつぶされ, 工具回転方向に引張られた状態になっていて, 工具に強く押しつけられたことがわかる. 穴入口部表面では, びびりマークが穴の奥へ向かって斜めに走っていて, 凸部 (または凹部) は穴各断面でその位相が変化している. 図 4 に P 系合金 (P 10) を高速 ($V=1.3$ m/s), 低送り ($f=0.1$ mm/rev) の条件で使用した場合の工具コーナ部近傍の破損状態を示す. 破損は大きく欠損した切れ刃を中間として, 前後の切れ刃にも及ぶが, 隣接刃の損傷程度は小さい. また残りの切れ刃には破損が認められないことが多い. このことと, 工具の振動振幅が大きいことから, 極端に激しいびびり振動が生じた場合, 瞬間的には 3 枚の切れ刃が切削に関与し, 残りの切れ刃は被削材から離れた状態にあることが推測される. マージン部を含めた逃げ面側は被削材に強く押しつけられ, またすくい面側は切りくず除去 (穴内周面の凸および凹部で切削幅に大きな差がある) に伴う変動切削力に加わり, 更にその状態が短時間に周期的に繰り返されるため, その衝撃によって破損が生じたものと考えられる.

3.2 びびり振動の特性

図 5 は被削材入口部の面取り角 $\alpha=75^\circ$, 切削速度 $V=0.53$ m/s, 送り $f=0.05$ mm/rev の条件で, 比較的軽度なびびり振動を生じた場合の食付き時の工具の変位波形である ((a) 工具の被削材との接触時, (b) 持続期, 主軸 1 回転に 1 回の変動成分 (回転ふれ) と高調波の変動成分が重畳されたもの). 食付き時, 工具の取付偏差, 被削材下穴偏差等のアライメント誤差から, 工具の任意の切れ刃がまず被削材上部と接触する. その際, 主軸-工具系の曲げ剛性が弱いので, 工具は半径方向に動き, 振動が始まる (その振幅は小さい). 続いて残りの切れ刃が穴内に進入した直後, 振幅は最大になり, 以後, 振幅は

Fig. 5 Wave form of chatter vibration measured at the tool shank in reaming

Cutting velocity; $V=0.53$ m/s, Feed rate; $f=0.05$ mm/rev, Chamfer angle at the workpiece entrance; $\alpha=75^\circ$

Fig. 6 Power spectrum of lateral vibration of tool shank in X-direction

f_{Ns} : Frequency of spindle rotation
 f_{S1} : 51 Hz (corresponding to $S=5$ or $S=7$)
 f_{S2} : 102 Hz (corresponding to $S=13$)
 f_{S4} : 204 Hz (corresponding to $S=25$)
 f_{S5} : 255 Hz (corresponding to $S=31$)
 f_{S7} : 357 Hz (corresponding to $S=43$)

徐々に減衰し、びびり振動は収束する。また一般に食付き時の工具の振れ方向と被削材下穴偏差に差異があるため、 X, Y 2方向の変位波形の両者の変動成分の振幅の大きさに差を生じる例（これを合成すれば扁平に近い楕円形状になる）が多くみられる。上記の X 方向変位波形の周波数分析結果を図6に示す。種々の周波数成分を含んでいるが、工具の多角形状生成運動に関連する刃数 Z の倍数成分が多くみられる。 f_{Ns} は主軸毎分回転数 $N_s=510$ rpm (8.5 Hz) に相当する主軸1回転に1回の変

Fig. 7 Roundness profile of hole in entrance portion and its spectrum analysis (using the hatchet type stylus)

Cutting velocity V m/s	Width of margin B mm	
	0.16	0.37
1.0	●	▲
1.3	○	△

Fig. 8 Relationship between depth of chattered portion and cutting velocity when varying feed rate and width of tool margin

