旋削バイトの再生びり振動*

(第 2 報, 斜剣形バイトの場合)

丸井 悦 男^{*1}, 橋 本 正 俊^{*2}, 加 藤 仁^{*3}

Regenerative Chatter Vibration of Lathe Tools

(2nd Report, Chatter Vibration of Straight Tools with Asymmetric Cutting Edge)

Etsuo MARUI, Masatoshi HASHIMOTO and Shinobu KATO

This paper deals with the regenerative chatter vibration in a straight tool with an asymmetric cutting edge. The vibratory energy of the cutting tool is consumed by the interference effect between the tool flank and workpiece surface, judging from the vibratory loop configuration of the cutting edge and the effective relief angle variation during vibration. Regenerative chatter vibration of straight tools with an asymmetric cutting edge is excited by the regenerative effect of chatter marks. This is confirmed by the dynamic cutting force simulation, where the specific cutting force, shear angle and friction angle on the rake face of the cutting tool are treated as functions of cutting depth variation. As a result, the vibration energy supply is ascertained for the vibratory loop observed experimentally by this simulation.

Key Words: Cutting, Chatter Vibration, Regenerative Effect, Interference Effect, Straight Tool with Asymmetric Cutting Edge, Vibration Energy Supply

1. ま え が き

前報⁽¹⁾では, 突切り形のバイトに発生する再生びり振動について, バイト逃げ面に生じる干渉効果およびびり痕による再生効果が振動エネルギーの供給・消費機構に及ぼす影響について主として実験面から検討を加えた。

本文では, 実際の切削作業に多い斜剣形バイトの場合について同様の検討を加えた。この検討の際, 凹凸のある被削材を切削するときに生ずる切削力の大きさを Albrecht の動的切削モデル⁽²⁾を参考にしてシミュレートする方法を提案した。再生びり振動の実測結果とシミュレーションにより求められた動的な切削力から, 斜剣形バイトの再生びり振動におけるバイト逃げ面の干渉効果とびり痕による再生効果の役割を明らかにすることができたので, 以下に報告する。

2. 実験装置および方法

本実験で採用した切削様式の概略を図 1 に示す。被

削材は, 配管用炭素鋼鋼管を図示の寸法になるように加工したものである。被削材の端面をテーパ状に仕上げ, バイトの送りとともに切削幅が増加するようになっている。使用したバイトは, 図 2 に示すようにシャンク断面が幅 10 mm, 高さ 20 mm のく形である斜剣形バイトである。このバイトを突き出し長さ $L=100$ mm として刃物台に取付けた。切れ刃の傾き角 α および逃げ角 γ_0 を種々に変化させた。

図 1 斜剣形バイトによる切削

* 原稿受付 平成元年 11 月 6 日。

^{*1} 正員, 岐阜大学工学部 (〒501-11 岐阜市柳戸 1-1)。

^{*2} 正員, 豊田工業高等専門学校 (〒471 豊田市栄生町 2-1)。

^{*3} 名誉員, 元名古屋大学工学部 (〒464 名古屋市千種区徳川山町)。

以上の方法により切削実験を行い、バイトに発生した再生びり振動を測定した。バイトの振動変位(送り分力方向: x , 主分力方向: y)は、シャンク側面に貼付したひずみゲージによって検出した。また切削力を測定する必要がある場合には、市販の三次元切削動力計を使用した。

3. 実験結果および考察

3・1 再生びり振動の発生状態 本節では、バイトに発生した再生びり振動の特徴を述べる。

図3は、 $\alpha=30^\circ$, $\gamma_0=7^\circ$ のバイトで切削をした場合の切削開始後の被削材ののべ回転数 N と主分力方向の振幅 a_y および切削幅 b の変化の関係を示したものである。図において、切削幅 b の変化を一点鎖線で示した。例えば $N_c=10$ は、被削材ののべ回転数 N が10までは切削幅 b が N に比例して増大し、 $N=10$ 以後は一定幅 $b=3\text{ mm}$ になることを示す。 N_c の値が小さいほど、1回転ごとの切削幅の増加率が大きい。 N_c が小さい被削材を切削すると、切削開始直後にびり振動が発生し、この振動は急速に発達している。 N_c が大きくなるにつれて、びり振動の発生は遅れ、また振動の発達もゆるやかである。特に $N_c=40$ の場合には、切削幅が定常値 3 mm に達したときの振幅 a_y がかなり小さく、まだ振動の発達途中にあることがわかる。

