非真円断面軸のラップ仕上*

久 曾 神 煌** 稲 田 久***

Lapping High Precision Polygonal Shafts

Akira KYUSOJIN and Hisashi INADA

The lapping has been used experientially for finishing method for the higher roundness of cylindrical shafts and holes. However, there are very few reports about the theoretical analysis of the finishing mechanism for the high precision polygonal cross section of cylinder. This study offers a new method of finishing polygonal shafts, of which shapes are ellipsoidal, triangular, of four-protrusion and so on. By this method, the amplitude can be increased and decreased of any Fourier's component of the out-of-roundness. Special types

of laps were produced by applying the measuring method of roundness called "V-block method". Using one of the V-block type laps, the magnitude of the four-protrusion component was increased from $8.4 \mu\text{m}$ to $9.9 \mu\text{m}$, while the other components were decreased. Then the out-of-roundness was improved from $35 \mu\text{m}$ to $25 \mu\text{m}$. By setting the angle between the supporting teeth adequate value, any polygonal shaft can be finished with these laps. This method is applicable also for finishing the polygonal holes.

Key words: cylindrical lapping, cylindrical shaft, roundness, out-of-roundness, lap, polygonal cross section, V-block method, four-protrusion.

1. 緒 言

円筒形状の軸や穴の真円度を高める最終仕上の方法として、従来より経験的に円筒ラッピングが用いられている。前報¹⁾では、新方式のラップ工具を提案し、高い真円形状軸の仕上げのみならず、高精度のポリゴン断面軸の仕上げが可能なることも明らかにした。また、真円度を高めるための研究として、園崎ら²⁾は、Vブロック式真円度測定法を円筒ラッピングに応用して、真円度の低周波成分の除去を試みている。

本研究では、Vブロックによる真円度測定法にヒントを得て、前報のラップ工具に工夫を加えて、真円度の任意の成分を減少あるいは拡大させることが理論的裏付けのもとに実証できた。一例として、初期形状において、真円度 $35 \mu\text{m}$ で4角形成分が $8.4 \mu\text{m}$ の軸を、110 min間のラッピング（工作物平均半径ラップ量 $21.4 \mu\text{m}$ ）により、真円度 $25 \mu\text{m}$ で4角形成分が $9.9 \mu\text{m}$ にすることに成功した。

2. 理 論

前報では、ラップ工具の形状を等角多角形（ k 角形）と仮定し、ラッピング中は工作物にラップ工具が外接す

ると考え、工作物形状によりラップ工具の中心がどのようになるか、理論的に計算した。その計算結果を表1に示す。表1の空欄は、ラッピング中に工作物とラップ工具の中心が常に一致していることを示し、工作物は凸部より削られて、軸形状は真円に近づく。●印の箇所は、工作物の凹凸に応じてラップ工具も同じ量だけふれまわり、凸部も凹部も一様にラッピングされるため、いくらラッピングをしても真円に近づかないことを示している。したがって、ある成分に対して、ふれの発生する等角多角形型ラップ工具を用いれば、その成分は減少せずに残ると考えられる。

次に、Vブロックによる真円度の測定について考えてみよう。図1において、試料円筒の半径がフーリエ級数に展開できるものとすれば、インジケータの振れ $Y(\theta)$ は、

Table 1 Whirling in the center of the lap

n	k	Regular polygon of k angles									
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ellipse	2	●									
Triangle	3		●								
Square	4	●		●							
Pentagon	5	●	●		●						
Hexagon	6			●		●					
Heptagon	7	●	●		●		●				
Octagon	8	●				●		●			
Nonagon	9		●	●			●		●		
Decagon	10	●						●		●	

* 原稿受付 昭和57年3月15日。昭和56年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和56年11月3日）にて発表。

** 正 会 員 長岡技術科学大学工学部（長岡市上富岡町字長峰1603-1）

*** 学生会員 長岡技術科学大学（現、（株）リコー；東京都大田区中馬込1-3-6）

Fig. 1 Instrumentation by V-block method

$$Y(\theta) = \left(\frac{-1}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 1 \right) a_0 - E + \sum_{n=2}^{\infty} \left\{ \frac{\cos n \left(90^\circ + \frac{\alpha}{2} \right)}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 1 \right\} C_n \cos(n\theta + \varphi_n) \quad (1)$$

と表すことができる³⁾。真円度は式(1)における第3項のみに従うから、各成分の拡大率 $\mu_{a,n}$ は、

$$\mu_{a,n} = \frac{\cos n \left(90^\circ + \frac{\alpha}{2} \right)}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 1 \quad (2)$$

