

旋削におけるびりり振動

杉本 隆 尚

旋削におけるびりり振動の原因、性質を理論的、実験的に検討し、びりり振動が被削材の一回転前の切削におけるびりり跡の時間遅れ効果も含めて振動系の動的不安定性により発生するものであり、しかもこのことは切削様式によらず成立することもわかった。

1. ま え が き

現場において工作機械のびりり振動と呼ばれている振動は、すべてが自励振動ではなく純粹の強制振動もあり、その上自励振動と強制振動が共存することもかなり多いため、工作機械の振動がすべて自励振動であると考えすることは誤りである。したがって現場で広い意味に使われているびりり振動は必ずしも自励振動を意味していない。しかしここで述べるびりり振動は自励振動に限ることとする。

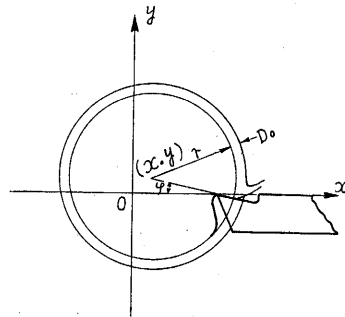
自励振動においては振動を持続させる周期的に変化する外力は振動系が振動することにより生じ、振動が止まれば外力の周期的変化も止まる性質を有し、この振幅は自励振動を生ぜしめる外力の性質、諸条件により定まり、その振動数はその系の自由振動数に近いことが多いが、発生させる外力の性質や条件によって変化する場合もある。自励振動は平衡点が動的に不安定な場合に発生することが多いが、このほか平衡点が安定でも衝撃などによりある大きさの振幅をもった振動を発生することがあり、そのほか外力の特有の性質により発生するものもある。したがって自励振動を防ぐ方法としては平衡点が動的に不安定であるために発生する場合は振動系に適当な減衰抵抗を与えてやればよいことは当然であるが、平衡点が動的に安定であるにもかかわらず発生する振動に対しては必ずしも粘性抵抗を加えることが防振策とならないことがある。さらに連成振動系の自励振動の場合には平衡点が動的に不安定な場合にも粘性抵抗を加えることが防振対策とならないといわれている。

ここでは旋削におけるびりり振動の原因を理論解析および実験より求めた結果について解説する。

2. 理論的解析法

振動の原因を知るには可能なかぎり理論的解析を行ない、この結果と実験結果と比較し両者の一致を知ることによるのが最適と考えられるので、安定論により解析を行なった。バイトのびりり振動、正面削りの場合の被削材の振動の場合も同じように解析でき、しかもいずれの場合も同一傾向の結果が得られるので外丸削りのときの被削材の振動について述べる。

振動中は切込み、送りなどの切削条件が変わるため切削抵抗が変化するので、これがびりり振動の原因である。



第1図

つまりびりり振動は自励振動であるという考えのもとに解析を行なう。第1図に示すように切削していないときの被削材の中心の位置に原点をとり、図のように座標軸をとり被削材の中心の座標 x, y により位置を表わす。切込み D 、送り S 、削り速度 V 、被削材半径 r 、バイトの取付角 α_1 、前切刃角 α_2 、削り角 α とし、 D_0, S_0, V_0 により定常切削時の切込み、送り、削り速度を表わすことにすると、切込みは刃先と外周との距離を計算することにより

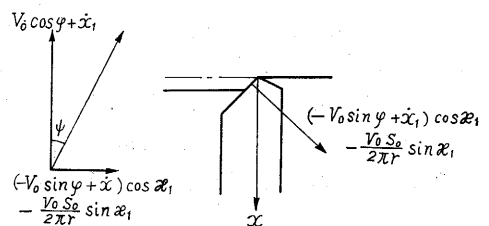
$$D = r + D_0 - \sqrt{(r-x)^2 + y^2}$$

と表わされる。被削材が水平および垂直方向にそれぞれ x, y だけ変位すると、送りが $x \cot \alpha_1 + S_0 y / (2\pi r)$ だけ減少したと同等の切屑厚さの減少を生ずる。他方ベッドに対するバイトの送り速度は一定であることを考えるならば次の関係式が成立する。

$$\{S + x \cot \alpha_1 + y S_0 / (2\pi r)\} (V_0 + \dot{y} \cos \varphi - \dot{x} \sin \varphi) = V_0 S_0$$

