

遠 心 バ レ ル 研 摩 法

松 永 正 久

バレル研摩法の研摩能率を向上させる方法の一つとして、遠心力を利用する遠心バレル研摩法が発達した。この方法によると、いままでの回転式バレル研摩法に比し、研摩能率が 50 倍程度まで向上する例が報告されており、形状によっては、さらに高能率を望むことができ、従来研摩不可能であった極微小部品も研摩できるということが明らかにされた。この解説は遠心バレル内の工作物の受ける遠心力の計算、バレル形状に関する考察、および研摩能率の向上例と能率向上の理由などについて解説した。

1. 緒 言

回転式バレル研摩法は、手ヤスリ仕上げ、バフ研摩、ベルト研摩、砥石研摩などにかわる方法として、工業部品のバリ取り、表面研摩、つや出し、かどの丸味つけなどに用いられ、多大の労力を節約してきた^{1),2)}。そして場合によっては、ある行程をバレル研摩に変更することにより、99.9%もの労力の節約ができた例が報告されている。このようにバレル研摩はこれが適用できる部品に対しては、すぐれた研摩法であるが、その欠点の一つに加工に長時間を要することがあげられる。

筆者のラッピングの理論³⁾によれば、湿式ラッピングの場合の研摩量はほぼ

$$Q = kFL \quad (1)$$

の式であらわされることがたしかめられた。ここに F は工作物にかかる荷重、 L は工具と工作物との相対運動距離である。この理論は湿式ラッピングの場合であり、かつ荷重としては 5 kg/cm^2 程度までしか実験によってたしかめていないが、これがバレル研摩の場合にも適用することができ、かつさらに高い荷重まで成立するものとすれば、研摩量を大きくするためには、 F または L の双方、または一方を大きくすればよい。回転式バレル研摩法において F および L を大きくするために、バレルを高速で回転すると、研摩石と工作物とは外壁に固着

し、相対運動がおこらなくなり、 L の値がほとんど零になる。すなわち研摩量はほとんどないことになる。このときのバレル内部の状態を図・1 に示す。

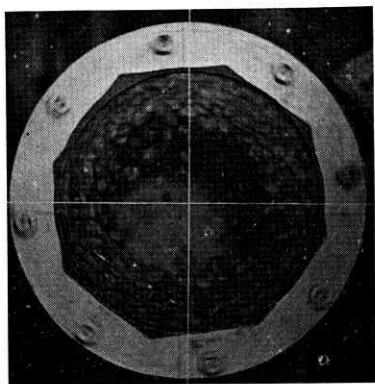
このような条件のもとで、研摩量を大きくする方法には二つある。その一つは回転槽の内で工作物を静置した場合であり、これはジャイロ仕上げ法と呼ばれている。他の一つは高速回転するフェイス・プレイト（ターレットと呼ばれている）にバレルをとりつけ、ターレットの軸と別個にバレルを回転させる方法であって、筆者はこれを著書においては高速遊星旋回式バレルと呼んだが²⁾、欧米においては centrifugal barrel という名称が用いられ、かつこの名称が簡単であるところより、ここでは遠心バレルと呼んでおくこととする。

研摩に限定せず、粉碎・混合などの化学操作に遠心力を利用したものは古くから行なわれている。またこの方法によって研摩を行なうという考えも二三の特許が散見されるが⁴⁾、あまり普及はしなかった。それは研摩条件に対する適正な考察がなされていなかったことと、機械の構造そのものが、理想的でなかったためと考えられる。

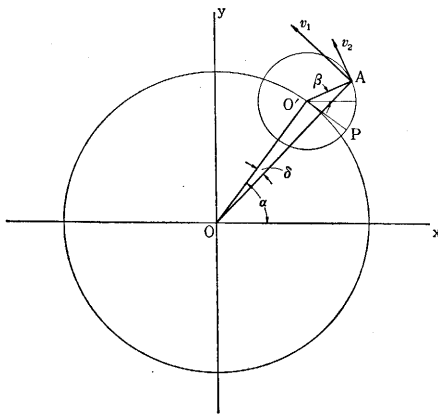
遠心バレルは内外ほぼ同時に実用期に入った。わが国では小林⁵⁾ がこれを試作して市販を開始し、アメリカでは Harper Buffing Co. が Harperizer と称して市販しており、イギリスでは Canning 社によって Harperizer が作られている。このような構造の機械で F を左右するのは遠心力であり、 L を左右するのはターレット 1 回転あたりに生ずるバレル内のマスの流動サイクルであるので、この両者について少し考察してみよう。

