

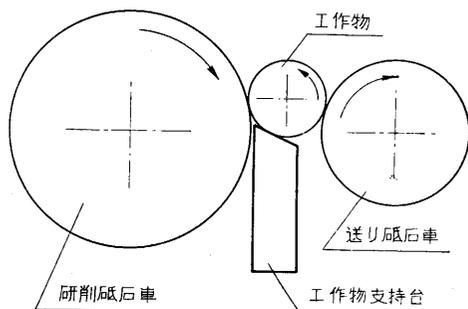
# 心無研削法について

小川 正義・宮下 政和

## 1. 心無研削法

円筒形部品の円筒面を所定の寸法、精度、表面粗さに加工するには、両端面にセンタ孔を作り、これを支持に使うのが普通なのであるが、センタ孔によらず工作物の円筒面そのものを規準として研究する方法を心無研削法という。このような工作機械が心無研削盤で、そのほかにも同種の方式によるものにマイクロセントリック (Microcentric, Cincinnati 社)・心無内径研削盤・心無超仕上げ盤・心無ラップ盤などがある。ここでは心無研削盤についてのみ述べる。

心無研削盤の特長は研削砥石車 (grinding wheel)・送り砥石車 (control Wh.) および工作物支持台 (work rest blade) の3要素の配置にある。これには、メーカーにより数多くの組合せがあるが、基本的関係位置は同じで第1図に示す通りである。

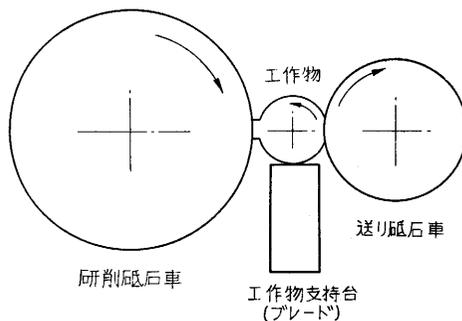


第1図 3要素の配置

研削砥石車は、研削を行うばかりでなく、その研削力により他の2要素と共に工作物を保持・回転させる作用を分担する。これはセンタ支持方式のときの主軸の回転力に対応する。送り砥石車は、工作物の回転に対して摩擦車としての働きを持つ。すなわち、研削力による工作物の速かな回転を摩擦力で受け止め、送り砥石車の周速で工作物を回転する。したがって、送り砥石車は必ずしも砥石である必要はなく、たとえば円錐ころ軸受の円錐ころの外径を研削するとき、砥石の代りに铸铁製のホイールを使用することがある。要は、工作物が送り砥石車に対して滑りを起さないことである。最後に工作物支持台であるが、これは文字通り工作物を送り砥石車と共に保持する役割を持ち、その意味で十分な剛性を持たなければならないが、後述の如くその頂角 (top angle)

の大きさと工作物を支持する高さは、心無研削盤が持ついわゆる“成円作用” (rounding action) すなわち真円でない断面の工作物を加工により幾何学的円に一層近づける働きに影響を持つ。

以上のような3要素の協同の働きにより、工作物断面をできる限り幾何学的な円に近づけるのが心無研削盤の目的であるが、この成円作用の簡単な場合を考察してみる。今最も単純な例として、工作物の中心が研削砥石車と送り砥石車の両中心を結ぶ線上にあり、ブレード (以下工作物支持台を単にブレードと呼ぶ) の頂面の傾き角 (単に頂角) が零のときを考える (第2図)。工作物上



第2図 工作物が両砥石車の中心線上にあり、ブレード頂角が零のときの垂円の発生機構

のある凹部が送り砥石車に接したとき、これに対応して同じ大きさの凸部が研削砥石により新たに作られる。このとき工作物の直径は常に、両砥石車の中心線上の間隙に等しい。こうして直径が一定で、しかも円でない形状が作られる。これを誇張して画いた例を第3図に示す。

