振動ラッピングの研究 (第1報)*

— 加工速度と最適振幅比 —

西村 源六郎** 横山 恭男***

Vibration Lapping (1st Report)

— Machining Speed and Optimum Amplitude Ratio —

Genrokuro NISHIMURA, Yasuo YOKOYAMA

A fine mechanical machining treated in this paper may be called by the name of Vibration Lapping, those tool vibrates tangentially along the work operating like the ordinary lapping machining.

In the present report, is related the experimental apparatus and some experimental and theoretical results on the machining speed of the Vibration Lapping for glass.

The main results are as follows :

1) The machining speed of the Vibration Lapping for glass is proportional to about $\bar{v}^{1.5}$ with respect to the mean velocity of the tool $\bar{v}$ (machining amplitude $a \times$ frequency $f \times 4$).

2) Similarly, it is proportional to about $p^{1.2}$ with respect to the lapping pressure p , but when the lapping pressure exceeds the limit lapping pressure p_l it becomes to show the saturating tendency and has no relation to the lapping pressure.

3) The relation between the lapping pressure p and the amplitude ratio r is expressed by

$$p = \frac{\pi F_0}{4\mu S} \sqrt{1-r^2}.$$

4) Assumed the machining speed W is expressed in the form $W = K p^\alpha a^\beta$, the optimum amplitude ratio r_0 is theoretically given by

$$r_0 = \sqrt{\frac{\beta}{\alpha + \beta}} \div 0.75,$$

and it is also confirmed to have a good agreement with the experimental result.

Then the optimum lapping pressure p_0 is given by

$$p_0 = \frac{\pi F_0}{4\mu S} \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha + \beta}}.$$

5) In the case that the lapping pressure is extremely high, the machining speed takes the maximum, when $p_l > p_0$, at the optimum amplitude ratio r_0 and, when $p_l < p_0$, at the amplitude ratio corresponding to the limit lapping pressure p_l .

1. 緒 言

一般のラッピングにおいては、加工量はラッピング距離に比例する。ラップ工具と被加工物の相対運動は回転運動を基本として、それに往復運動ないしは超低周波振動を重畳させたものが多い。しかしながら径の小さい円筒内面や非円形孔の内面のラッピング仕上をその一例とするように、平面や円筒外周の場合のように簡単にラッ

ピング距離を増大させることができない場合がある。このようにラップ工具の移動範囲が小さいとき、ラッピングの加工速度を増大させる手段としてラップ工具をある程度高い振動数で振動させることが考えられる。

たとえばこのような目的のために、ラップ工具と被加工物相互間に適当な振動を加えてラッピング加工を行なう加工法のことを振動ラッピングということとする。

この定義からわかるように、振動加工¹⁻³⁾との相違点は被加工物に対するラップ工具の運動にあり、振動加工においては、加工送り力は工具の運動方向と同一直線上にあって、工具は被加工物に対して法線方向の速度をも

* 昭和38年4月精機学会春季大会学術講演会にて発表

** 名誉会員 中央大学理工学部

*** 正会員 金沢大学工学部

って衝撃的に作用するのに反し、振動ラッピングにおいてはラップ工具の運動方向に対して法線方向の荷重が静的に与えられ、ラップ工具は被加工物に対して接線方向に振動する。このため、工具や砥粒の作動に関して差が生じ、振動加工の加工機構としては砥粒を加工の媒体として工具のハンマリング作用がそのおもなものであり、普通のラッピングにおいては、砥粒の平行運動、回転運動によるひっかき、ほり起こし作用がそのおもなものであったのに対し、振動ラッピングではその両者の複合した作用が期待できるものである。

この研究では、振動加工との対比の関係上、まず硬い材料、主としてガラス、を被加工物とした。硬い材料の加工機構が破碎現象の累積であるならば、前述の 2 種類の加工作用は相関連して作用し、結果として複合した特性を示すはずである。

また普通の金属のような材料の振動ラッピングに際しては破碎現象は生じないから、ハンマリング作用の効果はあまりみられず、普通のラッピングと同様な加工特性を示すことが推測されるが、これについては加工面の特性とともに別報にゆずる。