これより送り S を求めることができる。ここで第1図により $\tan \varphi = y / (r+x)$ である。上式の中変位による送りの変化は $\dot{x}, \dot{y} \neq 0$ の場合のみ成立する。

つぎに削り速度の方向とすくい面とのなす角を削り角と定義すると第2図に示すように削り速度の切刃に直角



第2図

な水平成分は

$$(-V_0 \sin \varphi + \dot{x}) \cos \alpha_1 + (V_0 S_0 \sin \alpha_1) / (2\pi r)$$

であって、他方これに直角な y 成分は $V_0 \cos \varphi - \dot{y}$ で与えられるから、削り角の変化分は第 2 図の ψ で与えられるから削り角は次式で与えられる。

$$\alpha = \alpha_0 - \tan^{-1} \frac{(-V_0 \sin \varphi + \dot{x}) \cos \alpha_1 + (V_0 S_0 \sin \alpha_1) / (2\pi r)}{V_0 \cos \varphi - \dot{y}}$$

また削り速度は次式で与えられる。

$$V = V_0 + \dot{y} \cos \varphi - \dot{x} \sin \varphi$$

さて取付角は外丸削りの場合振動してもほとんど変化せず、また逃げ角などは切削抵抗に無関係なので考慮する必要がなく、他方切削抵抗の主分力 F_1 、背分力 F_2 と切削条件との間にはほぼ次の関係式が成立することがわかってる。

$$F_i = K_i \alpha_1 - \beta_i D \epsilon_i S r_i \left(\frac{12 \alpha_{ei}}{5\pi} + \frac{5\pi b_i}{12 \alpha_{ei}} \right) (1 + \nu_i e^{-\mu_i V})$$

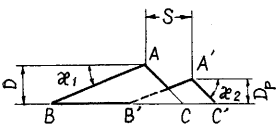
($i=1, 2$)

ただし

$$\alpha_{e1} = \alpha_0 - (S_0 \sin \alpha_1) / (2\pi)$$

$$\alpha_{e2} = \alpha_0 - (S_0 \sin \alpha_1) / (2\pi) - \pi/4$$

この式に上に求めた D, S, α の式を代入して級数に展開し x, y, \dot{x}, \dot{y} の 2 次以上の高次の項を省略して運動方程式に代入して不安定条件を求めれば、びびり振動の発生条件が求められる。つまり平衡点の動的な不安定性がびびり振動の発生原因であると考えて動的な不安定性を支配する条件を求めるのである。ただしびびり振動においては前歴効果、すなわち主軸 1 回転前の切削の際に



第 3 図

びびり振動が発生していた場合びびり跡が 1 回転後の切削の際に切削抵抗の周期的変化を生ぜしめるため、びびり振動の発生

条件に大きく影響する。この影響を考えに入れる場合には切込み、送りなどを次のように補正せねばならない。第 3 図において $A'B'C'$ を主軸の 1 回転前の切削における切削跡とし、 ABC を現在切削中のバイトの刃の位置とする。 D_p を 1 回転前の切削における切込みとすると図において斜線を施した部分の面積は

$$[D \operatorname{cosec} \alpha_1 - \{S + (D - D_p) \cot \alpha_1\} \{ \cos \alpha_1 - \sin \alpha_1 \cot(\alpha_1 + \alpha_2) \} / 2] \{ S \sin \alpha_1 + (D - D_p) \cos \alpha_1 \}$$

