三次元切削に関する基礎的研究*

(第2報 剣バイトの場合)

橋 本 文 雄**

The Mechanism of Three-dimensional Cutting Operations
—Part 2, Single-point Cutting Tool with Side-cutting Edge Angle—

Fumio HASHIMOTO

Single-point cutting tool is the most universally used. part 1 gave a description of the oblique cutting tool, and then this paper shows the results of the investigations in the right-cut, tipped single-point tool with side-cutting edge angle. The various angles of the single-point cutting tool were explained and defined. And the relations between the components of cutting force and normal or tangential forces on tool face were explained. The direction of chip flow was experimentally investigated. And the application of the theory of orthogonal cutting to the single-point cutting was described. And this paper comprises a study of friction on tool face.

1. 緒 論

Single-point cutting tool は最もよく使われている工具である。この中で図1に示されるような横切れ刃角を有するバイト、すなわちいわゆる剣バイトは旋盤加工、中ぐり加工、正面フライス加工等に用いられ、Single-point Cutting tool を代表していると考えてよい。この剣バイトに関しては従来からバイト寿命等の研究が進められ、最近では実際の旋削作業標準等も設定されている¹⁾。

一方切削機構の研究は主として二次元切削の場合について行なわれ、ほぼ完成された観がある。この切削理論を一般のバイトに適用するときには一般のバイトの切削現象が三次元的であるので種々の検討を加えねばならない。第1報²⁾では三次元切削における有効すくい角を決定し切削現象を解析しなければならないことを指摘し、主として斜切れ刃を有するバイト (Oblique cutting tool) について報告したので、ここでは剣バイトの場合について詳しく報告しよう。そして二次元切削で切削理論を展開したと同様の取り扱いを一般のバイトにおいても行なうために種々の解析を行なった。

2. バイトの角度

Single-point cutting tool を用いた場合の切削機構を考察するためにまずバイトの各角度を定義しよう。こ

図1 剣バイトの切り屑流れ方向と有効すくい角 α_e

こでは空間に座標をとり、旋盤の主軸方向すなわち送り方向とこれと直角のバイトの軸方向すなわち切り込みの方向および以上の二つの軸を含む平面に垂直の方向すなわち切削速度の方向の三つの座標軸を定め、座標系Kをとる。そしてこの直角座標を基準にして Single-point cutting tool の各角度を考えていくこととする。

図1に横切れ刃角を有する右勝手のバイトを示した。各角度を図2のように表わし、名称を次のようにつける。

i = 上すくい角 (Back rake angle)

* 昭和35年4月精機学会春季大会にて講演

** 大阪府立大学工学部 正会員

図2 削バイトの各角度

j = 横すくい角 (Side rake angle)

α_b' = 切れ刃傾き角 (Inclination of cutting edge)

α_n = 真の横すくい角 (True side rake angle)

θ_e = 前逃げ角 (Front relief angle)

θ_s = 横逃げ角 (Side relief angle)

C_e = 前切れ刃角 (End cutting edge angle)

C_s = 横切れ刃角 (Side cutting edge angle)

r_n = ノーズ半径 (Nose radius)

すると

$$\tan i = \frac{\tan \alpha_b' + \tan \alpha_s \cdot \tan C_s}{1 + \tan C_s \cdot \tan C_e} \quad (1)$$

$$\tan j = \frac{\tan \alpha_s + \tan \alpha_b' \cdot \tan C_e}{1 + \tan C_s \cdot \tan C_e} \quad (2)$$

なる関係がある²⁾。また切れ刃の傾き角は

$$\tan \alpha_b' = \cos C_s \cdot \tan \alpha_b \quad (3)$$

$$\tan \alpha_s' = \cos C_e \cdot \tan \alpha_s \quad (4)$$

となる。

一般にバイトの角度としては切れ刃傾き角 α_b' 、バイトの切れ刃に垂直な面内で考えたすくい角 α_n 、横切れ刃角 C_s 、前切れ刃角 C_e 、横逃げ角 θ_s 、前逃げ角 θ_e が与えられるから、これ等の値からは次の式を使用して各角度を求めることができる。

$$\tan i = \cos C_s \cdot \tan \alpha_b' + \frac{\sin C_s \cdot \tan \alpha_n}{\cos \alpha_b'} \quad (5)$$

$$\tan j = \frac{\frac{\tan \alpha_n}{\cos \alpha_b'} - \sin C_s \cdot \tan i}{\cos C_s} \quad (6)$$

