不安定範囲は著しく増加するが、切込みの増加に対しては徐々に、しかも上の不安定速度限界曲線の移動する割合はしだいに減少するが、下の不安定速度限界曲線についてはややわずかに増加の傾向があること、(v)したがってこれより前歴効果は切込みよりも送りの影響を特に強く受けること、(vi) 前歴効果は時間遅れの作用を有しているが、この時間遅れは励振作用を有する場合も制振作用を有する場合もあること、がわかった。このほか取付角、送りが前歴効果におよぼす影響について比較検討し、送りよりも取付角のほうが影響が大きいため防振上は取付角を大きくし、仕上用として刃の先端に一部取付角の小さい切刃を付けて仕上精度の不足を補えばよいであろうことがわかった。

端面切削の際に発生する振動についても同様に取扱うことができ、ほぼ上と同じ結果を得られるが、後に報告する。

文 献

- (1) R.N. Arnold, *Proc. Inst. Mech. Engr.*, **154** (1946), 261; R.S. Hahn, *Trans. ASME*, **75** (1953), 1073; R. S. Hahn, *Trans. ASME*, Ser. B, **81-3** (1959), 201; *Trans. ASME*, **76** (1954), 593; W. Hölken, *Industrie Anzeiger*, **1** (1985), 1; J. Tlustý, *Czechoslovak Heavy*

- Indus.*, **1** (1955), 8; N.H. Cook, *Trans. ASME*, Ser. B, **81-2** (1959), 183; J. Chisholm, *Machinery (E)*, **74** (1949-6-14), 51; E. Salje, *Trans. ASME*, **78** (1956), 737; S.A. Tobias & W. Fishwick, *Proc. Inst. Mech. Engr.*, **176** (1956), 232; *Masch. Markt*, **37** (1960), 28; *Engineering*, **185-4808** (1958-5-2), 568; 土井, 機械学会論文集, **19-86** (昭 28-10), 28; 機械学会誌, **54-385** (昭 26-2), 39; 土井・黒田, 機械学会論文集, **19-86** (昭 28-10), 34; **21-102** (昭 30-2), 110; 土井・加藤, 機械学会論文集, **21-110** (昭 30-10), 727; **22-118** (昭 31-6), 408; 土井, 機械学会論文集, **25-158** (昭 34-10), 963; 加藤, *Memoirs Fac. Engng. Nagoya Univ.*, **10-2** (昭 33-11), 117; 丸山, 第 2 回応力学連合講演会前刷第 4 部 (昭 27-11), 30; 丸山, 第 28 期定時総会講演会前刷, 講演番号 211 (昭 26-4), 37; 第 36 期通常総会講演会前刷集, No. 7 (昭 34-4), 7; 第 37 期通常総会講演会前刷集, No. 26 (昭 35-4), 45; 井上, 精密機械, **24-10** (昭 33-10), 543; **25-4** (昭 34-4), 107; **25-5** (昭 35-5), 198; 星野, 北海道大学工学部報告, No. 8 (昭 28-9), 8; No. 10 (昭 29-5), 1; No. 11 (昭 29-12), 97; 土井・栗田, 第 37 期通常総会講演会前刷集, No. 62 (昭 35-4), 61.
- (2) 海老原, 切削理論, マシナリ臨時増刊, No. 7 (昭 26), 110.
- (3) R. Turret, *Performance of Metal Cutting Tool* (1958), 65, Butterworth Science Pub.
- (4) 横山・ほか, 精密機械, **22-11** (昭 31-11), 467.
- (5) 杉本, 機械学会論文集, **26-169** (昭 35-9), 1 209.
- (6) Y. Rocard, *Dynamique général de Vibration*, (1949), 214, Masson & Cie; *Dynamic Instability*, (1957), 37, Crosby Lockwood & Son.
- (7) 藤井, 理工研報告, **1-5,6** (昭 22-6), 80.
- (8) S.A. Tobias & Others, *Trans. ASME*, **80** (1958), 1 079.

621.941-752:534.13.01

旋 削 に お ける 振 動*

(第 2 報, 実験的研究)

杉 本 隆 尙**

Chatter Vibration in Turning

(2nd Report, Experimental Studies)

by Takanao SUGIMOTO

The 1st report of this subject was concerned with the theoretical study of the chatter vibration of work pieces in turning.