これらをまとめれば振動ラッピングの効果として次のようなものがあげられる。

- 1) ラップ工具の移動範囲が制限される場合、単位時間当りラッピング距離を増大させるのに有効である。
- 2) ラップ工具の移動範囲が自由な場合でも、振動を重畳させることによって、いっそうラッピング距離を増大させる効果がある。
- 3) 砥粒の循環をたすけ、砥粒の偏在を妨げ、チップの排除を促進する。
- 4) 硬い材料のような材料に対しては、ハンマリング作用の効果が加わり能率がよくなる。

この研究はこのような考えに基づき、主として振動の効果に着目して振動ラッピングの加工特性について実験考察を行なった。第 1 報においてはガラスに対する振動ラッピングの加工速度について述べ、さらに加工精度、金属に対する加工特性などについて続報する予定である。

2. 実験の方法

2.1 実験装置

振動ラッピングの実験に用いた装置の略図を図 1 に示す。振動子は電磁形の自製のものであって、電磁石、振動板、工具保持部などによって構成されている。これを励振する発振器および増幅器は市販の低周波用で公称最

図 1 振動ラッピング実験装置略図

表 1 板ばね寸法

振動板番号	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
板 幅 (mm)	15	30	30	30	30
板 厚 (mm)	0.5	0.5	0.8	1.0	1.2
共振振動数 (c/s)	80	100	220	280	350

大出力 50W のものである。

振動板に用いた板ばねは表 1 のような寸法と固有振動数（使用状態において）をもったもので、ばね部の有効長さ 75mm の燐青銅板を 4 枚用いて 2 組の両端固定平行板ばねを構成し、支持台の下側にねじで固定してある。振動板は必要に応じて交換し、実験振動数によって最大振幅を得るように選ぶ。

工具保持部はピンバイスを使用し、ラップ工具は任意に交換することができる。

ラップ圧力を与える装置は、V みぞと鋼球による直線案内と重錘による荷重装置よりなり、この案内上をすべる移動テーブルに対する摩擦力は 10g 以下であった。

被加工物のガラス試片は移動テーブル上にアクリル樹脂製の試料押えによってねじで固定されている。

2.2 実験条件の決定

2.2.1 ラップ工具の寸法

ラップ工具は燐青銅板をある幅に切断したものを長さ 15mm に切断し、2mmφ のピアノ線にハンダ付けして用いた。ラップ工具材質は、工作の便宜上燐青銅を用いたが、実用上はさらに耐摩耗性のよい材料が望ましく、この場合の工具の摩耗は加工量に対して約 5% 程度であった。ラップ工具の幅は図 2 の実験の結果加工速度に影響が少ないことを確かめ、5mm を選び、特に大きいラップ圧力を要するときのみ、さらに幅を小さくした。ラップ工具の幅を 5mm とすれば、ガラス試料の加工幅が

工具振動数: 100c/s, 工具加工振幅: 0.5mm, 砥粒: #280C, 濃度: 80%

図2 工具幅の影響

図3

工具寸法形状

5mm であって加工面積は 25mm² となる。図3はラップ工具の寸法を示す。ラップ工具はピンバイスに正しく取り付け工具の表面がガラスの端面に平行に当たるようにする。実験はまず予備加工を行ない、試料とラップ工具との接触が完全になったのち測定を開始する。工具の振幅は顕微鏡によって直接測定した。

2.2.2 砥粒とその供給方法

ラッピングにおいては砥粒の種類による影響が大きい。本研究の性質上砥粒自体の性質は振動ラッピングの効果に関して関係が少ないように考えられるので、砥粒の種類による影響は後にゆずることとした。実験には粒度 #280~#2000 の C 砥粒を用いた。

砥粒の供給方法はいわゆるどぶ漬による連続供給とし、その濃度(重量比)も図4による実験によって、この範囲の濃度であれば、加工部に入る砥粒の濃度に、したがって加工速度にも影響が少ないことがわかったので、比較的供給の容易である 80% の濃度を採用した。工具先端の供給状況を図5に示す。

