

ホーニング加工における真円度生成機構の解析\*  
(第2報, 実験的検討)上田隆司\*<sup>1</sup>, 大森滋人\*<sup>2</sup>, 杉田忠彰\*<sup>1</sup>Influence of Honing Head Design on Out of Roundness  
(2nd Report, Experimental Investigation)

Takashi UEDA, Sigeto OMORI and Tadaaki SUGITA

Using the honing machine, the influence of the honing head design on the out of roundness of workpiece is investigated experimentally. Experimental results for three and four-stick honing heads agree well with the theoretical results obtained in the 1st report. In the case of the honing head with greater sticking, the simulation of honing operation is carried out using the micro computer and the results obtained are compared with the theoretical results.

**Key Words:** Manufacturing Technology, Honing Operation, Out of Roundness, Honing Head Design, Harmonic Analysis, Computer Simulation, Number of Sticks

## 1. 緒 言

前報<sup>(1)</sup>ではホーニングの加工機構をモデル化することによりシリンダ内面の真円度が生成されていく機構を理論的に検討した。その結果、砥石本数により、真円度が向上してゆく過程には大きな差があり、3本砥石ホーニングヘッドでは、次数3, 6, 9, ……の波の減衰は速いが2, 4, 5, 7, ……の波の減衰が遅くなる。しかし、いずれの次数の波も減衰していく。4本砥石ホーニングヘッドになると、次数2, 4, 6, 8, ……の波の減衰は速いが、3, 5, 7, 9, ……の波はそのまま残ってしまう。5本砥石以上のホーニングヘッドになると逆に増幅される次数の波のあることなどがわかった。

そこで、本報では実用機を用いて加工実験を行うとともに、ホーニングの加工過程をマイクロコンピュータでシミュレーションすることにより、解析解の妥当性を調べてみた。

## 使用記号

$a$ : オーバラン  
 $a_n, b_n$ : フーリエ係数  
 $B$ : 加工物長さ  
 $C_n$ :  $n$  次の波の振幅(フーリエ係数)  
 $\bar{d}$ : 砥石切込み深さ  
 $D_i$ : 加工物内径  
 $l$ : 砥石長さ  
 $N_s$ : 砥石本数  
 $\delta r$ : 加工物内半径の増加量  
 $\delta R(\theta)$ : 真円度曲線  
 $V$ : ホーニング速度  
 $2\alpha$ : 交差角  
 $\theta$ : 角度(ホーニングヘッドの回転角)  
 $\tau$ : 加工時間

## 2. 実験方法

**2・1 実験装置** 図1に実験装置の概略図を示す。加工機には縦形定圧内面ホーニング盤[千嶋工業(株), CW-500 S]を用いた。駆動軸両端にはそれぞれユニバーサルジョイントが取り付けられており、一端には図2に示すホーニングヘッドが装着され、他端は油圧駆動

\* 平成2年3月23日 関西支部第65期定時総会講演会において講演、原稿受付 平成元年6月14日。

<sup>1</sup> 正員、金沢大学工学部 (〒920 金沢市小立野2-40-20)。

<sup>2</sup> ミノルタカメラ(株) (〒590 堺市大山西町3-91)。

系に接続されて回転と往復運動をホーニングヘッドに伝える。この2個のユニバーサルジョイントにより、加工物中心と駆動軸中心のずれの影響を取り除くことができる。測定量は切削抵抗、切削量、および加工物横断面形状(真円度)である。切削抵抗(接線分力)の測定は、テーブル形状の動力計上に加工物を固定し、弾性八角リングに生ずる変形をひずみゲージで検出することによって行った。切削抵抗により砥石の加工状態を監視することができる。砥石圧力は砥石台拡張油圧をゲージ式圧力変換器で測定し、力に換算して求めた。切削量は内径の変化量をシリンダゲージ(最小目盛1 $\mu\text{m}$ )で測定した。加工物横断面形状は真円度測定器(小坂研究所, EC 2型, 精度0.08 $\mu\text{m}$ 以下)で加工物の中央部形状を測定した。測定した信号はA-Dコンバータ(サンプリングタイム:約5 ms)でデジタル信号に変換したのち、マイクロコンピュータ(PC-9801)で解析した。

