工具従動型回転工具による旋削の研究 (第5報)*

— 切 削 機 構 —

賀 勢 晋** 升 田 雅 博**

Researches on Turning with Self-propelled Rotary Cutting Tool (Part 5)

— Cutting Mechanism —

Susumu KASEI, Masahiro MASUDA

On turning with self-propelled rotary cutting tool, the effective rake angle is approximately equal to the normal rake angle from the relative stand point of view. If the cutting mechanism is varied by the rake angle, it will be difficult to understand its variation upon cutting with rotary cutting tool. Therefore, this cutting mechanism is discussed from the absolute stand point of view and is compared with the conventional cutting. The results obtained are as follows.

- (1) The angle of chip flow plays only a part which varies the tool-chip contact length.
- (2) The self-propelled rotary cutting tool is equivalent to the tool with restricted tool-chip contact length in cutting mechanism.

1. 緒 言

回転工具を用いた切削における切削機構の解析は、Shaw¹⁾に代表されるように平面ひずみ状態と仮定し、切削現象を工具の上に乗って観察するいわゆる相対的立場から試みられてきた。その結果、切削機構の変動に大きく影響する因子は有効すくい角であると結論されている。

工具の回転速度が被削材周速に工具傾き角の正弦を乗じた関係に保たれるような工具従動型回転工具での切削を相対的立場から観察すると有効すくい角はほぼ直角すくい角に等しくなり²⁾、工具従動型の切削機構の変動を理解することは困難である。このようなことから、本報では作業者の立場から切削現象を観察するいわゆる絶対的な観点から工具従動型回転工具切削における切削機構を論じ従来の切削と対比させた。その結果、この切削機構はすくい面拘束バイト切削³⁾で工具-切りくず接触面積を変化させた状態に対応させられることを実験的に確認したので報告する。

2. 切削模型と工具-切りくず接触面積

2.1 切削模型

工具傾き角 i を持った回転工具を用いて切削速度 (被削材速度) V_w 、工具送り速度 f 、切込み深さ t_0 なる切削条件で切削を行っている状態を図示すると図1のよう

になる。

ここで、解析を簡単にするために図2のような切削模型を採用する。

- 1) 切れ刃は円形であるが、切削に關与している部分 (図1の $\overline{AB}$) を直線切れ刃 AB とする。
- 2) 直線 $\overline{AB}$ を切れ刃としても切削面積は円形切れ刃 $\overline{AB}$ の場合と同じである。また、せん断角は切れ刃の各点において一様とする。
- 3) 切りくず流出は切れ刃の各部において一様な方向をとる。
- 4) 送り速度の影響は無視する。

図2に示した切削模型をもとに回転工具を用いた場合の切削現象を作業者の位置より観察する (絶対的観察) と切削速度 V_w 、切れ刃移動速度 V_r のとき切りくずはすくい面上を切れ刃に垂直な方向と角度 (切りくず流出角) η_c なる方向に速度 (切りくず流出速度) V_c で流出している。これを工具上からみれば (相対的観察) 相対工具傾

図1 回転工具切削の概略図

* 原稿受付 昭和50年4月18日。昭和50年度精機学会春季大会学術講演会 (昭和50年4月5日) にて発表。

** 正 会 員 徳島大学工学部 (徳島市南常三島町2-1)

図2 切削模型

き角 Δi を持った切れ刃は速度 (相対切削速度) V で切削が行われ, その時の切りくず流出方向 (切りくず相対流出角) は $\Delta\eta_c$ で速度 (切りくず相対流出速度) は V_f である。

すくい角は次のように定義される。

直角すくい角は切れ刃に垂直な面におけるすくい角で α_n , 絶対系における有効すくい角は切削速度ベクトル V_w と切りくず流出速度ベクトル V_c とを含む面におけるすくい角で α_e , また, 相対系における有効すくい角は相対切削速度ベクトル V と切りくず相対流出速度ベクトル V_f とを含む面におけるすくい角で $\Delta\alpha_e$ で表す。

それぞれの有効すくい角は次式より決定される。

$$\sin \alpha_e = \sin \eta_c \sin i + \cos \eta_c \cos i \sin \alpha_n \quad (1)$$

$$\sin \Delta\alpha_e = \sin \Delta\eta_c \sin \Delta i + \cos \Delta\eta_c \cos \Delta i \sin \alpha_n \quad (2)$$

2.2 工具-切りくず接触面積

回転工具切削におけるすくい面の応力値の挙動を理解するには工具-切りくず接触面積を決定しなければならない。以下, 工具-切りくず接触面積は次の仮定のもとに計算される。