2.2.3 加工時間と加工速度

加工速度は単位時間当りの加工深さで表わしている

加工面積: 25mm², 工具振動数: 100c/s, 工具加工振幅: 0.5mm, 砥粒: #280C

図4 砥粒濃度の影響

加工面積: 15mm², ラップ圧力: 1.6kg/cm², 工具振動数: 260c/s, 工具加工振幅: 0.75mm, 砥粒: #800C

図6 加工時間と加工深さ

図5 工具先端の状況

が、加工時間によって加工速度が変わらないことを図6のように確かめ、実験に用いる加工時間としては1分間を採用した。

いま加工速度を W とすると、

$$W = \frac{D}{t} \quad (1)$$

ここで

W : 加工速度 (mm/min)

D : 加工深さ (mm)

t : 加工時間 (min)

普通のラッピングの加工速度の表示に用いられている単位ラップ移動距離当りの加工量 M に換算するには次の式による。

$$M = \frac{10^4 \gamma W}{24 \cdot a f} \quad (2)$$

ここで

M : 単位面積当り、単位ラップ移動距離当り加工量 (mg/cm²・m), γ : 密度 (g/cm³), a : 工具加工振幅 (mm), f : 工具振動数 (c/s)

表2に本研究における標準実験条件をあげてある。以下の実験はこの標準条件のうち一つだけを変化させてそ

表 2 振動ラッピングの標準実験条件

加工時間	1 min
加工面積	25 mm ² (5mm×5mm)
工具加工振幅	0.5 mm
ラップ圧力	1 kg/cm ²
工具振動数	100 c/s
砥粒粒度種類	#280 C
砥粒濃度	80 % (重量比)
砥粒供給	連続
被加工物	ソーダガラス

の影響を調べたものである。

3. 振動ラッピングの加工速度

3.1 加工速度におよぼす工具加工振幅の影響

図 7 は加工速度 W におよぼす工具加工振幅 a の影響を示す。これらの実験結果から近似的に次の関係が知られる。

$$W \propto a^{1.5} \quad (3)$$

同様に加工振幅 a をパラメータとして振動数 f について表わしてみると図 8 のようになる。この図から

$$W \propto f^{1.5} \quad (4)$$

であることがわかる。

式 (3), (4) から

$$W \propto (af)^{1.5} \quad (5)$$

が得られ、工具の加工中の平均速度を $\bar{v}$ とすれば、

$$\bar{v} = 4af \quad (6)$$

であるから、結局、

$$W \propto \bar{v}^{1.5} \quad (7)$$

の関係があることがわかる。図 9 は加工中の工具平均速度 $\bar{v}$ に対してプロットした図であって、この図からも加工速度 W は加工中の工具平均速度 $\bar{v}^{1.5}$ に比例することがわかる。

このことは緒論に述べた振動ラッピングの特徴を示す一例であって、次のように説明することができよう。すなわち、普通のラッピングと同じ加工作用によるとすれば、加工速度は単位時間当りラップ移動距離に比例するから結局 $\bar{v}$ に比例する。しかしながら振動ラッピングにおいてはラップ工具はかなり大きな速度で振動しており、また砥粒が実際には球ではなく不規則な凸凹を多数もったいわゆる金平糖状であることなどのため、ラップ工具におさえられて回転するとき、その突起が被加工物に衝突し、振動加工と同様なハンマリング作用によって加工を行なうことも考えられる。この作用による加工は $\bar{v}^2$ に比例して行なわれる。これらの二種の加工作用は、一個の砥粒について同時には行なわれないが、互いに原因結果として影響するものであって、これらの総合的效果として相乗平均をもって表わされると考えれば、結局 $\bar{v}^{1.5}$ に比例することとなり、実験結果を説明することができよう。

3.2 加工速度におよぼすラップ圧力の影響

図 10 はラップ圧力の影響を示す実験結果であって、それぞれ粒度と振動数が異なる場合について示してある。これによると加工速度はラップ圧力の約 1.2 乗に比例していることがわかる。もし砥粒の作動形状が球であ

