両センタ支持円筒研削面の2山成分とその除去研削法*

加藤 秀雄** 中野 嘉邦** 村上 聡***

Two-lobe Components on Cross-sectional Profiles of Cylindrical Workpieces Ground by Using Two Dead Centers and Their Elimination

Hideo KATO, Yoshikuni NAKANO and Satoshi MURAKAMI

Two-lobe components or two-point lobings on cross-sectional profiles frequently dominate out-of-roundness of cylindrical workpieces ground by using two dead centers. The present paper deals with these components and a new grinding method to eliminate them. It is shown that two-lobe components are observed as two-cycle-per-revolution runouts of ground surfaces when measured just

after grinding from the workpiece table as a datum plane. This fact suggests that two-lobed profiles may result from workpiece rotation errors of two-cycle-per-revolution. In the proposed method, the workpiece runouts are corrected by oscillating the wheelhead position precisely by using a special system with a microcomputer and a stepping motor. It is found that, by this method, the two-lobe components and the out-of-roundness of workpieces can be reduced to about one half of the values in conventional methods.

Key words: two-lobe component, out-of-roundness, cylindrical grinding, rotation accuracy, center, position control

1. ま え が き

両センタで支持して円筒プランジ研削した加工面の真円度誤差曲線は、多くの場合1周あたり2山(楕円状)と3山(三角形)の成分に支配されることを既報¹⁾において報告した。これらの成分のうち、3山成分は主にセンタ穴の真円度誤差曲線の3山成分が伝達されるために生じるものであるが、2山成分はその大きさが必ずしもセンタ穴のそれに依存しないことから、ほかに原因が存在すると予想されている。通常この2山成分は研削面の真円度誤差曲線の最大の成分であり、その大きさは真円度の値とほぼ同程度であるから、この成分を除去することは加工精度を向上させるために極めて重要である。本研究では2山成分を生じる原因について加工物の振れを測定することにより検討を加え、その結果に基づいて2山成分を除去するための方法を提案している。

2. 加工物および研削条件

図1に加工物の形状を示す。この加工物の心押台側プランジ部を表1に示す条件でプランジ研削した。センタ穴は、旋盤に三爪チャックを用いて加工物を固定し、心押台に取り付けた60°A形センタ穴ドリルにより加工したものであり、センタ穴研削やラッピング等は行っていない。

ない。その入口部の直径は4.4~10.9 mmであり、真円度は2~26 μm であった。また、センタはMT4の60°A級超硬センタを用い、センタ穴との接触部の真円度は0.5 μm であった。

3. 研削面の真円度誤差曲線と振れの関係

研削面の真円度誤差曲線の例を図2に示す。図中に併記したフーリエ分析結果からわかるように、これらの曲

Fig. 1 Workpiece

Table 1 Grinding conditions

Grinding machine	TOYODA RSS 15-50
Grinding wheel	WA 60 KmV (ϕ 405×75)
Wheel speed	1 410 rpm
Workpiece speed	75 rpm
Infeed rate	1.0 $\mu\text{m}/\text{rev}$
Grinding time	20 s
Sparking-out time	30 s
Grinding fluid	Johnson Wax TL 131
Lubricant in center hole	Machine oil
Thrust between centers	200 N

* 原稿受付 昭和59年5月8日、昭和58年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和58年10月16日)にて発表

** 正会員 千葉大学工学部(千葉市弥生町1-33)

*** 学生会員 千葉大学工学部(現、マツダ(株); 広島県安芸郡府中町新地3-1)

Fig. 2 Profilogram of ground surface and its spectrum

Fig. 3 Runout just after grinding

線には約 $0.6 \mu\text{m}$ の明らかな 2 山成分が含まれている。この 2 山成分を生じる直接的な原因としては、まず第一に加工物の回転誤差が考えられる。そこで、これを検討するために研削直後に加工物を空回転させたときの研削面の振れを電気マイクロメータで測定した。図 3 にその測定例を示す。この場合、砥石台を基準として加工物の砥石側で測定した振れ ① は振幅が約 $0.1 \mu\text{m}_{p-p}$ で、加工物の回転に同期する成分はほとんど認められないが、テーブルを基準として加工物の作業側で測定した振れ ② には約 $0.7 \mu\text{m}_{p-p}$ の加工物 1 回転につき 2 周期の成分が認められる。図 4 はテーブル基準の振れと真円度誤差曲線の相互相関関数を示す。この場合、縦軸は振れの自己相関関数のピーク値 $R_{11}(0)$ と真円度誤差曲線のそれ $R_{22}(0)$ の積の平方根で正規化してある。この相互相関関数が加工物 1 回転または 1 周につき 2 周期の正弦波状曲線を示していることから、振れの 2 cycle/rev 成分と真円度誤差曲線の 2 山成分との間には強い相関のあることがわかる。また、図 5 はこれらの 2 山成分振幅と 2

