心無し研削法に関する研究 (第 4 報)

— ひずみ量と工作条件 —

小 川 正 義* 宮 下 政 和**

On Centerless Grinding (IV)

Masayoshi OGAWA, Masakazu MIYASHITA

The most interesting thing in the working of centerless grinding is the amount of the out-of-roundness of the work. From this point of view, the influences of the factors of the top angle of blade, the dimensions of the work and so on are discussed in this paper, the influence of the center-height of the work being treated already as the first factor in the preceeding papers. The differences between the out-of-roundness proper to the center-height in light-cut studied in the preceeding papers and the "chatter mark" are also discussed. Further, the damping ratio analyzed in the 2 nd paper is modified by the "grinding residue" and is compared with some experimental results.

前報¹⁾では、心高に固有なひずみ円形状及びひずみ量の最も少ない最適支持高さに関する実験結果について検討したが、工作の際直接問題になるのはひずみ量自体の大きさであるから、前報¹⁾で取り上げた第1要素である工作物の支持高さに引き続き、本報ではブレード頂角、工作物の直径などの要素の影響を論ずるとともに、いわゆる“びびれ研削”と、従来取り扱って来た軽研削におけるひずみ量との差異についても触れる。また第2報²⁾で取り上げたひずみ円の減衰率に、切り残しによる修正を加え、これと実際のひずみ量の変化との対応についても実験的に考察した。

1. ブレード頂角のひずみ量に及ぼす影響に関する 実験結果並びに考察

ブレード頂角がひずみ量に及ぼす影響を、頂角 15° な

図 1 真円度ひずみ量と心高 (γ), ブレード頂角

* 東京大学生産技術研究所 正会員

** 元 同 上 正会員

いし 60° の間で実験した。この結果を図 1 に示す。

奇数角のひずみ円に注目すると、明らかにブレード頂角が大きくなる程、3角ひずみ円のひずみ量は減少する傾向を示している。この具体例を図 2 に示す。また、3

図 2 ブレード頂角と奇数角ひずみ円

角ひずみ円が残留すると認められる最高心高を各種頂角について求めた結果を図 3 に示す。ここでも、3角ひずみ円が残留する最高心高は、ブレード頂角が大きいく程、低くなっている。この間の事情は第1報³⁾の解析で考察

図 3 3角ひずみが残る最高心高(r)とブレード頂角した奇数角ひずみ円の発生機構で十分説明することができる。事実、実験中に観察して、ブレード頂角が 15° ないし 30° の場合は、心高が低いとスパークिंगアウトで火花が断続し、品物の回転が円滑でないが、頂角が 45° を越えると同じ心高でも品物が円滑に回転し、火花が極めて微弱になつても回転を続けることが見られた。

一方、偶数角ひずみ円は、その発生領域が $r > 7^\circ$ であるため、奇数角ひずみ円と異なり、ブレード頂角やその配置がひずみ円減衰率に直接影響を与えることは第2報²⁾の解析から明らかであるが、この点に関しては後述する。ここでは、図4に示すように、ブレード頂角

図 4 ブレード頂角と偶数角歪円

15° , 30° , 45° の夫々の場合について差異があまり認められないことを示すに止める。

2. 工作物の大きさと真円度に関する実験結果並びに考察

工作物の質量および慣性モーメントの真円度に及ぼす

影響を調べるために、直径がそれぞれ 9 mm, 14 mm, 20 mm で長さ 30 mm の工作物について、ブレード頂角 30° 、心高 3 mm ないし 15 mm の範囲でひずみ量を求めたのが図5である。

図 5 工作物の寸法と真円度

奇数角ひずみ円に注目すると、明らかに径の小さいもの程 3角ひずみ円が顕著に現われており、径が大きくなる程ひずみ振幅は小さくなっている。この傾向は心高が低い程著しい。このような関係は、前節で述べたブレード頂角の影響と全く類似している。3角ひずみ円の発生機構から考えて工作物の外径が大きくなつて慣性モーメントが増大することは丁度ブレード頂角が増加したのと同じ働きを持ち、その結果工作物が研削砥石から離れて再び砥石に接する間、より一様な速度で回転が継続され易いことになる。このように、ブレード頂角の場合と全く同じ理由により、3角ひずみ円の発生が押えらる。