と与えられるので、切削抵抗の式に前歴効果を導入するため、等価切込み D_e 、等価送り S_e をつぎのように定義する。

$$D_e = D - q \{ S + (D - D_p) \cot \alpha_1 \} \sin \alpha_1$$

$$S_e = S + (D - D_p) \cot \alpha_1$$

$$2q = \cos \alpha_1 - \sin \alpha_1 \cot(\alpha_1 + \alpha_2)$$

この D_e, S_e を前記の切削抵抗の D, S に代入し、上式の D, S にはすでに求めた D, S の式を代入すればよい。ただし D_p としては運動方程式の中に時間遅れ項として入るようにするのが、びびり振動の解析上最も適している。すなわち主軸 1 回転前における被削材の水平方向の変位 $x(t - 2\pi r / V_0)$ を考えて

$$D_p = D_0 + x(t - 2\pi r / V_0)$$

とする。

著者はびびり振動発生条件を求めるに際し、前歴効果を考えに入れなるときは 2 自由度振動系と考え、つぎのように運動方程式を作った。振動系の質量を m ; x, y 方向のばね常数をそれぞれ k_2, k_1 、振動系固有の減衰係数を x, y 方向についてそれぞれ c_{02}, c_{01} であるとして

$$m\ddot{x} + c_{02}\dot{x} + k_2x = -F_2$$

$$m\ddot{y} + c_{01}\dot{y} + k_1y = F_1$$

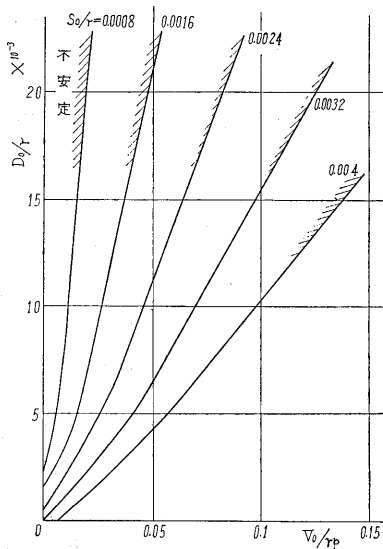
と表わした。これよりびびり振動の発生範囲を求めた結果 1 自由度系と求めて求めたバイトの振動の発生条件と同じ傾向の結果が得られたので、前歴効果を考えに入れた場合には、被削材は定常合切削抵抗の方向に振動する 1 自由度系と求めて、運動方程式をつぎのように作り、びびり振動の発生範囲を求めた。定常合切削抵抗方向のばね常数、振動系固有の減衰係数、合切削抵抗をそれぞれ k, c_0, F とし、またこの方向の変位を z で表わして

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = F$$

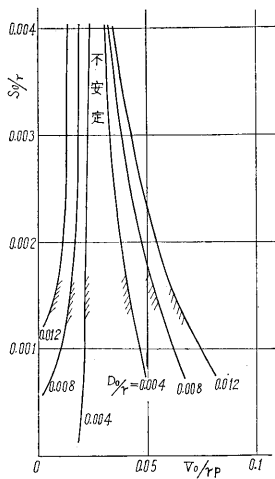
とする。実際は長円形の軌跡をえがいて振動し、しかもこの長円の向きが空間において移動するが、安定論により解析する場合には変位は微小と考えているので直線運動と考えても差し支えない。

3. 理論解析結果

前章で述べた方法によりびびり振動の発生条件を求め、これより発生範囲を求めた結果について述べる。切削抵抗の式としては著者の行なった軟鋼切削実験および横山⁽¹⁾の結果を用いて $\epsilon_1 = 0.96, \epsilon_2 = 0.94, \gamma_1 = \gamma_2 = 0.85, \mu_1' pr = 12.3702, \mu_2' pr = 12.3174, \nu_1 = 0.488, \nu_2 = 0.853, b_1 = 0.64, b_2 = 0.04$ を得、またばね常数としては $k_1 = 460 \text{ kg/mm}, k_2 = 320 \text{ kg/mm}, c_{01} = c_{02} = 0.092\sqrt{mk_1}, m = 0.00088 \text{ kg sec}^2/\text{mm}$ (平均値) とした。ただし $p^2 = k_1/m$ である。工具形状としては $\alpha_0 = 5\pi/12, \alpha_1 = \pi/4, \alpha_2 = \pi/9$ とした。これらの値を用い前歴効果を考えに入れなるときのびびり振動の発生範囲を求めた結果第 4 図を得た。横軸は無次元削り速度 V_0/pr 、縦軸は無次元切込み D_0/r 、パラメータとして無次元送り S_0/r をとってある。この図において曲線より左側が不安定範囲でびびり振動の発生範囲である。したがって、びびり振動の発生範囲が広いことをもってびびり振動が発生しやすいと解釈することにすれば、この図より



