心なし研削における工作物不釣合い量の 真円度に及ぼす影響 (第2報)*

[JSPE-59-08
93-08-1239]

—安定研削条件の理論解析結果の実験による検討—

高 巢 周 平** 榊 田 正 美***

Influence of Unbalanced Mass on Roundness of Workpiece
in Centerless Grinding(2nd Report)

— The Examination of Analytical Stable Grinding Conditions by Experiments —

Shuuhei Takasu and Masami Masuda

In centerless grinding, unbalanced parts are hard to get precise accuracy, because the centrifugal force caused by rotating the unbalanced mass tends to move the part up and down, and/or fall down the part from work support blade. The unbalanced parts are classified into 3 types by the position of unbalanced mass. The first report presents the criteria of this movement of each type of the unbalanced part by analyzing the balance of the forces working on it. This paper deals the experiment of centerless grinding of those 3 types unbalanced parts. The experimental results indicate that the accuracy was not affected substantially by the unbalanced mass under the stable grinding conditions, and this is coincident with analytical results.

Key words: centerless grinding, unbalanced part, unstable grinding condition, centrifugal force, through feed grinding, roundness error, grinding accuracy

1. 緒 言

心なし研削では、工作物の支持剛性が高く、かつ着脱が容易なことから、種々の形状の工作物の円筒面の高効率な仕上げ研削に多用されている。しかし、心なし研削の特徴である工作物支持方式ゆえに、加工精度が工作物形状の影響を受けやすい。

自動車及び圧縮機などのクランクシャフトをはじめ不釣合い量を有する工作物も、多量に心なし研削されており、加工精度は一樣径の単純円筒形状の工作物に比較し劣ることが経験的に知られているが、不釣合い量の加工精度への影響に関する研究は見当たらない。

筆者らは、不釣合い量を有する工作物の心なし研削では加工精度の劣化が、不釣合い量による遠心力のために、工作物がブレードから離れるという工作物支持の不安性に起因していることに着目し、前報¹⁾では、不釣合い量を有する工作物をその不釣合い量の位置により①軸方向不釣合い工作物、②半径方向不釣合い工作物、③軸方向及び半径方向の両方向に不釣合い量を

有する2方向不釣合い工作物の3種に大別し、それぞれの不釣合い工作物の心なし研削における、工作物支持の安定性の解析から、転落あるいは揺動のない安定研削条件を求めている。

本報告では、上記3種の不釣合い工作物を心なし研削実験し、安定研削条件の解析結果との対比を行っている。

2. 実 験 方 法

表1に、実験に用いた研削盤の仕様及び実験条件を示す。図1に工作物形状を示す。これらは前述した不釣合い量の3つの形態の特徴を持つ。すなわち、

- (1) 軸端に円柱状の重量を付加して軸方向のみに不釣合い量を持たせたもの、さらに研削幅を狭くし不釣合い側への旋回モーメントを大きくしたもの、
- (2) 中心から3, 4.5, 6mmの偏心位置に直径15mmの貫通穴を設けた、半径方向にのみ不釣合い量を持つものの、
- (3) 軸方向と半径方向に同時に不釣合い量を有するもの、および(1)と同様に研削幅を狭くしたもの、である。

ここでは、工作物の不釣合い量の大きさを表す量として、研削部重量 W_0 に対する不釣合い部重量 W_u の比

* 原稿受付 平成4年2月18日

** 正 会 員 日本電産(株)中央研究所(京都市右京区西京極堤外町10)

*** 正 会 員 (株)日立製作所生産技術研究所(横浜市戸塚区吉田町292)

Table 1 Specifications of centerless grinder and grinding conditions

Grinding wheel	
Specification	WA80K _M V
Dimensions	φ405×100
Rotational speed	2,000rev/min(2,500m/min)
Regulating wheel	
Specification	A150RR
Dimensions	φ203×100
Rotational speed	
Plunge cut	30, 60, 90, 120 rev/min
Through feed	90, 120, 150 rev/min
Workpiece Material	
Carbon Steel(S45C)	
Depth of cut	
Plunge cut	φ60 μm
Through feed	φ30 μm(φ10 μm×3pass)
Blade angle	θ=30°
Coolant	Solution(×50 dilute)