これと同じ現象は2枚刃ドリルの孔明け作業のときにも生ずる。一般に工作物の断面の形状を、適当な仮想中心を原点としてフーリエ級数で表わすには、以上の関係を

$$r(\varphi) + r(\varphi + \pi) = 2a_0 (= \text{直径})$$

第3図 第2図の配置で作られる工作物の極端な断面形状

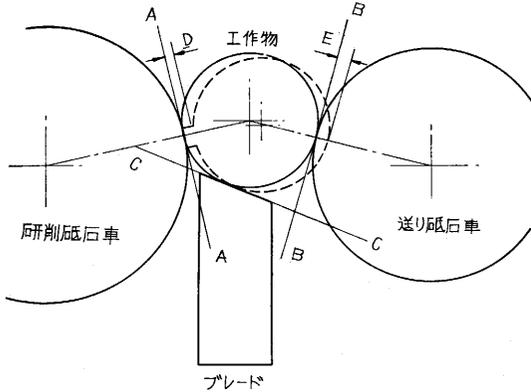
$$r(\varphi) = a_0 + \sum_{n=0}^{\infty} a_{2n+1} \cos\{(2n+1)\varphi + \delta_{2n+1}\}$$

この場合、偶数成分の歪に対しては成円作用を持つが、

奇数成分の歪に対しては持たない。

工作物の中心高さを上げていくと、これらの凹凸は同一直径上になくなり、加工された工作物断面の形状は、上式のように単純に奇数成分の歪を持つのではなく、さらに複雑になるが、これの数式的扱いは後述する。結論をいえば、残留する歪成分はさらに限定され、成円作用は向上することになる。

さらに成円作用を向上するには、ブレードに頂角を付け、かつ工作物の中心高さを上げる（第 4 図）。直線 A-



第 4 図 成円作用の機構

A, B-B はそれぞれ工作物と研削砥石車・送り砥石車との切点に引いた切線で、直線 C-C はブレード頂面を延長したものである。もし工作面上の大きさの凹部が送り砥石車に接すると、これに対応した位置に大きさ D の凸部が研削砥石により作られる。簡単のため、工作物のブレードと接する部分には凹凸がないものと仮定すると、常に  $D < E$  で、この関係は工作物の中心高さ・ブレード頂面の傾斜が大なるほど著しい。こうして、研削砥石は、だんだんとより小さな凹凸を作ることになり、工作物は幾何学的円に近づくことになる<sup>(9)</sup>。しかし、工作物のブレードに接する部分の凹凸と、送り砥石車に接する部分の凹凸との函数関係を考慮すると、成円作用は上記の如く簡単ではない。いずれにしても、成円作用を左右する幾何学的因子として、工作物の中心高さとブレード頂角の大きさが重要なのである。

## 2. 工作物の送り方式

代表的な送り方式としては次の二つがあり、工作物の形状および加工数量等に応じて適用する。

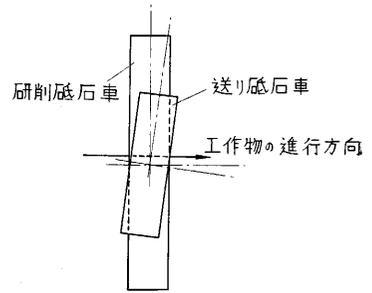
(i) 通し送り方式 (through-feed method)

(ii) 送り込み方式 (infeed method)

通し送り方式——この方式は、円筒ころやピストンピンのように邪魔になる段等のない円筒形の工作物に一般的に適用される。工作物は文字通り、ブレード上を研削砥石車と送り砥石車との間を通過しながら加工される。工作物は、研削砥石車の回転軸と平行に進むが、これは普通の円筒研削盤のテーブルの縦送りに相当する。

送り砥石軸は、工作物の進行方向に傾斜しているために（第 5 図）、工作物に働く摩擦力の水平成分が軸方向に対する工作物の送り力になる。

したがって、工作物の送り速度は、上述の送り砥石車の傾き角と回転速度に比例する。



この方式によ

ると、研削砥石 第 5 図 工作物の送り力の機構の厚みよりも長い工作物の加工もできる。

送り込み方式——これは、円筒研削盤の場合のプランジカット (plunge cut) 方式に相当する。すなわち、工作物と研削砥石車との間に軸方向の相対的変位を伴わず、研削砥石車の母線がそのまま工作物に移されるから、テーパ付き・たいこ形その他不規則なプロフィールを持つ工作物に適用される。