図2に砥石台およびホーニングヘッドを示す。ホーニングヘッドには3本砥石用および4本砥石用があり、それぞれ等間隔で3個、および4個の砥石台を装着できる。ホーニングヘッド内部にあるコーンは油圧によって軸方向に押し出され、コーンの円すい部が砥石台のテーパ部を押し込んで砥石台を拡張し、砥石を加工面に圧着する。砥石台には図2に示すように3 $\times$ 3 $\times$ 100 mmのダイヤモンド砥石が取付けられている。

2.2 実験条件 加工条件を表1に示す。砥石のオ

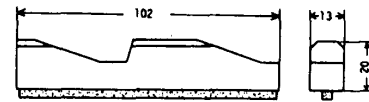
ーバラシ  $a$  は砥石長さ100 mmの1/3の33 mmとしている。加工材料には炭素鋼 S 45 C (850~900°Cに1 h 保持した後炉冷焼鈍, Hv 177)の丸棒を中ぐりしたパイプを用いた。寸法形状を図3に示す。外径  $D_0 =$

表 1 加工条件

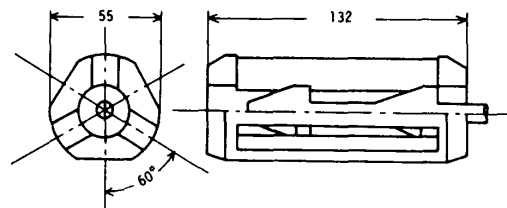
Honing speed	$v$ m/min	30
Crosshatch angle	$2\theta$ deg	30
Over-run	$a$ mm	33
Coolant	L/min	1.5

表 2 ダイヤモンド砥石

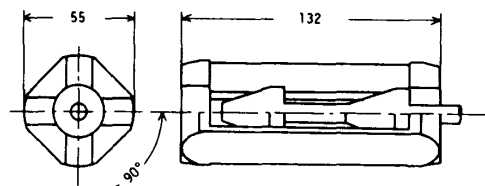
Bond	Grain	Grain size	Concentration
Metal MBG2	140/170		100
Dimensions 3 $\times$ 3 $\times$ 100 mm			



(a) 砥石台



(b) 3本砥石ホーニングヘッド



(c) 4本砥石ホーニングヘッド

図 2 砥石台およびホーニングヘッド

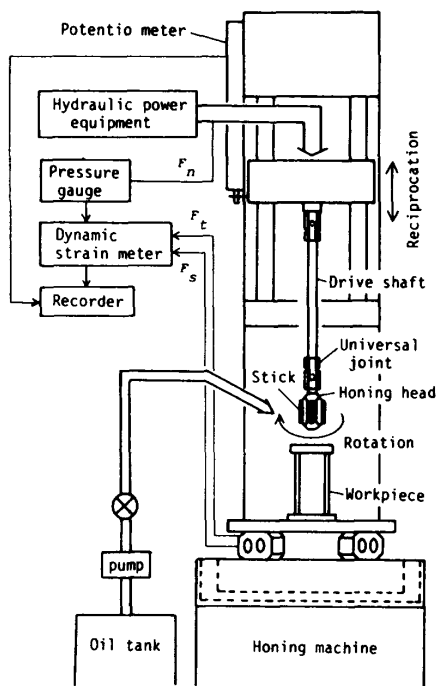


図 1 実験装置概略図

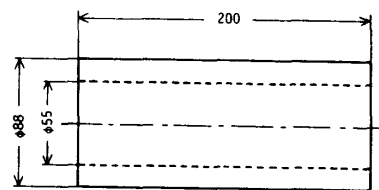


図 3 加工材料の形状

88 mm, 内径  $D_i=58$  mm, 長さ  $B=200$  mm である。砥石は表 2 に示すダイヤモンド砥石を用いた。硬度の低い鋼の加工に用いる標準タイプの砥石であり、長さ  $l=100$  mm, 幅  $b=3$  mm, 厚み  $h=3$  mm のスティック状である。加工油はダイヤモンド砥石を用いたホーニング加工で広く一般に用いられている油であり、鉱油をベースに極圧添加剤を添加している [日本グリース(株), ホーニング油 No.7, 粘度 3.3 cSt]。なお, 切りくずや脱落砥粒はマグネットおよびガラス繊維を用いたフィルタで除去した。