$\nu (=W_u/W_w)$ と、旋回中心から研削部重心までの距離 l_u に対する、旋回中心から不釣り合い量部の重心までの距離 l_w の比 $\kappa (=l_w/l_u)$ の積 $\nu \cdot \kappa$ を静的不釣り合い量比と呼んで用いている。表2(a), (b)に軸方向不釣り合い工作物の静的不釣り合い量比 $\nu \cdot \kappa$ を、表3(a), (b)に2方向不釣り合い工作物の静的不釣り合い量比 $\nu \cdot \kappa$ を示す。表中 κ の後の符号+, -は, +の場合転落に対する、旋回中心から研削部重心までの距離 l_u に対する旋回中心から不釣り合い量部の重心までの距離 l_w の比を表し, -は揺動に対するこの比を表す。転落と揺動では、旋回中心から研削部重心までの距離 l_u の測定方向が異なるため, +, -の符号により識別している。また後述する式(1), (2)に符号付きの κ 値を代入することにより安定研削条件が計算できる。

研削方法は、工作物(a), (c)に対してはインフィード心なし研削(リード角 $\eta=0.5^\circ$)を採用し、研削代は直径で約60 μmである。このときの研削サイクル線図を図2に示す。工作物(b)に対しては、1回当たり直径で約10 μmの研削代で、3回のスルーフィード心なし研削($\eta=1.5^\circ$)により、約30 μm研削している。なお本研究の実験データは、5個の工作物の平均値である。

3. 実験結果とその考察

上記条件による実験結果を以下にまとめる。

(1) 軸方向不釣り合い工作物

軸方向のみに不釣り合い量を持つ工作物(a)をインフィード心なし研削したときの真円度を図3に示す。軸方向の不釣り合い量は真円度に影響を与えていない。

研削幅を短くし静的不釣り合い量比 $\nu \cdot \kappa$ を大きくし

Fig.1 Geometric shape of workpieces used for the experiment

Table 2(a) Unbalance ratio of the axially unbalanced workpiece

l_1 (mm)	W_u (g)	l_u (mm)	ν	κ	$\nu \cdot \kappa$
2	5.44	1	0.15	0.06	0.01
4	11.94	2	0.34	0.11	0.04
8	23.87	4	0.68	0.23	0.16

Table 2(b) Unbalance ratio of the axially unbalanced workpiece shorten grinding width

l_1 (mm)	W_u (g)	l_u (mm)	ν	κ	$\nu \cdot \kappa$
2	13.8	7.67	0.57	0.52	0.29
4	20.3	6.99	0.83	0.61	0.50
8	32.2	11.3	1.32	0.76	0.99

た工作物(b)の場合、真円度は静的不釣り合い量比に比例して劣化するが、それほど顕著ではない。

静的不釣り合い量比 $\nu \cdot \kappa$ が1以上では、工作物が不釣り合い側へ転んで研削不可となる。

Table 3(a) Unbalance ratio of the radially unbalanced workpiece

NO	l_2 (mm)	W_u (g)	e (mm)	ν	k_+	$\nu \cdot k_+$	k_-	$\nu \cdot k_-$
C_{a1}	25	15.1	1.64	0.43	0.12	0.05	2.12	0.91
C_{a2}	30	17.5	3.81	0.50	0.13	0.06	2.12	1.06
C_{a3}	35	20.0	6.06	0.57	0.13	0.07	2.13	1.21

Table 3(b) Unbalance ratio of the radially unbalanced workpiece shorten grinding width

NO	l_2 (mm)	W_u (g)	e (mm)	ν	k_+	$\nu \cdot k_+$	k_-	$\nu \cdot k_-$
C_{b1}	25	23.4	1.06	0.96	0.63	0.60	3.20	3.07
C_{b2}	30	25.9	2.58	1.06	0.64	0.68	3.22	3.41
C_{b3}	35	28.4	4.27	1.16	0.66	0.76	3.24	3.75

Fig. 2 Grinding cycle for plunge cut

(2) 半径方向不釣合い工作物

半径方向に不釣合い量を有する工作物(b)をスルーフィード心なし研削したときの、偏心量及び回転速度の真円度への影響を図4に示す。この図より、偏心の大きい工作物において、ある回転速度以降において真円度が劣化していることが分かる。なお、真円度の測定点は工作物の送り方向に対し後端側である。

ところで、工作物は回転により、不釣合い量による遠心力が発生するが、この大きさを表す指標として、ここでは、工作物重量に対する遠心力の比($e\omega_z^2/g$)を動的な不釣合い量比と呼んで用いることにする。ここで e は工作物重心の回転中心からの偏心量、 ω_z は工作物回転の角速度、 g は重力加速度である。

図5は、図4の真円度の実験結果を、動的な不釣合い量比を横軸にとってプロットしたものである。動的な不釣合い量比が約1を越えるまでは真円度は一定であるが、この値を超えると、動的な不釣合い量比に比例して真円度が劣化している。この値は、前報¹⁾で解析した

