

## 低周波振動切削時のびびり振動の解析 Simulation of Chatter Vibration in Low Frequency Vibration Cutting

東京農工大学 ○鎌田 陽, 東京農工大学 ©笹原 弘之

### 要旨

本論文では、NC 制御により工具を送り方向に振動させ、その振動を主軸回転と同期させて切削を行う低周波振動切削時のびびり振動挙動を明らかにすることを目的とする。そこで低周波振動切削時のびびり振動の時間領域の解析モデルを開発し、再生効果と刃先が被削材から離れることによる断続切削の効果を解析した。その結果、低周波振動切削時のびびり振動は、波形が不規則に変化しつつ振幅が成長することが明らかになった。

### 1. 緒言

近年、切削加工の高能率化への要求が高まってきている中で、びびり振動が生産速度のボトルネックとなるケースが増加している。中でも、再生びびり振動は大きな振動に成長することが多く、実用上問題となりやすい<sup>(1)</sup>。近年、旋削加工における新たな加工技術として、低周波振動切削が提案されている。これは、NC制御により工具を切削送り方向に振動させ、その振動を主軸回転と同期させて切削を行う技術である。送り方向の振動によって、刃先が被削材から離れる瞬間を生じさせることにより、切りくずの効果的な分断や、工具への熱的、機械的負荷の低減が可能である。通常の旋削とは異なる切削特性を持つ低周波振動切削において、再生びびり振動がどのように発生するのか、再生びびり振動の安定限界が慣用切削と比べて高くなるのか低くなるのかなど、学術的に興味深い点が多い。そこで、本研究では低周波振動切削におけるびびり振動の時間領域での解析を行い、低周波振動切削における再生びびり振動の発生機構について明らかにすることを目的とする。また、実切削実験により、低周波振動切削時の実際のびびり振動挙動についても調査した。

### 2. 解析モデル

本研究では慣用切削(CC: Conventional Cutting)の解析に用いられてきた2次元切削モデルを低周波振動切削に適用し、びびり振動の時間領域での解析を行う。CCのびびり振動を時間領域で解析した例はあるが、低周波振動切削のびびり振動を解析した例はない。図1に低周波振動切削におけるびびり振動の状態の模式図を示す。びびり振動では、現在の刃先の振動と1回転前までに被削材表面に転写された振動波形によって、切削厚さに変動が生じる。また、図1のモデルでは工具構造が送り方向にのみ振動する1自由度のバネマスダンパ系であると仮定している。ここで、切削抵抗は切削断面積に比例すると仮定し、比切削抵抗を  $K_f$  [N/mm<sup>2</sup>]、切削幅を  $a$  [mm] とすると、運動方程式は

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F_{feed}(t)$$

$$F_{feed}(t) = aK_f h(t)$$

となる。主軸1回転前までに被削材表面に転写された振動波形が、現在の切削厚さに影響を与えるので、次の式のように表せる。

$$h(t) = \begin{cases} \text{surface}(t, \theta) - \{y_0(t) + y(t)\}, & h(t) > 0 \\ 0, & h(t) \leq 0 \end{cases}$$

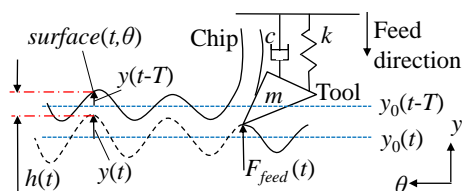


Fig.1 Process of regenerative chatter vibration

ここで、 $m$  は工具構造の等価質量[10<sup>-3</sup>kg]、 $c$  は減衰[N/(mm/s)]、 $k$  は剛性[N/mm]、 $t$  は時刻[s]、 $\theta$  は主軸角度[deg.]、 $h(t)$  は切削厚さ[mm]、 $\text{surface}(t, \theta)$  は被削材表面の座標[mm]、 $y_0(t)$  はNC制御により指示される刃先の移動軌跡[mm]、 $y(t)$  は指示された刃先位置に対する刃先の相対変位[mm]、 $F_{feed}(t)$  は送り方向の切削抵抗[N]、 $T$  は主軸1回転の周期[s]を示す。

また、低周波振動切削においてNCにより指示される刃先位置は、

$$y_0(t) = -\frac{2DQ+1}{4D}F \sin\left\{\frac{2\pi D}{T}t\right\} - \frac{F}{T}t$$

となる。ここで、 $F$  は主軸回転毎送り量[mm/rev]、 $D$  と  $Q$  は低周波振動切削の振動条件を定める定数で、 $D$  は主軸1回転あたりの振動数[-]、 $Q$  は送り量  $F$  に対する振動振幅の比[-]を示す。

これらの式を MATLAB の4次のルンゲクッタ法を用いるソルバ、ODE45を用いて解き、びびり振動の時間領域での解析を行う。

### 3. 低周波振動切削におけるびびり振動の解析結果

送り量  $F = 0.03$  mm/rev, 切削幅  $a = 1.1$  mm, 主軸回転数 2812 r/min, 主軸回転毎振動数  $D = 0.5$ , 振幅・送り比率  $Q = 1.5$  の条件で低周波振動切削におけるびびり振動の解析を行った。また、 $m$ ,  $c$ ,  $k$ ,  $K_f$  の値は実験により同定した値を用いた。

