被削材のびびり振動に及ぼす工具形状の影響*
(第2報, 工具のすくい角が負の場合)太田 博*¹, 水谷 一 樹*²
川合 忠雄*¹, 後藤 良次*³Effects of the Cutting Edge on the Chatter Vibrations of a Workpiece
(2nd Report, Case of Negative Rake Angle)Hiroshi OTA, Kazuki MIZUTANI,
Tadao KAWAI, and Yoshitsugu GOTO

The effects of the rake angle and the roundness of the cutting edge on the static and dynamic cutting forces are researched experimentally with a tool whose rake angle is negative. And the result is compared with the result which the authors have already reported for a tool whose rake angle is positive. The following findings were obtained: (1) the increasing rate of the horizontal cutting force to the depth of the cut changes at two points; the first change is caused by the roundness of the cutting edge and the second change is caused by the negative rake angle; (2) chatter vibrations occur at these two points; (2-1) at the first point, the same chatter vibration as already reported by the authors occurs; (2-2) at the second point the negative rake angle makes the chip flow unstable, which is one of the causes of primary chatter vibration.

Key Words: Cutting, Cutting Dynamics, Chatter Vibration, Roundness of the Cutting Edge, Effect of Rake Angle

1. ま え が き

切削の初期に発生するびびり振動は, 被削材の加工精度, 工具の寿命などに悪影響を与えるのみならず, 再生びびり振動の発生原因にもなる⁽¹⁾. 切削開始後, 切込みが深くなるときの切削状態は, 単に切削速度, 送りなどの切削条件だけでは決まらず, 切込み深さ, 工具形状によっても大きく変化する⁽²⁾⁻⁽⁴⁾.

著者らは, 切削開始の直後に発生するびびり振動を実験的に調べることによって, 切込み深さや工具形状が切削力の静的, 動的特性に及ぼす効果を求め, 切削初期に発生するびびり振動の発生条件とその原因について考察した. 前報では, すくい角が正の工具を用いた旋削の初期に現れるびびり振動が工具切れ刃の丸みに起因して発生することを示し, その発生機構を明らかにした⁽⁵⁾. 本報では, 超硬工具に多いすくい角が負の工具を用いて旋削の実験を行い, その初期に発生するびびり振動が2種類の原因によることを示した. さ

らにそのびびり振動の発生条件, 発生機構についても, 前報⁽⁵⁾と比較しながら考察を行った.

2. 実験装置および実験方法

図1には本報で用いた被削材の二自由度系振動モデルを示す. 被削材の水平変位を x , 垂直変位を y , 背分力を F_x , 主分力を F_y , 切込み深さを d とし, 被削材の自由振動に関する基準座標を $O-\xi\eta$ とする. 実験装置および実験方法は既報⁽¹⁾⁽⁵⁾と同じなのでその説明を省略する. 実験では, 直径 40 mm, 突出し長さ 300 mm の丸軸の先端に取付けた被削材の円周面を旋盤の前後

図1 被削材の二自由度系振動モデル

* 昭和63年3月14日 東海支部第37期総会講演会において講演, 原稿受付 昭和62年8月20日.

*¹ 正員, 名古屋大学工学部 (〒464 名古屋市千種区不老町).

*² 正員, 三重大学工学部 (〒514 津市上浜町1515).

*³ 正員, 豊田中央研究所 (〒480-11 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41-1).

図2 びびり振動の発生例 ($d_0=0.05$ mm/rev, $V_0=50$ m/min)

図3 切削力と切込み深さの関係

送りによって二次元切削した。

切削条件および工具については以下に示す。

切削条件：送り $d_0=0.05\sim0.25$ mm/rev

切削速度 $V_0=50\sim100$ m/min

被削材：黄銅板 (JIS H 3201, BsP 3)

厚さ $b=3$ mm

直径 $D=140\sim190$ mm

(回転センタを使用した)

工具：ホルダ (タンガロイ) ETFNR 2020 K 33

スローアウェイチップ (ダイヤチタニツト) TNPA 332

すくい角 -5° , 逃げ角 5°

切れ刃の丸み半径 $r=36\ \mu\text{m}$ (実測値)