Runout: $R_{11}(0)=22.0465 \mu\text{m}^2$, Profile: $R_{22}(0)=11.1333 \mu\text{m}^2$

Fig. 4 Cross-correlation function between runout relative to table and profile curve

Fig. 5 Relation between two cycle/rev component of runout and two-lobe component of profile

Fig. 6 Behavior of workpiece just after grinding

cycle/rev 成分振幅の関係を示し、センタ穴の大きさによってばらつきに多少の差はあるが、回帰直線の傾きから両者間にはほぼ 1:2 の関係のあることがわかる。

図 3~5 に関する以上の考察を総合すると、研削直後に空回転させたときの加工物の挙動は図 6 に示すようになる。すなわち、研削面の真円度誤差曲線に全振幅 $(a-b)$ の 2 山成分が含まれている場合であっても、砥石台基準の振れは研削作用によって振幅はほぼ 0 となるが、他方テーブル基準の振れには 2 山成分が全振幅 $2(a-b)$ の

Fig. 7 Method for eliminating two-lobe component

2 cycle/rev 成分となって現れる。さらにこのことは、研削面の全振幅 (a-b) の2山成分は、加工物回転軸が全振幅 (a-b) で1回転につき2周期で振れ回ることにより生じていることを示唆している。

4. 2山成分の除去研削法

前節において研削面の2山成分を生じる直接の原因は主として加工物が1回転につき2周期で振れ回するためであることが示された。この振れ回りは、空回転中すなわち研削力が作用しない状態でも生じていることから、センタとセンタ穴の形状誤差やアライメント誤差等が相互に関係して生じるものと思われるが、その原因は現状では十分に説明されていない。一方、真円誤差の原因にかかわらず真円度誤差曲線の形状に応じて加工物-砥石台間距離や加工物回転速度を制御して真円度を向上させる方法が既に試みられている²⁾³⁾。しかし、これらの方法を2山成分の除去に用いる場合、加工物の振れ回りのために真円度誤差曲線をインプロセスで測定することは困難であり、また真円度測定機で測定するとしても加工物の両センタ支持系への着脱により加工物回転精度の変化を生じる恐れがある。そこで、2山成分が研削面のテーブル基準の振れの2 cycle/rev 成分に対応するという関係を利用することが考えられる。すなわち通常のプランジ研削を行った後、図7に示すように、砥石を揺動させる研削を行うことによりテーブルの基準の振れの2 cycle/rev 成分が初めの1/2になるようにすれば、2山成分を除去できることになる。また、そのとき現れる振れの2 cycle/rev 成分の全振幅 (a-b) は加工物回転軸の振れ回りの全振幅 (a-b) に等しい。このように振れを制御する具体的な方法としては文献^{2), 3)}に述べられている方法や砥石軸静圧軸受のリセス圧力を変えて砥石を変位させる方法等が考えられる。しかし、本研究では研削盤自体の改造を最小限にするために以下に述べるような砥

Fig. 8 Response of wheelhead to sinusoidal infeed motion

Fig. 9 Relation of amplitude between input and response in the case of sinusoidal infeed motion

石台送り系の独特の性質を利用し、加工物の振れ回りに合わせて砥石の位置を制御することにした。

供試円筒研削盤の砥石台送り系には約27 μmのパックラッシュが存在する。砥石台送りハンドルによりあらかじめこの値以上の送りを与えた後に、このハンドルを周期1.9 sで余弦波状に回転運動させたときの砥石台の応答出力を図8に示す。この場合、ハンドルはステップモータ（ファナック製 HiPM 5, FANUC 640 駆動装置付き）により1/50ウォーム減速機と歯付きベルトを介して駆動しており、これによる公称の砥石台最小移動単位は1/96 μmである。また図中のハンドル回転振幅は公称の砥石台変位に換算して示してある。この図から、砥石台は余弦波の第1半周期の間はほぼ入力と同じように動いているが、その後は微小振幅のほぼ余弦波状の波形となることがわかる。このような挙動は送り系の摩擦や弾性変形等に起因すると考えられ、ほかの周期の場合も同様であった。周期0.95 sと1.9 sの場合の第1周期以後の振幅について入出力の関係を図9に示す。この図から、

Fig. 10 Hardware configuration

周期 0.95 s の場合には入力振幅が $10 \mu\text{m}$ 以上でステップモータは脱調し、周期 1.9 s の場合には入力振幅が $18 \mu\text{m}$ 前後で出力振幅は急変することがわかる。しかし、前述の入力振幅以下では非線形で $0.1 \mu\text{m}$ 程度のばらつきはあるものの周期 0.95 s のとき約 $0.6 \mu\text{m}$ 以下、周期 1.9 s のとき約 $0.35 \mu\text{m}$ 以下の出力振幅を実現できることがわかる。