図2に低周波振動切削におけるびびり振動の解析結果を示す。低周波振動切削は断続切削であるため、周期的な振幅の増減を伴いながら、徐々にびびり振動振幅が増大している。この時、低周波振動切削におけるびびり振動では、低周波振動切削の振動の1周期毎にびびり振動波形が不規則に変化しながら振幅が増大していく。このような振動波形の不規則な変化は、低周波振動切削におけるびびり振動特有の特徴である。そこで、低周波振動切削におけるびびり振動がこのような不規則な波形の変化を伴う原因について考察する。

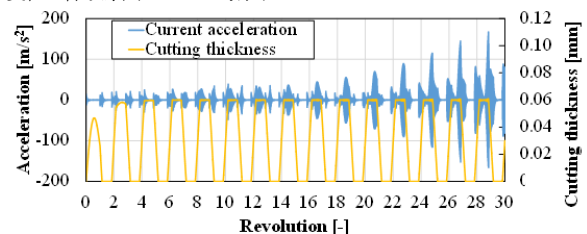
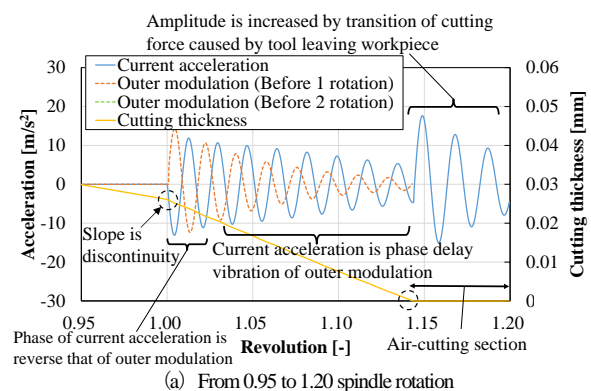


Fig.2 Result of analysis of chatter vibration ( $D=0.5$ ,  $Q=1.5$ )

図3に図2におけるびびり振動の発生段階のびびり振動波形を拡大し、外側波(Outer modulation)の波形を重ねたグラフを示す。低周波振動切削では主軸1回転前に創成された加工面から工具が離脱し Air cut time が生じるので、その部分では次の1回転後には2回転前に創成された加工面を加工することになる。そこで外側波については、前者を橙色の破線、後者を緑色の破線で色分けして示す。



(a) From 0.95 to 1.20 spindle rotation

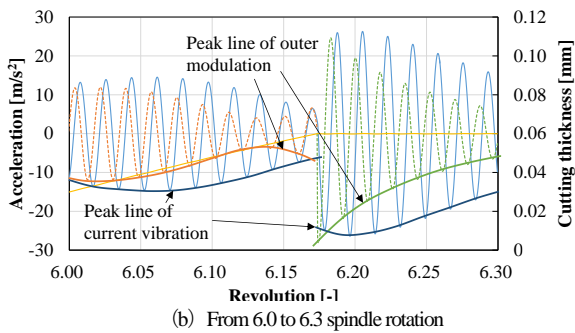


Fig.3 The graph that outer modulation is overlaid to enlarged view of Fig.2

図3 (a)を見ると、主軸2回転目の開始時に発生した刃先の振動波形において、通常は外側波に対する位相遅れ振動になるはずだが(実際に、振動発生後しばらくすると外側波に対する位相遅れ振動となっている)、その発生初期段階では外側波と逆位相の振動となっていることが分かる。これは、同じタイミングで切削厚さの変化率に不連続な点が存在することから、切削力の変化率の不連続性による振動が位相遅れ振動に重畳されているためと考えられる。また、切れ刃が被削材から離脱する時にも振動が大きくなっているが、これも切削力の変化率の不連続性による加振力によるものと考えられる。このような切削力の変化率の不連続点の存在は、低周波振動切削の断続切削の特性によるものであり、低周波振動切削におけるびびり振動が再生効果だけでなく、断続切削による効果が重畳されて発達することが明らかになった。

図3 (b)では刃先の振動波形と外側波のそれぞれについて、振動のピークを繋いだ線を重ねて表示している。ここで、主軸6.18回転後付近までの範囲に着目すると、外側波にはうなりの節が一つ現れているのに対し、刃先の振動波形にはうなりの節が現れない。これは、低周波振動切削においては切削の途中で、現在の刃先の振動に影響を与える外側波が主軸1回転前に創成されたものから主軸2回転前に創成されたものに(あるいはその逆に)切り替わることにより、外側波の全域が再生しないためである。また、主軸6.18回転後付近より後ろの範囲では、外側波には存在しないうなりのピークが刃先の振動に生じている。これは、低周波振動切削の切削力の変化率の不連続性による加振力による振動に対して、外側波に対する位相遅れ振動が重畳されたためである。よって、低周波振動切削におけるびびり振動では、低周波振動切削の特性による外側波の切り替わりと、現在の振動の外側波に対する位相遅れにより、振動波形が徐々に変化することが明らかになった。