3. 実験結果

3.1 砥石の加工性能 表 2 に示すダイヤモンド砥石を用いて砥石圧力  $P_n$  に対する砥石切込み深さ  $\bar{d}$  を加工実験より求めた結果が図 4 である。 $\bar{d}$  は砥石が通過するときの切込み深さを表しており, 切削量を一般的な形で表した値ともみることができ, 次式で与えられる<sup>(2)</sup>。

$$\bar{d} = \frac{\pi D_i B (B - l + 2a)}{N_s V \{l(b - l + 2a) - a^2\} \cos \alpha} \frac{d(\delta r)}{d\tau} \quad (1)$$

ただし,  $a$ : オーバラン,  $B$ : 加工物長さ,  $D_i$ : 加工物内径,  $l$ : 砥石長さ,  $N_s$ : 砥石本数,  $V$ : ホーニング速度,  $2a$ : 交差角,  $\delta r$ : 加工物内半径の増加量,  $\tau$ : 加工時間

図 4 より明らかなように, 多少ばらつきはあるものの  $P_n$  と  $\bar{d}$  の間にはほぼ直線関係があり, 砥石圧力に比例して砥石切込み深さが大きくなるのがわかる。本研究では  $P_n=1.38$  MPa で加工して真円度曲線の変化を調べているが, 図 4 より, このときの砥石の切込み深さ  $\bar{d}$  は  $0.050 \mu\text{m}$  であり, 真円度が  $\mu\text{m}$  オーダであることに比べるとはるかに小さいことがわかる。

3.2 真円度の向上形態 図 5 に 3 本砥石および 4 本砥石ホーニングヘッドで加工したときの加工物の断面形状の変化を調べた結果を示す。旋削加工で与えられた初期形状はいずれも 8 の字形の形状をしている。加工が進行すると 4 本砥石ホーニングヘッドでは三角形状に変化してゆくのに対し, 3 本砥石ホーニ