工作物をストッパーに対して押しつけて軸方向の動きを止めるために、通し送りのときと同様に送り砥石車の軸を前方に傾ける。この傾き角は、通し送りのときよりもわずかでよい。以上を通じて研削砥石車は、普通の研削盤と同様 6,000ft/min の周速、送り砥石車は 40~60ft/min の周速が普通である。

## 3. 心無研削法への応用と利点

1920 年代に始まり、1930 年頃現在のような形式をとるようになった心無研削盤は、本来円筒体の外径研削を目的としたが、最近では急速な進歩を遂げ、断面さえ円形であればかなり不規則なプロフィールを持つ工作物まで加工できるようになった。現在では特殊機械というよりは、一般的工作機械ということができよう。

具体的には、ピストンピン・ピストン・チェーン用ピン・転り軸受の内外輪・円筒ころ等の円筒体ばかりでなく、ジャーナル面付シャフト・頭付ボルト・アマチュアシャフト・円錐ころ・たいこ形ころ等の段付またはテーパその他のプロフィールを持った回転体を加工することができる。以上のほか、普通の円筒研削盤では加工できないもの、たとえば細線、先の尖った部品・ロッド材等のように心立て作業の不可能なものも容易に加工できる。

加工材料については、その他の研削加工のときと同様に各種金属・非金属材料にわたっている。

心無研削盤の第一の利点は、大量生産的工作機械であることで、たとえば外径・高さともに 10mm の円筒ころの外径を研削するとき、毎分 200 個近くも加工ができ、これは、他の研削機械ではとうてい達し得ない能率である。以下その利点を種々の見方から考えてみよう。

1) 無駄時間がほとんど無視できるほど小さい。

適当なホッパーを利用することにより、工作物を自動的に送り込むことができ、1個当りの無駄時間は無視できるほど小さい。しかも、場合によっては1人で同時に何台もの管理ができる。また容易にセットができるから、小量生産にも有利である。

2) 寸法管理が容易である。

同一条件の下で連続的に加工できるために、寸法のばらつきが少なく、抜き取り検査に適しており、しかも機械を止めずに寸法管理ができる。

3) 削り代がわずかでよく、寸法精度が高い。

わずかな削り代で加工でき、しかも寸法調整は半径でなくすべて直径が規準になるから誤差も半分になる。

4) 工作物に無理な力が加わらず、重研削ができる。

工作物は全体にわたって支持されており、しかも研削砥石は、他の研削盤に比べ遙かに大きいために重研削ができる。

5) 機械の精度が高い。

構成要素が極めて少なく、構造が簡単のため、比較的容易に高い精度を出すことができる。しかも、滑動面の移動量がわずかで、摩擦が少ない。

6) 仕上面が良好。

形直し(truing)部分は特に十分な剛性を持ち、形直し速度を十分小さくとることができ、かつ研削砥石が大きいので、仕上面は他の研削加工面に比べ一層良好である。

7) 加工真円度がよい。

加工条件を適切に選ぶと、工作物の真円度を極めてよくすることができる。たとえば、10~15mmの直径の工作物のときは1μ前後になる。この点については後述する。

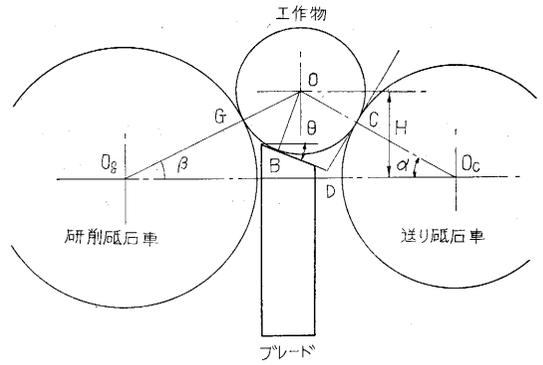
8) 作業が簡単で、未熟練者にも容易に操作できる。

#### 4. 成円作用の解析

これまで心無研削盤の特性を述べたが、最大の特長はこれのもつ成円作用である。前述の3要素で囲まれた工作物のとりうる形状は、必ずしも円形のみでないことが想像されるが、この点を数学的に解析してみよう。