2. 遠 心 力

遠心力をベクトルの的に求めようとしたところみは発表されているが⁴⁾、厳密な解ではないと思われるので、ここでは周速と回転半径から計算する解法をところみよう。ただし重力の影響は無視して考えてある。ターレットの回転軸が水平のときは、重力の影響は入ってくるけれども、後に計算で示すように、実用条件においては遠心力は重力にくらべて十数倍の値を有するので、いまは重



図・1 高速回転をしたときのバレル内の状態 ($N \geq 42.2/\sqrt{D}$)



図・2 移動速度の計算

力を考えないものとする。

(1) 移動速度 まずバレル各部における移動速度を考えてみる。符号は図・2 のように定める。ここに

O: タレットの回転中心

O': バレルの回転中心

α : 任意の瞬間におけるバレルの角位置

β : 任意の瞬間における工作物の角位置

v_1 : タレットの回転により生ずる任意の点の移動速度

v_2 : バレルの回転により生ずる任意の点の移動速度

R : タレットの回転半径, すなわちタレットの回転軸の中心とバレルの回転中心との距離

r : バレルの回転中心に関する工作物の回転半径, すなわちバレルの回転軸の中心より工作物までの距離

N : タレットの毎秒回転数

n : バレル軸におけるバレルの毎秒回転数

ただし, N および n は反時計方向を正とする。

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= 2\pi RN \\ v_2 &= 2\pi rn \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

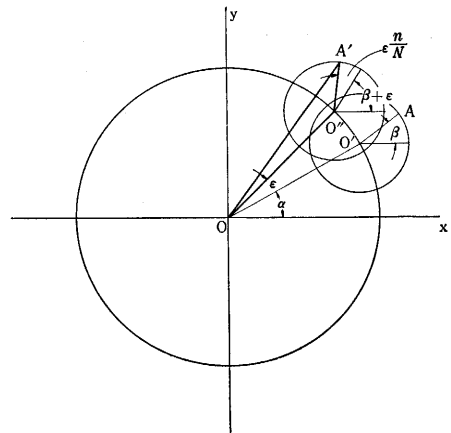
v_1 および v_2 を x, y 成分に分け, 合成移動速度を求めれば

$$\left. \begin{aligned} v^2 &= (2\pi N)^2 \left\{ (x^2 + y^2) \left(1 + \frac{n}{N} \right) + \frac{n}{N} r^2 \left(1 + \frac{n}{N} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{n}{N} R^2 \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

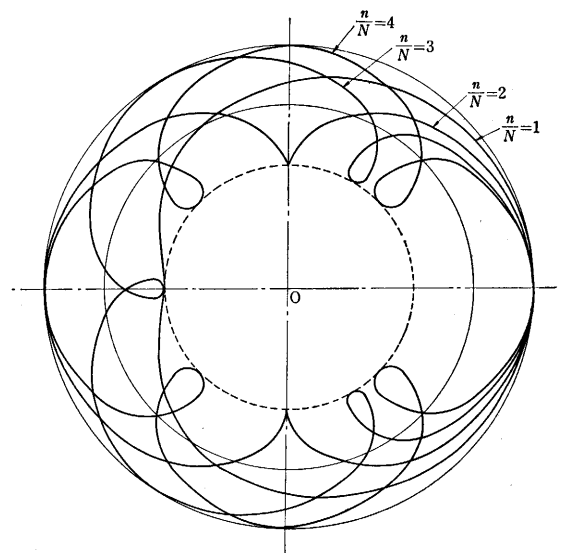
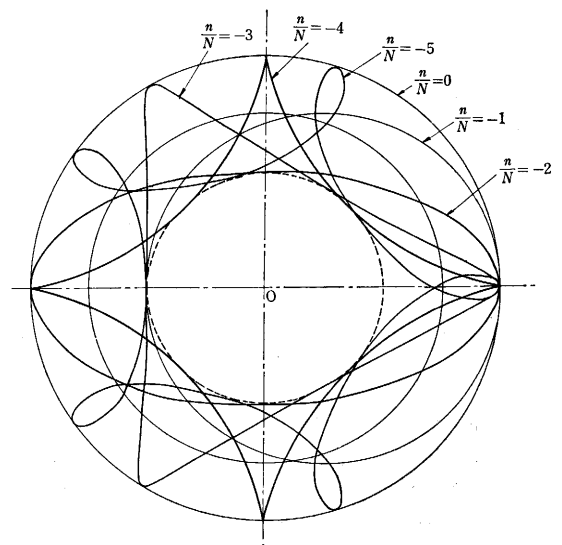
が得られる。