このような特性を利用して 2 山成分の除去研削（以後制御研削と呼ぶ）を行う装置の構成を図 10 に示す。加工物の回転位置は主軸台に取り付けたインクリメンタル形ロータリエンコーダ（ソニーマグネスケール製 MSS 261, デテクタ MSD 701-1 付き）とフォトインタラプタを用いた 1 回転マークにより検出している。エンコーダは加工物 1 回転あたり約 195 600 個のパルスを発生し、これを分周したステップモータ駆動パルスとすることにより通常研削を行う。その分周比は設定切込み速度に応じてマイクロコンピュータから供給される。制御研削におけるステップモータの駆動はパルス間隔を変化させるためにエンコーダ出力パルスを用いず、すべてマイクロコンピュータのソフトウェアで行っている。また、加工物の回転速度を変えるために主軸モータには小型インバータを取り付けてある。電気マイクロメータにより検出された振れは A-D 変換された後マイクロコンピュータに取り込まれ、フーリエ分析等が行われる。マイクロコンピュータのプログラムは研削の手順によって三つに分かれたメインルーチンとサブルーチン群から構成されている。それらの関係を図 11 に示す。メインルーチンは BASIC 言語で記述されているが、サブルーチンはいずれも高速処理を要するので機械語プログラムを ROM

Fig. 11 Software configuration

Fig. 12 Change of runout and its spectrum by controlled grinding

化して用いている。割込み処理は用いていない。

5. 研 削 実 験

通常のプランジ研削（以後通常研削と呼ぶ）の条件は表 1 に示すものと同じである。制御研削では、砥石台変位周期をステップモータの動作特性に対して余裕をみて 1.9 s としたので加工物回転速度は $1/[2 \text{ cycle/rev} \cdot (1.9 \text{ s}/60)] = \text{約 } 16 \text{ rpm}$ となった。また、この制御研削では $1 \mu\text{m}$ 以下の微小な真円誤差の除去だけを行うので初期切込み量は $2 \sim 3 \mu\text{m}$ とし、スパークアウトは加工物 20 回転分すなわち研削時間にして 75 s とした。

通常研削後と制御研削後のテーブル基準の振れの測定例を図 12 に示す。この場合 (a) に示すように通常研削後の振れの 2 cycle/rev 成分振幅が $0.2 \mu\text{m}$ であり、これを 1/2 にするために制御研削では図 9 の関係より約 $5 \mu\text{m}$ の入力振幅を与えることになる。 $5 \mu\text{m}$ の入力振幅を与えた結果、制御研削後の振れの 2 cycle/rev 成分振幅は (b) に示すように $0.12 \mu\text{m}$ となった。制御研削によって 6 cycle/rev 成分が若干増えたのは、図 8 (b) に示したように砥石台変位波形のひずみによるものと思われる。図 12 のような測定結果を振幅と位相に分けてま

Fig. 13 Comparison of amplitude and phase of runout after grinding

Fig. 14 Profilogram after controlled grinding

とめたのが図13である。この場合、位相は加工物回転マーク信号を基準にして測定したものである。この図から、制御研削では通常研削後の振れの2 cycle/rev成分に対して位相を変化させることなく振幅だけが約1/2に補正されており、装置がほぼ目標通り動作していることがわかる。図14は、通常研削時の真円度誤差曲線が図2のようであった加工物に対して制御研削を行った場合の真円度誤差曲線を示す。ただし、通常研削時の真円度測定の後、再度通常研削を行い、その振れに基づいて制御研削を行ったので、図2が制御研削直前の真円度誤差曲線と完全に一致するものではない。しかし、これらの図を比較すると、通常研削時に約0.6 μmの振幅を示していた2山成分は制御研削によって0.1 μm以下に減少していることがわかる。またこの制御研削では2山成分以外の

Fig. 15 Comparison of two-lobe component and out-of-roundness after grinding

成分は除去しないので、図2では目立たなかった3山成分が図14では明らかに現れるようになった。

通常研削のみの場合と制御研削を行った場合とを2山成分振幅および真円度の度数分布で比較した結果を図15に示す。通常研削、制御研削ともに同じ45個の加工物を用いている。この図から2山成分は、通常研削のみでは0.75 μm以下で分布し平均値が0.17 μmであるのに対し、制御研削を行うことによって0.4 μm以下の分布、平均値0.09 μmとなり、前者のほぼ半分に減少していることがわかる。この場合、制御研削によって2山成分が十分に除去されない場合があるのは、図13に示した制御研削の誤差、および図5に実験値のばらつきとして示されたように振れの2 cycle/rev成分以外の原因の2山成分への影響によるものと思われる。また真円度は、通常研削では1.8 μm以下の分布、平均値0.58 μmであるが、制御研削により1.0 μm以下の分布、平均値0.39 μmと減少し加工精度が向上していることがわかる。以上のことから本方法が2山成分の除去に対して十分有効であることが確認された。

