接触面積拘束工具のびびり振動抑制効果 (第2報)*

—2自由度工具系再生びびりにおける安定限界の改善—

呉 進** 帯 川 利 之*** 白 井 英 治†

Chatter Suppression Effects of Tools with Restricted
Tool-Chip Contact Length (Part 2)
—Improvement of Stability Threshold for Regenerative
Chatter of Tool System with Two Degrees of Freedom—

Jin Wu, Toshiyuki Obikawa and Eiji Usui

The paper presents a stability analysis for regenerative chatter of an orthogonal vibration system with two degrees of freedom which is placed around the cutting edge in orthogonal cutting with tools of restricted tool-chip contact length. In order to realize this system, a specially designed single point tool, of which rectangular shank can be rotated for both the tool post and the cutting edge of zero approach angle, was used in two dimensional turning of a pipe end. A numerical analysis of the chatter growth with the method proposed in the previous paper was carried out for obtaining the stability thresholds. The stability charts thus obtained were compared and proved to be in good agreement with those obtained with the experiments. It is found that the reduction of tool-chip contact length always improves the stability threshold regardless of the mode directions of the chatter vibration, and the smaller the contact length, the greater the improvement is realized.

Key words: tool with restricted tool-chip contact, regenerative chatter, stability threshold, stability chart, system of two degrees of freedom, numerical analysis, orthogonal cutting

1. ま え が き

前報¹⁾では振動方向が工具すくい面に平行(摩擦面に平行)な場合の1自由度工具系再生びびりを扱い、発振過程をシミュレートする数値解析手法を示すとともに、拘束工具が著しいびびり振動抑制効果を示すことを明らかにした。しかしながら、この効果の主因が切削厚さの変動に伴う摩擦力の変動を抑制することにあることから、例えばすくい角 0° の工具に対して振動方向が切削速度方向である場合には、十分な抑制効果を持たないことが懸念される。そこで本報では、このよ

うな場合を含めて問題をやや一般的に扱うため、振動系を直交2自由度の連成系とし、振動方向を変化させた場合の工具系再生びびりの安定限界が切りくず接触長さの拘束によっていかに改善されるかを解析及び実験から求め、この工具の有用性を検討することにした。

2. 問題の設定と解析の手法

図1(a)に示す直交2自由度連成系において、図示の角度 ϕ が変化する場合の2次元切削の再生びびり安定限界を考え、この安定限界が切りくず接触長さの拘束・縮小によってどのように改善されるかを検討する。前報¹⁾の解析は $\phi = 0^\circ$ で X_2 方向の振動が生じない場合であった。同図の設定を選んだ理由は、後述のようにバイトの矩形断面シャンクを切れ刃に対して回転させれば工具系びびりの問題としてこの設定を実現できること、またこの場合は同図(b)のような実

* 原稿受付 平成2年6月6日。1990年度精密工学会春季大会学術講演会(平成2年3月28日)にて発表

** 学生会員 東京工業大学工学部(東京都目黒区大岡山2-12-1)

*** 正会員 東京工業大学工学部

† 正会員 東京電機大学工学部(東京都千代田区神田錦町2-2)

(a) Orthogonal system of two degrees of freedom

(b) Lathe system of multiple degrees of freedom

Fig.1 Vibration systems for regenerative chatter

際多自由度工作物連成系びりより遙かに振動モードを特定しやすく、解析に正確を期すことができるためである。なお同図の工具の横すくい角、上すくい角が共に 0° であり、切込みが送りより十分大な場合を考えると、同図(a)の設定は直交2モードが主切れ刃に垂直な面内にある場合であり、同図(b)の旋削は多モードが図示のU-V面内にある場合となる。従って相違はわずかで、同図(a)の設定で角度 ϕ を変えて接触面積拘束工具の制振効果を吟味すれば、実用旋削におけるこの工具の効果を評価できると考えられる。前報¹⁾及び既報^{2) 3)}で示したように、びり発振過

程の動的切削力は刃先切削厚さに対して複雑な非線形となるから、安定限界を解析的に求めるには振動方程式を数値解析して発振の有無を調べなければならない。解くべき振動方程式は無負荷時の刃先位置を $x_1 = 0$, $x_2 = 0$ として

