旋削バイトの再生びり振動*

(第1報, 突切り形バイトの場合)

丸井悦男^{*1}, 橋本正俊^{*2}, 加藤 仁^{*3}

Regenerative Chatter Vibration of Lathe Tools

(1st Report, Chatter Vibration of Cut-Off Tools)

Etsuo MARUI, Masatoshi HASHIMOTO, and Shinobu KATO

This paper deals with the regenerative chatter vibration in a cut-off tool. The chatter vibration and chatter frequency are experimentally observed using cut-off tools of straight shank or bending shank. The vibration energy supply mechanism is investigated by considering the interference effect between tool shank and workpiece surface and the regenerative effect between successive cutting operations. It is clarified that the regenerative chatter vibration of cut-off tools is induced by supplying the vibration energy due to the interference effect. The reduction of the interference effect is effective to reduce the regenerative chatter vibration of cut-off tools.

Key Words: Chatter Vibration, Regenerative Effect, Interference Effect, Cut-Off Tool, Vibration Energy Supply

1. ま え が き

NC 工作機械の普及, マシニングセンタの実用化が進んだ現在, 作業員を減らして作業の自動化がはかれる機会が多いこと, 表面粗さや製品形状誤差など製品の加工精度に対する要求がますます高くなってきていること, 加工の高能率化をめざして切削速度が上昇してきたことなどにより, これまでにも増してびり振動抑制の問題が実用上の重要な課題となってきた。

切削時の自励びり振動の発生機構に関してはすでに, Arnold⁽¹⁾, Hahn⁽²⁾, Doi-Kato⁽³⁾, Tobias⁽⁴⁾, Tlustý⁽⁵⁾, Merritt⁽⁶⁾らによって検討され, 振動発生に関与する因子, 振動発生条件などが明らかにされている。しかしながら, 振動数が高く, 現象の把握が困難な切削バイト系の振動を取扱った研究例は比較的少なく, 土井ら⁽⁷⁾によるバイトのびり振動は乾性摩擦による自励振動と性質が似ているという指摘, また一次びり振動の場合, 再生びり振動の場合ともに工具逃げ面と被削

材表面の干渉により作用する摩擦力が主要な役割を果たしているという松原らの一連の研究⁽⁸⁾⁻⁽¹¹⁾, CNC 旋盤のように高速加工を行う工作機械を対象として切削条件がバイト系の振動発生に及ぼす影響を検討した Saxena⁽¹²⁾の研究がみられる程度である。

著者らも先に報告した研究⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾において, 旋削バイト振動系の励振エネルギー供給機構について詳細に検討し, バイト形状あるいは切削条件の効果を明らかにした。本文ではさらに再生効果を受ける場合について検討し, 再生効果およびバイト逃げ面の干渉効果が振動エネルギー供給機構に及ぼす影響を明らかにしたので以下に報告する。

2. 実験装置および方法

現実の切削様式とは多少異なるが, 前報⁽¹³⁾の結果との比較検討が容易になるよう, 本報でも突切り形のバイトを用いた。図1に示すように円筒状被削材の外周を切削することにより, 旋削バイト振動系に再生効果が生ずるようにした。切削幅 $b(=5\text{ mm})$ と被削材1回転当たりの送り f により, 重複係数 μ を $\mu=1-f/b$ と定義した。なお $f \geq b$ のときは $\mu=0$ となり, 一次びり振動が生ずることになる。切削速度方向の振動変位の検出は, シャンク根本に貼付したストレインゲ-

* 昭和63年10月29日 山梨地方講演会において講演, 原稿受付 昭和63年4月13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} 正員, 名古屋大学工学部 (〒464 名古屋市千種区不老町)。

ジによって行った。

実験には図2に示すように、逃げ角 γ_0 の異なる3種類のストレートバイト (S バイト) と刃先高さの異なる4種類のベンディングバイト (B バイト) を用いた。各バイトの切込み特性の違いを図3に示す。ストレートバイトあるいはシャンク上面から刃先までの高さ h_c とシャンク高さ h の比 h_c/h が0.5以下のベンディングバイトでは、刃先が下方に変位すると切刃が被削材に食込み、切込み深さが増す。すなわち、刃先が y だけ下方に変位したとき、付随的に切込み深さが x だけ増すものとする切込み深さ変動係数 $\lambda = x/y > 0$ となる。一方、 h_c/h が0.5より大きいベンディングバイトでは、逆に刃先が被削材から離れる方向に変位し、切込み深さが減少することになる ($\lambda < 0$)。