図3に示すように, 半径 r の工具において切削に關与している切れ刃部を $\widehat{AB}$, 切れ刃から工具中心方向に与った最大切りくず接触長さを $l \cos \alpha_n$, 点 O を中心とした半径 $r - l \cos \alpha_n$ の円に点 B から接線を引きその接点を C とすれば, 工具-切りくず接触面積は $\widehat{AB}$, BC , CA で囲まれた部分である。

$\widehat{AB}$ と $\widehat{AB}$ で囲まれた面積を S_{AB} , $\triangle ABC$ の面積を

図3 最大切込み深さおよび工具-切りくず接触面積

表1 実験条件および工具形状

		回転工具切削	すくい面拘束 二次元切削	通常二次元切削
工具形状	すくい角 (deg)	-10, 0, +10	-10, 0, +10	-20, -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50
	逃げ角 (deg)	20	6	6
	工具直径 (mm)	33.10	直線切れ刃 すくい面逃げ 60°	直線切れ刃
切削条件	切削速度 (m/min)	60	60	60
	切込み深さ (mm)	0.3	0.200, 0.225, 0.275	0.225
	送り量 (mm/rev)	1.125	—	—
	工具傾き角 (deg)	10, 20, 30, 40, 50, 60	—	—
	切削幅 (mm)	—	4	4
切削状態	外丸削り	端面削り	端面削り	端面削り
	乾式	乾式	乾式	乾式
工具材質		高速度鋼 第4種		
被削材材質		七三黄銅		

S_{ABC} とすれば, 直角すくい角 α_n を考慮して工具-切りくず接触面積 S_c は次の各式より求められる。

$$S_c = (S_{AB} + S_{ABC}) / \cos \alpha_n \quad (3)$$

$$S_{AB} = r^2 \sin^{-1} \frac{\overline{AB}}{r} - \frac{1}{2} \overline{AB} \sqrt{r^2 - \frac{1}{4} \overline{AB}^2} \quad (4)$$

$$S_{ABC} = \frac{1}{2} \overline{AB} \cdot \overline{CD} \quad (5)$$

$\overline{AB}$, $\overline{CD}$ は工具中心を原点とした直角座標 (X , Z) を考え, 図3に示す各点の座標より求められる。

3. 実験条件

回転工具切削における切削機構の変動を従来の二次元切削と比較するために回転工具切削は3種類の直角すくい角で工具傾き角を変化させ, 二次元切削はすくい角を変化させた場合と3種類のすくい角で工具-切りくず接触長さを变化させた場合とについて実験を行った。実験

切削速度: 60 m/min, 切込み深さ: 0.3 mm, 送り量: 1.125 mm/rev

図4 工具傾き角と切削抵抗との関係

条件は表1に示す。二次元切削の切削幅は回転工具切削と対応させるために図3において切削に関与している切れ刃長 $\overline{AB}$ におおよそ一致させた。切込み深さについてはすくい面拘束バイト切削ですくい角が 0° のときのみ3種類を選び切削機構に与える影響を調べた。

回転工具切削は切込み深さが切れ刃の各点で異なるが、切込み深さが最大となる状態は図3より被削材表面と被削材1回転前の工具との交点Eと工具中心Oとを結んだ線上にある。これを最大切込み深さ $t_m(\overline{EH})$ とすると次式を用いて求められる。

$$t_m \approx r - \sqrt{r^2 - \frac{2f}{\cos i} \sqrt{2rt - t^2} - \frac{f^2}{\cos^2 i}} \quad (6)$$

回転工具切削における工具-切りくず接触長さは切込み深さが各点で異なり、かつ、切れ刃が移動するために直接測定できない。しかしながら、工具すくい面上に塗

図5 工具傾き角と切りくず流出方向との関係

ったインキを切りくずがこすり落とした最大の長さは切込み深さが最大となる位置の接触長さを表していると考えられる。なぜならば、工具-切りくず接触長さに影響するのは絶対的観察における切りくず流出方向であり、これは図3の $\overline{CE}$ 方向にほぼ一致するとすれば、切込み深さ $\overline{EF}$ に対する工具-切りくず接触長さは $\overline{CF}$ となり、これを工具中心方向に移すと $\overline{CF}/\overline{EF} \approx \overline{GH}/\overline{EH} = l/t_m$ となる。