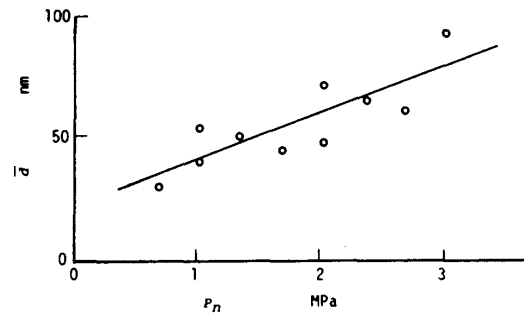


図 4 ダイヤモンド砥石の  $P_n$ - $\bar{d}$  線図

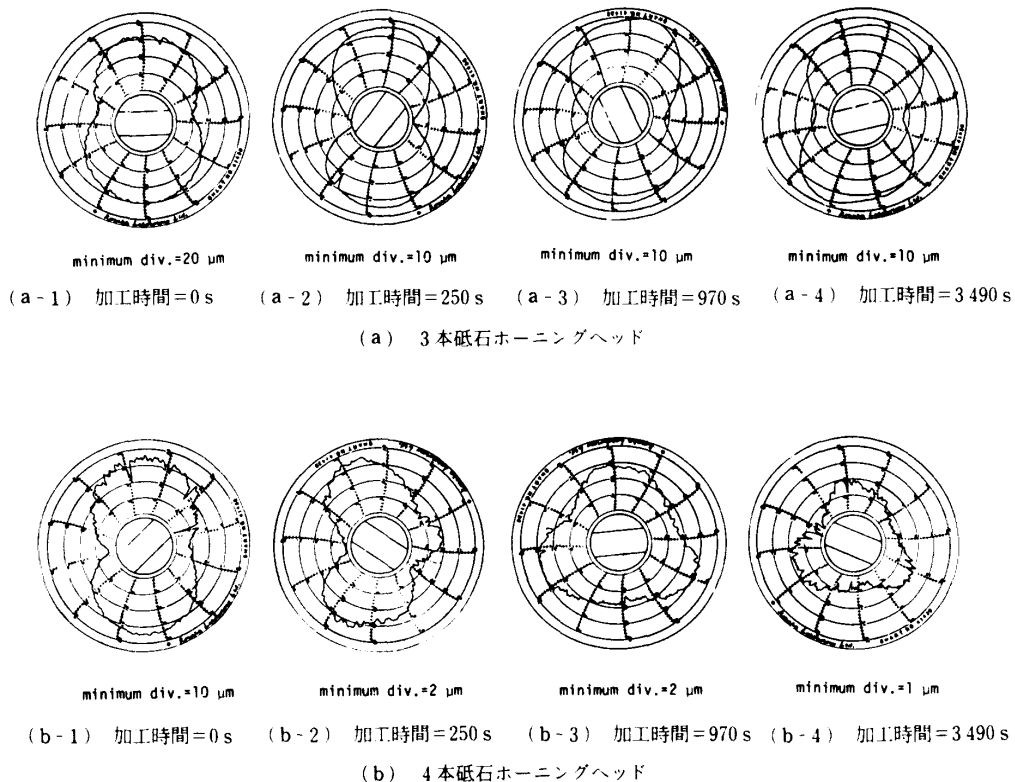


図 5 加工進行に伴う横断面形状の変化  $P_n=1.38$  MPa ( $\bar{d} \approx 50$  mm)

グヘッドでは8の字形がそのまま残っており、ホーニングヘッドの違いがよく現れている。

図6は図5の結果より真円度を測定し、加工時間で整理した結果である。4本砥石ホーニングヘッドでは急速に向上しているのに対し、3本砥石では改善の速度が遅く、両者の加工機構の間に大きな差のあることがわかる。そこで、図5の結果を調和解析して求めた真円度曲線  $\delta R(\theta)$  を、

$$\delta R(\theta) = - \sum_{n=2}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) \dots\dots\dots (2)$$

で表し、このときの  $n$  次の波の振幅  $C_n$  を

$$C_n = (a_n^2 + b_n^2)^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

で求めた結果が図7である\*\*1。初期形状は図7に見るようにいずれの場合も2次の波が大きい。図7(a)の3本砥石ホーニングヘッドでは2次の波の減少は遅く、また4次の波はほとんど減少していないのに対し、3次の波は急速に減衰している。この結果は第1報の理論解析で得られた結論とよく合っている。図7(b)の4本砥石ホーニングヘッドでは次数2, 4の波の減衰が著しく速い。これに対し、3, 5次の減衰は遅く、特に3次の波は除去されないままである。解析結果によれば、 $n=2, 4, 6, \dots$ の減衰は速く、 $3, 5, 7, \dots$ の波が除去されないが、実験結果もよくこの結果と合っている。

以上の結果より第1報の理論的取扱いが妥当であることがわかる。

#### 4. コンピュータシミュレーション

3章では加工機による実験結果をもとに、第1報で求めた解析解の妥当性を確かめた。しかし、3本砥石および4本砥石ホーニングヘッドの場合だけでなく、5本以上の砥石を用いたホーニングヘッドについては装置の都合上実験を行うことができなかった。そこで、マイクロコンピュータを用いてホーニングの加工過程をシミュレーションすることにより、5本砥石以上のホーニングヘッドに対する解析解の妥当性を確かめてみた。