3. 再生びり振動の発生状況

3.1 ストレートバイトの場合 ストレートバイト (逃げ角 10°) の振動発生状況の一例を図4に示す。図は、振幅 a と切削速度 V の関係を示したもので、図中のパラメータは重複係数 μ である。振幅 a は切削速度 V の増加とともにほぼ直線的に増大していること、重複係数 μ が大きくなり、再生効果が顕著になると振幅が減少し、再生効果が振動を抑制する働きをしていることなどの傾向が認められる。逃げ角 γ_0 を変えたときにも同様の傾向がみられたが、振幅の大きさは

逃げ角の増大とともに小さくなっていった。

Tobias⁽⁴⁾, Merritt⁽⁶⁾らによると再生びり振動の振動発生限界は、切削速度に対してローブ状に変化することが明らかにされている。本文では直接振動発生限界の測定は行っていないが、図4の振幅の測定結果によると本実験で用いたバイト振動系にはローブ状の特性が認められないように思われる。そこで、連続する200周期分について振動数を精密に測定してみた。結果を図5に示す。びり振動数は、切削速度方向の固有振動数より低い値となっているが、各周期ごとに振動数がかかなり不規則に変動している様子が見られる。したがって、次回転において被削材の同一か所を削る場合の再生効果の程度を表すびり痕の位相ずれが一定ではなく、常に変動していることになる。このため本論文のバイト振動系では、振動発生状況にローブ状の特性が認められなかったものと推定される。

次に図5のような資料から求めた平均振動数について検討した結果を図6に示す。振動数は固有振動数

図3 バイトの切込み特性

図1 切削方式

図2 使用バイトの形状

図4 ストレートバイトの場合の振幅と切削速度の関係

図5 びり振動数の変動

f_{ny} よりかなり小さいが、切削速度 V が低いほど、また重複係数 μ が小さいほどその減少の程度は大きくなっている。この理由を明らかにするため、振動速度 $\dot{y}$ の変化について検討した。その結果を図7~9に示す。振動速度 $\dot{y}$ は1周期中のある期間、切削速度と等しく、刃先と被削材とが一種の固着状態となり、刃先は切削速度 V で下方にたわむことがわかる。振動速度 $\dot{y}$ が切削速度 V と等しくなっている期間は、切削速度が低い場合ほど長くなっている。前報⁽¹³⁾の式(4)にみられるように切削速度が低い場合ほど逃げ角 γ の変動の度合が大きく、 $\dot{y}$ に前述のような傾向が認められたものと考えられる。びり痕の位相が前回転での切削のそれより遅れること(後述の図11)およびびり痕の形状(後述の図12)を参照すると、重複係数 μ が小さい場合ほど切削幅中に占める処女面の割合が大きいため、刃先逃げ面と被削材表面との間で生ずる干渉の緊密度が大きく、摩擦力の大きさも大きいものと考えられる。以上のように振動中に生ずる刃先逃げ面

と被削材表面の干渉が、振動数に図6のような特性をもたらす原因である。

3.2 ペンディングバイトの場合 ペンディングバイトに発生するびり振動の振幅と刃先高さの関係を求めたものを図10に示す。 $h_c/h=0$ のバイトがストレートバイトの場合であり、 $h_c/h=0.5$ のペンディングバイトでは刃先高さがシャンク中心に一致している。図にみられるように、 h_c/h が大きく刃先高さが低くなるほど振幅が小さくなり、 $h_c/h=0.45$ のペンディングバイト B4ではすべての重複係数 μ に対して振動発生はみられなかった。このように h_c/h が大きく、逃げ面の干渉効果が生じにくい場合ほど、びりが発生しにくい事実と、図10から明らかなようにペンディングバイトの場合には重複係数 μ が大きいときほど振幅が小さくなっている事実とから、再生びり振動の発生にも刃先逃げ面の干渉効果が主要な役割を果たしていることが明らかである。

4. 再生びり振動の発生機構

4.1 びり痕の位相差 再生効果が存在する場合には、当然今回の切削により作られたびり痕と前回の切削において作られたびり痕とは位相が異なっ

図6 平均振動数と切削速度の関係

図7 振動速度 ($V=13$ m/min の場合)

図8 振動速度 ($V=28$ m/min の場合)

図9 振動速度 ($V=59$ m/min の場合)