Fig. 3 Influence of axially unbalanced weight on roundness

Fig. 4 Influence of radially unbalanced weight on roundness

Fig. 5 Influence of dynamic unbalance ratio on roundness

半径方向の不釣合い量を持つ工作物の研削状態の安定限界にほぼ等しい。

図6に、偏心量1.2、及び2.4mmの工作物の安定限界

Fig. 6 Typical upward movement and roundness profile of radially unbalanced workpiece

Fig. 7 Measuring method of upward movement of workpiece

を越えた工作物回転数で研削したときの、先端側、中央、後端側の真円度形状の測定例、及びスルーフィード心なし研削中の工作物の揺動振幅を示す。工作物の揺動振幅は、図7に示すように、研削砥石と調整車に挟まれた工作物の通し送り通路のほぼ中央部上方に渦電流型の変位計を設置し、その下を研削時に通過する工作物の上方への移動量を測定している。

図6より偏心量が大きくなるに従って工作物揺動が大きくなり、真円度が劣化していることが分かる。また真円度の図より、偏心量1.2mmの工作物において、自励びり振動によると思われる先端側と後端側で逆位相の高次のうねりが、円周上に2度生じ、中央部には発生していないことがわかる。これは中央部を支点として、先端と後端が逆方向の揺動をしていることを意味する。このことは、揺動の測定例において1回転に2度の振幅約30 μmの揺動が観られることから分

Fig. 8 Relationship between moving height and roundness

かる。偏心量が2.4mmと大きな工作物の場合、1回転に1度振幅約100~150 μmの激しい揺動が発生しており、そして工作物の一端において大きな食い込みがあり工作物後端側の真円度が大きく害されている。

通常、渦電流型変位計では被測定物の円周方向の電磁気的特性が不均一であるため電氣的偏心があり、変位の測定値に誤差を生ずる。本実験に用いた工作物の場合、変位振幅に換算して約5~10 μmの偏心量に相当する電氣的偏心が認められたが、揺動の測定値に比較し小さく、測定値の誤差は小さいと思われる。

工作物揺動高さとの真円度の関係を図8に示す。この図より、工作物揺動高さが高くなるに従って真円度が劣化していることが分かる。また同図に揺動高さの最大値Δhによる切込み量の変動量Δr_wを計算値として示す。ここでγは心高角である。実験値は計算値より良くなっているが、これは計算値は工作物が調整車接線方向に上昇したとして、切込み量の変動の最大値を求めているが、実際の研削では切込み量の変動はこの値以下になっているためと考えられる。

(3) 2方向不釣合い工作物

前報¹⁾において、図1(c)に示す軸方向及び半径方向の2方向に不釣合い量を持つ工作物は、転落と揺動の2つの不安定状態が存在し、それぞれの不安定研削状態に対する絶対安定な条件は、

$$v \cdot |k| \cdot \frac{e \omega_r^2}{g} < \frac{(\cos \beta + \mu_r \sin \beta) \cdot (1 - v \cdot k)}{\sqrt{1 + \mu_r^2}} \quad (1)$$

であることを示したが、工作物回転速度 $n_w (= \omega_r / 2\pi)$ で表すと、

$$n_w \leq 15.76 \sqrt{\frac{(\cos \beta + \mu_r \sin \beta) \cdot (1 - v \cdot k)}{\sqrt{1 + \mu_r^2}} \cdot \frac{1}{v \cdot |k|} \cdot \frac{1}{e}} \quad (2)$$

となる。

ここで、βは研削砥石中心と調整車中心を結んだ線と工作物中心と調整車中心を結んだ線のなす角、μ_rは

Fig.9 Criteria of stable workpiece rotational speed for falling down of workpiece

工作物と調整車間の静止摩擦係数である。

上式(2)は、2方向不釣合い量工作物の転落または揺動のない安定な研削状態である工作物回転速度を示す。

本実験条件における実験条件 $\beta = 4.6^\circ$, $\mu_r = 0.4$ のときの偏心量 e に対し、転落及び揺動に対する安定限界の工作物回転速度 n_w の計算値をそれぞれ図9, 10に示す。表4は、表3に示す工作物の安定限界の回転速度をこれらの図より求めた値である。この表より、研削幅の長いC₂タイプの工作物では転落よりも揺動に対する安定限界の工作物回転速度が低く、研削幅を狭くし、静的不釣合い量比を大きくしたC₃タイプでは、逆に揺動よりも転落に対する安定限界の工作物回転速度が小さくなっていることが分かる。

上記工作物を安定限界の最小回転速度 $n_w = 4.3 \text{ rev/s}$ で心なしインフィード研削した場合の、不釣合い量比積 $(\nu \cdot |\kappa| \cdot e \omega_z^2 / g)$ と真円度の関係を図11に示す。(1)項と同様に研削の安定領域内では不釣合い量による真円度の劣化はそれほど大きくないことが分かる。