次に偶数角ひずみ円について考察すると、心高が 10 mm ないし 12 mm ($r \approx 7^\circ \sim 8^\circ$) の間では特別の差異は認められないが、心高 15 mm ($r = 10.7^\circ$) では、直径 9 mm のものが明らかに他の 2 者に較べてひずみ量が大きくなっている。これは、前報²⁾の 2, 3 で述べたように、ひずみ角数の増加に対応して工作物質量の振動するエネルギーが顕著になり、支持体を剛体とする前提が満足されなくなる一方、角数の多いひずみ円振幅が小さな値に押えられるということを考えると当然のことといえよう。

最適支持高さについては、1. で述べたことが全くそのまま当てはまる。すなわち、偶数角ひずみ円のひずみ量は r が 7° 近くで最小値に達し、それ以下では工作機械の機械的ノイズの中にかくれてしまい、他方奇数角ひずみ円の現われ始める最高心高は、工作物のもつ慣性モーメントが大きい程低い方に移行する。したがって、ひずみ量が最小になる最適支持高さは、工作物の慣性モーメントが大きい程、 r の値で 7° から低い方にその幅が広がってゆくといえよう。

3. 取り代と真円度に関する実験結果並びに考察

取り代の大小による真円度の差異，すなわちひずみ振幅の定常性を調べるために，実際上の工作条件を考慮して 20μ ないし 120μ の間で取り代を変えて実験した。この場合，砥石の切り込み深さ，もしくは取り代に応じた加工時間が当然問題になるが——この点については 5. で述べる——，これまでの解析の前提条件をできるだけ完全に満足させるという意味で十分の時間をかけた。このため，後述するように取り代が比較的大きい程比率としての加工時間を長くとる必要があつた。詳しくはびびれに関する項で触れることにする。このようにして得られた結果を図 6 に示す。3 角ひずみ円，偶数角ひずみ円

図 6 直径取り代とひずみ量

の発生領域および最適支持高さの領域をそれぞれ代表する心高について実験したが，いずれの場合も取り代の大小はひずみ量と無関係であることが判つた。

上述の実験に用いた工作物の前加工の真円度は， 90°V ブロックで測つて 10μ 以下であるが，上記の工作条件の下で少なくとも直径取り代 20μ を研削すると，固有ひずみ円に定常的に落着くことを示している。このことは，ひずみ円の減衰率が実質的に 1 に等しいことを示している。この点は，固有ひずみ円という概念の中に，同一工作条件の下でひずみ円の振幅そのものも定常的固有値を持つという意味を含めてよいことを示す。なおひずみ円の減衰率に関しては，第 2 報²⁾で幾何学的条件から種々解析したが，更に実験的に 6. で詳述する。

4. 送り砥石の周速と真円度に関する実験結果並びに考察

送り砥石の周速と真円度の関係を，偶数角ひずみ円，奇数角ひずみ円および最適支持高さ近傍のそれぞれの領域を代表する心高について実験的に求めた。この結果を図 7 に示す。いずれの場合もこの実験程度の範囲内では，

図 7 送り砥石の周速とひずみ量

送り砥石の周速は殆んど真円度に影響しないものと思われる。

心無し研削加工の幾何学的成円作用という点から考えると，第 1 報³⁾で述べた意味でのスパーキングアウトの状態が実質的に発生し，固有ひずみ円以外のひずみ成分は加工の初期に消滅し，定常的には固有ひずみ円が保持されながら研削が進行してゆくものと考えられる。この際，過渡の状態から定常形状に落着くまでの時間は，工作物の周速が速い程短縮されると考えられるが，定常状態ではもはや関係がない。ただ，ひずみ量の大きさに注目すると，偶数角ひずみ円のひずみ振幅は前報¹⁾の理由から，工作物の加工中の振動エネルギーは工作物の周速が速くなる程増大して心無し研削盤構成要素の剛性が相対的に低下し，ひずみ量が減少する筈であるが，当実験ではこの傾向は顕著でない。3 角ひずみ円についても回転運動エネルギーが増大するとひずみ量が減少する筈であるが，これも顕著でない。最適支持高さの領域では，すでに十分ひずみ量が小さくなっているから当然周速と無関係に一定である。また，前述のように送り砥石の周速を種々変えても固有ひずみ円形状は変化しないが，もしこれが工作物支持体の振動に起因するものであれば当然ひずみ円形状が変わる筈であり，この面からも固有ひずみ円が幾何学的配置に起因するものであることが判る。

以上は幾何学的立場からの考察であるが，工作物の周速を限定する実際の配慮としては，むしろ支持体の剛性の面を考えるのが妥当である。すなわち，周速が大になると送り速度が一定でも実効的切り込み深さが大きくなつて研削力が増大し，びびれ発生の危険が増大する。したがって，砥石が工作物に対して何等かの不規則な切り込み増加を起こした場合，ブレードに急激な過大な曲げモーメントが加わり，ブレードの振動を誘発してびびれ現象を起こし，極端な場合はブレード頂面の振動的変位で工作物を外部にはね飛ばしてしまう危険を伴うこともある。図 7 で，送り砥石の周速が大になつても真円度が必ずしも向上しないのは上記のような原因も含まれてい