切削抵抗、切りくず形状などの測定方法は既報²⁾⁴⁾と同様である。

4. 実験結果および考察

4.1 回転工具切削の相対的観察

4.1.1 切削抵抗

3種類の直角すくい角 $\alpha_n(-10^\circ, 0^\circ, 10^\circ)$ を持つ回転工具で切削した場合の切削抵抗の変化を図4(a)に示す。どの α_n においても工具傾き角 i の増大とともに主分力 F_c 、背分力 F_t は減少傾向を示し、送り分力 F_s は増大している。これを図2に示すように切れ刃 $\overline{AB}$ に沿った方向の成分 F_x 、すくい面に垂直な方向の成分 F_y 、およびすくい面上で切れ刃に垂直な方向の成分 F_z で表示すれば図4(b)のようになる。

i の増加とともに F_y は増大し、 F_z は F_t と同様の傾向を示すが、 F_x はほとんど値を持たない。

4.1.2 切りくず流出角

切りくず流出角 η_c と図2の速度関係より計算された切りくず相対流出角 $\Delta\eta_c$ を図5を图示すると図5のようになる。

図6 工具傾き角と速度関係

図7 工具傾き角と有効すくい角との関係

η_c は i の増加とともに大きくなり、かつ、 α_n が大なるとき大きくなっているが、 $\Delta\eta_c$ は α_n に関係なくほぼゼロである。

4.1.3 速度関係

工具の回転速度 V_r/V_w 、切りくず流出速度 V_c/V_w について測定値を図示すると図6のようになる。 V_r/V_w はほとんど工具傾き角の正弦(破線で表示)に一致し、相対工具傾き角 Δi はゼロに近い状態となっている。

4.1.4 回転工具切削の相対的観察

上に述べた実験結果より、工具従動型回転工具を用いた切削で $\Delta i \approx 0$ のとき、 $\Delta\eta_c \approx 0$ 、 $F_x \approx 0$ となり、相対的観察においては切れ刃が円形である影響⁵⁾を除いてお

切削速度: 60 m/min, 切込み深さ: 0.225 mm

(a) 通常二次元切削

切削速度: 60 m/min, 送り量: 1.125 mm/rev, 切込み深さ: 0.3 mm

(b) 回転工具切削

図8 通常二次元切削と回転工具切削との比較

よそ二次元切削と同等であるとみなすことができる。また、有効すくい角 $\Delta\alpha_e$ は直角すくい角 α_n に等しい(図7参照)ことから、どの工具傾き角においても切りくず生成状態、切削抵抗などは切削系における作用角、寸法の変化に伴う変化以外は同じでなければならない。しかしながら、図4に示したように切削抵抗は i とともに変動し、相対的観察では理解できない面を含んでいる。

4.2 回転工具切削の絶対的観察

通常の三次元切削における一つの評価因子である有効すくい角について着目すると、回転工具切削は図5に示したように i の増加とともに η_c も大きくなるので有効すくい角 α_e もまた i とともに大となる(図7参照)。

三次元切削における有効すくい角は二次元切削のすくい角と同等の役割をなす⁶⁾とすると、すくい角の増大は図8(a)に示すように、工具すくい面上の垂直応力 σ_t の減少、摩擦係数 μ の増大および切削比 r_c の増大などを

切削速度: 60 m/min, 切込み深さ: 0.225 mm

図9 すくい面拘束バイトを用いた二次元切削における工具-切りくず接触長さ l と切削抵抗との関係

もたらし。ここで、 σ_t の計算は工具-切りくず接触長さ l が切りくず厚さの1.1倍になる⁶⁾とした仮定に立っている。この値はすくい面拘束量を変化させた場合に切削抵抗が一定値となるときの l とほぼ一致している。

回転工具切削における切削機構の変動を有効すくい角の変化で理解できるかどうかを実験的に確認すると図8(b)のようになる。

有効すくい角 α_e の増加とともに切削比 r_c は増大し、二次元切削と同じ傾向を示すが、 σ_t の増大、 μ の減少は全く傾向を異にしている。

このように、回転工具切削における μ 、 σ_t などの挙動は従来からいわれているような有効すくい角の変化からでは説明できない。この一つの理由として、橋本ら⁸⁾が述べているように、従来の三次元切削では切りくず流出方向はすくい面上の力の作用方向と何らかの関係が存在するが、回転工具切削は i の変化に関係なく $F_x \approx 0$ であることから、すくい面上に作用する力と切りくず流出角 η_c とは一定の関係が存在しない結果によると考えられる。

i とともに η_c が変化しても力の作用方向の変動を伴わないが、 η_c の変化は少なくとも工具-切りくず接触面積を変化させていると考えられる。この絶対的観察と相対的観察での二次元切削状態とを重ね合わせると工具従動型回転工具切削は従来の二次元切削ですくい面を拘束した状態に対応させることができる。次に、回転工具切削とすくい面拘束バイト切削との対応性について吟味する。