In this 2nd report, the amplitude and the frequency of chatter vibration are obtained. The chatter vibration is considered to be influenced by the chatter mark produced during the preceding revolutions, and the orderly and characteristic patterns of chatter mark are produced by the interaction between the present motion of work pieces and the chatter mark produced during the preceding revolutions. Whether the chatter vibration of lathe tools belongs to the soft-generation or the hard-generation depends upon the cutting conditions.

1. ま え が き

前報⁽¹⁾において著者は旋削時における被削材の振動

* 昭和 36 年 4 月 5 日 第 38 期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 36 年 10 月 12 日.

** 正員, 千葉工業大学 (習志野市谷津町 7 の 1916).

につきその発生原因を理論的に解析した。そして前歴効果を考えに入れない場合の解析により 1 自由度系と考えて解析した旋削バイトの振動⁽²⁾の場合と同じ傾向の結果が得られたこと、また前歴効果を考えに入れ 1 自由度系と考えて解析した場合には、実験結果とよく

一致した傾向の結果が得られたことを述べた。したがって本報においては旋削時に最も発生しやすい被削材の振動につき実験的に研究し、理論解析と比較検討した結果、びびり振動の原因の大半は究明されたと考えられる。

2. 実 験 装 置

- (i) 使用旋盤、篠原製作所製 4 ft 旋盤
 ベッド上の振り 300 mm
 心間距離 600 mm
 送り mm/rev 0.028, 0.045, 0.069,
 0.115, 0.142, 0.175,
 0.220, 0.277, 0.341

この旋盤主軸-被削材系の上下、前後方向の剛性を測定した結果上下方向、前後方向それぞれ 460, 320 kg/mm を得た。

(ii) 測定装置 被削材の振動の測定は第 1 図に示すようなピックアップの容量形変位計を用い、記録は共和無線研究所の電磁オシログラフ MA 33 形（ガルバノメータ 7BB 1000 形）によった。切削抵抗の測定装置も同様に容量形変位計によった。この測定装置の固有振動数は上下方向 1240 c/s, 前後方向 1255 c/s である。また振動測定装置、切削抵抗測定装置の使用状態を第 2 図に示す。なお被削材の振動測定方法は後に改良し、被削材とチャックの中間の被削材取付軸に円板を取付け容量形変位計で測定するようにした。

(iii) 被削材 被削材は 0.18% C, かたさ H_{RB} 80 の軟鋼でその直径は約 140 mm, 厚さ 80 mm, これを第 3 図に示すような取付軸につけてチャック-回転センタにより旋盤にセットした。このようにしたのは測定に便利ようにすることと被削材の交替を容易にすることにある。

両センタ支持での実験では被削材取付軸を対称形を

第 1 図

なすように変え、被削材は厚さを前者の 1/2 にした。

(iv) 工具 工具は高速度鋼第 4 種完成バイト 13 mm 角を使用した。工具形状は削り角 75°, 取付角 45°, 前切刃角 20°, 前および横逃げ角 8°, ノーズ半径 0.3 mm を選んだ。使用に際しては 1 種類の実験ごとに油といしで研磨したが、使用度数が重なるにつれて刃の鈍化が避けられなかったので研削盤により研磨した。工具形状は上記のほか、比較のため削り角 85°, 90°, 取付角 60°, その他は上記のものと同じ値のものを使用した。おもなる実験で取付角を 45° としたのは、軟鋼切削で一般に使われる取付角 60° は振動しにくいので 20° を採用して実験したところ、これはきわめて広範囲の切削条件に対して激しく振動し、むしろ実験にやや不適当と考えられたので、60° と 20° の中間として 45° を採用した。

3. 実 験 方 法

びびり振動の発生機構を確かめるため切削諸条件を変化させ振動系の安定性がどのように変化するかを調べる。変化させる切削条件としては、削り速度、切込み、送り、取付角、削り角とした。またびびり振動がどのような性格を有する外力によるものかを推察するため削り速度と振幅との関係も求めた。

実験は次のような方法で行なった。

a) バイト形状の選択, b) テーパー部切削, c) 切りくず比一定の場合, d) 段階的に切込みを変化させた場合, e) 工具形状変化の影響, f) 被削材を両センタで支持した場合, g) 切削抵抗の測定。