図2 バイト刃先の形状

図3 繰返し切削による垂直方向振幅の増大

さらに、びり振動が生じ始めるときの切削幅は、 N_c が大きいほど小さいようである。

次に図4は、びり痕の位相遅れ Ψ と N の関係を示したものである。切削幅が一定値に達するよりかなり早期にびり痕の位相遅れ Ψ は定常値(このバイトでは 120°)に達している。この結果と図3の傾向を併せ考えると、被削材の形状に関係なく位相的な条件が同じであることから、切削幅がゆっくりと増加し再生効果を受ける回数が多い場合よりも切削幅の増加率が大きい場合のほうが、再生効果を受ける回数が少なくても振動の発達が急速であるということになる。

3・2 逃げ面干渉効果の役割 本節では、逃げ面干渉効果が再生びり振動の発生に際して果たしている役割について検討する。

まず図5は、切削幅が一定になりびり振動が定常状態になったときのバイト切刃が描く軌跡を示したものである。 x の正方向はバイトが被削材に近付く方向であり、 y の正方向はバイトが上方にたわむ場合である。 x 方向の振動のほうが、 y 方向の振動よりも位相が約 60° 進んでいる。

この図の振動波形から、振動速度 $\dot{x}, \dot{y}$ の経時変化

図4 繰返し切削によるびり痕の位相遅れの変化

図5 振動ループ

を求めると図6のようになる。 $\dot{x} < 0$ は、バイトが被削材から離れる方向へ、 $\dot{y} < 0$ は下方へ振動しているときである。また図中の破線は、被削材の周速を示す。バイトの振動速度 $\dot{y}$ がこの周速に等しくなると、バイトと被削材の間の上下方向の相対速度が零になり、刃先は水平方向のみに運動していることになる。バイト刃先と被削材との間の相対速度とバイト逃げ面のなす角度は、振動中の有効逃げ角となり、被削材表面と逃げ面の干渉効果を考察する上で重要な量である⁽³⁾。図6の振動速度から、時々刻々の有効逃げ角の値を求めると図7のようになる。振動1周期中に有効逃げ角 γ が負となる瞬間がある。このときには、逃げ面と被削材の表面の間にはかなりの干渉力(摩擦力)が作用することになる。

この干渉力により、バイト振動系に振動エネルギーが供給されるか否かについて検討するため、有効逃げ角 γ の変化とバイトの上下方向変位 y との間の関係を調べた。その結果を図8に示す。この図上で、 γ - y 関係は反時計回りのループを描いていることがわかる。 y の値が大きくなるとき、すなわち刃先が上方に振動しているときのほうが、刃先が下方に振動して y の値が小さくなるときよりも γ が小さく、 $\gamma < 0$ となる期間が長い。この事実と、バイト逃げ面に作用する干渉力はバイトに対して下向きに作用していることを併せ考えると、干渉力により振動系に励振エネルギーが供給される可能性はない。むしろ、干渉力は減衰効果を

もっていることがわかる。

よって、本実験でみられた振動においては、再生効果の働きが重要であると考えられる。

4. 動的切削力に関する検討

4.1 動的切削モデルの提案 びり痕による再生効果の役割を切削力との関連で明らかにするため、本節では動的な切削力の性質について議論する。再生効果(びり痕の有無)が切削力に及ぼす影響を検討するために採用した二次元切削モデルを図9に示す。このモデルはAlbrecht⁽²⁾によって提案された正弦波状の凹凸がある被削材を切削するときの切削機構のモデルを三角形の凹凸がある被削材を切削する場合へ拡張した切削モデルである。被削材表面には、びり痕に相当する三角形の凹凸(両底角がそれぞれ θ_1 および θ_2)が存在している。工具の形状はすくい角 α_0 、逃げ角 γ_0 である。この被削材を切削速度 V で切削すると、せん断角 ϕ の単一せん断面において被削材がせん断されるものとする。図9の切削モデルから切削主分力 F_T 、背分力 F_N が次のように書かれる。

$$\left. \begin{aligned} F_T &= \frac{sA_s \cos(\tau_0 - \alpha_0)}{\cos(\phi - \alpha_0 + \tau_0)} \\ F_N &= \frac{sA_s \sin(\tau_0 - \alpha_0)}{\cos(\phi - \alpha_0 + \tau_0)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

図6 振動速度の経時変化

図7 有効逃げ角の経時変化

図8 有効逃げ角と振動変位の関係

図9 表面に凹凸のある被削材を切削するときの切削機構のモデル

ただし, A_s : 被削材のせん断面積, s : 被削材のせん断降伏応力, τ_0 : 工具すくい面上の摩擦角である。

s, ϕ, τ_0 をなんらかの方法で評価することができ, A_s を幾何学的方法により求めれば, 式(1)から切削力を計算することができる。本文では, 定常二次元切削実験から求められた s, ϕ, τ_0 の値が図9の切削モデルに適用できるものとして, 式(1)から凹凸のある被削材を切削したときの切削力を見積もることとした。この方法の妥当性の確認は, 切削力の実測結果との比較により行った。