図10 工具傾き角 i と工具-切りくず接触長さとの関係

4.3 回転工具切削とすくい面拘束バイト切削との比較

4.3.1 すくい面拘束バイト切削における切削抵抗

実験は3種類のすくい角 α_n (-10° , 0° , 10°)と3種類の切込み深さ t_0 (0.200 mm, 0.225 mm, 0.275 mm)を選んで行った。図9に α_n をパラメータに工具-切りくず接触長さ l を変化させた場合の主分力 F_c 、背分力 F_t を示す。両者の分力とも l がある一定値に達するまで増大する。切削抵抗が一定となる状態の l は α_n の増大、切込み深さ t_0 の減少とともに小さくなる。しかしながら、切込み深さの変化に対しては工具-切りくず接触長さを l/t_0 の形で表示すれば後述のようにほとんどその影響は無視できる。

4.3.2 工具-切りくず接触長さ

図10に工具傾き角 i を変化させたときの工具-切りくず接触長さ l/l_m の実測値を示す。

直角すくい角 α_n 、工具傾き角 i が大なるほど l/l_m は小さくなっている。

二次元切削では図9よりすくい角の拘束量を減少させていったとき切削抵抗が変化し始める工具-切りくず接触長さ l/t_0 は $\alpha_n = -10^\circ$ で約4.07、 $\alpha_n = 0^\circ$ で約3.82、 $\alpha_n = 10^\circ$ で約3.24である。図10に示すように回転工具切削の方が二次元切削より非常に大きい。これは切りくず流出状態の不安定なこと、真の接触と見かけの接触との差などにも起因していると思われるが、これまでに報告⁶⁾⁸⁾されているように、工具-切りくず接触長さは切りくず厚さと関連があるということを考慮すれば、後述のように丸刃のために切りくず厚さが増加し、その結果、

すくい面拘束バイト切削: 切削速度; 60 m/min, 切込み深さ; 0.225 mm
 回転工具切削: 切削速度; 60 m/min, 切込み深さ; 0.3 mm, 送り量; 1.125 mm

図11 すくい面拘束バイト切削と回転工具切削との比較

回転工具切削は工具-切りくず接触長さを大きくしていると考えることができる。

本報では図10に示した測定値を用いて回転工具切削におけるすくい面摩擦応力 τ_t , 垂直応力 σ_t などが前述の仮定のもとに計算された。

4.3.3 回転工具切削とすくい面拘束バイト切削との対応性

図11に回転工具切削とすくい面拘束バイト切削におけるそれぞれの直角すくい角でのすくい面摩擦応力 τ_t , 垂直応力 σ_t , 摩擦係数 μ および切削比 r_c などの結果を示す。

切込み深さ t_0 の相違における σ_t , μ , r_c などの変化は工具-切りくず接触長さを l/t_0 の形で示せば図11(b)で理解されるようにほとんど認められない。したがって, 回転工具切削においても i の変化における t_m の変化からは σ_t , μ , r_c などは変わらないと考えられる。

直角すくい角 α_n の相違による σ_t , μ , r_c などの変化は α_n が大なるほど σ_t は減少, μ , r_c が増大していることは回転工具切削, 二次元切削とも同様である。

工具-切りくず接触長さ l/t_m の減少によって σ_t は増大, μ は減少, そして, r_c は増大する傾向は回転工具切削, 二次元切削とも同じである。その上, 回転工具切削と二次元切削との σ_t 値はよく一致している。しかしながら, r_c に関しては回転工具切削が二次元切削より小さ

く, μ については l/t_m が大なるところではほぼ同じ値であるが, 小なるところでは小さくなっている。

回転工具切削と二次元切削との間に値の不一致がみられる原因として円形切れ刃と直線切れ刃, 切れ刃移動と切れ刃固定の相違であると考えられる。

前者について考えれば, 切りくず流出方向は切れ刃に垂直な方向をとるとすれば丸刃のために切りくずは両側から圧縮され厚さ方向に延び切削比を小さくさせている。後者については, 回転工具切削で i の増大(l/t_m の減少)とともに切りくずに二次流れが見られなくなる結果²⁾からも理解されるように, 切りくず流出の際に切りくずが工具すくい面から受ける摩擦抵抗は工具回転によって緩和され摩擦係数をより減少させている。

回転工具切削の切削過程には丸刃や切れ刃移動の影響が含まれるが, 切削機構の変動傾向はすくい面拘束バイト切削と変わらない。したがって, 回転工具切削の切削過程は切りくず流出角の変動によるすくい面拘束量の変化によって説明できる。