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 = f_1(t)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 = f_2(t) \quad (1)$$

である。ただし m_1, c_1, k_1 及び m_2, c_2, k_2 はそれぞれ x_1, x_2 方向の相当振動定数であり、 $f_1(t), f_2(t)$ はそれぞれ動的切削力の x_1, x_2 方向成分である。式(1)をルンゲ・クッタ・ギル法によって数値解析するが、通常と異なるのは非線形加振力 $f_1(t), f_2(t)$ があらかじめ与えられず、これを刻々求めながら解かねばならないことである。このため前報¹⁾では速度不連続線による切削模型とエネルギー解析法を提案した。この方法と定常2次元切削データを用いれば、前回の切削による外側波の形(1波長あたり約20点の座標を用いる3次のスプライン関数で近似)と時刻 $t = t_0$ での刃先位置及び刃先速度が与えられるとき、時刻 $t = t_0 + h$ での動的切削力が求められる。またルンゲ・クッタ・ギル法では $t = t_0 + h/2$ での2種類と $t = t_0 + h$ で1種類の仮刃先位置が指定されるが、これらの位置での動的切削力も同様に求められるから、この方法による数値解析を行うことができる。解析は円筒端面の2次元旋削を対象として行い、切削厚さ零から出発して主軸1回転後にはば定常送りに到達する場合を扱った。図2は解析に用いた定常2次元切削のデータである。解析では設定の切削速度を 100 m/min としたが、発振時には切削速度方向の振動成分のため正味の切削速度が変化する。この影響は無視できないので、図示のデータを補間して正味の切削速度に対する値を用いることにした。

図3は数値解析によってえられる発振過程の数例であり、無拘束の通常工具の場合の結果である。本報告では切削幅を変化させて安定限界を求めるが、切削幅を増していくと同図(a)の無振動状態の持続(安定)から同図(b)の弱い発振状態が現れるようになる。通常工具でも非線形振動のために、この小振幅のびりが発達せずに持続するが、拘束工具では前報¹⁾で述べた制振作用のためこの状況が特に多い。そこでこの状況も安定と考えることにした。更に切削幅を増すと同図(c)のびり発振状態(不安定)となる。そこで安定限界は同図(b)から(c)に移行する限界切削幅とした。なお実験においても同図の傾向は同様であった。

Fig. 2 Orthogonal cutting data of shear stress τ_s , friction angle β , shear angle ϕ , and ratio of tool-chip contact length to depth of cut l/t_1

Cutting conditions : material cut, S45C steel; tool, P20 carbide ; depth of cut, 0.21 mm ; width of cut, 2.0 mm ; cutting fluid, dry

Fig. 3 Computed examples of chatter onset

Cutting conditions: Width of cut, (a) 1.0mm, (b) 2.0 mm, (c) 4.0 mm ; $\phi = 90^\circ$; other conditions are same as in Fig. 5 (a).

3. 実験装置と実験手続き

図1(a)の振動系を実現するため、図4に示す実験装置を使用した。図示の片持ちばり型工具シャンク（炭素鋼、38mm×19mmの矩形断面、長さ18mm）はすくい角 0° の工具切れ刃と旋盤刃物台に対

Fig. 4 Experimental set-up for chatter onset in the system of Fig. 1(a)

して回転できる構造となっており、切れ刃部は、切れ刃がシャンクの中心軸と一致する状態に置かれ、切削力測定用の圧電素子を介してシャンク先端の外側円板に固定されている。また図示のギャップセンサにより、切削厚さ方向の振動変位が測定される。この装置の顕著な振動モードはシャンク部の厚さ方向（図示の x_1 方向）と高さ方向（図示の x_2 方向）のみであり、インパルス応答法によって測定した振動定数は

x_1 方向：

$$\begin{aligned} m_1 &= 0.6619 \text{ kg} \\ c_1 &= 124.8 \text{ N} \cdot \text{s/m} \\ k_1 &= 1715 \times 10^4 \text{ N/m} \end{aligned}$$

x_2 方向：

$$\begin{aligned} m_2 &= 0.4768 \text{ kg} \\ c_2 &= 404.3 \text{ N} \cdot \text{s/m} \\ k_2 &= 3430 \times 10^4 \text{ N/m} \end{aligned}$$