図10 ペンディングバイトの場合の振幅と刃先高さの関係

ているものと考えられる。そこで、ストレートバイトの場合について、被削材の表面に残された切削跡の様子からこの位相差を測定した。ただしびり痕の形状が鋸歯状になっているので⁽¹³⁾切削跡の様子から直接位相角の大きさを求めることはできない。したがって、図11の結果では、切削跡にみられる振動1周期の長さ $\bar{\lambda}$ に対する次回転での位相ずれ $\Delta\bar{\lambda}$ の比をそのまま示した。図にみられるように、重複係数の異なるすべての場合において、びり痕には位相遅れの特性があることがわかった。位相遅れ比 $\Delta\bar{\lambda}/\bar{\lambda}$ は重複係数 μ とともにほぼ直線的に増大している。

この位相遅れ比 $\Delta\bar{\lambda}/\bar{\lambda}$ を位相角に換算したものを Ψ とし、位相が遅れる場合を $\Psi > 0$ 、進む場合を $\Psi < 0$ と定義する。突切り形のバイトが切削速度方向に振動するときの連続する回転におけるびり痕の様子を図12, 13に示す。図12が位相の遅れる場合、図13が位相の進む場合である。これらの図においては、びり痕の位相のずれを波長で表示したずれ $\Delta\bar{\lambda}$ ではなく、位相角 Ψ で表示してある。まず位相の遅れる図12について説明する。切削幅 b 中の μb 部では再生効果が生ずるが、残りの $(1-\mu)b$ 部には再生効果が生じない。今回の切削によって作られるびり痕の形状をABCとした。位相が遅れているため、1A2の部分、すなわち上図の1の部分では切削が行われるが、2BCの部分、すなわち上図の2の部分では刃先が被削材から離れ、切削は行われず、前回転の切削において作られたびり痕と刃先逃げ面の間で干渉効果が生ずるだけである。また $(1-\mu)b$ 部の切削の様子は、前報⁽¹³⁾で取扱った一次びり痕の場合と同様である。

次に、位相が進む図13について説明する。切削幅 b 中の μb 部で再生効果が生ずるが、残りの $(1-\mu)b$ 部では再生効果が生じないことに関しては図12と同様である。今回転の位相が進んでいるため、1B2部、すなわち上図の2部で刃先が被削材から離れ、切削は行われずまた逃げ面での干渉効果もない。また2C3部、

すなわち上図の1部では切削も行われるし、逃げ面での干渉効果も発生する。

以上のような切削の様子をもとにして、再生びり振動時のバイト振動系への励振エネルギー供給の様子を明らかにすることができる。

4・2 励振エネルギー供給機構 まず逃げ面干渉効果により供給される励振エネルギーの評価法の詳細は前報⁽¹⁴⁾で説明したので、以下では簡単に述べる。刃先丸みのため刃先部では切りくずと被削材の分離が行われず、この部分の被削材は刃先部で強く圧縮された後に弾性的に回復して、逃げ面と接触し、工具に摩擦力(干渉力)を働かせる。この摩擦力の大きさは、逃げ面での接触面積に比例するものとし、この摩擦力の算定に必要なパラメータ値は、前報と同様のSissonら⁽¹⁵⁾の値および切削実験から求めた値を使用した。

図12のびり痕の形状を考慮に入れて、工具の振動1周期中の干渉力(切削速度方向)の変化と振動変位の関係を計算したものを図14に示す。図は、びり痕の位相遅れ $\Psi = 50^\circ$ 、切込み深さ変動係数 $\mu = 0.2$ 、工具公称逃げ角 $\gamma_0 = 10^\circ$ の場合である。バイトが下方に変位するときに振動変位 y が増加する方向であり、干渉力 $F_{\pi T}$ は下方に作用している。図にみられるように、バイトが下方にたわむときのほうが上方にたわむときよりも大きく、振動1周期の間に図のループの面積に相当する励振エネルギーが振動系に供給されることになる。

図12 びり痕の形状 (位相遅れの場合)

図13 びり痕の形状 (位相進みの場合)