5. 結 論

工具従動型回転工具を用いた切削における切りくず生成状態, 切削抵抗などを従来のバイト切削に対比させて実験的に観察した結果次のことが明らかになった。

(1) 従動型回転工具切削では相対的観察と絶対的観察

とを同時に行わなければならない。

- (2) 相対的観察では工具傾き角に関係なく切りくず流出方向, すくい面上の作用方向はほぼ切れ刃に垂直であり, 丸刃の影響を除いては二次元切削状態として取扱うことができる。
- (3) 絶対的観察では工具傾き角とともに切りくず流出角が増大し, 切りくず接触面積を減少させて切削機構を変化させている。これは従来の切削で工具すくい面を拘束した状態に対応させられる。

参 考 文 献

- 1) M.C. Shaw: The Rotary Cutting Tool, Trans. ASME, 74, (1952) 1065.
- 2) 賀勢 晋, 原 利雄, 升田雅博: 工具従動型回転工具による旋削の研究 (第3報)——切りくず生成機構, 精密機械, 37, 10 (1971) 29.
- 3) 例えば, 臼井英治, 菊地千之: 接触面積拘束工具の切削性の研究 (第2報), 精密機械, 29, 7 (1963) 16.
- 4) 賀勢 晋, 原 利雄, 升田雅博: 工具従動型回転工具による旋削の研究——切削抵抗と切削動力の測定, 精密機械, 37, (1971) 1.
- 5) 例えば, 大越 諄, 国吉真暁: 切削抵抗に及ぼす切刃の曲率の影響, 昭和43年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1968) 49.
- 6) 臼井英治, 益子正己: 三次元切削の基礎的研究 (第1報), 日本機械学会論文集, 38, 316 (1972) 3255.
- 7) M.C. Shaw, N.H. Cook & I. Finnie: The Shear Angle Relationship in Metal Cutting, Trans. ASME, (1953) 273.
- 8) 横山武人, 橋本文雄: 三次元切削に関する基礎的研究, 精密機械, 26, 1 (1960) 32.
- 9) 加藤 仁, 山口勝美, 山田又久: 工具, 被削材の境界面に働く応力分布, 日本機械学会論文集, 37, 298 (1971) 1228.

——表紙写真説明——

FS-70H マシニングセンタ

FS-70H マシニングセンタは NC 機に ATC 装置, およびロータリーテーブルを具備させて完全自動化をはかり, 自動サイクルによりすべての機能を有効に働かせて熟練技能者の不足を補い, 加工能率を飛躍的に高めています。

また, 自動ワーク交換装置との結合により完全無人化をものはかることができます。

特 長

1. 機械と刃物のマッチングにより稼働率を向上できる。
2. 高馬力・高速切削により生産量を増大できる。
3. 被削材の多様化に 適応した 最適切削条件を 提供できる。
4. 各機能の高い信頼性による無人化運転が実現可能。
5. オートローディング装置の装着が可能。

FS-70H マシニングセンタ主要寸法表

項	目	単	位	数	値	項	目	単	位	数	値
1. 機 械 仕 様						早 送 り mm/min 4,800					
テ	ー	ブ	ル	の	大	き	さ	mm		700×700	切削送り mm/min 5~1,200
テ	ー	ブ	ル	の	T	溝		mm×本		20×6	
テ	ー	ブ	ル	の	割	出	角			90° 自動 4 分割	
テ	ー	ブ	ル	最	大	積	載	重	量	kg	2,000
テ	ー	ブ	ル	面	と	主	軸	中	心	の	距
主	軸							mm		80~730	
主	軸							mm		105	
主	軸									AST No. 50	
主	軸							r.p.m.		35~2,200/24	
テ	ー	ブ	ル	左	右	ス	ト	ロ	ッ	ク (X)	mm 850
テ	ー	ブ	ル	前	後	ス	ト	ロ	ッ	ク (Z)	// 650
主	軸							//		650	
送	り							//			
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送	り										
送

新日本工機株式会社

本社 大阪市東区北久宝寺町 2 丁目 44 番地 ☎ 06(261)3131(代) 広島出張所 ☎ 0822(21)8556(代)
 機械営業本部・東京支社 東京都中央区日本橋 2-1-10 新湊出張所 ☎ 0252(53)1369(代)
 柳屋ビル 9 階 ☎ 03(272)0371(代) 信太山工場 ☎ 0722(71)1201(代)
 名古屋支店 ☎ 052(571)6401(代) 岬工場 ☎ 07249(2)2111(代)
 九州支店 ☎ 093(541)0338(代)