Chamfer angle at the workpiece entrance; $\alpha=75^\circ$

動によるものである。穴内周面の凸部（または凹部）の数 $S=nZ \pm 1$ (n : 正の整数) に相当する回転振れの変動周波数は $f_s=N_s/60 \times nZ$ で計算される。図より無負荷時でのシャンク部曲げ方向の1次, 2次の固有振動数に対応する120 Hz, 420 Hz付近でのパワーがやや大きいようである。図7はびびり振動の転写による穴入口部の真円度形状およびその形状の分析結果である。真円度測定器 (Taylor-Hobson 社製タリロンド100型) では、Hatchet型接触子(軸方向曲率半径12.5 mm, 円周方向曲率半径0.3 mm)を使用するため、穴内周面の凸部頂点まで接触子が入り込むことができず、図6の分析結果とやや差異がみられる。びびり振動が生じた場合の穴入口部付近では、凸部（または凹部）頂点は穴の奥に入るに従って、回転方向に位相ずれ（いわゆるライフリング現象⁴⁾）を生じている（図3参照）が、図中、 $S=5$ または7は図6の f_{S1} に、 $S=13$ は f_{S2} に、 $S=25$ は f_{S4} に、 $S=31$ は f_{S5} に、 $S=43$ は f_{S7} にそれぞれ対応する。以上

のように多刃工具のリーマ加工では、びびり振動が生じた場合、刃数の整数倍で、主軸-工具系の曲げ方向の固有振動数に近い振動が励起され、それが加工穴断面に転写される例が多くみられる。

図8は、切削条件（切削速度、送り）および工具のマージン幅を変えて実験した場合のびびり振動の持続の程度を、加工穴表面に転写された長手方向のびびり跡の長さ L_c から調べた結果である。この長さはびびり時のトルクの特徴的な変動状態の持続長さとはほぼ一致し、食付き時の工具シャン

Fig. 9 Difference of tool contact condition to workpiece (Middle portion ① of cutting lip contacts to the workpiece of $\alpha > 45^\circ$ and corner edge ② of cutting lip contacts to the workpiece of $\alpha < 45^\circ$)

α : Chamfer angle of the workpiece entrance, λ : Approach angle of the cutting edges

Fig. 10 Influence of chamfer angle of pre-bored hole on amplitude of tool vibration in the beginning of penetration

ϵ_0 : Amplitude of tool deflection before cutting, ϵ_c : Amplitude of tool deflection in start of cut, Tool: 6-teeth carbide reamer ($B=0.32$ mm, K 10), Cutting velocity; $V=0.53$ m/s, Feed rate; $f=0.05$ mm/rev

ク部で計測したびびり振動の振幅が大きい程、長くなる傾向にある。また円筒マージン部での振動の抑制効果は大きく、マージン幅 $B=0.37$ mm の工具は、 $B=0.16$ mm の工具に比べて、低送りの範囲でびびり長さを約半分に抑えることができる。また送り小さい場合、工具は徐々に穴内に進入し、その間のスラスト力は小さいため、工具は半径方向に動きやすく、食付き時生じたびびり振動は長く持続することになる。

4. 前加工穴入口部形状の影響

4.1 面取り角と食付き時の切削状態

図9に被削材入口部面取り角 α の大小による工具食付き時の切れ刃の接触状態の差を示す。食付き角 $\lambda=45^\circ$ のリーマに対して、(a) 工作物面取り角 $\alpha > 45^\circ$ では図中食付き切れ刃部 ① が最初に被削材と接触し、(b) $\alpha < 45^\circ$ では工具コーナ部 ② から接触が始まる。図10に上記面取り角を種々変えた場合の食付き時の状態を、回転振れの振幅比 ($m = \epsilon_c / \epsilon_0$, ϵ_0 : 工具シャンク部で計測した食付き直前の振れの振幅, ϵ_c : 食付き直後の回転振れの振幅) および回転振れ変動の振幅の大きさ ϵ_c で示す (切削条件は3.2節と同様である)。面取り角 $\alpha \geq 45^\circ$ (B)

Fig. 11 Difference of frequency in lateral vibration of tool shank and order of its power spectrum level when varying the chamfer angle of pre-bored hole