第6図で研削砥石車・送り砥石車および工作物の回転中心をそれぞれ  $O_g$ 、 $O_c$ 、 $O$  とし、工作物と研削砥石車・ブレードおよび送り砥石車との接点を  $G$ 、 $B$ 、 $C$  とする。点  $C$  における送り砥石車の切線を  $CD$ 、これとブレード頂面の延長との交点を  $D$  とする。

今工作物は  $V$  ブロック  $BDC$  で支えられていると考え、点  $G$  で工作面に垂直にダイヤルゲージを当てたとき現われる工作物の歪量を考察しよう。工作物内の適当な1点を原点として、工作物を次のように表わすことができる。



$\theta$  = ブレード頂角,  $H$  = 工作物支持高さ (心高)  
第6図 工作時の関係位置

$$r_i(\varphi) = a_0 + \sum_{n=2}^{\infty} a_n \cos(n\varphi + \delta_n) \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $a_0 \gg a_n$   
上式の第2項が歪量に相当し、これを  $r(\varphi)$  とする。

$$r(\varphi) = \sum_{n=2}^{\infty} a_n \cos(n\varphi + \delta_n) \dots\dots\dots(2)$$

第6図で  $OC$ 、 $OB$ 、 $OG$  方向の歪量をそれぞれ  $r_c$ 、 $r_b$ 、 $r_g$  とすると、ダイヤルゲージに現われる歪量は、

$$t_i(\varphi) = \frac{\cos(\theta + \beta)}{\cos(\theta - \alpha)} \cdot r_c - \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos(\theta - \alpha)} \cdot r_b + r_g \dots\dots\dots(3)$$

ここで

$$\begin{aligned} r_g &= r(\varphi) \\ r_b &= r(\varphi + \pi/2 - \theta - \beta) \\ r_c &= r(\varphi + \pi - \alpha - \beta) \end{aligned}$$

心高が正の場合のみを考えて

$$\begin{aligned} \cos(\theta + \beta) / \cos(\theta - \alpha) &= 1 - \varepsilon \\ \sin(\alpha + \beta) / \cos(\theta - \alpha) &= \varepsilon' \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

ただし、 $0 > \varepsilon$ 、 $\varepsilon' \ll 1$  とおく。

次に歪量の任意の歪成分

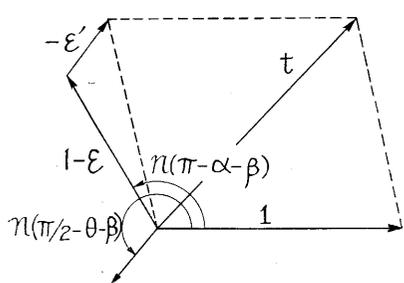
$$r_n(\varphi) = a_n \cos(n\varphi + \delta_n)$$

について、歪量のダイヤルゲージに現われる拡大率  $t = t_n/a_n$  (ただし、 $t_n$  は  $r_n$  に対応する  $t_i$  の成分) を(3)式から求めることができるが、上式の相対的位相  $\delta_n$  は拡大率に関係しないから、 $\delta_n = 0$  とおいてもよい。したがって、

$$\begin{aligned} t(\varphi) &= \cos n\varphi - \varepsilon' \cos\{n\varphi + n(\pi/2 - \theta - \beta)\} \\ &+ (1 - \varepsilon) \cos\{n\varphi + n(\pi - \alpha - \beta)\} \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