4. 実験結果およびその考察

本報においては主として振幅と切削条件などの関係

第 2 図

第 3 図

につき報告し、本研究の主目的である安定範囲については次報にゆずる。

(a) バイトの選択 びびり振動の原因を追求する実験を行なうに適切なバイトを選択するために取付角 20° 、削り角 $75^\circ, 80^\circ$ のバイトを2種作って実験した。以前に取付角 60° の標準バイトを使用した実験では、びびり振動が発生し難かったので、取付角は思い切って小さくした。その結果低速より非常に激しく振動して測定上支障があり、また切削にもかなりの無理が認められたので取付角 20° は不採用と定めた。そして以前の実験経験を参考にし、かつバイトの振動の理論解析で特異な現象を示したところの 45° を取付角として採用することに決定し、(b)~(d), (f), (g) の実験を行なった。

この予備実験では次の興味ある事実を発見した。すなわち研磨したばかりのバイトでは、刃のせん鋭度を調べるため指頭にて刃縁を擦ると傷がつく程度であり、かつ発振しやすいが、切込み、送り、削り速度が同一である切削条件下でも、刃のせん鋭度が摩耗のため落ちると発振し難くなり、削り速度をさらにあげても発振せず、ついに焼損するに至った。このことは現場でも利用されやすさなどで刃先を鈍化させて防振することがある。しかしこのときの被削面はバイトのせん鋭度が高いときに比べると仕上がりが悪く、第4図に示すような切りくずが被削面に密集して付着していることがわかった。ゆえに刃のせん鋭度が落ちるとバイトの限界速度が上昇し、構成刃先ができやすくなるものと思われる。構成刃先が最も成長したときの削り角は $50^\circ \sim 60^\circ$ ⁽³⁾ といわれている。他方軟鋼切削時には削り角 60° というのはびびり振動が発生し難い角度である。したがって構成刃先の発生するときはその成長、脱落などのため切削抵抗に周期的変化を生じて、びびり振動の発生にはあまり寄与することなく、成長、脱落などの周期と被削材の固有周期とが一致した場合は別として、構成刃先の成長による削り角の変化の影響のほうが大きく、びびり振動が発生し難いものと思われる。しかし構成刃先があるときは常に全くびびり振動を発生しないというわけではないことは後に述べる。

(b) テーパ部切削 テーパは約 0.8° の角度を有し、最初の切込み 0.025 mm 、削り速度は $30 \sim 40 \text{ m/min}$ におさえた。最初は

第4図

響—前歴効果—を受け発振領域を適確につかみ難いので適当な間隔でみぞを切り前歴効果をみぞのところで消すようにした。しかしこれは切込みの大きい部分ではかえって切削を始めた瞬間に切削抵抗の衝撃的作用により自由振動を誘起して、前歴効果をともない好ましくなかったようである。次に結果の一例を示す。

第5図に示すものは送り 0.142 mm/rev のもので、切込み $0.079 \sim 0.770 \text{ mm}$ 間で発振、第8帯では初めのほうの 5.5 mm 、第9帯では同じく 1.5 mm の間だけが発振、また第8帯では1回転中の一部分だけが発振し残部では発振していない。これらのことはびびり振動の持続には前歴効果が大きく影響していることを示すものと思われる。1回転中の一部分だけが発振する原因としては、被削材にテーパを付けるために切削したときに、偏心はほとんど完全に除かれているはずであるから、振動実験のときに被削材の1回転中に切込みの変化があるとは考えられず、また後の実験でもオシログラムに記録した波形は、主軸1回転中に1回の消長のあるうなりを発生したことなどを考え合わせると、チャックなどに剛性の不均一性があるのではないことも想像されたので、剛性の方向性の有無を検討してみたが、この点は問題なく、結局これは前歴効果および主軸歯車の偏心、かみあい不良などによるものらしいことが判明した。

この実験は切削の進行とともに切込みが増大し、切削抵抗の増大をともない削り速度の低下を生じ、一定に保つことができなかったため、正確な発振領域を求めることは困難であった。

(c) 切りくず比一定の場合 一般の旋削では切りくず比 D/S は $2 \sim 5$ が採用されるので、切りくず比を $2 \sim 5$ の間で変化させ、被削材は取付軸を介してチャック—回転センタにて取付け、削り速度を段階的に変化させて実験を行なった。これは切りくずの形状が発振しやすいさにおよぼす影響を知るために行なったものである。切りくず比は近似的に 0.5 ずつ変化させ

第5図

た. この実験における振幅-削り速度曲線の例を第 6 図に示す. 図中 a_x は前後振動振幅, a_y は上下振動振幅を表わす. 振幅曲線およびオシログラムを見るとびびり振動には次の性質のあることがわかる.