第4図



第5図

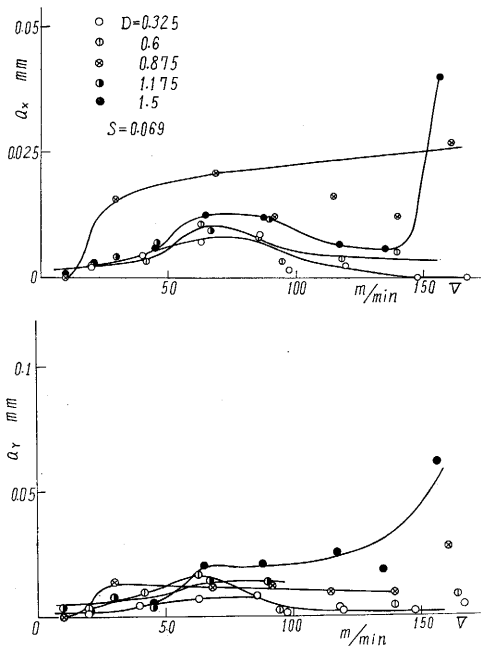
- (i) 切込み, 送りが大きくなるほど不安定範囲は広くなりびびり振動が発生しやすくなる。
- (ii) 切込み, 送りがある値以下になるとすべての削り速度に対して安定である。
- (iii) びびり振動の発生しやすさに対しては切込みより送りの方の影響が大きい。

ことが認められる。これらの結果はバイトの振動を1自由度振動系として前歴効果を考えずに得たものと同一傾向を有している。そしてこの結果のうち切込みが大きくなれば振動しやすくなるという結果はよいとしても、送りの小さいほど振動しやすいという一般にいわれ、また著者の実験からも確認された傾向に反するので、つぎに前歴効果を考慮して解析した結果、第5図を得た。この図の横軸は第4図と同じであるが、縦軸は無次元送り S_0/r をとりパラメータとして無次元切込み D_0/r をとつ

てあり、斜線を施した内部が不安定範囲である。これより切込みの大きくなるほど、送りの小さくなるほど不安定範囲は広くなり、したがってびびり振動が発生しやすくなることがわかる。この結果は従来定性的にいわれている傾向と一致し、またバイトの振動についても前歴効果を考えに入れた場合は同様の結果が得られている。このようにバイトの振動も被削材の振動も同一原因によって発生すると仮定して解析した結果、両者の傾向がよく一致し、かつ経験的にいわれている傾向とも一致したのでバイトの振動について前歴効果を考えずに解析して得られた取付角、削り角、剛性（これらは前歴効果の影響を受けない）がびびり振動の発生に及ぼす影響はそのまま被削材の振動の場合にも成立し、取付角、剛性の小さいほど、削り角の大きいほどびびり振動を発生しやすいといえる。しかしこれらの諸条件のうちどれが最も大きく影響するかを理論的に比較すると、送りと取付角の影響が大きく、とくに取付角の影響が最も大きい、前歴効果を考えに入れた理論結果が実験結果とよく一致したことは後に述べるが、前歴効果を考えに入れない結果と比較することにより、前歴効果はびびり振動を助長する作用もするが抑制する作用もすることがわかるであろう。この励振作用をするか抑制作用をするかはびびり跡とびびり振動との位相差の大きさによって定まるもので、しかもこの位相差は切削条件により変わる。また以上の結果よりびびり振動が前歴効果も含めて平衡点の動的不安定性によって発生する自励振動であることがわかった。正面削りにおけるびびり振動は外丸削りの場合におけるものとは、やや傾向が異なり取付角の大きいほどびびり振動を発生しやすくなり、軟鋼などを切削する際に普通に使用されているバイトを用いたときは外丸削りより正面削りの方が振動しやすいことが結論される。