ラップ圧力: 1kg/cm²
砥粒: #280 C

図 7 工具・加工振幅と加工速度

ラップ圧力: 1kg/cm²
砥粒: #280 C

図 8 振動数と加工速度

ラップ圧力: 1kg/cm²
砥粒: #280 C

図 9 工具平均速度と加工速度

るとすれば加工速度は圧力の 1.5 乗に比例するはずである。また鋭いコーン状であると仮定すれば圧力の 1 乗に比例すると考えてよいであろう⁴⁾⁵⁾。実験結果がこの中間の値である約 1.2 乗を示していることは、砥粒全体は平均的に球状ではあるが局部的には微細な突起をもっており、いわゆる金平糖状であることを意味している。

また図 11 は砥粒粒度が細かくラップ圧力が比較的大きい場合の加工速度に対するラップ圧力の影響をプロットしたものであり、ラップ圧力が 0~4kg/cm² の範囲ではほぼ 1.2 乗に比例しているが、ラップ圧力が 4kg/cm² を越えると、もはや加工速度は増大せず飽和状態を示すことがわかる。これに類似した事実は普通のラッピングでもすでに観測されいろいろな説明が行なわれている⁶⁻⁸⁾。しかしここでは振動加工の場合における限界衝突速度⁹⁾と同じ考え方によって説明することにする。すなわちこの圧力はラップと被加工物とが等価的に直接接するにいたるようなラップ圧力であって、これ以上圧力

を増大させても砥粒の作動効果は変化しないような状態である。このようなラップ圧力 p_l を限界ラップ圧力ということにすれば、加工速度 W は次のように表わすことができる。

$$W \propto p^\alpha, \quad \left. \begin{array}{l} p \leq p_l \text{ のとき } \alpha = \alpha \\ p \geq p_l \text{ のとき } \alpha = 0 \end{array} \right\} \quad (8)$$

限界ラップ圧力付近の現象をさらに詳細に観察すれば、加工速度はいったん極大値を示したのちわずかながら減少する傾向を示している。これは普通のラッピングにおける場合とよく似た現象であって、砥粒の破砕による粒度の変化や作動砥粒数の変化などを考えて説明されなければならない。しかし本報の範囲では一応加工速度は限界ラップ圧力 p_l において飽和するという簡単な形でこれを認めるにとどめ、さらに考察を続けたいと思う。

4. 工具加工振幅とラップ圧力の関係

4.1 工具運動の解析

振動ラッピングにおける工具の振動系を図 12 のような模型によって考えるとすれば工具の運動は

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \lambda \frac{dx}{dt} + kx \pm R = F_0 \sin \omega t \quad (9)$$

で表わされる。ここで

m : 振動工具の等価質量, λ : 流体摩擦の係数,
 k : ばね定数, R : 固体摩擦力, F_0 : 励振力の振幅,
 $\omega = 2\pi f$: 励振力の角速度, f : 振動数, x : 変位,
 t : 時間

固体摩擦力 R は運動の方向に逆に作用する力であって速度の正負によってその符号を変えるから、一般にはこの運動方程式は非線形となり解析的に解くことが困難である。しかしながら近似的に固体摩擦力 R を同じエネルギーを消費する等価流体摩擦と置き換えて考える⁹⁾ ことによって工具の振幅変化を考察することができる。いま固体摩擦力 R が振動の一周期の間に消費するエネルギーを E_1 , 工具の加工振幅を a とすれば,

$$E_1 = 4aR \quad (10)$$

また等価流体摩擦力を $\lambda' \dot{x}$ とおいてこれが一周期の間に消費するエネルギー E_2 を求めれば、振動が正弦的であるから

図 12 工具振動系模型図

図 10 ラップ圧力と加工速度

振動数: 100c/s, 加工振幅: 0.5mm
 加工面積: 5mm², 砥粒: #1500C

図 11 ラップ圧力と加工速度
 (ラップ圧力大なるとき)

$$\begin{aligned}
 E_2 &= \oint \lambda' \frac{dx}{dt} dx \\
 &= \lambda' a^2 \omega^2 \int_0^{2\pi} \cos^2 \omega t dt \\
 &= \lambda' \pi a^2 \omega
 \end{aligned} \quad (11)$$

