(6) 電源電圧の影響は大容量のとき小さく, 小容量で大きい.

(7) 加工穴と電極との直径差は加工電流が大になれば加工電流によってほとんど影響されない.

文 献

(1) 鳳, 他, 電気三学会東京支部連合大会予稿, 昭 25-4, 昭 25-

11, 昭 26-5, 昭 26-11, 昭 27-11 など; 前田, 精密機械, 19, 8 (昭 28), 296 & 19, 9 (昭 28), 332; 福井, 科学研究所研究報告書, (昭 29), 60; 倉藤, 精密機械, 21, 10 (昭 30), 378 など; E.M. Williams, *Electrical Engineering*, 71, 3 (1952), 257; H.V. Harding & V.E. Matulaitis, *American Machinist*, 96, 5 (1952), 136; I. Weber, *Iron Age*, 169, (May 29, 1952) 88; G. Eizers, *Iron Age*, 169, (Mar 20, 1952), 103 など.

すべり軸受でささえられた旋盤主軸の回転変動について*

岩 本 貢**, 菊池初太郎**, 内 藤 俊 雄**

On the Fluctuation of Rotational Angular Velocity of the Main Spindle Supported in the Plane Bearings of a Lathe

by Mitugi IWAMOTO, Hatutaro KIKUCHI and Tosio NAITO

Various observations and considerations on the fluctuation of rotational angular velocity of the main spindle supported in the plane bearings of a common lathe were made by measurements with an optical system, with the following conclusions.

The fluctuation is caused by different factors in the high speed and the low speed regions. In the former, primary torsional resonance is caused by the natural torsional frequency of the main spindle and the driving system as a whole and the period of variation of rotational torque due to the teeth of spur gears driving the main spindle. In the latter, fluctuation of rotation takes place invariably from the insufficient exactitude of profile of the rotating part attached to the main spindle; further, the variation is erratic on account of small rotating moment. To control such variations, it is effective to increase the number of reducing stages from the main motor to the main spindle, but harmful for the smooth rotation of spindle under low speed.

1. 緒 言

旋削加工において, 旋盤主軸の回転変動が工作物の仕上精度ならびに工具の寿命におよぼす影響の一要素をなしていることは周知のとおりである. また工作機械の動的精度という観点からも, 主軸台の動的特性についてはいまだにめいりょうでないように思われる. 最近四尺旋盤の動的特性に関して井上氏の論文⁽¹⁾がある. これは四尺旋盤で実験の際の主軸回転数は6種類のみで, しかも回転変動についてはデータが無い. 我々は六尺旋盤と同程度の主軸台を有する四尺直流旋盤を用い, 主軸回転数をできる限り広範囲に連続的に変化させて, 切削加工を行わないで旋盤主軸の軸心について, 光学的測定法で実験を行った. 結果として軸心

の軸線に直角な面内における二次元運動と回転変動の2種類に大別できた. 二次元運動に関しては, 我々の測定方法では実験誤差が大となるように思われたので, これらのうち回転変動について, 主軸回転数との関係ならびにこれら変動の発生原因について報告する.

2. 実験装置ならびに実験方法

使用した旋盤は四尺の直流旋盤である. ただし主軸まわりは六尺普通旋盤とほぼ同じで, ベッドの長さのみ4尺, 動力は直流100Vの分巻電動機1馬力のものを使用した. この旋盤を暗室に入れて, 第1図のような光学系により主軸1回転中の光像の軌跡と基準光点をブロマイド感光紙上に記録させた. ここで光学系のレンズ, 光源は旋盤の振動の影響を避けるために天井よりつるしたわくに取付けた. カメラも機械より離れた台の上に設置した.

実験方法として, 上記旋盤の各公称主軸回転数(G), (23 rpm より 536 rpm までの8段変速)において,

* 昭和30年4月6日 第32期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和32年9月17日.