4. 実験方法

実験に用いた旋盤は4フィート旋盤であって、振動の測定は容量型変位計を用い、被削材のびびり振動について検討した。モータは特別に、無段変速モータを用いた。被削材は0.18% C、硬さRB80の軟鋼で切削前の直径140mm、厚さ80mmのものを被削材取付軸につけてチャックにつかんだ。正面削りのときもほぼ同様で、両センタ支持の場合のみ被削材の厚さを上記の1/2とした。バイトは削り角75°、取付角45°、前切刃角20°、前および横進角8°、ノーズ半径0.3mmとしたが、削り角、取付角はこれらがびびり振動におよぼす影響を調べるために、2, 3種類変化させた。振動の実験は振動が発生しなければその性質を知ることができず、したがってその発生原因や防振対策も得られないので、適切な条件を求めるため、予備実験によりバイトの選択および実験方法の選択を行なった後切込み、送りを適当に変え、か

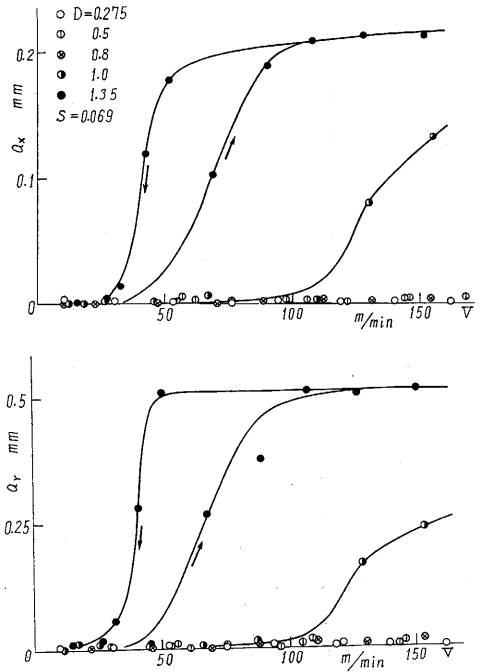


第 6 図

つ削り速度をほぼ 10 m/min ずつ変えて切削し、振動をオシログラフで記録し、さらに切削面上のびり跡の存在範囲を調べた。正面削りの場合は被削材の内側より外側に向かって主軸回転速度を一定のまま切削した。そのひめ削り速度はあまり高くすることができなかった。

5. 実験結果

予備実験において、つぎの興味ある結果を得た。すなわち刃が鈍化すると構成刃先がよく成長し、他方びり振動はきわめて発生しにくくなるが、切削面上には構成刃先の脱落片が密集して付着し仕上面はきわめてきたない。ゆえに刃を鈍化させてびり振動の発生を防ぐことが現場で行なわれているが、あまり好ましい傾向とはいえない。また構成刃先が発生すればびり振動が発生し