また図12にC₂₂タイプの工作物を心無し研削したと

Fig.10 Criteria of stable workpiece rotational speed for upward movement of workpiece

きのインフィードの切り込み速度、及び工作物回転速度の真円度への影響を示す。このときの揺動に対する安定限界の工作物回転速度は12rev/sである。この図より、軽研削及び重研削とも安定限界をわずかに越えた13.2rev/sまでは、真円度にそれ程大きな劣化はないが、安定限界の工作物回転速度を大きく越えた17.6rev/sでは切り込み速度が小さい軽研削の方が、高速回転で真円度の劣化が大きくなっている。これは、前報¹⁾で述べたように、工作物重量に対する研削力の法線分力の比 G_n/W_w が大きくなると、不安定研削状態になる限界の動的な不釣合い量比 $(e \omega_z^2 / g)$ が大きくなり、より高速の工作物回転速度まで安定になることによる。本実験に採用したC₂₂タイプ ($\nu \cdot |\kappa| = 1.06$) の場合、軽研削の工作物重量に対する研削力の法線分力の比を $G_n/W_w = 0.1 \sim 0.5$ とすると、安定限界の動的な不釣合い量比は約1.8~1.9となり、工作物回転速度13.2rev/sは安定限界であるが、17.6rev/sは不安定領域になる。また重研削では $G_n/W_w = 1 \sim 5$ とすると安定限界の動的な不釣合い量比は約2~3となり、上記実験条件の工作物回転速度は安定限界内になる。すなわ

Table 4 Critical workpiece rotational speed n_w

Workpiece No.	Ca ₁	Ca ₂	Ca ₃	Cb ₁	Cb ₂	Cb ₃
Falling down	49	31	22	12	6.5	4.3
Upward move	17	12	8.6	16	11	8.5

(Unit; rev/s)

Fig. 11 Influence of multiplication of static and dynamic unbalance ratios on roundness

ち、研削力が大きいほどより強く工作物を保持し、大きな遠心力で揺動し難いことを意味する。重研削においてもスパークアウト時には切込み量が減少して軽研削になり、工作物の把持力が減少し工作物の揺動が発生し真円度の劣化が生ずる。しかし、この領域では切込み量がほとんど0に近いので、真円度の劣化が小さく、絶対安定研削条件で研削した工作物の真円度に比べ2～2.5倍の真円度劣化に抑えられていると考えられる。

4. 結 言

軸方向、半径方向、及び2方向に不釣合い量を有する3種類の工作物を心なし研削実験した結果を以下に要約する。

(1) 軸方向不釣合い工作物の場合、静的不釣合い量比(研削部の不釣合い量側の一端を中心とする不釣合い量部の旋回モーメントと、研削部のそれとの比)が1未満では不釣合い量が増大するに従い加工精度が徐々に劣化するが、それほど顕著ではない。

静的不釣合い量比が1を越えると工作物が不釣合い側へ転落して研削不可となる。

(2) 半径方向不釣合い工作物の場合、工作物回転速度が高くなり、動的不釣合い量比(遠心力の工作物重量に対する比)が増大し、安定限界($e\omega_z^2/g=1$)を超えると、不安定研削状態になって、工作物の揺動が発生し、加工精度が劣化する。工作物揺動高さは

Fig. 12 Influence of workpiece rotational speed on roundness

動的不釣合い量比が大きいほど高くなり、真円度の劣化も著しい。これは解析結果と良い対応を示す。

(3) 半径方向及び軸方向の2方向不釣合い工作物の場合、転落と揺動の2つの不安定研削状態が存在し、それぞれの安定限界の工作物回転速度は異なるが、どちらの不安定状態の安定限界の工作物回転速度が、より低いかは工作物形状による。

揺動に対する安定限界の工作物回転速度が低いものの、転落に対する安定限界の工作物回転速度が低いものの2種類の工作物について心なし研削実験している。その結果、転落に対しては、安定限界以内であれば、不釣合い量の真円度へ与える影響は小さい。また揺動に対しては、安定限界を若干越えるような工作物回転速度でも、真円度はそれほど大きく劣化しないが、安定限界の工作物回転速度を大きく越えると、軽研削の場合には不安定研削状態になり真円度が劣化する。このことも解析結果と対応している。

実験にはミクロン精密(株)の心なし研削盤を借用させて頂いた。ここに深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 高巢周平, 榊田正美; 心なし研削における不釣合い量の真円度に及ぼす影響(第1報), 精密工学会誌, 54, 9 (1992) 1575