となる。拡大率 $\mu_{a,n}$ の値を表2に示す。一般に真円度成分の大きさ C_n と拡大率 $\mu_{a,n}$ の積に比例して指針が振れる。したがって、インジケータの代わりにその部分で切削したりラッピングしたりすれば、 $\mu_{a,n}$ の大きさに比例して削られると考えられる。ゆえに、 $\mu_{a,n}=0$ の場合は、その真円度成分を減少させられないことを意味し、 $\mu_{a,n}$ の値が負の場合(例えば、 $\mu_{90^\circ,4}=-0.41$)、その真円度成分(C_4 の値)が増加すると考えられる。

3. 実験装置および実験方法

工作物は、図2に示すように、直径40 mm、長さ60 mmの円筒形状で、材質はS45Cの生材である。旋削加

Table 2 Magnification of V-block method

n	α	45°	60°	75°	90°	120°	150°	Between 2 faces 180°
Ellipse 2		-0.85	0	0.57	1	1.57	1.90	2
Triangle 3		3.41	3	2.52	2	1	0.27	0
Square 4		1	0	-0.42	-0.41	0.43	1.52	2
Pentagon 5		-1.41	0	1.21	2	2	0.73	0
Hexagon 6		2.85	3	2.16	1	-0.15	1	2
Heptagon 7		2	0	-0.63	0	2	1.27	0
Octagon 8		-1.61	0	1.82	2.41	0.43	0.48	2
Nonagon 9		2	3	1.63	0	1	1.73	0
Decagon 10		2.85	0	-0.59	1	1.58	0.10	2

Fig. 2 Workpiece attached to a mandrel

Fig. 3 Illustration of lap

supply of lapping compound

Fig. 4 Lap of V-block type

工の後、円筒研削により仕上げた。軸方向の直径差は3 μm 以内である。その後、エメリー紙(#600)で非真円断面形状(初期形状)にした。また、図3にラップ工具の概略図を示す。これは、表1の等角五角形型ラップ工具に対応し、ラップ歯はFC25(デンスバ)で作ってある。図4は、Vブロック型ラップ工具の概略図で、表2の $\alpha=90^\circ$ に対応している。工作物は、支持歯2,3で

え、ラップ歯1のみでラッピング作用が行われるように、ラップ歯には図5(a)に示すように、幅0.5 mm、深さ0.5 mmのラップ剤溜めを設けた。また、支持歯は図5(b)に示すように、3か所にミニチュアベアリングを取り付け、ラッピング作用が行われないようにした。

図6に実験装置外観を、表3に実験条件を示す。工作物を装着したマンドレルの平行部をチャックし、50 rpmで回転させ、ラップ工具の柄を手で支えて、毎分2回の割で左右に動かしつつラッピングした。工作物の長さが60 mm、ラ

Fig. 5 Teeth for lap of V-block type

Fig. 6 Experimental apparatus

Table 3 Experimental conditions

Number of rotation	50 rpm
Lapping rate	0.1 m/s
Lapping compound	Volume ratio 1 : 1
Abrasive grains	GC # 800, WA # 800
Spindle oil	# 60
Torque	3 N·m
Stroke	35 mm
Number of strokes	Twice per min

ップ歯長さが45 mmでオーパハング量が10 mmになるように、ストロークは35 mmとした。ラップ剤はGC # 800 または WA # 800 とスピンドル油 # 60 を容積比 1:1 に混ぜたものを用い、ラップ剤補給孔に常時補給した。工作物とラップ工具の間の摩擦トルクはほぼ3 N·m 一定となるように、ラップ歯締付けボルトを適宜調整した。

真円度の測定にはタリロンド* を用い、パーソナルコンピュータ** を通して各真円度成分の大きさと位相角を計算した。工作物の直径(平均ラップ量)は μm 読みのマイクロメータで測定し、ラップ歯のラップ量は上記のマイクロメータと、0.01 mg 読みの直示天びん*** を

* Rank Taylor Hobson 社 (U.K.) Talyrond 200.