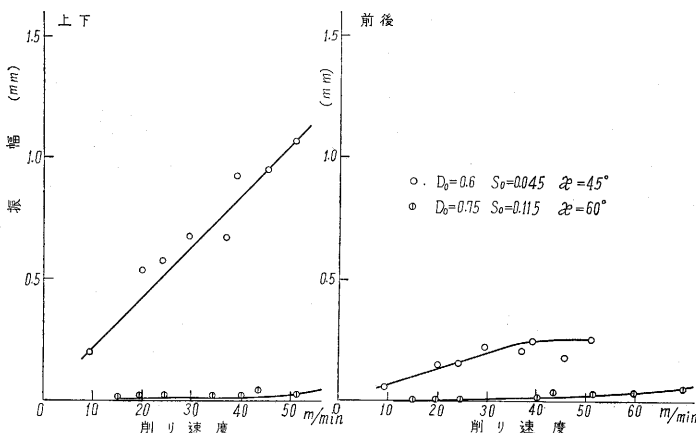
第 7 図

なくなるということはないことも注意すべきことである。

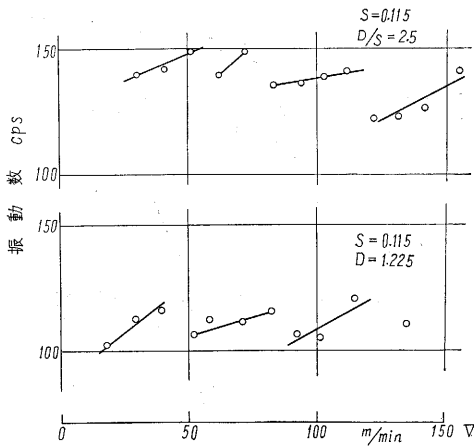
びり振動がどのような性質を有するかを知るために第 6, 8 図に振幅曲線の例を示す。第 6, 7 図はチャックで被削材取付軸をつかんだ場合(チャック-被削材系と呼ぶ)、第 8 図は正面削り実験の場合と同じ振動系における外丸削り実験の結果である。ここに a_x は水平前後方向の振幅、 a_y は上下方向の振幅を表わす。第 9 図は振動数曲線の例を示す。びり振動の振幅は削り速度の変化に対して変化が少なく、徐々に増大するもの、急激に大きくなり、その後ほぼ一定であるが再び急に小さくなるものがあり、その他共振曲線を示すものがある。横軸の変数の変化に対して振幅曲線が急激に変化する場合に

は曲線に履歴性を伴う、すなわち横軸変数を増加させる場合と減少させる場合で異なる曲線をえがくのが普通であるが、びり振動の場合にも履歴性を示すことが判明した。その例を第 7 図に示してある。

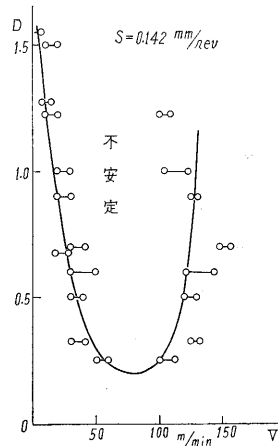
正面削りの場合には削り速度の変化に対してある速度以上では直線的に増加し後一定値に近づく傾向のあることが認められたが、まったく同じ振動系でも外丸削りの場合には第 8 図に示すように取付角の大きさによりこのような性質を示す場合と示さない場合のあることが認められた。振動数はきわめて多くの場合に第 9 図に示すように削り速度の変化に対して鋸歯状曲線的に変化するが、ほぼ系の



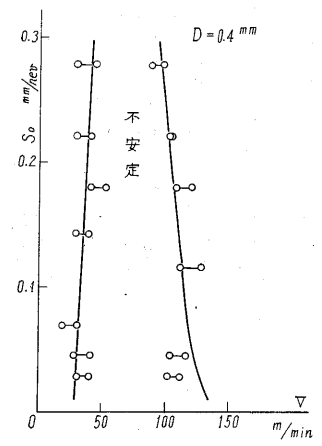
第 8 図



第9図



第10図



第11図

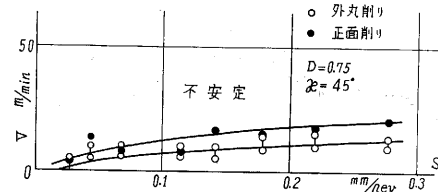
固有振動数に近い。

つぎにびびり振動の発生範囲につき述べる。第10図はチャック-被削材系の外丸削りの場合の例を示す。図において縦軸に切込み、横軸は削り速度を表わす。この図において線分で結んだ2点は切削面のびびり跡およびオシログラムより判定したびびり振動の発生する速度範囲と発生しない速度範囲の境界がこの2点間にあることを示す。したがって第10図においてU字曲線の内部がびびり振動の発生範囲を示すので、切込みの大きくなるほどびびり振動の発生範囲が広くなり振動しやすいことがわかる。しかし削り角の変化に対してはあまり著しい変化はなく削り角はびびり振動に対しあまり影響がないと判断される。