Single-point cutting tool の角度を考えるとときに座標軸 X, Y, Z を基準にしたすくい角 i, j をとる。

また切り屑の進行する方向を含む平面内で考えたバイトのすくい角すなわち有効すくい角 α_e は

$$\tan \alpha_e = \cos \gamma \cdot \tan i + \sin \gamma \cdot \tan j \quad (7)$$

となる²⁾。ここに γ は図1に示すように座標面上で考えた切り屑流れ角である。

3. バイトのすくい面上の摩擦力

図3に示すような切り込みの方向 OX 、送りの方向 OZ 、切削速度の方向 OY の3方向の切削抵抗分力を工具動力計で測定すると、これらの力を座標変換して、切れ刃にそつた力、切れ刃に直角なすくい面上の力、バイトのすくい面に垂直な力を示すことが出来る。

図3 すくい面上の力と切り屑流れ方向

座標系 K を図のようにとり、座標軸 OX, OY, OZ を定める。まず Y 軸を中心にして X, Z 軸を $(-C_s)$ 回転する。これはバイトの横切れ刃角 C_s をとつたこととなる。こうして新しく出来た座標軸を OX_1, OY_1, OZ_1 とする。次に Z_1 軸を中心にして Y_1, X_1 軸を $(-\alpha_b')$ あるいは $(+\alpha_b')$ 回転する。すなわち切れ刃傾き角を切れ刃にそつてとるわけで、 i, j の大きさにより $(-\alpha_b')$ か $(+\alpha_b')$ かをとるわけである。この場合

$\tan C_s (\tan j / \tan i) > 1$ の時 $(-\alpha_b')$ だけ回転

$\tan C_s (\tan j / \tan i) < 1$ の時 $(+\alpha_b')$ だけ回転

$\tan C_s (\tan j / \tan i) = 1$ の時回転せず

となる。こうして出来た新しい座標軸を OX_2, OY_2, OZ_2 とする。最後に X_2 軸を中心にして Y_2, Z_2 軸を $(-\alpha_n)$ だけ

け回転する。このようにしてできた新しい座標系 K' の座標軸を OX_3, OY_3, OZ_3 とするとこれらの軸上の力 F_t', F_c', F_s' はもとの座標系 K の軸 OX, OY, OZ 上の力 F_t, F_c, F_s を使って次のように表わすことが出来る。

$$F_t' = F_t \cos C_s \cdot \cos \alpha_b' + F_c \sin \alpha_b' - F_s \sin C_s \cdot \cos \alpha_b' \quad (8)$$

$$F_c' = F_t (\sin C_s \cdot \sin \alpha_n - \cos C_s \cdot \sin \alpha_b' \cdot \cos \alpha_n) + F_c \cos \alpha_b' \cdot \cos \alpha_n + F_s (\cos C_s \cdot \sin \alpha_n + \sin C_s \cdot \sin \alpha_b' \cdot \cos \alpha_n) \quad (9)$$

$$F_s' = F_t (\sin C_s \cdot \cos \alpha_n + \cos C_s \cdot \sin \alpha_b' \cdot \sin \alpha_n) - F_c \cos \alpha_b' \cdot \sin \alpha_n + F_s (\cos C_s \cdot \cos \alpha_n - \sin C_s \cdot \sin \alpha_b' \cdot \sin \alpha_n) \quad (10)$$

上の三つの式はバイトの切れ刃傾き角 α_b' 、切れ刃に直角なすくい角 α_n 、横切れ刃角 C_s が与えられれば F_t', F_c', F_s' が求められることを示す。

図3に示すようにバイトのすくい面上には F_t' と F_s' の合力 F_f という力がすくい面にそつて作用する。すなわち

$$F_f = (F_t'^2 + F_s'^2)^{1/2} \quad (11)$$

となる。 F_f と軸 OZ_3 との間の角を η_t とすると

$$\tan \eta_t = \frac{F_t'}{F_s'} \quad (12)$$

となり η_t は F_f の方向をあらわすこととなる。

さてこの η_t と実際に切り屑が進行する方向とは一致する場合もあるが、普通は少しふれる。そこでバイトのすくい面上における切り屑流れ角を η_c とすると

$$\eta_c - \eta_t = \delta \quad (13)$$

とおき δ なる偏差角を考えることが出来る。すなわち、 $F_f \cdot \cos \delta = F_f'$ とおくと F_f' はバイトのすくい面において切り屑が進む方向に働く摩擦力となる。したがつてバイトのすくい面と切り屑との間の摩擦係数 μ は

$$\mu = \frac{F_f'}{F_c'} \quad (14)$$

となる。なぜならば F_c' がバイトのすくい面に垂直に作用している力をあらわしているからである。

4. 実 験

被削材は 900°C で 1 時間焼鈍した炭素鋼を用いた。寸法は長さ 500mm、直径 60mm の中実丸棒で硬度は HB113.4 である。工作機械は直結式高速 6 呎旋盤で、工具は超硬 S 2 を用いた。バイトはすべて #200 ダイヤモンドホイールで研摩仕上げしたものを用い、次のような