(5)式をベクトル表示すると、第7図のようになる。

以上研削砥石の代りにダイヤルゲージをあててその振れを求めたが、実際の加工のときは、ちょうどその“振れ”が工作物への切込みになる。単位量の歪成分に対する切込みを示すものとして(5)式を考えると、第8図で加工点の歪1は、加工により  $t$  だけ切り込まれて  $r'$  に変形するという関係になる。ここで、普通の工作条件では

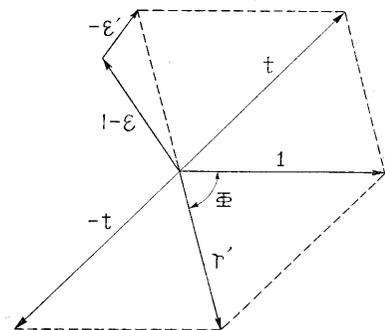


第 7 図 拡大率のベクトル図

$\epsilon'$  は極めて小さいので、 $|r'| \approx 1$  と考えることができる。この点を考慮すると、上述の関係は加工により位相

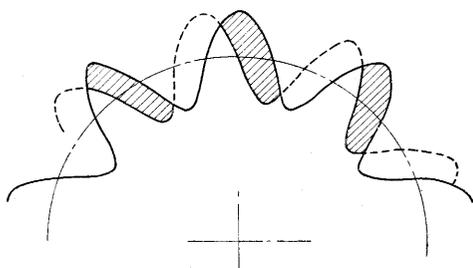
のみが  $\theta$  だけずれるものと考えられることができる。

この現象をスパークアウトの場合に適用してみよう。すなわち、この状態



第 8 図 拡大率と切込み変化率の関係

では研削砥石の工作物への送りが零で、工作物の回転と共に切込みの位相が工作物の位相に対して次々とずれてゆくから、研削砥石車が工作物に切込んだり離れたりしながら、歪が消滅してゆく (第 9 図)。このようにして、 $\theta = 0$  の



第 9 図 スパークアウトで  $\theta \approx 0$  のときの歪円の消滅過程

条件を満たす歪成分は残るが、その他の成分はすべて除去される。工作物が研削砥石車と常に離れることなく研削が進行しているとき、その切込みの変化量は、工作物の歪の位相と切込みの位相が一致しているときに最も小さい。したがって、 $\theta = 0$  の条件は、(5)式で拡大率  $t$  が最小値を取ることにほかならない。

今簡単のために  $\epsilon' \approx 0$  とおくと、第 10 図から

$$t^2 = 1 + (1 - \epsilon)^2 - 2(1 - \epsilon) \cos \theta \dots\dots\dots (6)$$

$$\theta = (2i + 1)\pi - n(\pi - \gamma)$$

ただし、 $\gamma = \alpha + \beta$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots$

(6)式で  $\epsilon^2 \approx 0$  とおくと

1)  $n$  が奇数のとき ( $n = n_o, t = t_o$  とする)

$$t_o \approx (2 - \epsilon) \sin n_o \gamma / 2 \dots\dots\dots (7)$$

2)  $n$  が偶数のとき ( $n = n_e, t = t_e$  とする)

$$t_e \approx (2 - \epsilon) \cos n_o \gamma / 2 \dots\dots\dots (8)$$

3)  $\theta = 0$  の近傍では

$$t \approx \epsilon$$

以上が(5)式の近似解である。

上式で拡大率  $t$  が最小になるのは、

1)  $n$  が奇数のとき

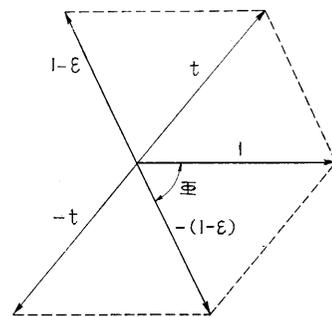
$$n_o \approx 2k\pi / \gamma \dots\dots\dots (9)$$

2)  $n$  が偶数のとき

$$n_e \approx (2k + 1)\pi / \gamma \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 $k = 0, 1, 2, \dots$