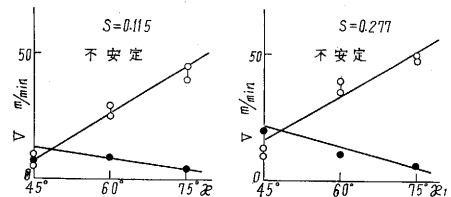
上と同じ結果をチャック-被削材系について縦軸に送り、横軸に削り速度をとってびびり振動の発生範囲を表わした結果例を第11図に示す。この場合も記録方法は前と同じである。この図より送りの大きくなるほどびびり振動が発生しにくいことが判明する。

正面削り、外丸削りの場合を比較すると振幅曲線にやや違った傾向が認められたが、第12図に示すようにびびり振動発生範囲曲線の形状、性質には差違がなく、びびり振動の発生原因に根本的な違いのないことが認められた。正面削りの場合について取付角とびびり振動発生範囲を求めたところ第13図の結果を得た。なおこの図には比較のため同じ振動系についての外丸削りの場合の結果も記入してある。これより正面削りの場合は取付角の大きくなるほどびびり振動発生範囲の低速側限界が低くなり、外丸削りの場合と反対の傾向をもっていることがわかる。このことは実験において高速切削が不可能であったため求められていないが高速側限界についても同じように成立するものと考えられる。したがって取付角の大きいときは外丸削りより正面削りの方が振動しやすいといえる。

切削剤が防振効果を有するかどうかについて実験して



第12図

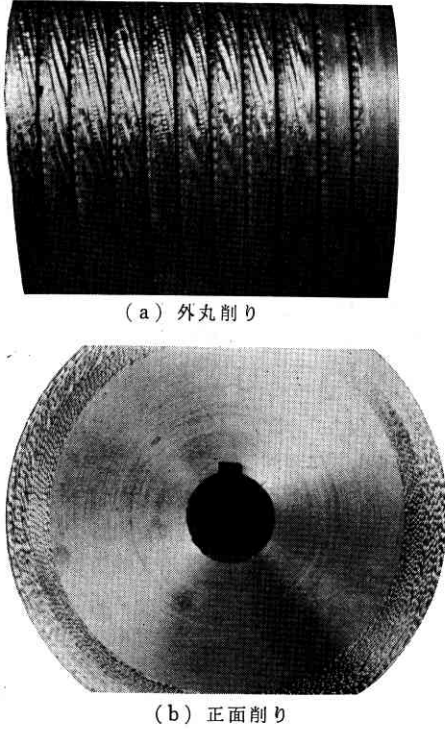


第13図

みた。切削剤としては現在いろいろのものが用いられているが、実験においては切削面に長い間付着して振動に影響することを避けるためガソリンを用いたが、その結果では大量に切削剤を注がなければ防振効果がほとんど認められず、したがって切削剤も粘性抵抗を利用する以外には防振効果を望むことはできないことがわかった。

びびり振動を発生しているときの切屑形状は振幅によって多少異なるが一般に鋸歯形を有し、かつ側面には切削時の剪断面と思われる筋が見られる。びびり振動を伴う外丸削り、正面削りの際に発生する切屑の形状に差はないが、正面削りの場合はびびり振動の振幅が小さくても振動1サイクルごとに切れて生成するという違いがある。

びびり跡は第14図に示すようにきれいなしま模様となるが、これは前歴効果によるもので、もし前歴効果のないような方法で切削する場合にはびびり跡はしま模様とならない。びびり跡がしま模様となるのは前歴効果によることは実験的に確かめることができる。このびびり跡のピッチを被削材の回転速度がわかればびびり振動の振動数は求められるわけであるが、実際にはびびり跡が