(i) びびり振動の振幅は削り速度の変化に対してあまり変化せず小さいものと, ある削り速度で急に大きくなりさらに高速度で再び急に小さくなるもの, および共振に似た曲線を有するものに分けられる. 第 1 の場合は切込みの小さい場合が主で, 切込みが大きくなるにしたがって第 2 の形式になる. また切込みがある

(a)

(b)

第 6 図

範囲の大きさでは第 2 の形式に属し, その範囲より切込みが大きくても小さくても第 1 の形式に属するようになる. したがってびびり振動は切削条件によって弱い発振ともなれば強い発振ともなるようである.

(ii) 共振曲線に似た振幅曲線は多くは送りの大きい場合で, またとくに前後振動に多く現われている. かつこれら共振に似た現象を示す削り速度はほぼ一定で大部分は 60~70 m/min であり 80~100 m/min のものは一, 二例にすぎない. この振動系の固有振動数は上下方向 160 c/s, 前後方向 157 c/s に対し自励振動の振動数は 91~140 c/s で多くは 115 または 135 c/s 程度である. さらにまた振動数が削り速度の変化に対しても原点を通る直線上に並ばない点から判断すると共振とは考えられない点がある. しかし共振点に相当する削り速度がほぼ一定なことから, びびり振動の振幅曲線が共振曲線のような形状をもったのは, おそらく自励振動と主軸歯車のかみあい不良による影響が重なったためではないかと考えられたので, 主軸歯車の歯数を調べてみたところ 47 枚で, かみあいごとにかく乱があるとすると, 105~140 c/s を換算すると 57~76 m/min で, 80~100 m/min を逆に換算すると 153~192 c/s となる. したがって 100 m/min 近傍のもの以外は主軸歯車のかみあいによるかく乱のために共振を起したものと判断される. 100 m/min 近傍のものは主軸回転速度の約 32 倍の振動数を有する周期的かく乱によるものと思われ, これについては明白な原因はわからない. 上述のように共振と判断されたことは主軸歯車の影響が小さいと考えられる両センタ支持の場合には, ほとんど共振状曲線が得られていないことよりかなり確実に推測される.

この実験の結果を D/S の等しいものについて調べてみると, その間にはっきりした関係は見出されず, 次に述べるものと差異はないようである.

(iii) びびり振動の振動数は一定ではなく各サイクルで若干変化し, しかも上下振動と前後振動でも各サイクルでわずかな差がある. このことは被削材がだ円振動を行なっていて, そのだ円が空間に固定されず移動することを示し, またびびり振動がうなりを生じていることを示すもので前歴効果によるようである.

(d) 段階的に切込みを変えた場合 この実験は前記の実験との比較のために行なったもので, 被削材の取付方法は前記の場合と同じであって, また振幅曲線も第 6 図と同じ傾向を有するものが得られたが, この場合は実験の方法からみて前記の場合と変らないはずであるにもかかわらず, 振幅曲線の形状は前述の第 2 の場合に属するものが大部分で, 共振に似た現象を

示したものは全実験中上下, 前後振動を合わせて5例にすぎず, また同一切削条件でも水平振動に共振状曲線が現われても上下振動には見られないなど(水平振動に多く見られる), 共振と認めがたい点はあるが, やはりこれも前述のような理由から主軸歯車のかみあいにより発生する周期的かく乱によるものと判断すべきであろう。しかし一定の送りの実験について考えると, 本質的には D/S を変えた場合も切込み D を段階的に変えた場合も変らないはずで, 上述のように2種の実験で振幅-削り速度曲線に若干の差異が現われたのは, この種の実験の再現性の悪さに一つの原因があるものと思われる。