上式で  $k \geq 0$  の場合には、 $n$  の値が極めて大きくなり、このような歪成分は機械振動その他のノイズの中にかくれてしまい考慮する必要がない。したがって、(9)式から  $n_o$  は零となるが、実際には  $\theta = 0$  の条件を近似的に満足する歪成分として、 $3 \cdot 5 \cdot 7$  等の  $n$  の小さな歪成分を考慮すればよい。しかも(7)式から明らかなように、 $\gamma$  の値すなわち工作物の支持高さが高いほど、これら  $3 \cdot 5 \cdot 7$  等も考慮する必要がなくなる。また減衰率については第 10 図から明らかなように、工作物が角  $\pi - \gamma$  だけ回転



第 10 図  $\epsilon' = 0$  のときの拡大率と切込み変化率の関係

ごとに振幅が  $1 - \epsilon$  倍になり、減衰率は  $1 / (1 - \epsilon)$  となるが、 $\epsilon$  と  $\epsilon'$  とはほとんど同程度の量であるから、上述の近似解としては減衰率が 1 であると考えた方がよい。原理的には、減衰率は最大値  $1 / (1 - \epsilon - \epsilon')$  から最小値  $1 / (1 + (\epsilon' - \epsilon))$  までの間の値を取りうるが、さらに立入った解析はここでは省略する。

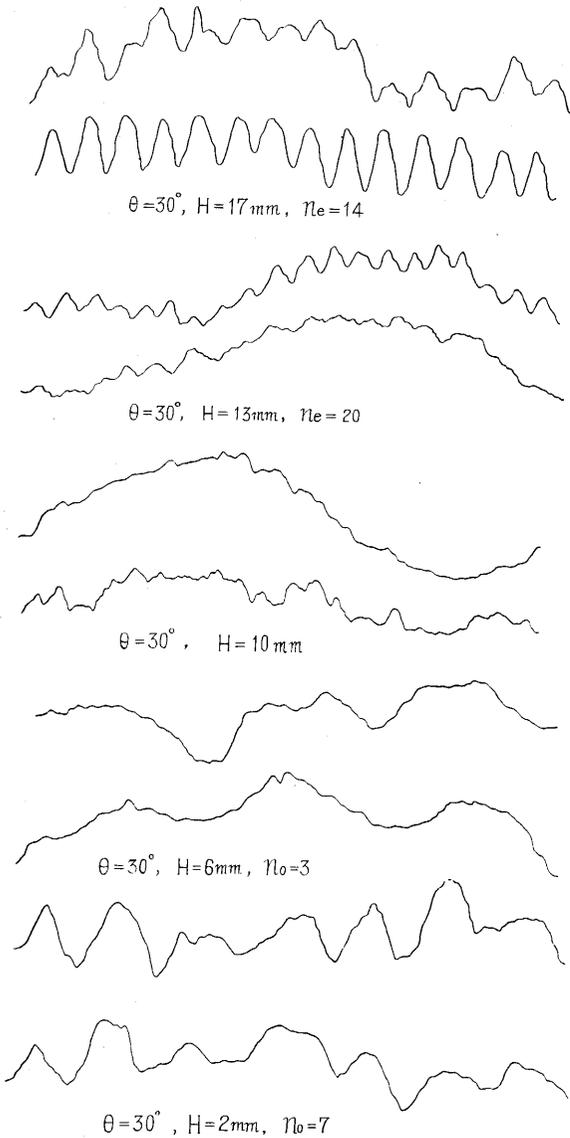
以上の解析から次のような結論が得られる。

(i) 工作物の支持高さが比較的低いときは、奇数角 ( $n$  が奇数) の歪円が残る。3 角歪が最も残り易く、5 角、7 角等がこれに次ぐ。

(ii) 支持高さが高くなると、奇数角の歪成分が除かれて、偶数角の歪成分が残り易い。この角数  $n_e$  は、

$$n_e \approx \pi / \gamma$$

第 11 図にいくつかの実例を示す。これは、工作物がある中心のまわりに 1 回転させたとき、工作物の外周にあてた電気マイクロメータの出力を自動記録させたもので、セットのときの偏心量 ( $2 \sim 3 \mu$  程度) を含んでいる。この例でも、工作物の支持高さが低いときは、奇数角の歪円が現われるが、支持高さが高くなると偶数角の