となり、 $E_1 = E_2$ として λ' を求めれば

$$\lambda' = \frac{4R}{\pi a \omega} \quad (12)$$

となる。結局この振動系の等価流体摩擦の係数は $\lambda + \lambda'$ となるが、この場合 $\lambda \ll \lambda'$ であるから $\lambda + \lambda' \doteq \lambda'$ として考えることにすれば、式 (9) は次式と置き換えることができる。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{4R}{\pi a \omega} \cdot \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (13)$$

これを解いて工具の加工振幅 a は、

$$a = \frac{x_{st}}{\sqrt{(1-z^2)^2 + \left(\frac{4R}{\pi m n^2 a}\right)^2}} \quad (14)$$

ここで

$$z = \frac{\omega}{n} \doteq 1, \quad x_{st} = \frac{F_0}{mn^2} = \frac{F_0}{k}, \quad n^2 = \frac{k}{m}$$

a について整理すれば次式を得る。

$$a = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{4R}{\pi F_0}\right)^2}}{1 - z^2} x_{st} \quad (15)$$

いまラップ圧力を p 、工具接触面積を S とすれば、

$$R = \mu p S \quad (16)$$

となる。ここで μ は加工面の等価摩擦係数である。

加工を行っていないとき、すなわち $p=0$ のときの工具振幅を x_f とすれば

$$x_f = \frac{x_{st}}{1 - z^2} \quad (17)$$

加工中の工具振幅 a と加工していないときの工具自由振幅との比を振幅比 r とすれば

$$r = \frac{a}{x_f} = \sqrt{1 - \left(\frac{4\mu p S}{\pi F_0}\right)^2} \quad (18)$$

または

$$p = \frac{\pi F_0}{4\mu S} \cdot \sqrt{1 - r^2} \quad (19)$$

を得る。これらの式の形は振動加工の場合と類似していることがわかる¹⁾。

$z=1$ のときには、 λ を無視しないで計算をすれば

$$r = 1 - \frac{4\mu p S}{\pi F_0}, \quad p = \frac{\pi F_0}{4\mu S} (1 - r)$$

の結果を得る。振動加工においては $z=1$ において安定

な動作が得られたが、振動ラッピングの場合は必ずしも共振である必要はない。しかしながら実用上大振幅を得るには $z=1$ の近くで動作させるのが有利である。実際には $\lambda \neq 0$ であって、この場合振幅が最大になるのは $z = \sqrt{1 - 2h^2}$ においてであるから、前述の計算に従って考察を進めることとする。ここで $h = \lambda / (2mn)$: 減衰定数であって、このような装置では普通 0.01 程度の値を示す。

4.2 最適振幅比と最適ラップ圧力

ラップ圧力 p と振幅比 r との間には式 (19) のような関係があつて一方が増大すれば他方が減少する互いに逆の傾向をもっている。しかるに加工速度は図 8 および図 11 にみられるように、振幅または振幅比およびラップ圧力の増大に伴って増大する。したがって他の条件が一定であれば、ある振幅比またはラップ圧力において加工速度が最大となることが予想される。

実験より得た式 (3)、式 (8) によって加工速度 W を次の形で表わすことにする。 K は比例定数である。

$$W = K p^\alpha a^\beta \quad (20)$$

式 (18)、(19) の関係を用い p を消去し、 r の関数の形に表わすと、 K' を比例定数として

$$W = K' (1 - r^2)^{\frac{\alpha}{2}} r^\beta \quad (21)$$

と書ける。 r について W の最大値を求めれば、 $dW/dr = 0$ として

$$K' (1 - r^2)^{\frac{\alpha}{2}} r^\beta \{ \alpha r (1 - r^2)^{-1} - \beta r^{-1} \} = 0$$

$r(1 - r^2) \neq 0$ とすれば、結局最適振幅比 r_0 として

$$r_0 = \sqrt{\frac{\beta}{\alpha + \beta}} \quad (22)$$

が得られる。したがって最適ラップ圧力 p_0 は

$$p_0 = \frac{\pi F_0}{4\mu S} \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha + \beta}} \quad (23)$$