** 正員, 鉄道技術研究所(東京都港区芝海岸通1の1).

*** 准員, 鉄道技術研究所.

第 1 図

第 2 図

主電動機の回転数を電氣的に変化させて旋盤主軸の回転数を連続的に種々変化させた。これら回転数のおののについて主軸を空転させた場合と、主軸に取付いているチャックの側面より水平方向に 10 kg, 28 kg, 42.5 kg, 63.5 kg, 88.5 kg の 5 種類の圧力を加えた場合における主軸 1 回転中の軸心の運動現象を上記記録方法により記録した（以下水平方向に圧力を加えた場合を負荷運転と呼ぶ）。また同時にハスラー回転計により主軸の毎分回転数を測定した。

なお本実験は冬期より初夏にわたって行ったため、負荷運転の実験の際にも再確認の意味で空転実験をあわせ行った。以上のごとく撮影記録したプロマイド感光紙を毎回液温 20°C の新しい現像液で現像した。本実験に用いたプロマイド感光紙は上記現像液で現像条件を一定にして現像した場合、黒点の黒化度と露出時間との間に第 2 図に示すような特性を有していた。

記録された一例を第 3 図に示す。第 3 図(イ)(ロ)(ハ)のおののにおいて濃淡が現われているのが観察できる。このおののについて、濃い部分とすぐ隣の淡い部分の黒化度の差 (y_0) を山部式写真濃度計により測定した。この黒化度の差はプロマイド紙上における光像の軌跡の各点において、光像の移動速度の変化により感光時間が変化するために生ずるものである。この移動速度の変化は、なめらかな円弧の切線方向に生ずる場合と、しからざるものとに分類される。前者の場合は軌跡の円の半径が $l \times \tan 2\beta$ (l : 反射鏡より記録紙までの距離, β : 主軸の回転軸と反射鏡の軸心における法線とのなす角) に等しくなり、軸心は回転のみを行うことになるから、光像の円弧の切線方向の移動速度の変化はとりもなおさず回転角速度の変化により現われる。これに反し後者の場合は、軸心の軸線に直角な

第 3 図

面内における二次元運動により生ずる速度変動から現われるもので、今回の報告においては主として前者の回転変動によって現われたとみられる現象について述べる。すなわち黒化度の差は回転角速度の変化によって現われるということから、今軌跡上の濃い点における光像の移動速度 (V_β) を生ずる回転角速度を ω_β rad/s, この濃い点のすぐ隣にある淡い点における光像の移動速度 (V_α) を生ずる回転角速度を ω_α rad/s, 主軸回転数を n rpm, 平均回転角速度を ω_n rad/s とすると、回転角速度の変動率 (α) と y_0 との関係は次のようになる。

第 2 図の直線部分で上記の濃淡に相当する二点における黒化度ならびに露出時間を $y_\alpha, y_\beta; T_\alpha, T_\beta$ とする。

$$k = \frac{y_\beta - y_\alpha}{\log_{10} T_\beta - \log_{10} T_\alpha} \quad (1)$$

k : プロマイド紙の感光材, 現像液により変化する定数

$$V_\alpha = l \cdot \tan 2\beta \times \omega_\alpha \quad (2)$$

$$V_\beta = l \cdot \tan 2\beta \times \omega_\beta \quad (3)$$

$$T_\alpha = \frac{c}{V_\alpha} \quad (4)$$

$$T_\beta = \frac{c}{V_\beta} \quad (5)$$

c : 光像の進行方向における光像の幅と光度分布に関する定数

$$y_\beta - y_\alpha \equiv y_0 \quad (6)$$

各濃淡部における角速度の平均値が 1 回転の平均角速度に等しくなるため

$$(\omega_\alpha + \omega_\beta)/2 = \omega_n = \frac{2\pi n}{60} \quad \dots\dots\dots(7)$$

n : 毎分主軸回転数

(4), (5) 式を変形して (2), (3) 式および (7) 式を代入する.