図 4 (A) 切削抵抗 ($V=135\text{m/min}$, $f=0.12\text{ mm/rev}$, $t=1\text{mm}$)

図 4 (B) 切削抵抗 ($V=80\text{m/min}$, $f=0.12\text{ mm/rev}$, $t=1\text{mm}$)

図 4 (C) 切削抵抗 ($V=135\text{m/min}$, $f=0.05\text{ mm/rev}$, $t=1\text{mm}$)

図 4 (D) 切削抵抗 ($V=80\text{m/min}$, $f=0.05\text{ mm/rev}$, $t=1\text{mm}$)

図 5 (A) バイトのすくい面上の力 (図 4 (A) より計算)

図 5 (C) バイトのすくい面上の力 (図 4 (C) より計算)

各角度のものに定めた。

- 切れ刃傾き角 $\alpha_b' = 0$
 前逃げ角 $\theta_e = 6^\circ$
 横逃げ角 $\theta_s = 6^\circ$
 前切れ刃角 $C_e = 15^\circ$
 横切れ刃角 $C_s = 15^\circ$

ノーズ半径 $r_n = 0.5\text{mm}$

また切れ刃に直角な面内でのすくい角 α_n を 35° より -10° まで 5° おきに变化させた。

この場合には (1), (2) 式より

$$\tan i = \frac{\tan \alpha_s \cdot \tan 15^\circ}{1 + (\tan 15^\circ)^2}$$

$$\tan j = \frac{\tan \alpha_s}{1 + (\tan 15^\circ)^2}$$

となり。

図 5 (B) バイトのすくい面上の力 (図 4 (B) より計算)

図 5 (D) バイトのすくい面上の力 (図 4 (D) より計算)

$$\tan \alpha_s = \frac{\tan \alpha_n}{\cos 15^\circ} \quad (15)$$

なる故 i と j が求められる。

実験はすべて乾式切削で行なった。第1報²⁾に示した工具動力計を用いて切削抵抗を測定し、図4のような結果を得た。図は横軸に α_n 、縦軸に各分力をとつてあ

る。また切削速度 V m/min, 送り f mm/rev, 切り込み t mm はそれぞれ図中に示した。

さて前節で述べたように座標変換を行なうと(8)(9)(10)式により切れ刃にそつた力 F_t' , 切れ刃に直角なすくい面上の力 F_s' , すくい面に垂直な力 F_c' がそれぞれ計算される。

この F_t' , F_s' , F_c' を図4の値から計算して図示すると図5のようになる。なお式(11)より F_f を求め、次に次節で述べる方法により、(13)式の偏差角 δ を求めて $F_f' = F_f \cos \delta$ を求め、図5の図中にこれを示した。 F_f' は切り屑の進行する平面内でバイトのすくい面に作

用する摩擦力となる。 F_c' はバイトのすくい面に作用する垂直力である。この F_c' と F_f' が二次元切削におけるバイトのすくい面に作用する垂直力と摩擦力に相当するものである。

二次元切削においてはバイトのすくい角の変化に対して、すくい面上の摩擦力はあまり変化しない。またすくい面に垂直な力はすくい角と共に直線的に変化する³⁾。

三次元切削においては二次元切削のすくい角に相当するものは切削の進行する方向を含む平面内で考えたバイトのすくい角であるから³⁾, 有効すくい角 α_e となる。

このバイトについて(7)式を使用してすくい角 α_n に対する α_e を計算すると図6のようになる。ただし切り屑の進行する方向 η は次節で述べるような方法で実測して、その結果を用いた。図に示されるように α_e はほとんど α_n に等しい。そこで α_e のかわりに α_n を用いて図5に示すように α_n に対して F_f' と F_c' を考えると上述の二次元切削の場合と同様に摩擦力 F_f' はあまり変化せず、すくい面の垂直力 F_c' は直線的に変化していることがわかる。

5. 切り屑の流れ方向

前節で述べた実験と同時に切削中にバイトのすくい面上の写真撮影を行なう。1/500 秒のシャッター速度で写した1例を写真1に示す。この場合に図1の座標面 OX—OZ 平面を撮影するように写真機は設置されている。