4.1 シミュレーションの方法 砥石の切削作用は第1報における仮定に従うものとする。すなわち、

仮定1 真円度曲線は加工物の軸方向に一樣とする。したがって、砥石の回転運動により加工が進行してゆくものとする。

仮定2 加工は砥石の中心線上で行われるものとする。

仮定3 砥石には変位に比例した力が作用し、力に比例した切削能力を持つものとする。

仮定4 加工面の凹凸によって受ける砥石の変位、およびこれによって砥石に作用する力は常に中心を向いているものとする。

仮定5 砥石軸の中心と基準円の中心は一致しているものとする。

これらの仮定に基づいて、次の手順でシミュレーションを行った。

手順1 加工物の初期横断面形状をデジタル化してパーソナルコンピュータに取り込む。

手順2 調和解析により、加工物の初期真円度曲線を求める。

手順3 真円度を求める。

手順4 ホーニングヘッドが1°回転するごとに、加工表面の凹凸によって生じる砥石の変位量を

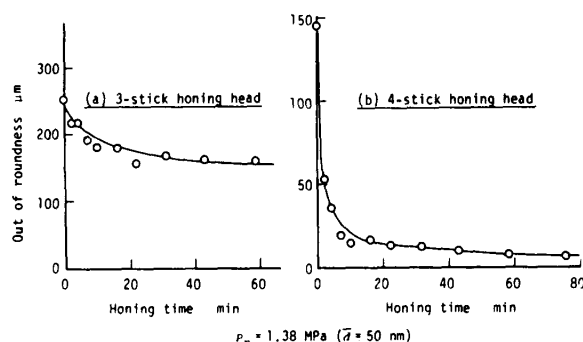


図6 加工進行に伴う真円度の向上

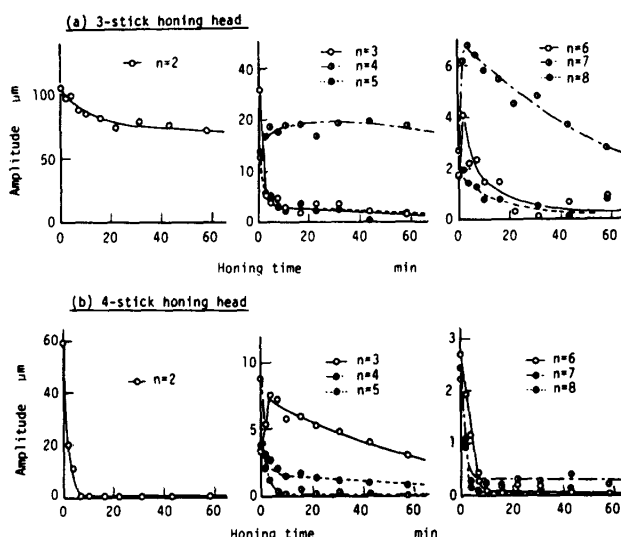


図7 加工進行に伴うフーリエ係数の変化

\*\*1 図7の次数  $n=2$  の結果より、第1報における式(17)の値を求めたところ、 $C_r K/S \approx 4.6 \times 10^{-4}$  となった。

求め、この変位量に比例した圧力が砥石圧力に加わり加工物を除去するとして、加工面の後退量を求める。このとき、 $N_s$  本すべての砥石の切削作用を同時に考慮する。

手順5 ホーニングヘッド1回転後の新しい表面形状を調和解析し、真円度曲線を求める。

手順6 真円度、半径増加量を求める。

手順7 手順4～6を繰返す。

**4・2 実験結果との比較** 図8(a)は3本砥石および4本砥石ホーニングヘッドで加工したときの真円度が向上してゆく様子を比較している。初期形状として図5の実験に供した加工物の横断面形状を用いている。3本砥石ホーニングヘッドの場合、真円度の向上は遅く、シミュレーション結果は実験結果とよく一致している。4本砥石ホーニングヘッドでは、真円度の向上は速く、半径増加量  $\delta r$  が  $200 \mu\text{m}$  までは真円度が急速に改善されている。しかし、限界があり、これ以後は変化せず一定となっている。実験結果もほぼこの傾向を示しており、 $\delta r$  が  $200 \mu\text{m}$  以後は真円度はほとんど改善されておらず、シミュレーション結果の傾向とよく合っている。

図8(b)は真円度曲線を調和解析して、 $n$  次の波の振幅  $C_n$  を求めた結果を比較している。3本砥石ホーニングヘッドでは振幅の大きい2次の波を取り除くのが難しく、これが真円度を悪くしている。逆に、4本砥石ホーニングヘッドでは2次の波を効率よく除去することができるが、3次の波を除去できないためこの波がいつまでも残り、真円度の向上を妨げている。いずれの結果においても、よく実験結果と一致しており、シミュレーションの方法が妥当であることがわかる。

**4・3 基本的な形状の真円度改善に及ぼすホーニングヘッドの影響**  $n=2\sim 8$  次の典型的な初期形状を持つ加工物を想定し、3～8本砥石ホーニングヘッド

によって真円度が改善されてゆく過程をシミュレーションした結果が図9である。図9中の  $n$  は形状を表す次数、 $N_s$  はホーニングヘッドの砥石本数を表している。次数により断面形状が異なり、 $n=2$  次はだ円形状、 $n=3$  は三角形状、 $n=4$  は四角形状、……である。一般の形状はこれらを組合せた真円度曲線で表すことができる。