(2) 移動点の軌跡 任意の点における回転半径を求めるためには, 軌跡の方程式を求めなければならない。いま図・3 のようにタレットが ϵ だけ回転したときを考えれば, A 点は x 軸に対しては $\epsilon \left(1 + \frac{n}{N} \right)$ だけ回転したことになる。ゆえに A 点の画く軌跡の方程式は

$$\left. \begin{aligned} x &= R \cos(\alpha + \epsilon) + r \cos \left\{ \beta + \epsilon \left(1 + \frac{n}{N} \right) \right\} \\ y &= R \sin(\alpha + \epsilon) + r \sin \left\{ \beta + \epsilon \left(1 + \frac{n}{N} \right) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$



図・3 軌道方程式

図・4 移動点の軌跡 ($n/N > 0$ のとき)図・5 移動点の軌跡 ($n/N \leq 0$ のとき)

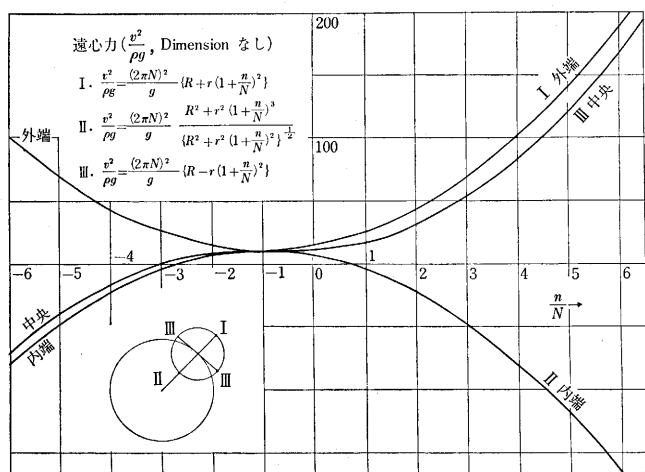
で表わされる。これはエピサイクロイド類似の曲線である。軌跡の例は図・4 および図・5 に示す。この図より遠心力の方向を求めることができる。遠心力は軌跡に垂直に凹の側より凸側にはたらく。このことを考慮に入れて遠心力の方向を定めてあり、遠心力によって内容物がタレットの外側に移動する方向のときを正、逆の場合を負にとっている。

(3) 曲率半径 任意の点における曲率半径 ρ は

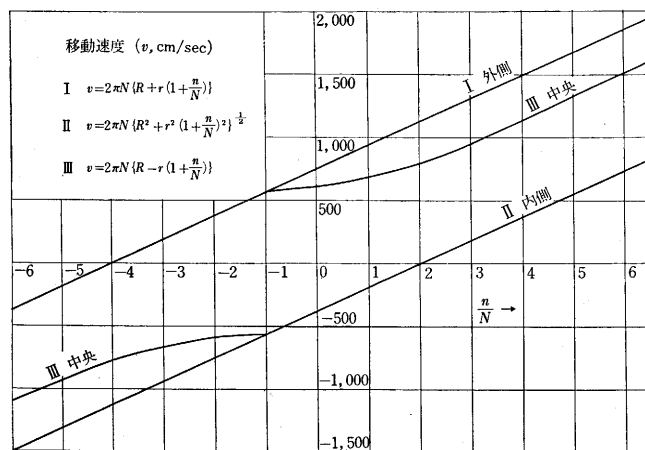
$$\rho = \left| \frac{\left\{ 1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right\}^{3/2}}{\frac{d^2y}{dx^2}} \right| \quad (5)$$

で計算することができる。計算の結果は

$$\rho = \frac{\left\{ R^2 + r^2 \left(1 + \frac{n}{N} \right)^2 \right\}^2}{R^2 + r^2 \left(1 + \frac{n}{N} \right)^3} + \frac{\left(1 + \frac{n}{N} \right) (x^2 + y^2 - R^2 - r^2)^{3/2}}{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{n}{N} \right) \left(2 + \frac{n}{N} \right) (x^2 + y^2 - R^2 - r^2)} \quad (6)$$



図・6 遠心力線図



図・7 速度線図

となる。

(4) 遠心力 遠心力の加速度は v^2/ρ であるので、

$$\frac{v^2}{\rho} = \frac{(2\pi N)^2 \left\{ R^2 + r^2 \left(1 + \frac{n}{N} \right)^3 \right\}}{\left\{ R^2 + r^2 \left(1 + \frac{n}{N} \right)^2 \right\} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{n}{N} \right) \left(2 + \frac{n}{N} \right) (x^2 + y^2 - R^2 - r^2) + \left(1 + \frac{n}{N} \right) (x^2 + y^2 - R^2 - r^2)^{1/2}} \quad (7)$$