研削砥石半径: 198mm, 送り砥石半径: 122mm, 工作物直径: 14mm  
 第 11 図 工作物の心高と加工真円度との関係を示す実例 縦倍率×3,400

歪円が現われる。しかも、この程度の工作条件の範囲では、いずれも上述の歪成分(角数  $n$ ) を示す式を満足している。

實際上、最も都合のよい工作条件として、奇数角の歪量が現われない程度に支持高さを高くし、しかも偶数角が顕著に現われないような値に押えるのがよい。第 11 図の場合から判断すると、ほぼ 10~12mm 程度がよいと思われる。これは  $n_e$  の値として約 24~26 になり、 $r = \pi/24 \sim 28$  すなわち  $7^\circ$  ないし  $8^\circ$  に相当する。

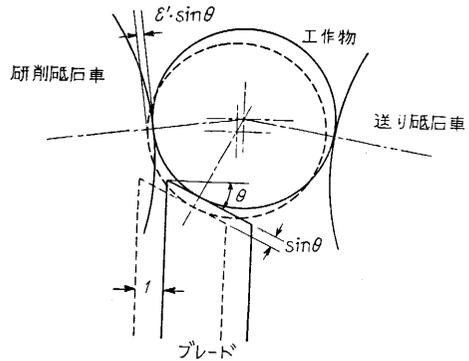
5. 工作物保持の安定性

これまで、幾何学的条件に起因する歪円を述べた

が、工作物が送り砥石車と滑りを生じたり、ブレードが振動を起したりしたときも当然工作物に歪を生ずる。研削力により、工作物はブレード・送り砥石車の両面の間で回転するが、工作物とブレード頂面および送り砥石面との間に働く摩擦力と研削力とが釣合を保ちながら、工作物はゆっくり送り砥石面の周速で回転する。このように正常な状態で工作物の保持・回転が行われるためには、二つの条件が満足されなければならない。すなわち第 1 に、送り砥石面に働く摩擦力の方向がその臨界摩擦角を超えないこと、第 2 に、ブレード面に働く摩擦力による曲げモーメントにブレードが十分耐えて、研削砥石車が工作物に喰い込まないことである。

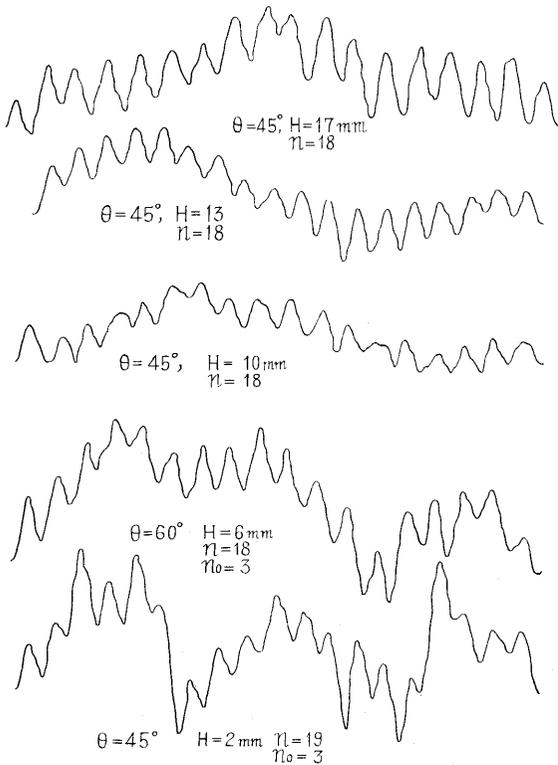
第 1 の条件が十分満たされなければ、送り砥石車が研削力による工作物の回転を受け止めることができなくて、工作物は研削砥石車の周速で回転することになり、危険である。一般にブレード頂角が小さく、心高が高いほど、この摩擦角が大きくなり、滑りを起す危険が多い。