るのではないかと考えられる。

5. 送り込み速度と真円度に関する実験結果並びに考察——臨界送り込み速度

これまでの実験結果は、すべて心無し研削盤の各構成要素を剛体と見なしてよい程研削力の小さな工作条件の下で行なったものである。このような制約の下では、第1, 2報²⁾で取り扱った解析結果は実験結果とよく一致した。ここは、このような前提が実験に用いた機械についてどこで満たされなくなるかという臨界的工作条件を求めるため、各種の送り込み速度の下で得られた工作物の真円度を記録した。その1例が図8である。

図8 送り込み速度と真円度

この結果から、送り込み速度がある値以下ではひずみ量は送り込み速度の大小と無関係に一定であるが、この値を越えると研削力が増加しひずみ量が急激に増大することが判る。上記の実験結果は、心高15.5mm、ブレード頂角18.5°の場合であるが、その他の工作条件の下でも同様に上述のような現象がみられる。このように、送り込み速度をある値以下に取りさえすればひずみ量は一定になり、固有ひずみ円になるが、これを超えるとびびれひずみ円となつてひずみ量が急激に増大する。この1例を図9に示す。

上述のように、ひずみ量が急激に増加し始める送り込み速度を臨界送り込み速度と名付ける。このような臨界送り込み速度は、ブレードの剛性、頂角、心高および工作物の周速により大きく変化する。一般的に、研削砥石の切れ味、工作物の研削部分の大きさ、幾何学的配置および心無し研削盤の各構成要素の剛性等に関係するものと思われる。このような点に関しては、びびれに関する項目で改めて取り扱うことにする。ここでは、臨界送り込み速度を境にして、固有ひずみ円を形成する領域と、びびれを発生する領域とに明確に2分されることを指摘

図9 固有ひずみ円とびびれひずみ円

するに止める。

6. ひずみ円の減衰率に関する実験結果並びに考察

第2報²⁾では、研削の際の“切り残し”を無視してひずみ円の減衰率 λ を導いたが、切り残し率 κ を考慮するとひずみ円の減衰率 λ_0 は次式で示される(付記参照)。

$$\lambda_0 = \frac{1}{1 - (1 - \kappa) t_{\min}}$$

または

$$= \frac{\lambda}{\lambda - (1 - \kappa)(\lambda - 1)}$$

このような関係にある減衰率について、それぞれその最大値、最小値に対応する工作条件の下でひずみ量を実験的に求めた。いま、切り残しを零としたときの減衰率について考えると、図10において、 $p_1=1$, $p_2=3$ のと

図10 心無し研削の関係位置

き λ が最大値 $\lambda_{\max}$ になるのは第2報²⁾における解析結果によれば、10, 16, 22角等である。ここでは、実験例として $\gamma=11.5^\circ$ 、ブレード頂角 $\theta=29.5^\circ$ 、 $n_0=16$ の場合を選んだ。

このとき, $\lambda_{\max}=1/0.69$

他方, 減衰率 λ が最小値 $\lambda_{\min}$ になるのは, p_1 が偶数のときで, たとえば, $p_1=2$, $p_2=5$ のとき, $n_e=16$ のひずみ円減衰率は $\lambda_{\min}=1/1.11$

このときのブレード頂角は 18.5° で, 心高は同じく $r=11.5^\circ$ である。図 11 に, 上述の数値例に対応する工作

図 11 工作物ひずみ量と減衰率

条件を含む種々のブレード頂角についての実験結果を示す。このひずみ量は, λ の計算値の大小に無関係に, $r=11.5^\circ$ の心高に固有なひずみ円であることを示すに過ぎず, 減衰率の実験値は 1 に等しいと考えて差し支えない。