これは遠心バレルにおいて、バレル内の任意の点において作用する遠心力をあらわす。この式は複雑であるので、特別の点について遠心力を求め、これを図示する。

また図示にあたっては、遠心力を重力の加速度 g の倍数として、すなわち $v^2/\rho g$ としてあらわすこととする。

(i) $x^2 + y^2 = (R \pm r)^2$ のとき、この場合、考慮している点はバレル上においてタレットの回転中心より最遠点 (正号) および最近点 (負号) である。

$$v = 2\pi N \left\{ R \pm r \left(1 + \frac{n}{N} \right) \right\} \quad (8)$$

$$\rho = \frac{\left\{ R \pm r \left(1 + \frac{n}{N} \right) \right\}^2}{R \pm r \left(1 + \frac{n}{N} \right)^2} \quad (9)$$

$$\frac{v^2}{\rho} = (2\pi N)^2 \left\{ R \pm r \left(1 + \frac{n}{N} \right)^2 \right\} \quad (10)$$

ここで奇異に思われるのは、 $x^2 + y^2 = (R + r)^2$ のとき v は

$$\frac{n}{N} = - \left(1 + \frac{R}{r} \right)$$

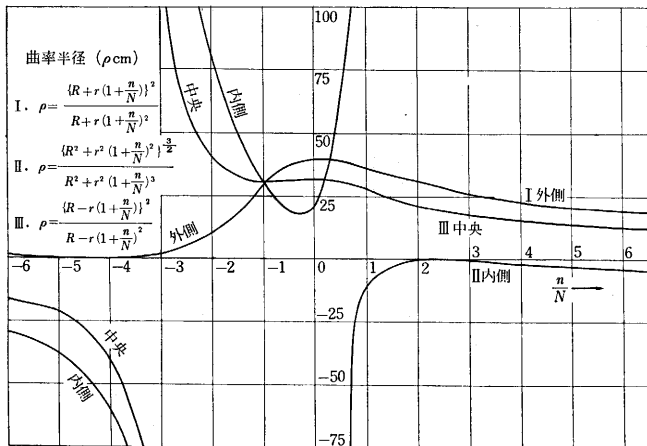
において零となるにもかかわらず、遠心力を示す (10) 式は零にならないことである。これは図・8 よりわかるとおり、 n/N の値が 0 より次第に $-(1 + R/r)$ に近づくにつれて、外端の曲率半径は次第に小さくなり、 $n/N = -(1 + \frac{R}{r})$ において尖点となり ρ は零となる。すなわち見かけ上の遠心力を有するにすぎないことがわかる。

(ii) $x^2 + y^2 = R^2 + r^2$ の場合 この場合はバレルの回転軸中心より、 $00'$ に垂線をおろして、バレル周と交わる点、図・2 の P に相当する。

$$v^2 = (2\pi N)^2 \left\{ R^2 + r^2 \left(1 + \frac{n}{N} \right)^2 \right\} \quad (11)$$

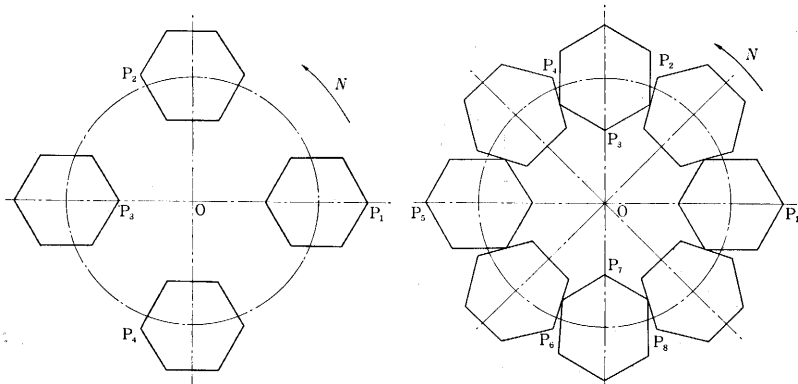
$$\rho = \frac{\left\{ R^2 + r^2 \left(1 + \frac{n}{N} \right)^2 \right\}^{3/2}}{R^2 + r^2 \left(1 + \frac{n}{N} \right)^3} \quad (12)$$

$$\frac{v^2}{\rho} = (2\pi N)^2 \frac{R^2 + r^2 \left(1 + \frac{n}{N} \right)^3}{\left\{ R^2 + r^2 \left(1 + \frac{n}{N} \right)^2 \right\}^{1/2}} \quad (13)$$