次に第 2 の条件であるブレードに働く曲げモーメントによる危険について述べよう。いまブレード頂面が単位長さだけ水平方向に変位したとき、ブレード頂面に直角な方向の工作物の変位量は  $\sin \theta$  であるから、これによる研削砥石車の工作物への切込み変化量は  $\epsilon' \cdot \sin \theta$  となる(第 12 図)。ブレード頂面の水平方向の変位は、摩擦



第 12 図 曲げによりブレード頂面が単位だけ移動したときの切込変化量

力によるブレードの曲げモーメント  $M_b$  に比例すると考えてよいから、研削力に対するブレードの剛性を表わす量として  $1/M_b \cdot \epsilon' \cdot \sin \theta$  を考えるのが妥当である。このような意味での剛性が不足すると、わずかの切込みに対しても研削砥石車が工作物に喰い込んでブレードに急激な曲げモーメントが加わり、その反動としてブレード頂面が工作物を上方にはね上げ、工作物が振動を起すことになる。極端なときは、工作物を上方にはね飛ばすこともある。上述の意味での剛性は、ブレード頂角または工作物支持高さが過大になると急激に低下する。第 13 図は、このような剛性の不足または砥石の目づまりに起因する研削力の増大による工作物表面のびびれの实



第 13 図 工作物保持の剛性不足によるびびれの実例 縦倍率×3,400

例を示す。工作物の支持高さの大きさに無関係に、いずれも 18 角形の歪を持っている（心高 2 mm のときのみ 19 角形）。このような理由から重研削のときは、特にブレード頂角を過大にしないように注意すべきである。

6. 結 び

心無研削法に関する研究は従来慶応大学の米津教授によって発表されているものがあるだけで、世界的にも文献はほとんどない。理論的にも実験的にもさらに深く広い研究が必要で、これによりこの方法の完成が期待される。(1958. 2. 10)

文 献

- (1) Abrasive Industry. Nov. 1931  
"Periphery Locates Work in Centreless Grinding" Abrasive Industry. Oct. 1932  
"Centreless Grinding Troubles Corrected by Simple Adjustment" by A. D. Meals.
- (2) Cincinnati Instruction Book. sept. 1950.  
"Grinding, Lapping & Polishing"  
Edited by Arthur W. Judge. Caxton Pub. Co.
- (3) 米津 栄 "心無研削に関する研究"  
日本機械学会論文集 19 卷 86 号ほか.
- (4) 小川・宮下 "心無研削法に関する研究" "精密機械" 24 卷, 2 号.
- (5) E. Sachsenberg u. R. Kreher. Werkstatt tech. u. Werksl. Jg. 33. Ht 11, S. 280 (1939)

正 誤 表 (2 月号)

頁段	行	種別	正	誤
8	左 12	表	% o. w. f	% O. W. f
"	" 15	本文	ナイロン, アセテート	ナイロンアセテートより
"	右 12	"	Sandocryl 法	Sandocryl 法
20	" 下 2	"	に行く. この	に行くこの
21	左 7	"	(第 11 図)	(第 10 図)

次 号 予 告 (4 月増大号)

研 究 解 説

特殊陽極を用いるマグネシウムの電解製錬.....	江 上 一 郎 細 田 正
日本の製鉄技術の歴史的考察の一側面.....	金 森 九 郎 中 沢 護 人
日本の建築家.....	村 松 貞 次 郎

海 外 事 情

訪ソ旅行メモ (2) .....	竹 中 規 雄
------------------	---------

研 究 速 報

ドロップ試験について.....	三 木 五 三 郎
Pb-Sb 合金の時効に関する研究 -Pb-Sb 純元素に及ぼす微量の As の影響 .....	加 藤 正 夫 西 川 精 一
重水素核衝撃による放射性ピストン リングについて .....	加 藤 正 夫 津 田 野 敏 高 井 義 郎 梅 原 明
薄肉鋼管構造の強度試験.....	田 中 尚