$n=2$  次の形状に対して、3本砥石を除くホーニングヘッドは急速に真円度を改善している。3本砥石ホーニングヘッドは形状の改善効率が悪く、だ円の形状を取り除くには適さない。しかし、シリンダをだ円形状に仕上げるときには3本砥石以外のホーニングヘッドは考えられないことになる。 $n=3$  次の形状に対して、4本砥石ホーニングヘッドは真円度を改善することはできないが、5本砥石以上のホーニングヘッドになるとよく改善している。 $n=4$  次の形状に対しては、5本砥石は真円度を改善することができず、逆に悪化させている。しかし、実際の加工では真円度が悪くなると仮定4や仮定5が成り立たなくなり、また砥石幅の影響などもあり、シミュレーションの結果のように真円度が限りなく悪化することはない。むしろ、4次の波を除くことが難しいとみるべきである。5次以上の形状に対しても、[砥石本数の整数倍の値 $\pm 1$ ] 次の形状の真円度は悪化し、それ以外の形状の真円度は改善される。

次に、ホーニングヘッドの側からみると、3本砥石はあらゆる形状に対して有効であるが、改善の速度が遅い。4本砥石は改善できない形状があるが、そのほかの形状に対しては改善の速度は速い。5本砥石以上のホーニングヘッドでは真円度が逆に悪化する場合がある\*\*3。したがって、初期形状に合わせて適切な砥石本数のホーニングヘッドを選ぶのが望ましいが、一般に次数の低い波ほど振幅が大きく真円度に与える影響が

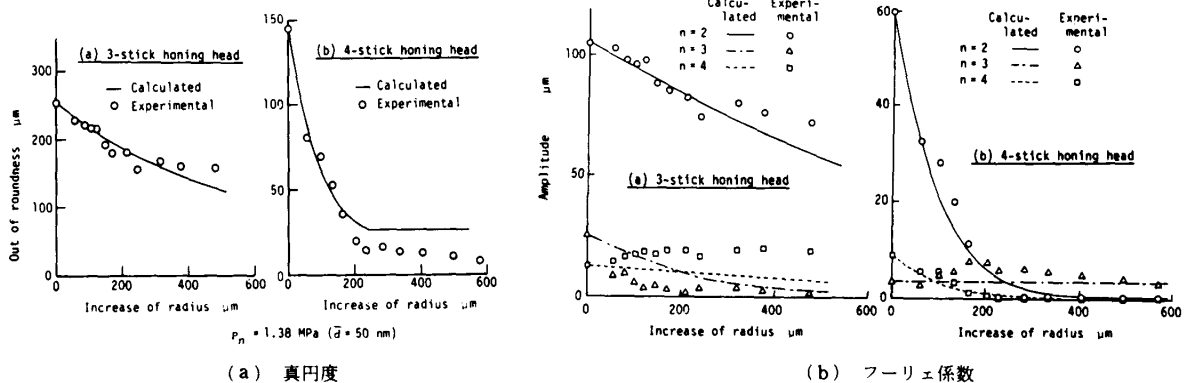


図8 シミュレーション結果と実験結果の比較

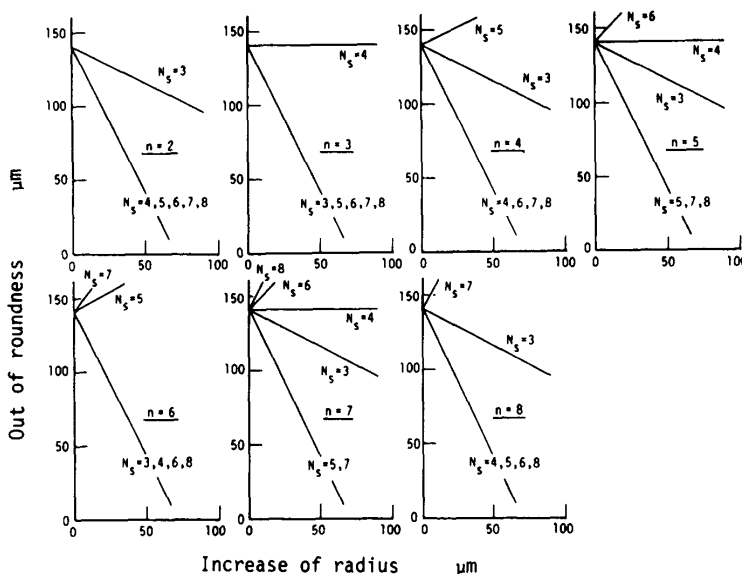


図9 基本的な形状の真円度改善に及ぼす砥石本数の影響\*\*2

大きいことから、砥石本数の多いホーニングヘッドを選ぶのが望ましいといえる。なお、砥石本数が増せば、加工能率や生産性が向上し、真円度の改善速度が速くなる利点もある。