図・8 ρ の値

式 (10) および式 (13) に示した遠心力の 1 例は図・6 に、 v の値は図・7 に、 ρ の値は図・8 に示した。この場合、 $N=3$ rps, $R=30$ cm, $r=10$ cm として計算してある。

(5) 考 察 遠心バレル研摩による研摩区域は回転式バレル研摩と同じく流動層であるといわれている⁵⁾。後述するようにバレルの形状を適当にすれば、マス内部は遠心力によって固着し、回転につれて表面のみが流動をおこすような条件を作ることができる。研摩量の能率の向上を考えるとときには、この内部の流動形態を考慮しなければならない。次に N および n が研摩能率におよぼす影響を考えてみる。 N および n をかえたときの研摩能率の変化はいろいろの要素に支配されることがわかる。一つは流動サイクルであり、図・9 に示すように

図・9 n/N と流動サイクルとの関係
(左) $n/N=1$, (右) $n/N=2$

タレット 1 回転あたりにつき $|n/N|$ 回流動する。流動が早くなれば、流動層における運動がちがってくるので、研摩能率は必ずしも流動回数に比例するとはいえないが、 $|n/N|$ のある値までは流動回数が大きくなるにつれて、研摩量は向上するであろう。もし研摩能率が流動回数に比例するとすれば、単位時間あたりの研摩量におよぼす流動の影響は $N|n/N|$ すなわち $|n|$ に比例するこ

とになる。

いま一つの要素は遠心力である。ただし遠心力は $n/N=-1$ の場合を除いて、バレル内各部においてちがっている。研摩は流動層においてのみおこると仮定すれば、 $x^2+y^2=R^2+r^2$ の場合の値を代表として採用して大きな誤差はないであろう。さらに研摩能率は遠心力に比例するとすれば、研摩量は次のような式であらわされる。

$$Q = k' N^2 |n| \frac{R^2 + r^2 \left(1 + \frac{n}{N}\right)^3}{\left\{R^2 + r^2 \left(1 + \frac{n}{N}\right)^2\right\}^{1/2}} \quad (14)$$

ここに k' は比例常数である。すなわち n/N を一定とすれば、研摩能率は N^2 に比例し、 N が一定のときは n/N の値によって複雑な変化をすることがわかる。しかし $n/N > 0$ の条件においては、 Q は n/N の値の増加につれて増加し、 $n/N=0$ で Q は零であり、 $n/N=0$ と

$$\frac{n}{N} = -\left\{1 + \left(\frac{R}{r}\right)^{2/3}\right\} \quad (15)$$

との間において極大点を有し、(15) 式において零となり、 n/N がこの値より小さくなるにつれて、 Q の絶対値は大きくなるがわかる。

図・6 の遠心力を示す曲線、図・4 および図・5 の軌跡よりみてもわかるとおり、あまり大きな $|n/N|$ は使用できない。 $|n/N|$ をあまり大きくすると、マスの一部がバレル内壁全面に固着する条件を生ずる。これを式であらわせば

$$\frac{n}{N} > \sqrt{\frac{R}{r}} - 1 = 0.732 \quad (16)$$

$$\frac{n}{N} < -\left(\sqrt{\frac{R}{r}} + 1\right) = -2.732 \quad (17)$$

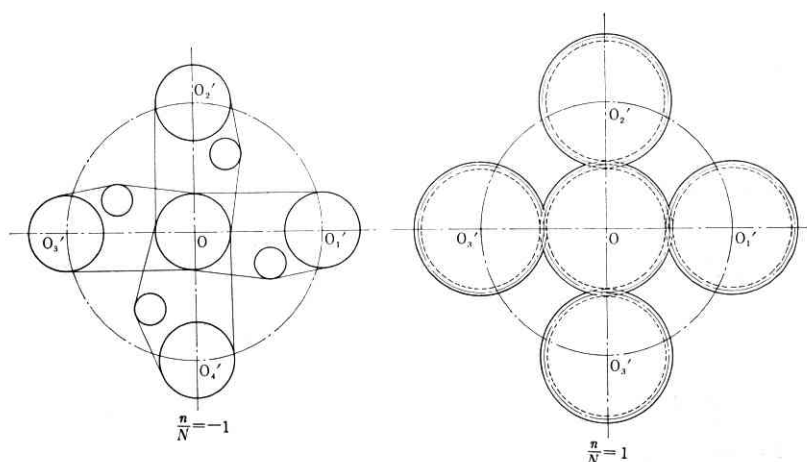
において全周固着がはじまる。 $|n/N|$ が大きい方がタレット単位回転あたりの流動回数が多くなり、かつ遠心力も大きくなるので、研摩能率も大きくなるけれども、全周固着の条件を生ずるので、研摩が均一に行なわれないおそれが生ずる。それゆえ