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_\beta} + \frac{1}{T_\alpha} &= \frac{l \cdot \tan 2\beta}{c} \cdot (\omega_\beta + \omega_\alpha) \\ &= \frac{l \cdot \tan 2\beta}{c} \times \frac{4\pi n}{60} \quad \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

(1), (6), (8) 式より

$$\frac{1}{T_\beta} = \frac{l \cdot \tan 2\beta}{c} \times \frac{4\pi n}{60} \times \frac{1}{(1+10^{y_0/k})} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\frac{1}{T_\alpha} = \frac{l \cdot \tan 2\beta}{c} \times \frac{4\pi n}{60} \times \frac{10^{y_0/k}}{(1+10^{y_0/k})} \quad \dots\dots\dots(10)$$

(2), (3), (4), (5), (9), (10) 式より

$$\left. \begin{aligned} \omega_\beta &= \frac{1}{(1+10^{y_0/k})} \times \frac{4\pi n}{60} \\ \omega_\alpha &= \frac{10^{y_0/k}}{(1+10^{y_0/k})} \times \frac{4\pi n}{60} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここで $1+10^{y_0/k} \equiv B$ とする

$$\alpha \equiv \frac{\omega_\alpha - \omega_\beta}{\omega_n} = 2 \times \frac{10^{y_0/k} - 1}{1 + 10^{y_0/k}} = 2 - \frac{4}{B} \quad \dots\dots\dots(12)$$

実験資料より y_0 を測定して上記 (12) 式より α を求めた.

ここでこの実験の場合 $k=1.32$ であった. 第3図に一例として y_0, α の値を示した. 第4図に第3図の黒化の変化状態をわかりやすく示しておいた.

3. 実験結果ならびに考察

実験資料を整理した結果次のような現象が観察された. 第一に回転数の変化により光像の軌跡によってできる円の位置が定点に対し移動し, かつその円の平均直径が変化したり, 凹凸を生じたりしている場合がある. これらの諸現象は主軸の軸心が軸線に直角な面内

(条件は第3図に同じ)

第 4 図

で二次元運動をするために発生するものであるが, 上述のような測定方法では変化量が小さく, 測定誤差の影響が大なるため数量的に求め難いので, 別途の方法で実験を行うことにした. 第二にこれら現象の他に軌跡円の切線方向に第4図(イ), (ロ)のようなはん点が見られる. これは前述のように回転角速度変動によって生じるもので, 1はん点の濃淡部の黒化度の差を測定することにより, これを数量的にあらわすことができる. すなわち $G: 137, 214, 346, 536 \text{ rpm}$ の高速段領域では, ある回転数領域において第4図(イ)に見られるように1回転中 41 個の黒化の変動を示すただ1種類の回転変動を生じている. この数は主軸の駆動歯車の歯数に等しい.

これらについて α と n の関係を求めると第5図のような傾向を有している. 図中A, Bの記号と矢印は電動機の回転数を連続的に変化させた場合の主軸回転数の変化範囲であって, この回転数の範囲内において実験を行ったことを示す. また鎖線 X, Yは, 第1表に示す各駆動系における一次のねじり固有振動数に等しい周期を有する回転力変動が主軸に取付いている歯車により誘発されるものと考えた場合における主軸回転数を示す. すなわち鎖線 X は主軸のねじり固有振動数(両端自由)について求めた場合, 鎖線 Y は駆動系全体のねじり固有振動数について求めた場合である. これらによると, 200 rpm 付近においては主軸の毎秒回転数と主軸駆動歯車の歯数 (z) との積が, 駆動系全体の一次のねじり固有振動数にほとんど一致した点において変動率 (α) の最大を生じており, また 1 000 rpm 付近においては $n \cdot z/60$ が主軸のみのねじり固有振動数に一致した点で最大の変動率が現われている. 一般に平歯車により動力を伝達する際には, 動力伝達トルクが軸の1回転に歯車の歯数だけ変動を生ずることが知られている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾. それゆえ $n \cdot z/60$ なる周波数を有する回転力変動と駆動系, あるいは主軸の固有振動数との間で一次共振を生ずるためにこのように大きな回転変動を生ずるものと解される. また共振振幅の大きさは G の値によって異なる. これは振

第 5 図

動系内の制振力がおおのの場合によって異なるためであるが、更に実験結果から考察した。駆動系内で歯車による速度変換の回数が多くなると歯車のかみあいにおけるがたと歯面上の油膜等の部分が系全体を通じて多くなる。このために振動振幅に比して振動系の非線形量が多くなり、制振力が見掛上大きくなったと同様の効果を現わすものである⁽⁵⁾⁽⁶⁾。そのため G が 214 rpm の時の $\alpha_{\max}$ の値が他の公称回転数のときより大きくなっているものと考えられる。