3. 実験結果および考察

本実験で発生したびびり振動の例を図2に示す。図

2の上図の▽印は工具と被削材が接触を始めた点を始点としたときの半回転ごとの印であり、下図の⊥印は切りくずが発生したことを表す印である。図2と前報⁽⁵⁾の図2との比較により、(1)背分力の時間に対する変化割合はA, Bの2箇所の位置で変化する、(2)びびり振動は(1)の2箇所(A, Bの位置)で発生しておりy方向の振動が顕著である、(3)びびり振動は切込み深さのある範囲でのみ発生する、ことがわかる。この章では、図2に示すびびり振動の発生原因を調べ、その発生条件および発生機構について考察する。

3・1 切削力の静特性 この節では、まず、びびり振動の発生しない状態での切削力の特性を明らかにする。

図3(a), (b)は切込み深さ d に対する背分力 F_x , 主分力 F_y の関係を表した。図3(a)には切削速度が一定 ($V_0=75$ m/min) で送り d_0 を変えた場合の結果

を示し、図3(b)には送り d_0 が一定($d_0=0.1\text{ mm/rev}$)で切削速度 V_0 を変えた場合の結果を示した。図4は図3(b)のデータについて主分力 F_y と背分力 F_x の関係を示す。なお、びり振動が発生する場合には振動が生じていない部分のデータのみを図4に書き入れた。

図3(a), (b), 図4と前報⁽⁵⁾の図4(a), (b), 図5で得られた結果との比較から以下の類似点と相違点が明らかになる。

類似点：

(1) 図示の範囲において、切削力 F_x, F_y は送り d_0 , 切削速度 V_0 によらず、切込み深さ d のみによって決まる。

(2) 切込み深さ d に対する背分力 F_x の変化割合および背分力 F_x に対する主分力 F_y の変化割合が切込み深さ $d=0$ からA点までともう一つはB点より深い切込みの二つの領域で一定値になる。前報⁽⁵⁾ではA点を変曲点として、その前後の切込み深さの領域で一定値になった。

相違点：

(1) 切込み深さに対する背分力 F_x の変化割合および背分力 F_x に対する主分力 F_y の変化割合はA, Bの2点で変化する。

(2) B点より深い切込みにおける(1)の二つの変化割合は前報⁽⁵⁾とは異なる。

この考察に基づいて、A, Bの2点に着目すると、実験結果を表1のようにまとめることができる。表1中には前報⁽⁵⁾から得られる結果も記入した。

つぎに、図3(a), (b), 図4, 表1とこれまでに報告された研究⁽²⁾⁽³⁾⁽⁶⁾との比較をもとにして、A, B点の物理的意味を考える。

山本・中村⁽²⁾⁽³⁾は、(1)切削を開始した後、切削力の変化割合の最初に変化する点が切削開始点である、(2)この点における切込み深さ d , 切削力 F_x, F_y は工具切れ刃の丸み半径に比例する、(3)この点までの切削力は切込み深さに比例する、(4)切削開始点よりわずかに深い切込みから切削力にすくい角の影響が現れる、と報告している。本報においても(1)~(3)の条件が満たされているので、図3, 4に示したA点は前報⁽⁵⁾と同じく山本・中村の報告した切削開始点であること、およびA点までの切削状態は工具の切れ刃の丸み半径の大小によって変わらないこと、を確認できた。また(4)に関してAlbrecht⁽⁶⁾は、切削力の変化割合が変化した後の切込みにおいて、切込み深さに対する切削力の変化割合が切れ刃の丸み半径には関係しないこと、すくい角の強い影響を受けること、を報告し