** 日本電気 PC-8001.

*** Sauter (西独) セミ・ミクロ 404/51.

Harmonics	Amplitude μm
2	0.39
3	0.20
4	1.86
5	0.01
6	0.08
7	0.15
8	0.30
9	0.19
10	0.08

(a) at the Beginning of Lapping

Harmonics	Amplitude μm
2	0.03
3	0.02
4	1.26
5	0.00
6	0.10
7	0.01
8	0.01
9	0.12
10	0.01

(b) at the End of Lapping (Lapping Time : 40 min)

Fig. 7 Cross-sectional shapes of the workpiece (regular polygon of five angles type at point B)

Fig. 8 Changing process in Fourier coefficients of workpiece (regular polygon of five angles type at point B)

併用した。また、工作物の軸方向表面粗さは、タリサーフ†を用いて行った。

4. 実験結果および考察

4.1 等角多角形型ラップ工具

実験結果を図7, 図8に示す。図7には、工作物中央(B点)におけるラッピング前後の真円度を形状と、真円度成分の大きさを示してある。初期形状が(a)のようであったものが、40 min 間のラッピング(工作物平均半

† Rank Taylor Hobson 社 (U.K.) Talysurf 5 M-120.

径ラップ量 $14\mu\text{m}$) により, (b) に示すような4角形状となった。この時, 真円度は $8\mu\text{m}$ から $3\mu\text{m}$ に向上した。また, 各真円度成分の大きさを見ると, 4角形成分は $1.86\mu\text{m}$ から $1.26\mu\text{m}$ とわずかに減少しているものの, 全真円度*に対して占める割合は, 57% から 79% に増加した。他の成分については, 各2, 3, 5, 7, 8, 10角形成分は, $1/5 \sim 1/10$ 程度まで減少しており, また, 各6, 9角形成分はほぼ一定である。これらのことは, 表1の $k=5$ に対する空欄と●印に対応し, 実験結果が理論によく合っていることが明らかである。ただ, 4角形成分, 9角形成分もわずかに減少しているが, これは, 表1が工作物とラップ工具が線接触であると仮定して計算したものに対し, 実際の実験ではラッピングが進むに伴い, 線接触から面接触に移行していったことが原因の一つではないかと思われる。

以上より, 高精度の4角形断面軸を作るには, 初期形状において4角形成分を大きくとり, 等角5角形型ラップ工具を用いてラッピングを行えばよい。そのうち, 6角形成分, 9角形成分が大きい場合は, 更に, 等角3角形型ラップ工具を用いてラッピングを行えばよい。一般に, n 角形断面軸の仕上には, 等角 $(n+1)$ 角形型のラップ工具でラッピングした後, 表1に従って, n 角形断面軸に対してふれまわりの生じる等角 k 角形のラップ工具 (例えば, $k=n-1$) で更にラッピングすればよい。

図8は, 工作物の各真円度成分の大きさ (フーリエ係数) の変化を, 工作物平均半径ラップ量に関して表してある。この図からも, ふれまわりの発生しない3, 7角形成分は激しく減少し, ふれまわりの発生する4, 6角形成分はほぼ一定であることが明らかである。ただ, 真円度成分の大きさが $0.05\mu\text{m}$ 程度になると減少しなくなるようであるが, この原因の一つとして, 砥粒径のばらつきが考えられる。

4.2 Vブロック型ラップ工具

図9は, 工作物中央 (B点) におけるラッピング前後の真円度を, 断面形状と各真円度成分の大きさで示してある。初期形状が (a) のようであったものが, 110 min 間のラッピング (工作物平均半径ラップ量 $21.4\mu\text{m}$) により (b) に示すようにほぼ4角形状となった。この時,

* 全真円度が, 2~10角形成分から成り立っていると仮定した。

Fig. 9 Cross-sectional shapes of the workpiece (experiment 1, V-block type, Tooth width: 3 mm, at point B, with groove)

真円度は $35\mu\text{m}$ から $25\mu\text{m}$ に向上した。また, 増加が期待された4角形成分は, $8.4\mu\text{m}$ から $9.9\mu\text{m}$ と増加が得られた。他の成分は表2の拡大率と比較してみると次のようである。()内は, 真円度成分の減少割合である。

拡大率

- 0 7角形成分 (1/1.8), 9角形成分 (1/1.6)
- 1 楕円成分 (1/2), 6角形成分 (1/4.6)
10角形成分 (1/8.1)
- 2 おむすび成分 (1/4.4), 5角形成分 (1/4.5)
2.4 8角形成分 (1/48)

以上のように, 拡大率に従って各真円度成分が減少していることがわかる。ただ, 拡大率が0の場合にも減少しているが, これは, 理論解析ではラップ工具と工作物が線接触であると仮定して行ったのに対して, 実験ではラッピングの進行に伴い面接触になっていっていること, また, 高周波成分 (7, 9角形成分) であることなどに起因していると考えられる。例えば, 拡大率 $\mu_{a,n}=1$ の場合, 楕円成分の減少割合が $1/2$ であるのに対し, 6角形成分は $1/4.6$, 10角形成分は $1/8.1$ となっていることから, 高周波成分が減少しやすいことが明らかである。