(e) 工具形状の影響 工具の形状がびびり振動の発生に大きな影響を有することはすでに経験されていることである。工具形状のうち削り角, 取付角, ノーズ半径, 逃げ角がびびり振動の発生に大きく関係し, とくにある程度小さい逃げ角は防振に効果がある⁽⁴⁾といわれているが, 著者はノーズ半径の大小は取付角の大小と同一効果を有するものと考え, また逃げ角は振幅の大小にのみ関係し, 発振しやすさにはあまり影響ないものと考えられたので, 他の実験の場合と同一とし取付角を 60° , 削り角を $75^\circ, 85^\circ, 90^\circ$ に変えて実験してみた。工具の形状は発振しやすさに大きく影響し取付角が大きくなると発振し難くなるが, 振幅は必ずしも小さくならず, かえって大きいものもある。他方被削面上のびびり跡もかなり見きわめにくかった。またこの振幅曲線は他の実験で得られたものと特別変わったところはない。このことはびびり振動の発生機構が工具の形状にはよらず, 切削機構そのものによることを示し, びびり振動現象を解析的に解明しうると考えられる実験的根拠である。送りの大きいときは振幅が小さいのに反し, 送りが小さいときは振幅が大きわめて大きくなることより, 送りが小さいときとくに前歴効果を大きく受け, しかも励振作用として働くことが多いものと思われる。

(f) 被削材を両センタで支持した場合 主軸の剛性, チャックおよび歯車などの影響を除いた状態でびびり振動の実験を行なうことはきわめて重要と考えられる。また被削材の剛性がびびり振動の発生におよぼす影響を知るためにも, 比較的剛性の弱い両センタ支持で実験を行なった。この振幅-削り速度曲線の例を第7図に示す。振幅は全般的にチャック-回転センタ支持系の場合より大きく実験を行なうことがきわめて困難であった。なおこの図には跳躍現象にともなう履歴性を調べた結果も示してある。これよりびびり振動は前述のように強い発振の特性を有することがわかる。

しかし切削条件によっては弱い発振となることもあることは図より認められる。また以上のことより正面削りにおいて中心より外に向かって削るときと, 外から中心に向かって削るときでは, 発振範囲があたかも違うように感ぜられ, 外より中心に向かって切削するほうが振動しやすいと判断されやすい理由もわかる。

(g) 切削抵抗の測定 前述の装置を用いて被削材の剛性を増して切削抵抗と切削条件との間の関係を求めた。ただし取付角, 削り角は一定のままで削り速度, 切込み, 送りのみを変えた。切削抵抗と削り速度 V との関係はほぼ近似的に $F = ae^{-bV} + c$ の形で表わされるようで, かつ a, b, c は切削条件により変化することである⁽⁵⁾が, 著者の場合は全実験より他の切削条件との間に何ら明確な関数関係が見出されなかったもので, 全実験より得られた平均値を用いること

第 7 図

にした。その結果主分力 F_1 、背分力 F_2 は次式のよう
に表わされた。

$$F_1 = 84 D^{0.98} S^{0.85} \left\{ \frac{12\alpha}{5\pi} + \frac{5\pi}{12\alpha} \left(\frac{\pi}{3} \right)^2 \right\} (1 + 0.488 e^{-0.00469V})$$

$$F_2 = 127 D^{0.94} S^{0.85} \left\{ \frac{12(\alpha - \pi/4)}{5\pi} + \frac{5\pi}{12(\alpha - \pi/4)} \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{4} \right)^2 \right\} (1 + 0.846 e^{-0.00472V})$$

D : 切込み mm, S : 送り mm/rev, α : 削り角 rad, V : 削り速度 m/min で表わす。削り角と F_1 , F_2 との間の関係は横山⁽⁶⁾の結果を引用してある。

4. その他の現象について

研究の目的にはあまり深い関係はないと考えられるが、興味あるいろいろの現象がみられたのでそれらについて述べる。

(a) びびり振動の発生と切りくず形状 工具すくい角の大小によって切りくず形状は変るが、低削り速度で切削するときはコイル状、円弧状、うず巻など

(a)

(b)

第 8 図

となるが、削り速度の増大とともに流れ形の切りくずに近づくが、この領域にはいるとびびり振動を発生するようになり、振動中は振幅により変るが特有のこの歯状の切りくずを生成する。さらに削り速度が増し振動が発生しなくなると、切りくずは流れ形または曲率半径の大きい円弧を有するピッチの大きいコイルとなる。しかし高い削り速度で切削するときも切りくずの裏側（バイトのすくい面に接した側）にはうろこ状の模様がつきここで切りくずに少し段がつく。このピッチは削り速度によって変化するが、だいたい削り速度の増大とともに増大する。したがって、このうろこ状のものは構成刃先の脱落片とみるべきであろう。