であった。この振動定数を用いて前項の解析が行われている。びり実験は同図に示すように外径 $\phi 135$ mmのS45C炭素鋼円筒の端面の2次元旋削によって行い、内径を変化させて所要の切削幅を得た。従って主軸回転数が一定での実験である。また切削幅と同時に図示のシャンク方位角 ϕ と工具すくい面の切りくず接触長さ l を変えながら安定限界を求めた。図示の ϕ を正とすると問題に対称性があることから、実験は $0^\circ \leq \phi < 180^\circ$ の範囲でのみ行った。また用いた切りくず接触長さは $l = 0.71 \text{ mm}$, 0.86 mm 及び自然接触長（無拘束の通常工具）である。

Fig.5 Stability charts showing increase of threshold width of cut with reduction of tool-chip contact length

Cutting conditions: material cut, S45C steel ; tool, P20 carbide; depth of cut, 0.21 mm ; width of cut, var. ; cutting speed, 100 m/min ; cutting fluid, dry

$l = 0.71$ mmは用いた送り 0.21 mm/rev, 無振動の場合の自然接触長さよりかなり小さく, 小振幅のびり振動に対しては接触長さの拘束が常に有効(拘束長さ<自然接触長さ)となる. また $l = 0.86$ mmは同じ小振幅に対して前報¹⁾で述べた部分拘束状態, すなわち1波長の振動中切削厚さが増大する時に拘束が有効, 減少する時に無効となりやすい接触長さである.

4. 解析結果と実験結果の比較・検討

図5は解析及び実験で得られた安定限界の極座標表示であり, 半径は限界切削幅, 角度は図1(a)及び図4の方位角 ϕ である. また黒丸印と実線は解析結果, 白丸印と点線は実験結果を示している. まず図5(a)の無拘束($l = \text{Natural}$, 通常工具)の場合をみると, $\phi = 90^\circ$ の安定限界は $\phi = 0(180^\circ)$ のその2倍以上であることに気づく. x_2 方向の剛性は x_1 方向のそれより著しく大にとっており, $\phi = 90^\circ$ の場合に切削速度方向に振動が生じても, 切削厚さ方向の振動が誘発されにくい設定になっているからである. また $\phi = 120 \sim 150^\circ$ の安定限界が最も小であり, 同じような配置であっても $\phi = 30 \sim 60^\circ$ のそれが大なことも上記の剛性の相違と図示の平均切削力 R の方位(計算結果)を考えれば理解できる.

次にこの状態から切りくず接触長さを拘束・縮小すると, 同図(b), (c)にみるように安定限界が著しく改善されていくのがわかる. 特に $\phi = 0(180^\circ)$ の場合の改善が著しく, $l = 0.71$ mmでは $\phi = 90^\circ$ と $\phi = 0(180^\circ)$ の限界切削幅が逆転する. $\phi = 0(180^\circ)$ では切削速度方向の剛性が最大, 切削厚さ方向のそれが最小となつてびりが生じやすいが, 前報¹⁾で示したように, 拘束工具の防振効果は主に切削厚さ変動によるすくい面摩擦力の変動を抑制することによっており, この場合に最も効果が顕著となるからである. また図示のように平均切削力の方位が接触長さの拘束・縮小によって変化することも, $\phi = 0(180^\circ)$ での効果を最大にすることを助けている. なお $l = 0.71$ mm, $\phi = 0(180^\circ)$ の場合でも同図(c)のように安定限界が存在するのは, 系が不安定でびり振動が増大するとき, 前報¹⁾で示したように次第に部分拘束状態となつてしまい, 切削厚さの減少域での摩擦力変動を抑え切れなくなるためである.