ところで, 初期形状において, 4角形成分の全真円度に対して占める割合は50%であったものが, ラッピング後には80%まで増加した。このことは, ラッピングを続けければ, 工作物は4角形成分のみから成る形状に成り得ることを示している。

図10は, 工作物の各真円度成分の大きさの変化を, 工作物平均半径ラップ量に関して示してある。図には各3, 4, 7, 8角形成分の大きさの変化具合を表してあるが, こ

Fig. 10 Changing process in Fourier coefficients of workpiece (experiment 1, V-block type, Tooth width; 3 mm, at point B, with groove)

Fig. 12 Changing process in Fourier coefficients of workpiece (V-block type, Tooth width; 6 mm, at point B, with groove)

Fig. 11 Cross-sectional shapes of the workpiece (V-block type, Tooth width; 6 mm, at point B, with groove)

れからも、各真円度成分がそれぞれの拡大率に従って増加、あるいは減少していることが明らかである。ただ、各真円度成分が $0.5 \mu\text{m}$ 程度になると、これ以上減少しなくなるようであるが、この原因の一つとして、先に述べたように砥粒径のばらつきの影響が考えられる。

次に、ラップ歯幅を 6 mm にしてラッピングを行った場合の結果を、図 11、図 12 に示す。図 11 より、70 min 間のラッピング (工作物平均半径ラップ量 $21 \mu\text{m}$) により、4 角形成分の全真円度に対する割合は、49% から 70% まで増加したが、4 角形成分は $6.8 \mu\text{m}$ から $6.2 \mu\text{m}$ と

わずかに減少した。また、図 12 より、4 角形成分がわずかではあるが減少の傾向にあることがわかる。このことより、ラップ歯幅が真円度成分の変化に影響を与えるのではないと思われる。

最後に、工作物の軸方向の表面粗さを図 13 に示す。研削後には $R_{\text{max}} = 6 \mu\text{m}$ 程度だったものが、#600 のエメリー紙を用いて初期形状を与えた後には、 $R_{\text{max}} = 0.7 \mu\text{m}$ 程度になった。次に、ラップ剤 (WA #800) を常時供給しながらラッピングを行った後には、 $R_{\text{max}} = 5 \mu\text{m}$ 程度であったが、ラップ剤の供給を 10 min 間止めてラッピングを行った場合には、 $R_{\text{max}} =$

$2.5 \mu\text{m}$ 程度まで小さくなった。このように、常時供給に比べて表面粗さが小さくなっていることより、#2000、#3000 のように小さな砥粒径を用いれば、表面粗さおよび真円度が更に向上するのではないかと考えられる。

5. 結 言

等角多角形型ラップ工具とVブロック型ラップ工具を用いて実験を行い、次のことが明らかになった。

- (1) 任意の成分から成る高精度のポリゴン断面軸を作るには、まず初期形状における希望の成分を他の成

Fig.13 Surface roughness

分より大きくとり、その成分に対してふれまわりの発生する等角多角型ラップ工具を表1から選び、ラッピングを行う。この時、初期形状によっては二つ以上のラップ工具を用いる。ただし、等角多角形型ラップ工具によるラッピングでは、希望の成分もわずかに減少するようである。

- (2) 任意の真円度成分を増加させるには、その成分に対して拡大率がマイナスになるVブロックの開き角(支持歯間の角度)を持つVブロック型ラップ工

具を用いてラッピングを行えばよい。各真円度成分の減少具合はほぼ拡大率に従う。また、高周波成分ほど減少具合が大きい。実験では、110 min間のラッピングにより、4角形成分の全真円度に対して占める割合を、50%から80%まで増加させることができた。軸方向の表面粗さは、ラップ剤を常時供給するよりも、1回の供給でラッピングを行う方が小さく、砥粒径の小さな砥粒を用いて行えば、表面粗さおよび希望の成分を除いた残りの真円度は更によくなると思われる。また、真円度成分の増減に対して、ラップ歯の歯幅が微妙に影響しているようである。

以上より、真円度の任意の成分を希望の大きさにもつポリゴン断面軸のラップ仕上が可能になったことが明らかになった。また、この原理は、非真円断面形状の穴のラップ仕上にも応用できる。

参 考 文 献

- 1) 久曾神 煌ほか: 円筒軸形状補正ラップ工具の開発, 精密機械, **45**, 8 (1979) 913.
- 2) 園崎昭八, 藤原晴夫: 真円度向上のための円筒加工法, 精密機械, **43**, 10 (1977) 1167.
- 3) 中田 孝: 工学解析, オーム社 (1972) 77.