ている。したがって、B点をすくい面の効果が現れ始める点と考えることができる。

3・2 びり振動の発生原因 この節では高速度カメラを用いた実験に基づいて、振動の発生原因を解明していく。

切りくずの流出状態を高速度カメラを用いて観察し、変位、切削力の測定結果と対応させたところ、流出状態を四つに分けることができた。

(1) 工具が被削材に接触してから切りくずが発生するまで。工具が被削材表面を擦過していると考えられる。

(2) 切りくずが発生してからB点まで。カールしない、まっすぐな切りくずが発生する。切りくずの流出角 ϕ (図8を参照) が時間の経過に従って、 45° から 85° (すくい面の直線部分に沿う方向) へと変化する。A点近傍で振動が発生しているときには流出角 ϕ

表1 切削力の特性

		Present Paper	Previous Paper ⁽⁵⁾
Radius of cutting edge	$r (\mu\text{m})$	36	70
Value at point A	$d (\mu\text{m})$	8	18
	$F_x (\text{N})$	120	200
	$F_y (\text{N})$	60	110
Value at point B	$d (\mu\text{m})$	14	—
	$F_x (\text{N})$	130	—
	$F_y (\text{N})$	120	—
$\Delta F_y / \Delta F_x$ along P		0.53	0.55
Q		1.3	2.1

図4 主分力と背分力の関係

が変動していた。

(3) B点から振動の終了まで。B点のときに切りくずの長さが急に長くなる。B点の直後から切りくずのカールが始まる。切りくずは工具すくい面の直線部分にほぼ沿って流出する。びびり振動をしている間、切りくずは工具のすくい面を押し付けるように振動する。

(4) 振動終了後。切りくずは一定のカール半径を保ったまま、振動することなく流出する。

切削力の静特性も考えると、このうち(1)が摩擦領域、(2)が掘り起こし領域から切削領域の初期に対応すること⁽⁴⁾は前報と同じである。したがって、A点近傍の(2)で発生する振動は、前報⁽³⁾で報告した振動と同じであることがわかる。

一方、(2)の後半から(3)、(4)にかけての切削状態は、つぎの点で前報とは異なっている。第1は切りくずの長さがB点から急に長くなること。前報ではA点の直後から切りくずの長さが急に長くなった。第2はB点から背分力 F_x が再び増加を始めること。第3は(3)のときびびり振動が発生すること。

第1および第2の相違点はすくい角の違いによって生ずると考えられる。すなわち、すくい面に沿った切りくずの流出は、すくい角が負の場合には正の場合よりも起きにくいと考えられる。したがって、すくい角が負の本報ではすくい角が正の前報と異なり、切りくずの長さが急に長くなる点(すなわち、すくい面に沿った切りくずの流出が始まる点)が前報よりも遅いB点にずれている。また3・1節で考えたように、B点以降、切込みが深くなるに従って切りくずのすくい面に及ぼす力が大きくなるが、その大きさと方向はすくい角による影響を強く受ける。したがって、B点よりあとの切込み深さに対する切削力の変化割合はすくい角

の異なる前報と本報では異なる。

つぎに、第3の相違点のびびり振動について、その発生原因を考察する。図5(a)、(b)には図2の $t=335\sim 339$ msにおける、変位 x, y と切削力 F_x, F_y の関係を示した。図2、図5(a)、(b)をみると、この振動では、 x 方向の運動によりエネルギーが失われているにもかかわらず、 y 方向の運動により振動系にエネルギーが入ってその振幅が大きくなっている。被削材のばねによる連成も y 方向から x 方向にエネルギーを伝えるが、これは自励的な振動を引き起こさない。そこで、切削を介して y 方向と x 方向が連成し、それが振動を引き起こしているのではないかと考えられるので、確認のための一連の実験を行った。

実験ではまず、びびり振動が発生しない限界の切削条件($d_0=0.075$ mm/rev, $V_0=75$ m/min)で切削し、ハンマで被削材に鉛直下方への衝撃を加えた。衝撃は、切込み深さが図2で振動が発生しているのと同じ切込み深さになったとき(図6の十字印の瞬間)に与えた。図6はこのときの変位 x, y , 切削力 F_x, F_y , 切込み深さ d の時間変化を表す。