で、食付き時、濁音とともに流れ型の切りくずは、切れ刃間の溝を通してシャンク部に巻き付くように上方に排出される。一方、 $\alpha < 45^\circ$ (A) では、びびり振動は観察されず、切りくずはまとまって下方に落ちる。(B) の場合、 α の増加につれて、 m, ϵ_c は大きくなり、 $\alpha=90^\circ$ では、 $m > 1$, $\epsilon_c \approx 35 \mu\text{m}$ にも達し、かなりの程度のびびり振動が観察された。 $\alpha=45^\circ$ の場合、食付き角と面取り角が一致することから、切れ刃稜線と面取り部とが全面接触し、びびり振動を生じにくいと思われるが、工具取付け時の振れ、被削材下穴偏差などの要因により、両者の接触は先行刃から始まることになり、びびり振動を生じる。しかし、その程度は小さい。以上のようにびびり振動の有無は、工具の被削材との接触状態の差異に強く関係し、 $\alpha < 45^\circ$ の場合、びびり振動を生じない。この場合、両者の接触は工具コーナ部から始まるが、その際、4.2節で述べるように切りくずは内側方向に排出され、工具の溝底に突き当たる。このため工具の半径方向の動きは拘束される。加えて円筒マージン部によって工具は送り方向に案内され、かつ、穴壁面とのバネ力働く。このことが、食付き時のびびり振動を抑えるものと思われる。図11に食付き時、工具シャンク部で計測した変位波形の周波数およびその分析結果をパワーの大きさの順に示す。 $\alpha=45^\circ$ を境にして、振動周波数に違いがあり、 $\alpha < 45^\circ$ では高調波成分はみられず、主軸-工具系の曲げの固有振動数付近の周波数が多いようである。図12、図13は加工後の穴入口部の真円度誤差および穴拡大量であり、両者ともびびり振動の生じる範囲 ($\alpha \geq 45^\circ$) では、 α が大きくなるにつれて、値の増加がみられる。一方、びびり振動の生じない範囲 ($\alpha < 45^\circ$) では、 α の大小による真円度誤差への影響はみられない。1回目の実験での真円度誤差で、 $\alpha=90^\circ$ のときの値が $\alpha=60^\circ$ の場合に比べて小さいのは、3.2節で述べた真円度測定器の接触手が、穴内周面の凸部頂点まで入り込めないことによるものと思われる。また1回目と2回目の実験で、工具コーナ部の摩耗程度が異なる (同一工具による2回目の実験は、1回目の実験の後、切削長さ300 mm 程使用した後にいった) ことの影響は、 $\alpha \geq 45^\circ$ のびびり振動を

Fig. 12 Comparison of roundness error in entrance portion of hole when varying chamfer angle of pre-bored hole

Fig. 13 Comparison of hole oversize in entrance portion of hole when varying chamfer angle of pre-bored hole

生じる範囲でみられ、摩耗量の増加（コーナ部付近の切れ刃逃げ面とマージン部まで張り出した摩耗により、コーナ部の輪郭が丸くなる）は、びびり振動の程度を小さくする。しかし、 $\alpha < 45^\circ$ の範囲ではその影響はみられず、値の変化はなく、安定した穴精度が得られる。この実験条件では、 $\alpha = 45^\circ$ に近い $\alpha = 43^\circ$ 程度の面取り角が適当と思われる。なお穴の深部の精度には面取り角の大小による影響はみられず、表面粗さ $R_a \approx 0.2 \mu\text{m}$ 、真円度誤差 $K_f \approx 10 \mu\text{m}$ 程度である。図 14 は、切削条件（切削速度、送り）を変えた場合の面取り角の相違（(a) $\alpha = 75^\circ$ 、(b) $\alpha = 20^\circ$ ）による加工の安定限界を示したもので、 $\alpha = 20^\circ$ にすることによって、安定領域を高速にまで拡大し、食付き時、びびり振動を抑制することができる。なお、 α を大きく（ $\alpha < 45^\circ$ ）すると、(b) の安定限界は低速側にシフトし、安定領域が狭まる傾向がみられる。