にあまり大きな $|n/N|$ の範囲を用いるべきでなく、 Q を大きくするには N を大きくすべきである。

ここで注目すべきは $n/N=-1$ の場合である。この場合にはバレル上の点はすべて半径 R の円周上を等速運動をするので、 $|v|$, ρ , v^2/ρ はすべての点において等しい。この結果、図・6 に示すように、外周の遠心力 (バレルにかかる遠心力の最大値) は最小となり、しかも前

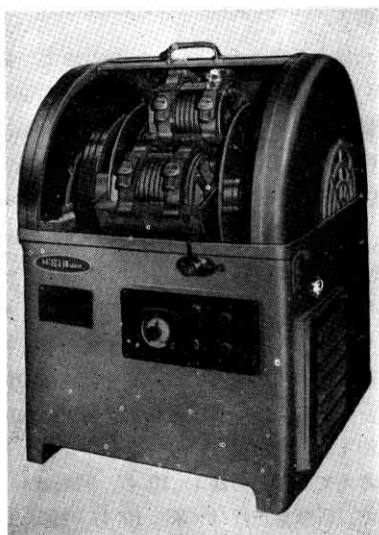
に述べた理由によってこの値は研摩能率に関係せず、機械の強度にのみ関係するので、この値の小さいことは設計を容易にする効果がある。しかも流動層における遠心力は極大であり、研摩能率も相当によいものと思われる。おそらく $n/N = -1$ が遠心バレルの最適構造と思われるが、これはさらに実験によってたしかめる必要がある。

(6) 回転機構 回転機構は図・10 に示すとおりであり、(i) は n/N がマイナスの場合、(ii) は n/N が



図・10 回転機構

プラスの場合の1例である。前者は中央のチェーン・ホイールを固定し、チェーン駆動する。この場合駆動ホイールと被駆動ホイールとの比が n/N と等しくなる。(ii) の場合は歯車駆動であり、やはり歯車のピッチ円の直径比が n/N を与える。図・11 は小林⁵⁾ が設計・製作したものであり、主要要目は次のとおりである。 $R=260$ mm, バレルは六角柱、外接円の半径 95 mm, $N=190$ rpm, $n/N = -1$ 。この場合の遠心力はバレル内どこでも同一であり、10.49 g である。



図・11 遠心バレル研摩機の例 (小林)

3. バレル形状と研摩能率

小林⁵⁾ はバレルの形状を六角にすると、円形の場合にくらべて研摩能率がいちじるしく向上することをたしかめた。筆者ら⁶⁾ はバレル形状と研摩能率との関係を実験によってたしかめた。使用したバレルは前記のものであり、角数は4, 5, 6, 7, 8, 10, 12角および円形、内容積は形状にかかわらず7 l, 断面積 310 cm², 長さ 225 mm である。これらのバレルの写真は図・12 に示す。

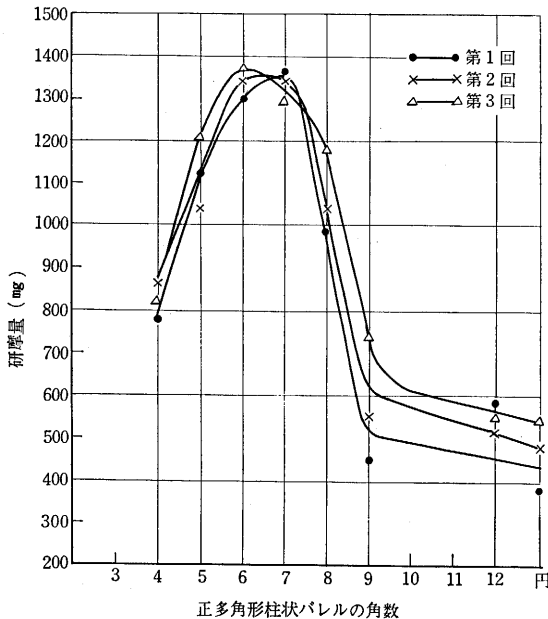
使用した試験片は熱処理したニードル・ローラで長さ 8.5 mm, 直径 2.5 mm のもので、1 チャージ約 200 g を装入した。研摩石は 3500 g 使用し、1300 g の水と 10 g/l のコンパウンドとを使用した。研摩石はアランダム系の球状のもので、直径は 6 ± 0.5 mm, コンパウンドは鉄鋼の荒研摩用の標準コンパウンドであり⁷⁾、試験時間は30分である。