更にこれら回転変動の性質を調べるため負荷運転を行った。 $G=214$ rpm では第 6 図に見られるように押付圧力 (F) が 10 kg では $F=0$ の時より $\alpha_{\max}$ の

値が小さく、 $F=28.5$ kg 以上になるといずれの場合にも $F=0$ の時より $\alpha_{\max}$ の値が大きくなっている。しかし $F=88.5$ kg では 63.5 kg の時より逆に小さくなっている。すなわち 10 kg くらいまでは負荷を加えることにより見掛上の制振力が大きくなり回転変動を抑制するように働き、20 kg くらい以上になると逆にこの見掛上の制振力が小さくなり変動率が大きくなる。更に負荷を大にしてゆくと回転摩擦抵抗力、主軸のたわみ、歯車のかみあい状態等の諸因子により主軸のチャック側における回転角速度の変動率は降下するものと考えられる。以上のような現象は他の G の値においても同じように現われている。

$G: 23, 35, 57, 90$ rpm の低速領域における回転変動は高速領域の場合とは全然趣を異にしていて、第 2 表に示すように数種類かの回転変動を発生している。すなわち回転数全般にわたって 1 回転中のところどころに不定の変動を発生している。その他に特定の回転数またはある回転数範囲内では主軸 1 回転中の大部分に主軸駆動歯車の歯数 (84) に等しい変動を発生する場合、またはこれの半分に近い 42 個/回転 くらいの変動を発生する場合、または 60 個/回転 か 30 個/回転 くらいの変動を発生する場合がある。なおこれらの回転変動の特性について第 2 表に要約して表示しておいた。また以上のような規則性のある変動の空転の際における α と n の関係を第 7 図に示す。図中 A, B の記号と矢印の意味は第 5 図の A, B の記号、矢印と同じである。全体として主軸の回転速度が低速なるゆえ回転慣性小さく、かつ主軸の軸心の軸線に直角な面内で二次元運動をすることも高速に比して変化が激しいので回転変動の発生状態も非常に不安定である。中でも割合安定で最もよく発生していると思われる 42 個/回転 の変動は駆動歯車の摩耗あるいは工作誤差による歯厚の不同、減速率の大きいこと、回転数が低いということから発生する回転力変動により生ずるものとみなすことができる。

すなわち同時かみあい歯数が第 1 表に示すように、この場合 2 以上の値であるところへ駆動歯車 (歯数 84 枚) の歯厚を測定検査してみると、連続 3 枚に 1 枚く

第 1 表

G	歯車かみあい機構 (数字は歯数を示す)	最終段におけるかみあい歯車の同時かみあい歯数	系全体の1次の固有振動数 C/s	主軸のみの固有振動数 C/s
23		2 05 49	222	66.7
35		"	219	"
57		"	198	"
90		"	191	"
137		1 68 98	149	"
214		"	136	"
346		"	118	"
536		"	90	"

第 6 図

第 7 図

第 2 表

	G	発 生 回 転 数 (rpm)				備 考
		23	35	57	90	
回 転 範 囲 (rpm)		20~45	26~70	38~113	50~176	
回 転 変 動 種 類	42個/回転	20~40	26	な し	100~176	負荷をあたえるとよく現われる。
	84個/回転	45	43	50	50	負荷をあたえると現われない。
	60, 30 個/回転	な し	な し	70~113	な し	負荷をあたえると現われない。
	不 定	20~45	26~70	38~113	50~100	負荷をあたえると変動率が減じる。 または現われない場合もある。

らい $0.02 \sim 0.04$ mm の歯厚不同を生じていた。これを 84 枚の歯について順次 3 枚ずつ常に 1 枚だけ重複して取っていくと 42 個のグループができる。この各グループの中には必ず 1 枚歯厚不同の歯があった。それゆえこれによって伝達トルクに顕著な変動を生じ、回転変動を発生したものと考えられる。G: 90 rpm において回転数 100 rpm 以上で回転慣性が割に大きいと考えられるにもかかわらず 42 個/回転 くらいの変動が発生している。これは低回転数の時に比し変動が 1 回転中に一部分しか現われていなくて、かつ α も割に小さく現われている。これらのことからして、これはあるかみあい状態で ($n \cdot z$) の周波数を有する かく乱力が駆動系のねじり固有振動数に接近して一次振動を発生するが、上記のごとき歯厚の不同のために 42 個/回転 くらいの変動を生じて、振動エネルギーがこれに消費され現象が継続しないものと考えられる。もちろん系全体の見掛け上の制振力は高速段の場合より大きい。