4.2 定常切削に関する実験 切削幅 b の被削材を切込み深さ d で定常二次元切削したときの切削主分力および背分力 F_T, F_N を測定することにより, 工具すくい面上の摩擦角 τ_0 , 比切削抵抗 k_T, k_N が次のように求められる。

$$\tau_0 = \tan^{-1} \frac{F_N + F_T \tan \alpha_0}{F_T - F_N \tan \alpha_0} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} k_T &= \frac{F_T}{bd} \\ k_N &= \frac{F_N}{bd} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

また切削厚さを t_2 とすると, せん断角 ϕ は,

$$\phi = \tan^{-1} \frac{d \cos \alpha_0}{t_2 - d \sin \alpha_0} \quad (4)$$

となる。せん断角 ϕ が求められると, 被削材のせん断

面積 A_s は,

$$A_s = \frac{bd}{\sin \phi} \quad (5)$$

となり, 被削材のせん断降伏応力が次のように求められる。

$$\begin{aligned} s &= \frac{F_T \cos(\phi - \alpha_0 + \tau_0)}{A_s \cos(\tau_0 - \alpha_0)} \\ &= \frac{F_N \cos(\phi - \alpha_0 + \tau_0)}{A_s \sin(\tau_0 - \alpha_0)} \quad (6) \end{aligned}$$

びり振動試験のときと同じ円管状の被削材を定常切削したときの各パラメータ値を図10, 11に示す。なお使用したバイトのすくい角は $\alpha_0 = 0^\circ$, 逃げ角は $\gamma_0 = 7^\circ$ である。比切削抵抗 k_T, k_N , 被削材のせん断降伏応力 s の値はいずれも寸法効果を示し, 切込み深さ d とともに漸減する傾向がある。これに対応してせん断角 ϕ は d とともに増大している。一方, 工具すくい面上の摩擦角 τ_0 は d の影響をほとんど受けていない。また切削速度の効果もそれほど顕著ではないようである。

4.3 三角形形状の被削材を切削した場合 次に, 図12のように切削開始側で $\theta_1 = 11.9^\circ$ の傾きをもつ三角形形状の突起が連続している被削材を, 突起底からさらに 0.1 mm だけバイトを切込ませた状態で切削し, 連続的な切込み深さすなわち切削位置の移動に対する切削力の変化を求めた。切削力の測定結果を同じ図12に示してある。切削力 F_T, F_N も切込み深さの変化には直接的には対応しておらず, かなりの位相差が存在していることがわかる。

さてこのような切削力の変化を, 図9に示した切削機構のモデルから推定しうるか否かについて検討する。先に述べたように, 切削力を計算するには被削材の降伏せん断応力 s , 工具すくい面上の摩擦角 τ_0 , せん断角 ϕ を評価する必要がある。以下のシミュレーションにおいては, 定常二次元切削に関する図11, 12の値を採用することとし, これらの各パラメータが図9

図10 比切削抵抗, せん断降伏応力と切込み深さの関係

図11 せん断角, すくい面上の摩擦角と切込み深さの関係

図12 三角形形状の凹凸がある被削材を切削したときの切削力(実験結果)

のように刃先位置 A における未変形成切屑厚さ $\bar{d}$ の関数であるとした。すなわち、切削の進行とともに $\bar{d}$ の値が変化する。これに対応する s, τ_0, ϕ の値の変化は図 10, 11 の $s, \tau_0, \phi-d$ 関係を d の関数として最小二乗近似した関数関係を使用して求めた。このようにして求められたパラメータ値を式 (1) に代入すれば、切削力の変化を推定することができる。

図 12 の実験結果に対応して、突起底からさらに 0.1 mm だけ切り込んだときの切削力変化のシミュレーション結果を図 13 に示す。シミュレーションにより求められた切削力値は、実験結果より少し大きめであるが、切削位置の移動に対する切削力の変化の様子は定性的には実験結果によく一致している。したがって、本節で提案したような未変形成切屑厚さが連続的に変化するときの切削力の推定法は妥当なものであると考えられる。