得られた結果は図・13 に示すとおりであり、六、七角がもっとも安定で研摩能率が高く、五、八角形がこれに次ぎ、そのほかのものは能率が悪い。図・14 は研摩石の摩耗量を示し、ほぼ研摩量と同じ傾向である。

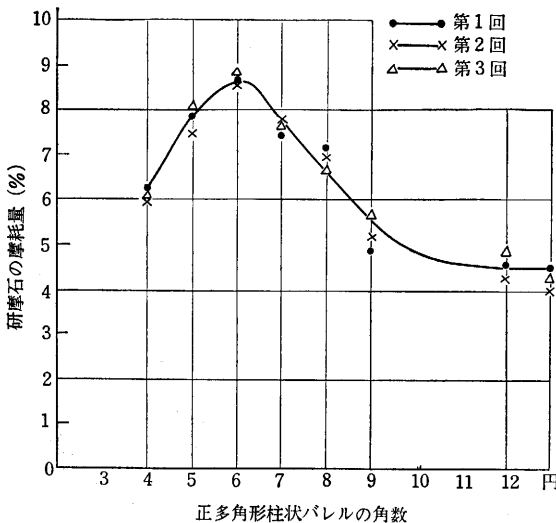


図・12 いろいろの断面形状のバレル

このように六角形バレルの研摩能率が最高である理由は、まだ確実にはわかっていない。これをたしかめるには、内部のマス運動状態を検討しなければならない。しかし次のように想像することができる。円形または角数の大きいバレルではマスが一体となってバレル壁に沿ってすべり、相対すべりは主としてマスとバレル壁との間で行なわれ、流動層の生成が少ない。したがって研摩量も少ないということになる。これに反して、角数の少ないときは攪拌作用が行なわれ、やはり流動層の生成が少ないということになり、その間にちょうど適当な角数が存在する。



図・13 バレルの形状と研摩能率との関係



図・14 バレルの形状と研摩石の摩耗量との関係

4. 研摩能率の比較

研摩能率の比較としては著書²⁾には佐藤がおこなった表面あらさを主体とした回転バレルとの比較値をかかげた。同氏のデータには振動バレル（サークル型）とも比較しているので表・1 にそのデータをかかげておこう。工作物は図・15 に示すような事務機械用のラインスペース・レバーであり、熱処理後の材料キズ、打痕などを荒バフ（#180）で除き、その後バレル研摩によってバフ目を除去し、表面あらさ 0.5μ に達するまでの時間を比較したものである。この表よりみてわかるとおり、遠心バレルは回転式バレルにくらべて 50 倍、振動式バレルにくらべて 15 倍の研摩能率があることがわかる。

表・1 3 種のバレル研摩法の研摩能率の比較(佐藤)

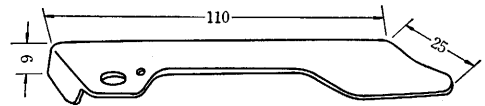
機械の型式	回転バレル	振動バレル	遠心バレル
作業条件			
バレル型式	水 平 型	ドーナツ型	六角・四連
内容積 (リットル)	50	50	各 6
回転数 (rpm)	30	1,800	190
電動機馬力 (HP)	1/2	1 1/2	5
振 幅 (mm)	—	6	—
研摩石*	AT #2, 50% AE #3, 50%	A T#2, 50% A T#3, 50%	HS #5
充填量 (%)	55	80	50
研摩石の量 (kg)	33	53	各 2.1
混合比**	1 : 5	1 : 8	1 : 1
コンパウンド***	C-200	C-200	C-200
コンパウンド量 (g/l)	5	10	10
水の量 (リットル)	11	5	各 1.6
工作物数	180	200	各 60
研摩時間**** (時)	50	15	1

* AT, AE, HS は研摩石の商品名、最初の文字は成分を示し、A はアラシダマ、H は遠心バレル用研摩石を示す。第2の文字は形状を示し、T は三角柱、E は楕円柱、S は球形を示す。最後の数字は大きさであり、T#2 は 20×20 (辺長) $\times 7$ (厚さ) mm, T#3 は 15×15 (辺長) $\times 6$ (厚さ) mm, E#3 は $15 \times 10 \times 6$ (厚さ) mm, S#5 は直径 $5 \sim 7$ mm の球を示す。

** 混合比は工作物と研摩石との混合容積比を示す。

*** C-200 は鉄鋼研摩用のコンパウンドの商品名で鉄鋼用標準コンパウンド類似のものである。

**** ここに研摩時間とは表面あらさ $H_{max} = 0.5\mu$ まで研摩するのに必要な時間を示す。



図・15 遠心バレル研摩の例
ラインスペース・レバー、材質 SPM 浸炭焼き入れ (佐藤)