図6 有効すくい角
(写真1の結果を使用して計算)

写真1 切り屑流れ方向の測定写真

写真中の記号は1行目:被削材回転数(r.p.m.), 2行目:バイトのすくい角 α_n (度), 3行目:送り A=0.05, B=0.12, C=0.24mm/rev, を表わす。すべて切り込み 1mm, 乾式切削

そして拡大された写真よりバイトの切れ刃に対して切り屑流れ方向を測定するのである。いま切り屑が曲線運動をしている場合を考えよう。図7に示すように $OX-OZ$ 平面を考えるとこのバイトの横切れ刃角は 15° であるから、切れ刃 OA と OX 軸とは 15° の角度をなすわけである。いま切り屑の中心線を MM' とすると、切り屑が図のようにカールして排出されているときは MM' の外側で引つ張りを受けて伸び内側で圧縮されてちじんでいると考えられる。

さて一方バイトのすくい面と切り屑との接触面積を考

図7 切り屑の流れ方向 η の測定

図8(A) 切り屑流れ方向
(写真より測定)

図8(B) 切り屑流れ方向
(写真より測定)

え、これがいま $OBCD$ であるとしよう。 OD, BC は切り屑が曲線運動しているときは円弧となる。 MM' と CD との交点を L とし、 ML を結び OX との間の角を η とする。これが切り屑流れ方向を与える角である。いま同じように BC と OX 軸との間の角を η_1 , OD と OX 軸との間の角を η_2 とすると

$$\eta_1 < \eta < \eta_2$$

となる。切り屑流れ角としては η を採用する。この η を実測して示すと図8のようになる。図4, 図5においては例が多くなるので送り f は $0.05, 0.12 \text{ mm/rev}$ の値のみを示したが、以下においては $f = 0.24 \text{ mm/rev}$ の値も示すこととする。

図9(A) 切り屑流れ角
(図8(A)より計算)

図9(B) 切り屑流れ角
(図8(B)より計算)

さて座標面上の切り屑流れ角 η がわかると図3に示すバイトのすくい面上の切り屑流れ角 η_c が計算される。 η と η_c の間には

$$\sin \eta_c = \cos \eta \cdot \cos i \cdot \cos \alpha_e + \sin i \cdot \sin \alpha_e \quad (16)$$

という式が成立するので数値計算することが出来る。この結果を示すと図9の如くなる。

以上の如く切り屑がバイトのすくい面上を切削中に進む方向がわかつたので、次にバイトのすくい面上に働く切削抵抗の分力 F_f の方向を考えてみよう。図3に示されたように F_t' と F_s' が計算されると F_f の方向 η_f が

図 10 (A) すくい面上の摩擦力の方向
(図5より計算)

$V=80\text{m/min}$ $t=1\text{mm}$ パラメーター: $f\text{mm/rev.}$

図 10 (B) すくい面上の摩擦力の方向
(図5より計算)

図 11 (A) すくい面上の摩擦力と切り屑
進行方向との偏差角

図 11 (B) すくい面上の摩擦力と切り屑
進行方向と偏差角

計算される。すなわち式 (12) を使用して η_t の値を計算し図示すると図10のようになる。この η_c と実際の切り屑の進行方向 η_t を比較するために式(13)を使用して $\eta_c - \eta_t = \delta$ の値を求めてみる。すると図11のようになる。

図 12 (A) 摩擦係数

図 12 (B) 摩擦係数

以上の実験に示されたように切り屑がパイトのすくい面上を進むときには、ほぼ切削抵抗の働いている方向に進行すると考えてよい。すなわちすくい面上のベクトル F_f の方向 η_t と実際の切り屑流れ方向 η_c はほぼ等しいが偏差角 δ が存在するわけである。そして α_n が負のとき以外は大部分切り屑は図3のような状態となつて排出され、 η_c の値の方が η_t より大きいことが多い。

6. 摩擦係数

二次元切削におけるバイトのすくい面と切り屑との間の摩擦係数 μ を三次元切削においても考えることが出来る。(14) 式より μ を計算して示すと図12 のようになる。図において二次元切削のすくい角 α に相当する有効すくい角 α_e を横軸にとつてある。二次元切削のときと同様にすくい角が大きくなるにつれて μ の値も大きくなる。すなわちバイトのすくい角 α_n の増大と共に、すくい面上の摩擦力は一定であるのに垂直力が減少し、摩擦係数 μ は増大する。