いま, 上述の $\lambda_{\max}$ および $\lambda_{\min}$ について, 切り残し率を考慮した減衰率 λ_0 を前述の式につき計算すると,

$$\lambda_{0\max}=1.06$$

$$\lambda_{0\min}=0.98 \quad (\text{ただし, } \kappa=0.8 \text{ とする。})$$

となり, いずれの場合も極めて 1 に近い値となる。その他のブレード頂角のときは, 当然上記の値の中間の値をとり, 殆んど 1 に等しくなるものと考えられる。

また前報りの 2, 3 で考察したように, 工作物は回転中その幾何学的拘束の中で, 固有ひずみ円の角数およびひずみ振幅に応じて振動するが, これに対してブレード頂面及び送り砥石軸がひずみ振幅の僅か数%でも変位するものと仮定すると, 上述の減衰率 λ_0 の値は最大値, 最小値ともに事実上 1 に等しくなるものと考えて差し支えないであろう。このような理由から, 1. で指摘したように偶数角ひずみ円はブレード頂角の大小に無関係に一定であるという実験結果がえられたものと思われる。

以上から, 固有ひずみ円のひずみ量の減衰率は 1 に等しく, 従つて固有ひずみ円は定常的形状であるということになる。

7. 結 論

(1) 3 角ひずみ円のひずみ量は, ブレード頂角又は工作物の慣性モーメントが増加すると減少する傾向があ

る。

(2) 偶数角ひずみ円のひずみ量は, 工作物の質量が増加すると, 減少する傾向がある。

(3) 最適支持高さは

(i) ブレード頂角が大きいき

(ii) 工作物の慣性モーメントが大きいき

$r \approx 7^\circ$ よりも小さい心高の方に, その幅がのびる。

(4) 固有ひずみ円のひずみ量は, 取り代の大小に無関係である。

(5) 送り砥石の周速 $20 \sim 28 \text{ m/min}$ の範囲では, 固有ひずみ円のひずみ量は殆んどその周速に影響されない。

(6) 固有ひずみ円は, 臨界送り込み速度以内では常に成立する。従つて送り込み速度に無関係にひずみ量は一定である。

(7) 固有ひずみ円は定常的形状で, そのひずみ量は減衰も増加もしない。

付 記

ひずみ円の減衰率に関しては, 既に第 2 報²⁾で解析したが, この場合, 研削加工に伴ういわゆる“切り残し”がないものと仮定した。ここでは, このような“切り残し”を考慮に入れた場合の減衰率を求める。

このときの心無し加工による工作物の変形過程は次式で示される。

$$r(\varphi-2\pi)-(1-\kappa)[r(\varphi-2\pi)-\epsilon' r(\varphi-\varphi_1)+(1-\epsilon)r(\varphi-\varphi_2)]=r(\varphi) \quad (1)$$

ここで, $\varphi_1=\pi/2-\theta-\beta$, $\varphi_2=\pi-\gamma$, κ =切り残し率,

$$\epsilon'=\sin(\alpha+\beta)/\cos(\theta-\alpha), \quad 1-\epsilon=\cos(\theta+\beta)/\cos(\theta-\alpha)$$

すなわち, $\varphi=\varphi$ のときの切り込み深さは, 1 回転前のひずみ量 $r(\varphi-2\pi)$ およびブレード, 送り砥石にそれぞれ接する点における工作物のひずみ量 $r(\varphi-\varphi_1)$, $r(\varphi-\varphi_2)$ で決まり,

$$(\text{切り込み深さ})=r(\varphi-2\pi)-\epsilon' r(\varphi-\varphi_1)+(1-\epsilon)r(\varphi-\varphi_2)$$

となる。したがつて, (切り込み深さ) $\times (1-\kappa)$ だけ変形して (1) 式が得られる。

一方, 第 2 報²⁾で論じた (1.2) 式, すなわち,

$$r(\varphi)+(1-\epsilon)r(\varphi-p_2\rho)-\epsilon' r(\varphi-p_1\rho)=t_{\min} r(\varphi) \quad (2)$$

ここで, $p_1\rho=\varphi_1$, $p_2\rho=\varphi_2$, $t_{\min}=(V \text{ ブロックによるひずみ量拡大率の最小値})$

を (1) に代入して整理すると,

$$r(\varphi)/r(\varphi-2\pi)=1-(1-\kappa)t_{\min} \quad (3)$$

すなわち, 工作物 1 回転当たりのひずみ量の減衰率 λ_0 は

$$\lambda_0 = 1/[1 - (1 - \kappa) t_{\min}] \quad (4)$$

または,

$$\lambda_0 = \lambda/[\lambda - (1 - \kappa)(\lambda - 1)] \quad (5)$$

ただし, λ は“切り残し”がないとしたときのひずみ量の減衰率である。(1961, 2月21日受付)

註

- 1) 小川, 宮下: 精密機械, Vol. 26, No. 3.
- 2) 小川, 宮下: 精密機械, Vol. 24, No. 6.
- 3) 小川, 宮下: 精密機械, Vol. 24, No. 2.