図11 びり痕の位相ずれ

図 14 逃げ面に作用する干渉力の変化

図 15 再生効果による切削主分力の変化

次に切込み深さに比例する切削力が作用するものとして、振動 1 周期の間の切削主分力と振動変位の関係を求めた。図 15 は、図 12 のようにびり痕の位相が遅れるものとして切削主分力の変動を求めたものである。図 12 の μb 部のみについて切削力を計算した。びり痕の位相が遅れているため、刃先が下方にたわみ、切込み深さが増すときには切削作用が行われず、切削主分力 F_{pr} は作用しない。したがって、刃先が上方にたわむときのほうが切削力が大きいことになり、いずれの μ に対しても図 15 にみられるように、切削主分力は左回りのループを描く。再生効果により、バイト振動系は振動エネルギーを消費する結果となる。

図 14, 15 の干渉力あるいは切削力の変動のループから励振エネルギーを求め、再生効果 (重複係数 μ) との関係を議論した。励振エネルギーの大きさは切削に関与する種々のパラメータの影響を受けるので、ここでは $\Psi > 0$ (位相遅れ) と $\Psi < 0$ (位相進み) の場合について、干渉力により供給されるエネルギー E_1 および再生効果により供給されるエネルギー E_2 と μ との関係を定性的に議論するにとどめた。励振エネルギー E_1, E_2 の定性的な特性を図 16 に示す。両エネルギーとも μ に対してほぼ直線的な変化をしているが、位相角 Ψ の正負により顕著な差異が認められる。すなわち、 $\Psi > 0$ のときには干渉力による励振エネルギー E_1 は正で μ とともに増大している。また再生効果による励振エネルギーは負となっている。したがって、びり痕の位相が遅れる場合の再生びり振動は、逃げ面

図 16 励振エネルギーの特性

の干渉効果によってエネルギーを供給されており、再生効果は減衰効果をもっていることがわかる。一方、 $\Psi < 0$ のときには E_1, E_2 とも正である。 E_2 は μ とともに増加しているが、 E_1 は μ とともに減少する傾向を示している。いずれにしても、 E_1, E_2 とも正であるので、このときの再生びり振動は両効果により励振エネルギーを供給されていることは明らかである。

実験において観察されたびり痕の位相は、図 11 にみられるように $\Delta\lambda/\lambda > 0$ 、すなわち $\Psi > 0$ であるから、以上の考察を参照すると突切り形のバイトの再生びり振動を持続させるためのエネルギーは、工具逃げ面と被削材表面の干渉によって供給されていることがわかる。これは図 10 のベンディングバイトで観察された結果とよく対応している。よって、この形の再生びり振動を抑制するためには、工具形状を変化させることにより逃げ面での干渉効果を減ずることが肝要となる。

5. む す び

突切り形の旋削バイトに発生する再生びり振動について、逃げ角の異なるストレートバイト、刃先高さの異なるベンディングバイトを用いて振動発生の様子を観察した。さらに工具逃げ面と被削材表面の干渉効果およびいわゆる再生効果によって供給されるエネルギーについても検討を加え、再生びり振動の発生機構を議論した。その結果、突切り形のバイトに発生するびり振動は、主として工具逃げ面と被削材表面の干渉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となり、この干渉効果を減ずることが防振上肝要であると結論した。ただし、このための具体的な手法については次報以下の課題としたい。

文 献

- (1) Arnold, R. N., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 154-3 (1946), 261.
 - (2) Hahn, R. S., *Trans. ASME*, 75-8 (1953), 1073.
 - (3) Doi, S. and Kato, S., *Trans. ASME*, 78-7 (1956), 1127.
 - (4) Tobias, S. A. and Fishwick, W., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 170 (1956), 232.
 - (5) Tlustý, J., *Proc. 6th MTDR Conf.*, (1965), 5.
 - (6) Merritt, H. E., *Trans. ASME, Ser. B*, 87-4 (1965), 447.
 - (7) 土井・加藤, 機論, 19-86 (昭28), 28.
 - (8) 松原・小田, 精密機械, 41-10 (昭50), 965.
 - (9) 松原・小田, 精密機械, 42-10 (昭51), 961.
 - (10) 松原・中村, 精密機械, 44-3 (昭53), 359.
 - (11) 松原・草野, 精密機械, 45-4 (昭54), 500.
 - (12) Saxena, J. P., *Adv. Mach. Tool Des. Manuf. Technol.*, (1982), 98.
 - (13) 丸井・ほか2名, 機論, 48-428, C (昭57), 606.
 - (14) 文献(13)の614ページ.
 - (15) Sisson, T. R., and Kegg, R. L., *Trans. ASME, Ser. B*, 91-4 (1969), 951.
-