次に 84 個/回転 の変動の発生原因は中間軸において系全体のねじり 固有振動数に近い 周波数をもつ かく乱力 (たとえば G=57 rpm で 50 rpm の時は、 $50 \times \frac{84}{22} \times \frac{58}{60} = 184$ c/s の変動力を発生している。しかしして系全体のねじり固有振動数は 198 c/s である。) が働き、そのため瞬時的に共振現象を起し、これによる振動エネルギーのために主軸の駆動歯車とこれにかみあうピニオンの歯との間に遅速運動を生じ、この運動を繰返すために主軸駆動歯車の歯数に等しい数の回転変動を発生するためと考えられる。なおこれは夏季より冬期の方が現われやすい点から、油の粘性が小さくなると歯間の見掛け上のがた量が大きくなり、同一発生振幅に対して見掛け上の制振力が大となり、このために現われにくくなるものと考えられる。

それから 60 個/回転、または 30 個/回転 の変動は 42 個/回転 に属するものか、あるいは不定のものに属するか判然としないが、第 2 表に示してあるようにこれは非常に不安定で、かつ負荷を加えると現われない点からむしろこれは不定の中の現われない部類に属するものと考えられる。これらの発生原因としては、主軸がすべり軸受でささえられて回転数が低いために

軸受内で軸が一種の旋回運動に似た運動、または円滑でない回転運動を起すためと考えられる。それゆえに低速になればなるほど、また各可動部分の工作精度 (主としてプロフィールの精度) が悪いほど現われやすいようである。

4. 結 論

旋盤は実際には切削という負荷をあたえた状態における現象を問題にすべきものであるから、ここでは負荷を加えたために現象が現われなくなる種類の回転変動については言及しないことにして、負荷を与えて変動が消滅しないものとまた逆に変動が激しく現われるものを対象にして結論を述べる。

1) すべり軸受でささえられ歯車で駆動される旋盤主軸の回転変動は、高速度領域と低速度領域とによって発生原因が異なる。

2) 低速回転の場合には歯車、軸および軸受など回転部分の工作精度がよくなければ必ず第 2 表に示した回転変動のいずれかを発生する。またすべり軸受で回転慣性が小さいために発生する不定の変動がある。

3) 高速回転領域では、主軸台内における駆動系の動的剛性と歯車の歯による回転力変動の周期との関係からねじり振動の一次共振を起すような状態がある。

4) 更に高速回転 (1000 rpm) になると主軸のチャックと駆動歯車との間における動的剛性と ($n \cdot z$) とによってねじり振動の一次共振を発生する回転域がある。

5) これら変動の発生は必ず主軸駆動の歯車の歯数に直接関係がある。

6) 主電動機より主軸までの減速段数が多くなると、ねじりによる一次振動に対して制振力という点ではよい効果を有するが、低速の場合軸の円滑な回転という点では悪い結果をもたらす。

以上現在使用状態にあるかかる旋盤の動的特性の一つとして主軸の回転変動について述べてきたが、なおこの他の見失われた動的特性があるものと考えられるが、これらは今後の実験研究にまつほかはないと思う。

終りにのぞみ本研究遂行上種々御指導御鞭撻をいただきました当所機械工作研究室伊藤室長に厚く御礼を

申し上げます。またいろいろ御助力してくださいました同室の方々に厚く謝意を述べる次第である。

文 献

(1) 井下友一, 精密機械, 23, 3(昭 32).

- (2) 小野盛正, 機械学会誌, 35, 182(昭 7), 624.
 (3) 関口八重吉, 佐々木重雄, 機械学会誌, 37, 209(昭 9), 614.
 (4) 和田稻苗, 機械学会論文集, 20, 90(昭 29), 82.
 (5) 西野吉次, 岩本貢, 応用力学, 4, 24(昭 26), 81.
 (6) 渡辺 茂, 機械学会論文集, 20, 91, 94(昭 29), 222, 402.