4.2 面取り角と切りくず流出方向

超硬合金リーマを高速域で鋼に対して使用する場合、流れ型の切りくずが排出されることが多く、また低速域での加工に比べて、単位時間当たりの切りくず体積が増す。特に $\alpha > 45^\circ$ の場合、食付き直後、切りくずは上方に排出され、切れ刃間の溝を通して、工具シャンク部に巻き付き、その処理が問題になる。その際の切りくずカール半径は大きい、切削深さ 1~2 mm 程度からはカール半径は小さくなり、この切りくずはまとめて下方に落ちる。図 15 は面取り角の違い（(a) $\alpha = 75^\circ$ 、(b) $\alpha = 30^\circ$ ）による予想される切りくず断面形状と切りくず

(a) Chamfer angle $\alpha = 75^\circ$

(b) Chamfer angle $\alpha = 20^\circ$

Fig. 14 Comparison of stability limit in cutting tests when varying the chamfer angles of hole

Tool: 6-teeth carbide reamer ($B=0.37 \text{ mm}$, $K 10$),
x: No chatter, o: Chatter occurs

(a) Chamfer angle $\alpha = 75^\circ$ (b) Chamfer angle $\alpha = 30^\circ$

Fig. 15 Variation of direction of chip flow and uncut-chip shape when varying the chamfer angle of hole

流出方向⁵⁾および得られた切りくずの外観である。(a)の場合、工具コーナ部に近い側の切りくず厚さは薄く、他方に厚い不等辺の三角形形状の断面をもつ切りくずが排出され（ $\alpha = 60^\circ$ のときの切りくずを樹脂に埋め込んで観察した結果、切削初期とみられる切りくずの断面は不等辺三角形の形状であった）。両辺の厚みの違うことが、切りくずを上方に向ける要因と考えられる。一方(b)の場合、コーナ側で厚い断面になるため、切りくず流出角

は(a)に比べて小さく、切りくずは工具の溝底に突きあたって曲げられ、カール半径は小さくなるものと思われる。この場合、切りくずはまとまって下方に落ち、処理は容易である。

5. 結 論

超硬合金リーマにより、高速域で鋼を加工する場合の食付き時の工具挙動を調べ、びびり振動の特性を明らかにするとともに、下穴入口部の形状による食付き時の切削状態の違い、加工の安定性について検討し、次の諸結果を得た。

- (1) リーマ加工におけるびびり振動は、食付き時の比較的軽切削の期間中に生じやすく、その程度が激しい場合、切れ刃に破損をひきおこすことがある。
- (2) 上記びびり振動周波数には主軸-工具系の曲げの固有振動数に近い、工具刃数の整数倍の成分が多くみられる。
- (3) 工具外周マージン部でのびびり振動の抑制効果は大きい。
- (4) 前加工穴入口部の形状は食付き時のリーマの切削挙動に大きく影響し、工具切れ刃の食付き角 $\lambda=45^\circ$ に対して、入口部面取り角 $\alpha<45^\circ$ にすることによ

り、びびり振動を抑えることができる。

- (5) 入口部面取り角 $\alpha<45^\circ$ にすることにより、切削状態の安定領域を高速度域まで広げることができる。
- (6) 面取り角 $\alpha<45^\circ$ にすることにより、切りくず処理を容易にする切りくず流出方向を得ることができる。

終わりに、本実験の遂行に協力された、当時大学院生の崎谷秀幸氏(現、三菱電機(株))、ならびに工具の提供を頂いた日本タングステン(株)に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 佐久間敬三, 清田 宏: 超硬合金リーマに関する研究, 九大工学集報, **48**, 4 (1975) 101.
- 2) 佐久間敬三, 清田 宏: 超硬リーマによる加工精度に関する研究 (第3報), 精密機械, **48**, 3 (1982) 348.
- 3) R. N. Ryn'kov: Dynamic Stability in High Speed Reaming, *Machines & Tooling*, **35**, 11, (1964) 27.
- 4) 佐久間敬三, 清田 宏: 超硬リーマによる加工精度に関する研究, 九大工学集報, **54**, 6 (1981) 723.
- 5) L. V. Colwell: Predicting the Angle of Chip Flow for Single-point Cutting Tools, *Trans. ASME*, **76**, 2, (1954) 199.