4. 低周波振動切削におけるびびり振動の実験的検討

CCと低周波振動切削のそれぞれにおける、びびり振動波形の測定実験を行った。実験装置の概略と実験条件を図4と表1に示す。

図5に全実験条件の内、主軸回転数2812 r/minにおけるCCのびびり振動波形の測定結果と、同じ回転数でD=0.5の条件における低周波振動切削時の測定結果を示す。CCでは連続切削なので、切れ刃が被削材に食いついて、振幅が急速に増加し、飽和してからは一定の振幅が持続している。一方、低周波振動切削では断続切削であるので、振幅の周期的な増減を伴ってびびり振動振幅が増加していく様子が確認できる。また、Qの変化に伴ってびびり振動振幅の最大値が変化している。

ここで、Qをグラフの横軸にとり、各条件の実験結果における片振幅の最大値を図6に示す。実切削においては主軸回転毎振動数Dの変化に比べ、振幅・送り比率Qの変化がびびり振動振幅に対して顕著な影響を与えることが分かる。

5. 結言

低周波振動切削適用時のびびり振動の時間領域での解析モデルを開発した。また、加速度センサを用い、実切削によるびびり振動波形の測定実験を行った。解析と実験の結果から、以下のことが明らかになった。

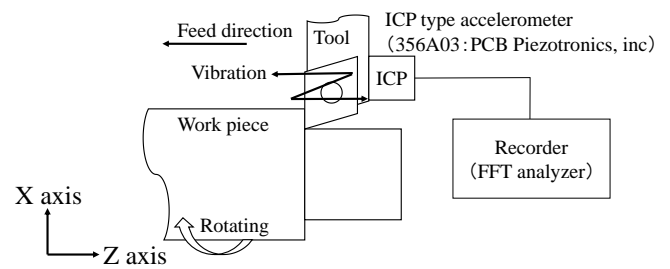


Fig.4 Experimental setup

Table.1 Machining condition

Tool material	-	Coated-cemented carbide DCGT302L-FY AC520U
Work piece material	-	SUS304
Work diameter	mm	10
Spindle speed S	r/min	2812, 3752
Depth of cut a	mm	0.4
Feed rate	mm	0.03
Vibration per spindle rotation D	-	0.5, 1.5
Amplitude per feed rate Q	-	0.5, 1.5, 2.5
Cutting fluid	-	Dry

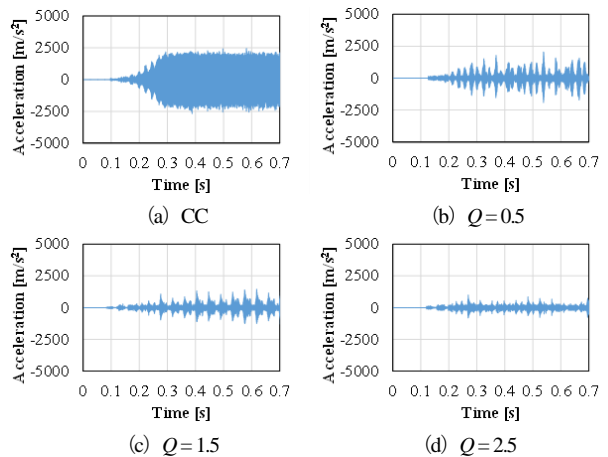


Fig.5 Experimental result of acceleration of chatter vibration

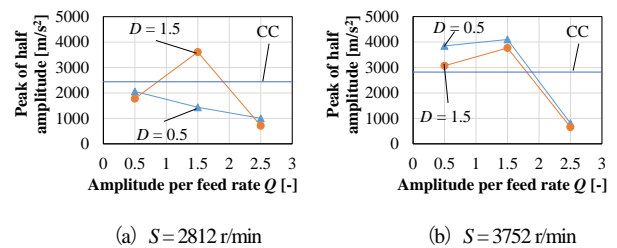


Fig.6 Experimental result of peak of half amplitude with different Q

- (1) 低周波振動切削におけるびびり振動では、現在の振動が再生効果だけでなく、断続切削の効果が重畳されて生じる。また、低周波振動切削による外側波の切り替わりと、現在の振動の外側波に対する位相遅れにより、振動波形が徐々に変化する。
- (2) 実切削において、低周波振動切削の振動はびびり振動の有限振幅の大きさや振幅の成長速度など、びびり振動の振動挙動に対して影響を与える。特に振幅・送り比率Qが主軸回転毎振動数Dに比べびびり振動振幅に対して顕著な影響を与える。

文献

- (1) 鈴木教和, “切削加工におけるびびり振動 (前編)”, 精密工学会誌, Vol.76, No.3 (2010), pp.280-284.