びびり振動が発生しているときの切りくずの一例を第 8 図に示す。これは切込み 1.0 mm, 送り 0.115 mm/rev, 両センタ支持の場合である。低速においては振幅が小さいため、切りくずはこの歯状にはなっているがほとんど完全につながっている。また切りくずを側面から見てもせん断面がはっきりしていない。第 8 図 (a), (b) は 80 m/min のもので振幅が大きかったため切りくずはつながってはいるが、おうとつはきわめて激しく切りくず側面にはせん断破壊時のせん断面と思われる筋を認めることができる。さらに高速になると切りくずはほとんど連結したままでは採取できない。この場合にも側面にはせん断破壊のしみがはっきりと認められ、せん断面がバイトすくい面に対して直角に近くせん断角は $20^\circ \sim 30^\circ$ くらいになっている。これに反し 80 m/min の場合はせん断面が被削材の内部へくいこむくらいである。これよりせん断角の小さくなる切削条件のとき振幅が大きくなると推測できよう。

切込み、送りがともに大きいときには、発振中の切りくずにはせん断面と誤認しやすいような筋がはっきりと切りくず側面に長手方向に走る。

一般に切りくずの厚さは切込みよりも大きくなる。これはせん断角が約 50° よりも小さいためであるが、振動中の切りくず厚さは必ずしも厚くならず、激しく振動するときは切りくず厚さが切込みよりも小さくなっていることもあるが、これはおそらく被削材の振動のためバイトすくい面に沿うて切りくずが流れず、ほぼせん断面に近い方向に押しだされているためと思われる。このことは振動中削り角が大きく変化することを意味する⁽¹⁾。

(b) びびり跡 びびり跡が特有のしま模様を示すことは衆知のことで、びびり振動の発生と他の振動の発生との区別に用いられる。びびり跡がしま模様になるのは、前回転におけるびびり跡に対して一定量だ

け位相の遅れたびり跡を生ずるからであるが、この位相遅れは決して最初に振動し始めた位置より被削材1回転後の位置において必ず存在するものとは考えられないことは確かであり、実際にも遅れてはいなかった。そのようすを第9図に示す。図からわかるように振動し始めてから1回転後のところでは、びり跡は前回転のものに比べて遅れてはいなくてむしろ若干進んでいる(ピッチ 0.9 mm に対し 0.2~0.3 mm だけ進んでいた)。しかしこのびり跡から3個めあたりより位相が遅れ始め、そのつぎからは後に切削した部分と同程度の位相遅れを生じ特有のしま模様を作り始める。したがってびり跡特有のしま模様は、前回転におけるびり跡と被削材の振動との干渉によるものと考えられる。

(c) 波形 被削材の振動波形が削り速度によってどのように変化するかを第10図に示す。これは切込み 1 mm, 送り 0.179 mm/rev, 削り角 75°, 取付角 45° の場合である。写真において上は水平前後振動, 下は上下振動を表わし、一番下にあるとつ(凸)部のある直線は主軸の回転マークである。低速では各サイクルの振幅に変化はあるが、高速の場合のようにはっきりしたうなり状の波形にならないが、高速になるにしたがってかなりはっきりしたうなりが認められ、波形も自励振動が主体と考えられるようになってきて低速の場合と異なってくる。このうなりは対称形を有するものはほとんどなく、また被削材に対する振幅極小の位置、数は大略は定まっているが時には変化する。また

上下振動と前後振動では振幅極小の位置が多くの場合若干の差がある。うなりの振幅極小の位置を各速度で比較すると主軸1回転につき1個のうなりを有する場合は大略回転マークの位置にあり——このことは他の研究者⁽⁷⁾の報告でも同様の性質が認められている——これは被削材を交換しても変わらないので、うなりを生ずる原因は旋盤主軸およびチャックの特性にもよるものと考えられる。しかし被削材-主軸系の総合剛性を測定してみたが、直角2方向に特別の差は全く認められなかったので剛性によるものではないようである。