となる。ただし $p_0 \leq p_t$ の範囲でなければならない (次節参照)。

このようにして最適振幅比および最適ラップ圧力を求めることができたが、実際には式 (22) からわかるように無次元量である最適振幅比が扱いやすいとはいうまでもない。 $p_0 \leq p_t$ である限り、他の条件のいかんにかかわらず、最適振幅比を与えれば自動的に最適ラップ圧力で加工が行なわれる。

実験によって、 $\alpha = 1.2$ 、 $\beta = 1.5$ とすれば、

$$r_0 \doteq 0.75$$

が得られる。図 13 に示す実験によって上述の計算がよく合っていることがわかる。

振動数: 100c/s, 砥粒: #280C

図 13 ラップ圧力、加工速度と振幅比の関係

4.3 限界ラップ圧力と加工速度

3.2 節に述べたようにラップ圧力を増してあるラップ圧力に達したならば加工速度は飽和した傾向を示す。このようなラップ圧力のことを限界ラップ圧力 p_l とすれば、式 (20) は $p \geq p_l$ のとき $\alpha=0$ であるから、 K'' を比例定数として、

$$W = K'' r^\beta \quad (24)$$

の形で表わされる。この式においては W を極大にする r の値は存在しないが、 r がしだいに 1 に近づくにしたがって、式 (19) の関係によりラップ圧力 p が小さくなって $p \leq p_l$ になり、式 (21) の関係に従うことになる。この関係を図に示したのが 図 14 である。図において点線で示したのは振幅比とラップ圧力の関係であって、励振力 F_0 または振動数 f によってきまるパラメータ $K_1, K_2, \dots$ に従って式 (19) の関係で変化する。 p_l で示す X 軸に平行な点線は限界ラップ圧力を示し、この圧力に対応する振幅比 $r_1, r_2, r_3, \dots$ より小さい振幅比では $p > p_l$ であって式 (24) にしたがう、これより大きい振幅比では $p > p_l$ となって式 (21) に従う。図は簡単のために $\beta=1, \alpha=1$ として表わしてあり、励振力 F_0 または振動数 f によって変わるパラメータ K_i が $K_2, K_3, \dots$ と大きくなって行くに従い、限界ラップ圧力 p_l に対応する振幅比 r も $r_2, r_3, \dots$ と大きくなって行く。この図ではパラメータ $K_i = K_1$ のときには限界ラップ圧力に対応する振幅比は存在しないように示してある。パラメータ K_2, K_3, K_4, K_5 においてはそれぞれ対応する振幅比 $r_2, \dots, r_5$ において p_l に達し、それ以下の振幅比では加工速度は r^β に比例し、それ以上の振幅比では $r^\beta(1-r^2)^{\alpha/2}$ に比例することを示している。この図から加工速度の最大値は最適振幅比または限界ラップ圧力に対応する振幅比のいずれかにあることがわかる。すなわち限界ラップ圧力が最適ラップ圧力（最適振幅比）以上にあるときは最適振幅比

実線：相対加工速度， 点線：相対ラップ圧力

図 14 振動ラッピングの加工速度（理論）

において、また限界ラップ圧力が最適ラップ圧力以下にあるときは限界ラップ圧力に対応する振幅比において、加工速度は最大になる。

4.4 励振条件と加工速度

上述の考察は主としてラップ圧力 p と加工振幅 a 、振幅比 r に関するものであって、その他の励振条件は比例定数の中に含めて考えてきた。しかし実際には加工振幅 a は振幅比 r 、励振力 F_0 、振動数 f などの関数であって、装置の特性などをも含めて振動ラッピングの加工特性を考察するには加工振幅のみでは不十分である。そこで励振条件として振幅比 r 、励振力 F_0 、振動数 f の三つを考え、装置の等価工具質量 m をも含めて総合した加工速度の式は式 (14), (15), (19), (20) などにより次のようになる。 K''' は比例定数である。

$$W = K''' m^{-\beta} r^\beta (1-r^2)^{\frac{\alpha}{2}} F_0^{\alpha+\beta} \left(\frac{z^2}{1-z^2} \right)^\beta f^{\alpha-2\beta} \quad (25)$$