6. あとがき

両センタ支持円筒研削面の真円度誤差曲線において支配的な2山成分とその除去研削法について実験的に検討した結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 2山成分は研削直後にテーブル基準で測定された研削面の振れの2 cycle/rev成分として観測することができる。
- (2) 2山成分を生じさせる直接の原因は主として加工

物回転軸の1回転につき2周期の振れ回りである。

(3) 加工物の回転に同期して砥石台の位置を制御し研削面の振れを補正することにより2山成分を除去する方法が開発された。

(4) 通常の研削では2山成分が $0.75\mu\text{m}$ 以下、真円度が $1.8\mu\text{m}$ 以下の範囲で分布した加工物に対してこの方法を適用することにより各々 $0.4\mu\text{m}$ 以下および $1.0\mu\text{m}$ 以下の分布に減少できることが確認された。

本研究は昭和57年度文部省科学研究費補助金(奨励研究A)の援助を受けて行われた。また、昭和57年度卒

業研究学生松木昭君、清水義久君、昭和58年度卒業研究学生石井真君の協力によって研究は遂行された。ここに付記して謝意を表す。

文 献

- 1) 加藤秀雄, 中野嘉邦, 鴻巣健治: センタ穴の真円度が円筒研削面の真円度へ及ぼす影響, 精密機械, **46**, 5 (1980) 615.
- 2) 吉川弘之, 古川 健, 守友貞雄, 辰巳洋司: 形状精度制御円筒研削盤の試作, 精密機械, **40**, 10 (1974) 833.
- 3) 小尾 誠, 北御門貞夫, 佐田登志夫: 研削加工における形状制御, 精密機械, **42**, 6 (1976) 465.

情 報

(p. 1720 より続く)

〔油圧機器〕 55年を境に生産は低迷し、58年は2040億円で、わずか0.7%の伸びである。このように長期低迷の様相を強めているのは、総需要の9割以上を占める内需の著しい冷え込みが主因である。特に公共投資抑制に伴う建設機械の不振と貿易摩擦問題を抱えた工作機械の低迷が大きく作用した。輸出も欧米向けの不調で前年比1.0%増の87億円である。景気動向に加えて油圧ユーザの内製化進行の影響も大きい。54~57年にかけての油圧メーカーの出荷の伸びが1.12倍なのに対し、内製額の伸びは2.27倍と高い。こうした厳しい需給環境下で油圧企業の経営も苦しい状態である。このため各企業とも経営体質強化策を積極的に展開するとともに輸出拡大に取り組んでいる。

〔自動車〕 58年の生産は1111万台強と2年ぶりに1100万台の水準に戻し、前年比3.5%の増加をみせた。56年に次ぐ史上第2位である。特に乗用車は内需回復に伴って史上最高の715万台を記録した。ここ2,3年不振のトラックも低迷を脱した。欧米との摩擦がらみから輸出は56年から伸び悩み状況にあり、58年は557万台弱と前年比1.4%増と若干上向いたものの、ほぼ横ばいである。逆に国内販売台数は538万台強と史上最高だった。貿易摩擦の激化に伴い完成車輸出主体の国際化戦略の転換を余儀なくされた自動車各社は海外生産を加速化の気

配である。

本田技研がオハイオで初の現地生産を始めたのに続いて日産自動車が小型トラックの生産を開始し、トヨタ・ゼネラル・モータースの合併事業も動き出した。マツダ、三菱自動車なども対米進出を決断し、日産の対英進出も決定した。しかし摩擦問題は依然、根強く続いており、国際化を一層強めざるを得ない。

〔自動車部品〕 自動車生産の回復に伴って自動車部品メーカーの経営内容も58年度6月期、9月期とも軒並み増収増益の好況である。世界的にも未曾有の活況下にあるが、米国自動車産業の再建が日本の自動車メーカー、部品メーカーを巻き込んで実現しつつあるほか、日本企業の米国生産の急展開、技術革新を背景にした国際的な提携および再編の進展などの激動の嵐に見舞われている。自動車メーカーの対米進出、さらには米国のビッグ3からの引合急増などから自動車部品メーカー各社や関連産業の現地生産が次第に活発化しつつある。さらに新素材の開発、利用とエレクトロニクスの技術革新が競争の激化、新規参入企業の続出、再編促進に拍車をかけている。日米相互投資の拡大、国際的な部品調達増大、技術革新の進展、新規企業の参入などといった状況のもとで自動車メーカーの部品メーカー、加工企業に対する購売、外注政策も厳しさを増すばかりである。

(p. 1790 へ続く)