図7は衝撃を加えた直後($t=115\sim 119$ ms)の変位

図5 変位 x, y と切削力 F_x, F_y の関係
($d_0=0.04$ mm/rev, $V_0=50$ m/min)

図6 被削材に鉛直下方への衝撃を加えた例
($d_0=0.075$ mm/rev, $V_0=75$ m/min)

x, y と背分力 F_x の関係を示す。図7から、背分力 F_x は被削材が下方に動くとき ($\dot{y} < 0$) に大きくなり、上方に動くとき ($\dot{y} > 0$) に小さくなること、つまり、 y 方向の運動が x 方向の運動に切削を介して連成していることがわかる。

次に、連成の機構を明らかにするために、切りくずが流出する状態を詳細に調べて、その状態を模式図8(a)~(d)に表した。図8は切削速度 $V_0 = 75 \text{ m/min}$ のときの結果である。図8(a)は切りくずの発生時、図8(b)はB点での振動の発生時、図8(c)は図8(b)の振動の終了時、図8(d)は切込みがさらに深くなったとき、を表す。図8(b)には山本・中村の実験結果⁽⁷⁾を参考にして、切れ刃が切りくずに及ぼす垂直応力 σ 、せん断応力 τ を書き入れた。図8中の切込み深さ d に対する切りくず厚さ t_c および切りくずとすくい面の接触長さ l_c の比 t_c/d 、 l_c/d は前報⁽⁵⁾と同様の方法で求めた。この比は送り d_0 、切込み深さ d に関係なくほぼ一定になった。切削速度 V_0 を変えた場合の値を表2に示した。前報⁽⁵⁾から得られる値も表2に書き

入れた。

図8(b)のB点の切削状態を考えれば、連成の機構はつぎのように説明できる。

- (1) 切りくずがまだすくい面に沿って流出していないときに被削材が鉛直下方へ動いたとする ($\dot{y} < 0$)。
- (2) このとき切りくずはすくい面に押し付けられ、この面に沿って流出を始める。
- (3) 切りくずのすくい面に沿った流出はせん断応力 ($-\tau$) を大きくする。
- (4) せん断応力の増加によって背分力 F_x が大きくなり、被削材は右方向に動こうとする。
- (5) その後、被削材が右方向に動くことにより切込み深さ d が小さくなるので、背分力 F_x 、主分力 F_y が小さくなる。
- (6) 被削材が鉛直上方に動くとき ($\dot{y} > 0$) は上記(2)~(5)とは力および運動の方向が逆になる。

以上の考察から、B点の近傍で切りくずがすくい面に沿って流出するかしないかを繰返すときに切削力の変化が現れること、これによって鉛直方向と水平方向

図7 変位 x, y と背分力 F_x の関係

図8 切りくずの流出状態

表2 切りくず厚さ、接触長さ、切込み深さの関係

	Present Paper			Previous Paper ⁽⁵⁾
V_0 (m/min)	50	75	100	50, 75
t_c/d	6.2	4.4	3.3	2.5
l_c/d	6.2	5.6	5.1	5.0

図9 びびり振動の振幅と切込み速度

の連成が生じてびびり振動が自励的に発達すること、
 がわかる (図7に現れる程度の連成で自励振動が生ず
 ることについては別の機会に報告したい)。ただし、切
 込みが深くなると切りくずがすくい面に沿ってたえず
 流出しており、上記(2)の切りくずの流出状態の変化
 はなくなる。つまり、ここで説明したびびり振動は切
 込み深さの限られた範囲のみで発生する (深い切込み
 において衝撃を加える実験を行い、振動が減衰して短
 時間に消滅することを確かめた)。