## 5. 結 言

ホーニング加工の実用機に3本砥石および4本砥石ホーニングヘッドを用いて加工実験を行い、加工物の横断面形状が改善され、真円度が向上してゆく様子を調べるにより、第1報で求めた解析解の妥当性を確かめた。また、砥石の加工過程をマイクロコンピュータを用いてシミュレーションし、実験結果や理論結果と比較検討した。その結果、加工実験より得られた真円度曲線を調和解析したところ、各次数の波が減衰してゆく様子は解析解とよく一致した。また、シミュレ

ーションした結果はよく実験結果や理論結果と合っており、特に2～8次の典型的な形状を持つ加工物の真円度が3～8本砥石ホーニングヘッドで改善されてゆく過程は理論結果とよく合った。

## 文 献

- (1) 上田・大森・杉田, 論文講演抜刷関西支部第65期定時総会(1990-3), 論文No. 89-8101A.
- (2) 上田・山本, 精密機械, 48-11(1982), 1514.

\*\*2 式(2)において、 $n=2$ の初期形状に対して  $a_2=50 \mu\text{m}$ ,  $b_2=50 \mu\text{m}$ , 他の係数はすべて0;  $n=3$ に対して  $a_3=50 \mu\text{m}$ ,  $b_3=50 \mu\text{m}$ , 他の係数はすべて0; ……としており、このときの初期真円度はすべて  $141 \mu\text{m}$  となる。

\*\*3 実際の加工では取り除くことが難しいと考えるのが適当である。

## 討 論

〔質問〕 進村 武男〔宇都宮大学工学部〕

2279 ページの実験方法・実験装置の記述からは、第1報の理論的検討で仮定されている「仮定3：砥石には変位に比例した力が作用し、……………」の内容が本加工装置において実現されるか否かは不明りょうに感じられる。

〔回答〕 実験装置の説明文の中に不十分なところがあるのかもしれないが、本研究で用いたホーニング盤はごく一般的なものであり、実験において、加工物の真円度が改善されていることから、変位に比例した

力が砥石に作用しているとの仮定は妥当なものと考えている。

〔質問〕 田中 芳雄〔大阪府立大学工学部〕

加工物の真円度改善過程が砥石幅の影響を無視した簡単なシミュレーションによっても十分に追跡できることを実験によって証明されておられるが、砥石幅を本研究で用いられたものよりさらに大きくした場合に真円度改善に対して、また加工能率や生産性に対してどのように影響するのか、著者の考えなり、経験を教えてほしい。

〔回答〕 ホーニング加工における砥石幅の決定は重要な要素の一つである。本研究ではダイヤモンド砥石を用いているため砥石幅を3mmと細くしている。これは切り屑の除去を容易にするためである。ダイヤモンドやボラゾン砥石のように砥石損耗の少ない砥石で砥石幅を大きくすると切り屑の排出が悪くなり、砥石の切削性が著しく低下してしまう。WAやGC砥石の場合、加工物の大きさなどで異なるが、本研究で用いた加工物では幅10mm程度の砥石を用いるのが一般的である。もちろん、溝などがある加工面では砥石幅を大きくして砥石が溝を十分またぐことができるようにする必要がある。

一般に、砥石幅を大きくすれば加工能率はそれだけ

向上するといわれている。

真円度への影響は難しいが、当然加工径の大きさによって砥石幅の影響は異なってくる。一般的には、砥石幅を大きくすれば力の作用する領域が広がってその方向が一樣とみなせなくなるため、砥石間相互の影響の仕方が複雑になる。このため、例えば4本砥石ホーニングヘッドの場合、3次、5次、…、の波がそのまま残るようなことはなくなり、ゆっくりと除去されてゆくと考えられる。また、5本砥石以上の場合、振幅が増幅される波があるが、この傾向が緩和されることになると考えている。これらの点は一応コンピュータによるシミュレーションで簡単に検討しているが、今後の課題である。