もともと再生びりが生じにくい設定になっている $\phi = 90^\circ$ の場合にも拘束工具が効果を示すのは特筆すべきであろう. いまわずかな切削厚さ変動(切削厚さ方向振動)がある状態に切削速度方向のかなりの振動が重なる場合を考えると, 正味の切削速度は変動するから, これに対応する2次元切削データも変動する. また内外波の波形も変化するため, 前報¹⁾の波形傾き

Fig. 6 Computed amplitudes of deflection and cutting force at stability threshold. Contact length is 0.71mm and other conditions are same as in Fig. 5

角 δ_s , δ_c も変化し, これに伴って工具の相当すくい角 α^* , 更に工具すくい面摩擦特性も変化する. 従って切削速度方向の振動が無い場合より切削力変動は大となり, 切削厚さ方向の変動力成分($\alpha = 0^\circ$ の場合, 摩擦力の変動)も大となって切削厚さ方向も励振される. 拘束工具はこれらの連成による摩擦力変動を抑えるから, 安定限界を向上させるわけである. しかし, $\phi = 90^\circ$ の安定限界はもともと高いし, 拘束工具は切削速度の変化による摩擦応力の変化は抑えられないから, 十分な安定限界の向上が得られなかったものと考えられる. 図6は $l = 0.71 \text{ mm}$ の場合に, $\phi = 0 (180)^\circ$ と $\phi = \pm 90^\circ$ の安定限界における発振過程を解析によって求め, 比較したものである. 拘束工具の安定限界では小振幅の振動が発散せずに持続することがわかる. また $\phi = \pm 90^\circ$ の場合, 切削速度方向の振幅 x_1 , 切削力変動 f_x はかなり著しいが, 切削厚さ方向の y_1 , f_y が抑えられているためびびりが発達しない. この連成びびり系では切削厚さ方向の振動が律速しており, これを抑えればびびり振動を防げることがわかる.

以上の諸結果から図1(b)の実際の多自由度工作物系びびりを考えると, U-V面内の各固有モードの水平成分がほとんど零といった状況, すなわち切込み方向にはほとんど振動が生ぜず, 主として切削速度方向に振動する状況はむしろ特異であり, 存在しそうにないから, 一般に本報告の $\phi = \pm 90^\circ$ の場合よりも拘束工具が有効に作用しうる状況であると言ってよい. 従って同図の場合にも拘束工具によるびびり安定限界の著

しい改善が期待されるが, これについては次報で報告する.

なお図5の解析結果と実験結果を比較すると, いずれの場合も極めてよく一致しており, 定常2次元切削データと動的切削模型, エネルギー解析法を用いる本研究のびびり振動予測手法が有効なことが再び確かめられる. また結果は示さないが, 発振過程のシミュレーションについても解析結果と実験結果の一致は良好であった.

5. 結 論

2次元旋削における直交2自由度連成系の再生びびりを扱い, 振動方位を変化させた場合の接触面積拘束工具によるびびり安定限界の改善を吟味し, 以下の結論を得た.

- (1) 振動方位により程度に差異があるが, 切りくず接触長さの拘束・縮小により, 方位にかかわらず安定限界を改善でき, 実用性が期待できる.
- (2) 拘束接触長さを小にするほど安定限界の改善が著しく, 本報告の範囲では接触長さで切削厚さの比が3.4で安定限界切削幅が1.5~3倍に向上した.
- (3) 定常2次元切削データと動的切削模型, エネルギー解析法を用いる本研究の予測手法により, 無拘束の通常工具および接触面積拘束工具のびびり安定限界を計算によってもとめることができる.

引 用 文 献

- 1) 臼井英治, 呉 進, 帯川利之: 接触面積拘束工具のびびり振動抑制効果(第1報) — 発振過程の解析と振動抑制機構の検討, 精密工学会誌, 56, 2(1990)329.
- 2) 臼井英治, 井原 透, 笹原弘之, 白樫高洋: 自励びびり振動における動的切削過程の非線形効果(第1報) — 動的切削過程のすべり線場解析, 精密工学会誌, 55, 11(1989)2017.
- 3) 臼井英治, 帯川利之, 笹原弘之, 白樫高洋: 自励びびり振動における動的切削過程の非線形効果(第2報) — 動的切削過程のエネルギー法による解析, 精密工学会誌, 56, 4(1990)661.
- 4) 例えば F. Koenigsberger & J. Tlustý: Machine Tool Structure, Vol. 1, Pergamon Press, Oxford(1970).