5. 再生効果による 励振エネルギーの供給

ここでは、励振エネルギーの供給に対して再生効果がどのような役割を果たしているのかについて前章で明らかにした動的な切削力の特性を考慮に入れて検討した。なお前章で述べたような動的な二次元切削モデルの特性を斜削バイトによる三次元切削の場合に適用するにあたり、以下のような仮定を置いた。すなわち、切屑の流出方向は Stabler の法則⁽⁴⁾により定まるものとし、この方向では近似的に二次元切削状態になっているものとした。前回転での切削により形成された凹凸のある被削材を工具が振動しながら切削するときの工具の振動変位と切削力の関係から再生効果による励振エネルギーの大きさを評価した。

ここで以下の記号を用いることにする。切削速度： V 、びり振動数： β 、設定切込み深さ： d_s 、刃先の x, y 両方向の振幅： x_0, y_0 、 x, y 両方向の振動の位相

差： δ (本実験結果のように x 方向の位相が進んでいる場合を正とする)、前回転と今回転のびり痕の位相差： Ψ (前回転のびり痕の位相が進んでいる場合を正とする)。このようにすると、前回転での振動変位 x_1, y_1 は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_0 \sin(\beta t + \delta) \\ y_1 &= y_0 \sin \beta t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

今回転での関係は、

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= x_0 \sin(\beta t + \delta - \Psi) - d_s \\ y_2 &= y_0 \sin(\beta t - \Psi) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

式 (7), (8) により、バイトの再生びり振動における切込み深さの変動が求められる。そこで、図 10, 11 の定常二次元切削における実験結果が近似的に再生びり振動の場合にも適用できるものとする、振動中の切込み深さの変化に対応するせん断降伏応力 s 、せん断角 ϕ 、すくい面上の摩擦角の大きさ τ_0 を推定することができる。この推定値を式 (1) に代入すると、時々刻々の切削二成分力の変動を計算することができる。

このようにして求められた切削力は、式 (8) の垂直、あるいは水平方向の振動変位に対して閉ループを描く。この閉ループの面積から、再生効果によって振動系に供給される、あるいは振動系が消費するエネルギー量がわかる。

一例として、図 5 程度の振幅の振動が発生しているものとして垂直方向振動によるエネルギー E_r とびり痕の位相差 Ψ との関係をも 3 種の δ の値に対して求めたものを図 14 に示す。図中の水平な破線は、系の減衰による消費エネルギーを示している。 E_r の値は、 δ および Ψ によってかなり広範囲に変化している。図 4 よりびり痕の位相差は $\Psi = 120^\circ$ であり、図 5 の振動の x, y 両方向の位相差は $\delta = 60^\circ$ である。したがって、図 14 から垂直方向の振動により励振エネルギーが供給されていることがわかる。水平方向の振動に伴

図 13 三角形の凹凸がある被削材を切削したときの切削力(シミュレーション結果)

図 14 垂直方向振動による振動エネルギーとびり痕の位相差の関係(再生効果, $\alpha = 30^\circ$)

うエネルギー E_N は E_T に比較するとかなり小さいが、 $\Psi=120^\circ, \delta=60^\circ$ の付近ではやはり $E_N > 0$ であった。以上により、本実験で観察されたバイトの再生びびり振動ではびびり痕の再生効果は励振作用をしていることが確かめられた。しかしながら、一般的にはびびり痕の再生効果が励振作用をもつか否かは、びびり痕の位相差 Ψ, x, y 両方向の振動の位相差 δ と密接に関連する。

6. む す び

本文では、実際の作業でもよく使用される斜剣形バイトの再生びびり振動の発生に対するバイト逃げ面と被削材表面の干渉効果およびびびり痕の再生効果の役割について考察を加えた。振動発生に対する両効果の作用は、刃先の描くループの形状(δ の値)、びびり痕

の位相差(Ψ の値)により異なる。例えば、送り分力方向の振動の位相が主分力方向振動の位相より進んでおり、前回転でのびびり痕の位相が今回転でのびびり痕の位相より進んでいる場合には、バイト逃げ面の干渉効果によりびびり振動が減衰するが、びびり痕の再生効果によって励振エネルギーを供給されることになる。本研究で取り上げた斜剣形バイトでは前報⁽¹⁾の突切り形バイトの場合とは対称的に、干渉効果によって振動系はエネルギーを消費し、再生効果によって励振エネルギーを供給されていることが明らかになった。

文 献

- (1) 丸井・ほか2名, 機論, 55-510, C(1989), 261.
- (2) Albrecht, P., *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, 87(1965), 429.
- (3) 丸井・ほか2名, 機論, 48-428, C(1982), 614.
- (4) Stabler, G. V., *Proc. Inst. Mech. Engr.*, 165(1951), 14.