最後に、発生するびびり振動の振幅の大きさにつ
 いて考える。上でみたように、びびり振動は切込み深さ
 の限られた範囲で発生するので、この範囲を通過する
 時間が長いほどその振幅が大きくなると考えられる。
 図9には切込み深さの増加速度 $\dot{d}$ とそのとき発生す
 る振動の最大振幅 $x_{\max}$, $y_{\max}$ の関係を表した。図9中
 の実線は $x_{\max}\dot{d} = \text{一定}$ および $y_{\max}\dot{d} = \text{一定}$ の直角双
 曲線を表す。各切削速度に対して実験結果はこの曲線
 によく一致している。したがって、発生する振動の振
 幅は不安定な切削となる領域を通過する時間によつて
 決まることを確認できた。ただし、切削速度 V_0 が小さ
 くなるほど同じ $\dot{d}$ に対してびびり振動の振幅 $x_{\max}$,
 $y_{\max}$ が大きくなっている。表2をみると V_0 が小さい
 ほど切込み深さ d に対して切りくず厚さ t_c , 接触長さ
 l_c が大きくなっている。このため、低速切削ほど切り
 くずが厚くならないとすくい面に沿ったなめらかな流
 出にならないために、同じ切込み速度に対してびびり
 振動の振幅が大きくなっているのではないかと考え
 られる。

4. 結 論

すくい角が負の工具を用いた場合に発生するびびり
 振動について実験的な研究を行ったところ、つぎの結
 論を得た。

(1) 切込み深さに対する背分力の変化割合が、A,
 Bの2箇所に変化する。A点は山本・中村の指摘した
 切削開始点であり、B点は切りくずのすくい面に沿っ
 た流出の始まる点である。

(2) 結論(1)に挙げたA, Bの2点においてびび
 り振動が発生する。

(3) A点で発生するびびり振動は前報⁽⁵⁾で報告し
 たびびり振動と同じである。

(4) B点でのびびり振動は、切りくずがすくい面
 に沿って流出するかしないかを繰返す不安定な切削状
 態になると、鉛直方向と水平方向の運動の連成が生じ
 るために発生する。

(5) 結論(4)のびびり振動はB点近くの限られた
 切込み深さの範囲において発生する。

(6) 結論(5)の切込み深さの範囲を通過する時間
 が長いほど発生するびびり振動の振幅は大きくなる。

文 献

- (1) 太田・水谷・川合, 機論, 52-480, C (昭61), 2278.
- (2) 山本・中村, 精密機械, 34-5 (昭43), 310.
- (3) 山本・中村, 精密機械, 35-3 (昭44), 164.
- (4) 勇田, 精密機械, 35-5 (昭44), 292.
- (5) 太田・水谷・川合, 機論, 54-500, C (昭63), 968.
- (6) Albrecht, P., Trans. ASME, Ser. B, 82-4 (1960), 348.
- (7) 山本・中村, 精密機械, 36-3 (昭45), 176.

討 論

〔質問〕 松原 十三生 (鳥取大学工学部)

工具が被削材に接触開始直後のびびり振動において
 は切れ刃先端の丸味半径 r が大きく影響すると考え
 られるが、これについて実験的に検討されたか。また、
 本文1965ページ右欄2~16行めの連成の説明は丸味
 が変わればどのように影響されるかお示し願いたい。

〔回答〕 ご指摘のとおり、工具が被削材に接触を
 開始した直後では、切れ刃先端の丸み半径がびびり振
 動の発生機構や発生条件に大きな影響を与える。著者
 らはこれについて実験的に検討した。

まず、切削初期では切れ刃の丸み半径によって切削
 状態が不安定(切りくずの流出角が周期的に変動する)
 となって、びびり振動の発生する現象を確認した。こ

の振動は、切れ刃の丸み半径によって決まるある限ら
 れた切込み深さの範囲で発生しており、この切込み深
 さの範囲を通過する時間によって発生する振動の振幅
 が決まってくる。したがって、切れ刃の丸み半径が大
 きくなるほどびびり振動の発生する切込み深さの範囲
 が広くなり、びびり振動が発生しやすくなると考えら
 れる⁽⁵⁾。

また、連成の機構は切れ刃の丸み半径の大小によつ
 て影響を受けないと考えられる。ただし、切れ刃の丸
 み半径が大きいくほど、この連成の生ずる切込み深さの
 範囲が広くなり、びびり振動が発生しやすくなるもの
 と推測できる。