7. 考 察

三次元切削においては切り屑流れ方向 η_c がわかれば有効すくい角 α_e が決定され、したがって切削機構が明らかとなる。 η_c を使つて α_e を書きあらわせば

$$\sin \alpha_e = \sin \eta_c \cdot \sin i + \cos \eta_c \cdot \cos i \cdot \sin \alpha_n \quad (17)$$

となる。すなわち η_c が重要な因子であることがわかった。

図3において切削抵抗 F_c , F_t , F_s がそれぞれわかると F_c' , F_t' , F_s' および F_f が定まり、 F_f の方向 η_t も定まる。切り屑の進行する方向はほぼ η_t と等しいので二次元切削としてこの F_c' と F_f の含まれる平面を考えてもよい。

さていま切削条件の中で切り込み t , 送り f が変化した場合を考えると、この場合には F_t , F_s という切削抵抗分力が主に 変化するので F_t' , F_s' が変化し η_t の値は変化する。この t と f の変化の割合と F_t , F_s の変化の割合の関係を知れば η_t を求めることができる。またバイトのすくい角 α_n の変化に対しては、図4のように F_t と F_s が変化するから η_t の値が変わってくる。すなわち図10のように η_t はバイトのすくい角 α_n の大きくなるにつれて減少している。実際に切り屑の進む方向を図9でみても η_c は大体この傾向をとつていると思われる。

さて η_t と η_c の偏差角 δ を考えてみよう。これはバイトのすくい面上に作用している摩擦力の方向と実際の切り屑の進行方向との差であるから、切り屑はこの角度だけ被削材からバイトにかかっている力の方向からずれていることになる。図11に示されるようにバイトのすくい角が正のときは大体 δ は正であつて η_c の方が η_t よりやや大きいこととなる。これは切り屑がバイトの軸方向すなわち X 軸の方向に少しずれていることを意味し、第1報で述べたようにバイトの X 軸上のすくい角 i が

存在するときは、斜面となつているバイトのすくい面の低い方へすべつていることをあらわしている。 i が負となると低い方は反対側へ向くので δ も負となる。

一方切り屑の断面を考えてみよう。図7においてバイトのノーズ部分はノーズ半径が 0.5mm であるので切削面積の巾が薄くなつてゐる。そして切り屑断面も 0 のノーズに近い部分では巾が薄くなつてゐる。したがつて切り屑はこの部分でのび易くなり反面ノーズから遠い B の部分では厚いので、前述のように切り屑はスパイラル運動やヘリカル運動をするのである。このために切り屑流れ方向 η_c も摩擦力の方向 η_t より少し大きくなつてゐると思へられる。しかし α_n が負の場合のことを考えると、このノーズ半径の影響よりもバイトのすくい角の影響の方が大きく、図11に示されるように i が大きくなると共に、換言すると α_n の増大とともに δ の値は大きくなる傾向をとつてゐる。

すなわち切り屑流出方向 η_c はバイトの幾何学的図形とすくい面の摩擦特性によつて定まる。また i がわかれば η_c を予知することが出来るという第1報の Oblique cutting tool の結果をそのままここでも使うことが出来る。すなわち η_c は切り屑条件がわかれば決定されるものであるといえよう。

8. 結 論

(1) 三次元切削における切削理論を進めるために、バイトの各角度、各方向の分力の大きさを計算し、二次元切削における切削理論を延長する方法を明らかにした。

(2) 切り屑の流れ方向が分かると、有効すくい角が決定され、すくい面上の摩擦力も計算出来る。

(3) すくい面上の摩擦力はバイトのすくい角が変化してもあまり変化しない。

(4) 一般に用いられているバイトについて摩擦係数を計算してみると、二次元切削における結果と一致する。

(5) 切り屑の流れ方向はすくい面上の摩擦力の方向と大体一致するが偏差角が最大 10° 程度ある。

(6) 切り屑の流れ方向 η_c は切削条件がきまれば決定され、バイトのすくい角 α_n が大きくなると小さくなる。

(1961, 3月29日受付)

文 献

- 1) 竹山, 他: 切削作業標準設定に関する研究, 精密機械, Vol. 24, No. 11, 1958, Vol. 25, No. 2, 1959, Vol. 25, No. 3, 1959.
- 2) 横山, 橋本: 三次元切削に関する基礎的研究, 精密機械, Vol. 26, No. 1, 1960.
- 3) 横山, 橋本: 負すくい角バイトによる金属切削に関する研究, Vol. 22, No. 11, 1956.