研削 といしの現況と問題点

通産省では機械工業審議会工具部会において研削といしの合理化基本計画を検討しているが, 研削砥石工業会では, このほどその参考資料として業界の現況と問題点についてとりまとめた。

この要旨は

(1) 生産は戦時の最高量の 65% であって, 完全に回復したといえないが, 精度の高い WA といしの生産が多くなっている。

(2) 輸出は漸次増大の傾向をたどっている。

(3) 工場設備は旧態そのもので, 大幅に改善する必要があるとのべている。

つぎに各項の概要を掲げる。

1. 生産 29 年は総計 27 億 7 373 万円であるが, この内訳は (1) ビトリファイド法 = A 12 億 6 984 万円, WA 4 億 4 535 万円, C 4 億 8 797 万円, GC 3 億 4 827 万円。

(2) エラスチック法 = ゴム系 1 億 2 070 万円, 樹脂系 1 億 159 万円。

30 年は総計 29 億 3 407 万円で, この内訳は

(1) ビトリファイド法 = A 13 億 6 286 万円, WA 4 億 5 327 万円, C 4 億 9 957 万円, GC 3 億 5 558 万円。

(2) エラスチック法 = ゴム系 1 億 3 312 万円, 樹脂系 1 億 4 765 万円。

31 年は総計 46 億 6 012 万円でこの内訳は

(1) ビトリファイド法 = A 21 億 69 万円, WA 7 億 9 623 万円, C 5 億 9 623 万円, GC 5 億 9 398 万円。

(2) エラスチック法 = ゴム系 2 億 3 921 万円, 樹脂系 4 億 1 549 万円。

このように生産量は堅実に漸増しているが, 31 年の 1 万 4 854 t は戦時中の 2 万 2 863 t に比べると 65% であり, いまだ相当の開きがある。

昭和 31 年の生産量を製造別にみると, ビトリファイド法が全体の 89%, 樹脂法が 6%, ゴム法が 5% であるが, 最近の増加率をみると樹脂法とゴム法が高く, とくに樹脂法の増加が著しい。

また, ビトリファイド法といしのなかでは精密研摩に使用される WA といしの生産が最も増加している。

2. 輸出と輸入 輸出先は主として台湾, フィリピン, 琉球, シンガポールなどの東南ア諸国である。

30 年には合計 202 t, 31 年には 344 t であった。戦前の年間最高輸出量は約 1 760 t であったが, 戦争のため中絶, 最近になって再びわずかながら輸出市場が回復しはじめた。

輸入は 30 年に 42 t, 32 年に 24 t であって漸次減少の傾向にあるが, このほか機械の輸入の時に約同量程度輸入されている。

しかし輸入されている研削といしは, 輸入機械の付属品としてはいってくるものを除いては, 研削加工技術の改良による新しい型の といし がきわめて特殊の用途に使われるため, 国内需要が少く換算のあわぬもの, または国産品と比較するため輸入しているものが多い。

輸入先は研削といしの先進国であるアメリカがほとんどで, 西ドイツ, スイス, イギリス, スエーデンの諸国からもわずかはっている。

3. 問題点 といしの価格はアメリカより, わが国の方が割安であるが, ヨーロッパものと比べると小形のものは安い, 大形になると逆に割高となり, 将来を考えると 10% 安くする必要がある。

10% 引下げでは中形以下のものは, 国際価格なみが割安となるが, 大形のものはなお, 割高であるので, 今後の生産技術の改良などが大きな課題である。

また主要原料である研削材は大メーカーによって生産されており, ほとんど技術的に満足できるが, 特殊のと粒は得がたく, また価格も国際価格に比べると若干高価にみられる。

これは需要が少ないなどのためであるが, 進んで新品種の研究が必要である。

これについては といし業者と原材料の業者が協力して品質の向上, 価格の引下げに努力する必要があるし共同購入についても研究する余地が残されている。

設備についても設備の更新はもちろんのこと, プレスの投入が必要である。

現在プレス法による生産量は全生産量の約 20% 程度であるが, 加圧力が自由でしかも常に一定してえられること, 寸法押えが容易であること, などから全生産量の 70% をプレス法におきかえることが必要である。(服部敏夫)