この結果は表面あらさで比較しているので、さらに研摩量で比較してみる必要があるので、これに関する実験を依頼した。使用したバレルおよび研摩条件は次に示すとおりである。

型式：八角水平密閉式、バレルの大きさ：直径 240 mm \times 長さ 230 mm、内容積：10 リットル、回転数：38 rpm、研摩石：HS #5, 8.5 kg、装入量：50%、コンパウンド：CO-200, 10 g/l、水量：2.5 リットル（マスと同位）、工作物：ニードル・ローラ、直径 2.5 mm、長さ 8.5 mm, 200 g、研摩時間：24 時間。

24 時間後の研摩量は約 9.4 重量% であり、一方遠心バレルでは 30 分で 8.7 重量% が研摩できる。それゆえにあらわれた数値だけから比較すると遠心バレルは 44.5 倍の研摩能率を示すこととなり、さきの佐藤の結果とはほぼ一致する。このような研摩量を示す原因として、厳密な考察を加えることは現在ではできないけれども、おおざっぱに考えて、遠心力が $1 : 10.47$ 、回転数が $38 : 190$ であるので、研摩量比は $1 \times 38 : 10.47 \times 190 = 1 : 52$ となり、50 倍程度の研摩能率が期待できることがわかる。

小林⁵⁾は小物部品ではさらに研摩能率が向上できることを述べている。また、このバレルの特長は他の方法では研摩不能な微小部品の研摩もできることであるという。

5. 結 言

遠心バレルについての簡単な理論と、研摩能率の向上についての実験を述べた。遠心バレルは比較的新しい機械であるから解決を要する問題が多くある。たとえば研摩石の具備すべき性質の探究、コンパウンドの性質、遠心力と研摩量との関係、混合回数と研摩量との関係、 n/N をかえたときのバレル内のマスの運動および研摩量

におよぼす影響、不均一研摩または望ましくない形状に研摩されることを防ぐようにすることなどがこれである。これらの点も多くの作業者の協力によって解決してゆくものと考えられる。
(1966年1月6日受理)

文 献

- 1) 松永編, バレル仕上法, 誠文堂新光社, 1959.
- 2) 同 上, バレル研摩法, 日刊工業, 1964.
- 3) 松永, ラッピング, 誠文堂新光社, 1954.
- 4) U.S.P. 3,094,818, 1963. 特公, 昭 29-2547.
- 5) 小林久峯, 機械技術 11 (9) 65; 11 (11) 69, 1963.
- 6) 松永ほか, Metal Finishing (A) 投稿中.



東京大学生産技術研究所報告刊行

第 15 卷 第 3 号 本 間 禎 一 著

金属の高温酸化における酸化層の微視的 および巨視的構造の役割

金属の高温酸化に及ばず放射線照射の効果,あるいはブレイク・アウエイ現象を解明するためには,形成する酸化物について,巨視的構造とともに結晶格子欠陥のような微視的構造,あるいは酸化層内の巨視的および微視的応力分布挙動に関する知識を必要とする。

ローゼンバークの反応中断法による二三の金属についての測定によれば,酸化層の中の点状格子欠陥濃度は熱平衡状態で存在すると期待される値より高く, 10^{13}nv 程度の照射量で導入される欠陥量の影響を受けないことを示している。転位の存在挙動に関する間接的観察およびX線回折法による酸化層内応力の解析結果と合わせて,これら諸構造が酸化機構の中で果たす役割を考察し,金属の耐酸化性を改善する原則を確立するためには,このような諸構造に関する知識が必要であることを示した。

(1965 年 12 月発行)

第 15 卷 第 4 号 丸安隆和・小林一輔・阪本好史 著

高炉セメントコンクリートの研究

高炉セメントを使用したコンクリートの諸性質について,最近約 10 年間にわたって行なってきた研究をまとめたものである。高炉セメントは,これまでダムなどの河川構造物を中心に用いられてきたが,近年,急速にその生産量を増している。しかし,高炉セメントを使用したコンクリートについての研究は非常に少なく,その使用方法が適切でないケースも多かった。

本文は高炉セメントを用いたコンクリートは,主としてまだ固まらない状態における諸性質,強度および弾性的性質,容積変化,耐久性,耐熱性などについて研究を行ない,普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比べて,どのような点でちがうか,また特にどのような点に注意して取り扱われなければならないかなどの諸点について明らかにした。なお高炉セメントを用いたコンクリートの配合設計を行なう場合に参考となる表を示した。これには新しい考え方を導入している。

(1966 年 2 月発行)