ここで $\alpha, \beta \div 1 \sim 1.5$ $p \leq p_l$ のとき $\alpha = \alpha$ $p \geq p_l$ のとき $\alpha = 0$

この式から次のようなことがわかる。すなわち加工速度 W を大きくするには、励振力 F_0 を大きく、 z は 1 に近く、 z が一定ならば振動数 f は小さく、工具質量 m は小さくする方がよい。振幅比 r については前述のとおりである。振動数 f に関しては 4.1 節に述べたように装置の設計上 $z = \sqrt{1-2h^2}$ で励振させるのが有利であって、この条件のもとで f を小さくすると、振幅 x_f は f^2 に反比例して大きくなり、したがって加工振幅 a も大きくなり緒論に述べた目的に反することになるから諸条件を

考え合わせて適当な振動数を選択することが大切である。振幅が一定ならば、式(4)のように振動数 f が大きいほど加工速度 W は大きくなる。

5. 結 論

この研究は、ラップ工具を被加工物に対して接線方向に振動させ、普通のラッピングと類似の加工を行なうような精密加工法として振動ラッピングに関して述べてあり、本報においては、振動ラッピングの実験装置、方法およびガラスに対する加工速度について一連の実験結果と理論的考察について報告した。

そのおもなものは次のとおりである。まず実験の結果によって次のようなことがわかる。

1) ガラスに対する振動ラッピングの加工速度 W は工具の平均速度 $\bar{v}$ (加工振幅 $a \times$ 振動数 $f \times 4$) の約 1.5 乗に比例する。

2) 同じく加工速度はラップ圧力 p の約 1.2 乗に比例するが、ラップ圧力が限界ラップ圧力 p_l を越えるとラップ圧力に無関係になり飽和した傾向を示す。

このような実験結果に基づき、次のような理論的解析結果を得、さらにこれを実験によってたしかめた。

3) ラップ圧力 p と振幅比 r との間には次の関係がある。

$$p = -\frac{\pi F_0}{4\mu S} \sqrt{1-r^2}$$

4) 加工速度 W が $W = K p^\alpha a^\beta$ の形で表わされるとすれば、最適振幅比 r_0 は

$$r_0 = \sqrt{\frac{\beta}{\alpha + \beta}} \div 0.75$$

最適ラップ圧力 p_0 は

$$p_0 = -\frac{\pi F_0}{4\mu S} \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha + \beta}}$$

となる。

5) ラップ圧力 p が非常に大きい場合は、 $p_l > p_0$ ならば最適振幅比 r_0 において、また $p_l < p_0$ ならば、限界ラップ圧力に対応する振幅比において加工速度は最大値をとる。

終わりに、本研究に関してご助言を賜った東京大学工学部・神保泰雄助教授に心から感謝の意を表します。

(1964, 10月31日受付)

文 献

- 1) 西村源六郎, 横山恭男: 振動加工の研究(第1報), 工具運動の解析, 精密機械, 30巻2号(1964)171.
- 2) 同上: 振動加工の研究(第2報), 加工エネルギーと限界衝突速度, 精密機械, 30巻11号(1964)871.
- 3) 同上: 振動加工の研究(第3報) ポンプ作用と加工速度, 精密機械, 30巻12号(1964)921.
- 4) 今中治: ガラスのラッピングに関する研究(第1報~第8報), 電気試験所集報, 25巻1号~8号(1961).
- 5) 谷口紀男: 硬脆材料の衝撃破砕加工, 誠文堂, (昭34) 32. 第2章.
- 6) 大越諄: ラップ仕上に関する研究, 精密機械, 3巻(1936) 360.
- 7) 佐藤健児: ラップ剤の切削作用について(第3報), 精密機械, 15巻(1949) 138.
- 8) 松永正久: ラッピングに関する研究(第3報), 精密機械, 20巻(1954) 251.
- 9) S. Timoshenko: Vibration Problems in Engineering, D. Van Nostrand Co., (1955) 92. (邦訳: 工業振動学, 商工出版, (昭35) 80.)