このうなりの主原因については著者の実験では確かめられなかったが、加藤⁽⁸⁾の報告から判断するとおもに前歴効果にあるものと考えられる。

うなりは上述のほか次のような種類のものも現われた。これは切込みを階段的に変化した場合の切込みを 0.9~1.2 mm, 送り 0.028, 0.045 mm/rev; 両センタ支持の場合の送り 0.115, 0.179 mm/rev, 切込み 0.6~1.5 mm で切削中、被削材の1回転中に1回の消長を起すようなうなりとさらにきわめて消長の顕著なかつ周期の長い——主軸が約5~10回転するに要する時間——うなりを発生した。この現象は他の切削条件のときにはほとんど発生しなかった。このように二重のうなりを比較的小さい送りの場合に発生する理由ははっきりつかめていない。

(d) 振動数 びり振動の振動数は多くの場合削り速度に対してのこ歯状曲線的に変化する。この数例を第11図に示す。これはそれぞれ送り S , 切込み D が 0.115 mm/rev, $D/S=2.5$; 0.115 mm/rev, 1.225 mm; 0.277 mm/rev, $D/S=3.5$ のものである。このように振動数がのこ歯状に変化するのには前歴効果によることを理論的に説明することができる。

p を系の固有円振動数とすればびり振動の円振動

第 10 図

数は pA , 削り速度は $rp\lambda_0$ (r : 被削材半径) で与えられるから被削材 1 周上のびびり跡の数 i は

$$A/\lambda_0 = i + \psi$$

で与えられる。ここに ψ は非整数でびびり跡の位相差に相当する。これより

$$A = \lambda_0(i + \psi)$$

が得られる。 A が λ_0 の増加により 1 以下のある値まで増加すると i は 1 だけ減少して

$$A = \lambda_0(i - 1 + \psi)$$

となる。さらに λ_0 の増加により A が増加して 1 以下のある値に達すると () 内がさらに 1 だけ減少して

$$A = \lambda_0(i - 2 + \psi)$$

となる。以下同様のことを繰返す。ここで ψ はほぼ一定で振動持続エネルギーが最大になるような値をとる。実験的にもこれは成立する⁽⁹⁾ である。もし前歴効果がないときは ψ は全く任意の値となり各サイクルで変化することになる。そして上式に示した関係は成立せず振動数も λ_0 に対しのご歯状的に変化することはなくなるであろう。

(e) うなり 前述のうなりの原因については確定した決定的なものをあげることはできないが、主原因は前歴効果にあるようである。定常状態では振動 1 周期を平均すれば無減衰状態であるから、前歴効果はおそらく自由振動を誘起するであろうと考えられる。そこで自励振動と自由振動が共存すると考えてうなり

を論じてみよう。いまは簡単のために上下振動についてのみ考える。

上下方向の振動は上述の事実により次式で表わされるであろう。

$$\begin{aligned} \eta &= A \sin(A\tau + \psi_1) + B \sin(\tau + \psi_2) \\ &= \sqrt{A^2 + B^2 - 2AB \cos\{(A-1)\tau + \psi_1 - \psi_2\}} \\ &\quad \times \sin\left\{A\tau + \tan^{-1} \frac{A \sin\{(A-1)\tau + \psi_1 - \psi_2\}}{A + B \cos\{(A-1)\tau + \psi_1 - \psi_2\}}\right\} \end{aligned}$$

この式よりは $|A-B|$ と $A+B$ の間を円振動数 $|A-1|$ で変化する振幅を有し、振動数も周期的に変化する振動となることがわかる。振動数も変化することは実験においても認められたところであることおよび $A \approx 1$ であることから、びびり振動のうなりは上式によって説明されうものと考えられる。

5. 結 論

実験的解析の結果振幅、振動数などについてつぎのことがわかった。

(i) びびり振動は主として切込みにより弱い発振ともなれば強い発振ともなるような外力——切削抵抗——による自励振動である。

(ii) びびり振動は前歴効果がある場合にはきわめて多くの場合にうなりを生ずるようである。このうなりの振幅極小に対応する被削材表面の位置はほとんど一定であるが、振幅が大きくなると数が増加する(削り速度にも関係するようである)。

(iii) びびり振動の振動数はほとんどの場合に系の固有振動数よりも低く、かつ削り速度に対してのご歯状的に変化する。これは前歴効果による。

(iv) びびり跡および削り速度によりびびり振動の振動数が支配される。

(v) 切削中のせん断角はびびり振動に大きく影響するようで、せん断面が被削材に食込みみうような切削条件のとき振幅が大きくなるようである。

(vi) びびり振動の切削面上の跡の特有のしま模様は前歴効果によるもので、1 回転前のびびり跡との一定の位相差はびびり振動が最初に発生した位置より 1 回転後の位置では必ずしも現われないで数サイクル後によりやく一定値になる。