(a) 外丸削り

(b) 正面削り

第 14 図

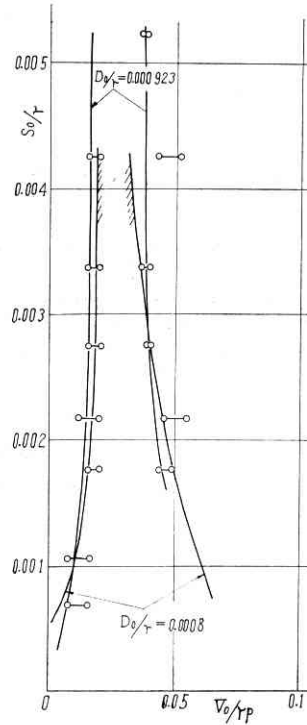
1 回転または 2 回転前および後のびり跡と干渉するためびり跡のピッチを正確に測定することは不可能で、したがって場合によっては非常に大きな誤差を生ずることがあるので注意を要する。

6. 考 察

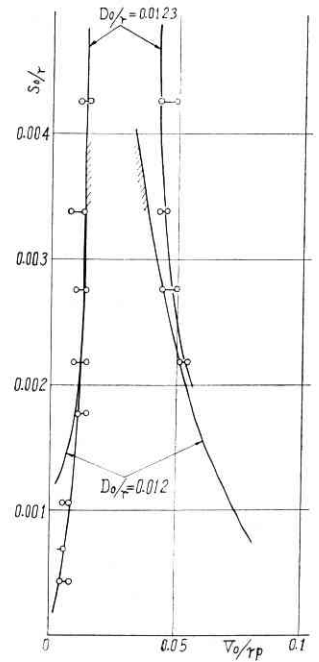
びり振動の発生原因を知るためには振動発生範囲図について考察するのが最適であるので、これについて考える。

前述のように前歴効果を考えに入れない理論結果によれば、送りの変化に対するびり振動発生範囲の変化の傾向が実験結果と異なったが、切込みの変化に対しては一致した傾向を示した。他方前歴効果を考えに入れた場合には前者の欠陥が改善されて、実験結果と十分に一致した。その模様の例を第 15, 16 図に示す。この図において理論結果と実験結果に少し不一致な点が認められるのは実験においては主軸歯車の噛合い不良のために共振現象を生じたためと切削抵抗—削り速度曲線が低速においては構成刃先の生成のため正勾配を有するにもかかわらず、理論では全速度域にわたって負勾配を有すると近似したことによる。

第 15, 16 図を見ると理論結果と実験結果がかなりよく一致していることが認められる。したがってびり振動は前歴効果による時間遅れ作用も含めて平衡点の動的不安定性により発生するものであることが明白となった。このことは前述の切削剤の防振効果についての実験



第 15 図



第 16 図

結果からも証明されるであろう。剛性、切削様式(外丸削り、正面削りなど)、工具形状などは振動の発生範囲には影響するが発生機構を変えるものではない。前述のように前歴効果は制振作用と励振作用の両作用を有し、びり跡とびり振動との位相差により励振作用をすることも制振作用をすることもあるので、この性質を利用すればびり振動は避けられると考えられる。バイトの振動と被削材の振動とはその原因が異なり、後者の原因は切削特有の現象であるところの時間遅れ(被削材の振動より切削抵抗の変化の位相が遅れる)であると述べている研究者⁽²⁾もあるが、著者の考えではバイトの振動も被削材の振動も原因は同じで、また時間遅れも振動中の切削抵抗が被削材、バイトの変位に比例する成分と速度に比例する成分を有するための必然の結果であると思う。

7. 結 論

以上を総合して旋削におけるびり振動は前歴効果も含め、振動系の動的不安定性により発生する自励振動であることが判明し、したがってこれを防ぐには適当な減衰を与えることがよいこと、またはバイトに適当な振動数の微小振動を与えればよいであろうことがわかった。

(1962 年 10 月 10 日受理)

文 献

- (1) 横山外 精密機械 22—11 (昭 31—11) 467
- (2) 土 井 工作機械の振動 (昭 29)