(vii) びびり振動のうなりは切削条件により 2 種類あって、その一つはほぼ主軸 1 回転につき 1 回の消長を示すもので、他は主軸の数回転につき 1 回の消長を示すものである。

文 献

- (1) 杉本, 本論文集, 713 ページ。
- (2) 杉本, 機械学会論文集, 26-169 (昭 53-9), 1209。

第 11 図

- (3) 星, 金属切削(昭 35), 63, 工業調査会; 中山, 機械と工具, 3-8 (昭 34-8), 12.
 (4) 土井, 工作機械の振動, (昭 29), 66, 誠文堂新光社.
 (5) R. Tourret, *Performance of Metal Cutting*, (1958), 23, 24, Butterworth Science Pub.
 (6) 横山・ほか, 精密機械, 22-11 (昭 31-11), 467.
 (7) E. Salje, *Trans. ASME*, 78 (1956), 737; S.A. Tobias & W. Fishwick, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 176 (1956), 232.
 (8) 加藤, *Memoirs Fac. Engng. Nagoya Univ.*, 10-2 (昭 33-11), 156.
 (9) 文献(4), 31ページ.

621.941-752:534.13.01

旋 削 に お け る 振 動*

(第3報, びびり振動の発生限界について)

杉 本 隆 尙**

Chatter Vibration in Turning

(3rd Report, On the Region with Chatter Vibration)

by Takanao SUGIMOTO

The 1st and the 2nd reports of this subject were concerned with the theoretical and the experimental study.

However, the present report is concerned with the experimental investigation of the stability chart which gives those cutting speeds at which chatter-free machining is ensured, and the comparison with the theoretical results. As a result, it may be established that the greater part of the causes of machine-tool chattering is the dynamical instability of the systems.

1. ま え が き

工作機械のびびり振動についての研究方法としてはいくつかの方法が考えられるが, 著者はびびり振動の発生範囲を理論的, 実験的に解析して求め, 両者を比較検討してびびり振動の原因を探究した. 本報では前に発表した理論的解析結果⁽¹⁾と実験的解析による不安定範囲を比較検討する.

2. 実験装置および実験方法

この実験に用いた旋盤(4 ft 旋盤), 被削材(0.18% C 炭素鋼), 工具(第4種高速度鋼), 測定装置(容量形変位計)などすべて前報⁽²⁾におけるものと同じである. 実験方法もほぼ前報と同様であるが, びびり振動の発生範囲を調べるためには主として被削面上のびびり跡の観察により, さらに補足としてオシログラフにより記録測定された振幅値によった. びびり振動の発生範囲を求めたものは前報⁽²⁾において述べた切りくず比一定で切削した場合, 段階的に切込みを変化させた場合, 工具形状変化の影響, 被削材を両センタで支持した場合の4種についてである.

3. 実験結果およびその考察

3-1 被削材をチャック-回転センタで支持し取付角45°, 削り角75°, 前切刃角20°, 前, 横逃げ角8°, ノーズ半径 0.3 mm の工具を用い切りくず比一定で切削した場合と, 段階的に切込みを変化した場合の2種の実験より得られた安定範囲に関する結果の数例を第1~4図に示す. 第1, 2図は縦軸に切込み D , 第3, 4図では縦軸に送り S をとり横軸はともに削り速度 V をとった. そしてそれぞれ送りまたは切込みを媒介変数とした. これらの実験においては削り速度をほぼ10 m/minごとに変え, 削り速度を変化させる間は刃物台の送りを止めておいたので, 切削面上には各削り速度で切削した部分が帯状に並んで明白に区別された.

したがってたとえば切込み D_1 , 送り S_1 で切削し30 m/min以上の削り速度で切削した切削面にびびり跡が認められ, 20 m/min以下の削り速度で切削した切削面にびびり跡がない場合には, 削り速度が20 m/minと30 m/minの間にびびり振動を発生する速度範囲と, 発生しない速度範囲の境界があるものと推定し, このことを示すために20 m/minと30 m/minの2点に点を記録しこれを線分で結んだ. また130 m/min

* 昭和36年4月5日 第38期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和36年10月12日.

** 正員, 千葉工業大学(習志野市谷津町7の1916).