

# 回転スピン制御法による鋼球の多段階研磨\*

—発泡ポリウレタンパッドによる研磨—

黒部利次\*\* 森田知之\*\*\*

## Spin Angle Controlled Polishing of Steel Ball Using Vesicant Polyurethane Pad with Grain Size Degradation

Toshiji KUROBE and Tomoyuki MORITA

Spin angle controlled ball lapping method developed recently, is to have an excellent performance to lap the ball, in which V-groove lapping plates are separated into two parts and three plates are able to rotate independently. Present paper focuses on polishing characteristics of a steel ball using vesicant polyurethane pad. Experiments are conducted using an aluminum oxide grain ranging from 5.5 to 0.3  $\mu$  m in size. It is found that the surface roughness of steel ball polished by vesicant polyurethane pad is smaller than that of the cast iron lap. Experiments show that the grain size degradation is very effective for decreasing the surface roughness of ball. It describes that spin angle  $\theta$  influence on both of the surface roughness and stock removal of the ball.

keyword : steel, spin angle controlled polishing, vesicant polyurethane pad lap, surface roughness, grain size degradation

### 1. 緒言

機械要素部品の一つにベアリングがあるが、機械の回転精度はベアリングの加工精度に依存している。ベアリングは、内外輪の隙間にボールを挿入して作成されており、ボールの加工精度がベアリングの回転精度を決定づける。ボールの研磨加工は、V溝を彫ったラップ盤にボールを入れ平面ラップ盤をその上に置いて、それらを相互に回転運動させることによって行われる。それによって、①直径の縮小、②真球度の向上、③表面粗さの低減、を図っている。研磨速度の向上は、上下ラップ盤の回転速度を大きくするかラップ盤に非対称のV溝を彫るなどして対処している<sup>1)</sup>。しかし、ラップ盤の回転速度をあまり大きくすると、ラップ液が遠心力によって飛散するのでそれには自ずと限界がある。また、溝の形状を極端に変えることもできない。そこで最近、V溝を分割した3軸駆動型ボール研磨法(回転スピン制御研磨と命名)が創案・開発された<sup>2)3)</sup>。本研磨法は、各ラップ盤の回転速度( $\omega_A$ ,  $\omega_B$ ,  $\omega_C$ )を自由に選定することによって加工能率の向上を図ることを目的としている。加工能率の向上は、ボールの自転軸角度である $\theta$ 角を制御することによって行われる。

鋼球の研磨は、一般に铸铁製のラップ盤を用いて行われている。しかしながら、加工精度の一層の向上を図るにはラップ盤の材質についても検討することが必要であると考えられる。シリコンウエハやガラス磁気ディスク等の硬ぜい性材料の研磨には、高分子材料製の発泡ポリウレタンパッド<sup>4)</sup>が使用されている。パッドは、粘弾性体で発泡構造を有しているが、鋼球の研磨にも適用できるのではないかと考えられる。

本研究では、ラップ盤に発泡ポリウレタンパッドを貼付して鋼球の研磨を行った。実験は、砥粒を粗粒から細粒へと段階的に変えていく多段階研磨法と呼ばれる方法で行った。

### 2. 実験方法

#### 2.1 回転スピン制御研磨法

本研究では、鋼球の研磨は回転スピン制御研磨法を用いて3つのラップ面にそれぞれ発泡ポリウレタンパッドを貼付して行った。図1に、回転スピン制御研磨法によるボールの運動の様子を示す。被研磨ボールは、パッドA, B, Cで構成される3軸駆動ラップ盤の間に挿入され、それらを独立に回転させることで研磨を行った。ここで、 $R_A$ はボール公転半径である。図1に示すように、ボールはパッドに挟まれながら回転し研磨される。その際、ボールは水平軸に対し角度 $\theta$ を成してスピンしながら絶えずその向きを変えている。この角度 $\theta$ を自転軸角度と呼ぶ。 $\theta$ は、幾何学的計算により式(1)で表される。

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{R_A R_B (\omega_B - \omega_A) \sin \beta - R_A R_C (\omega_C - \omega_A) \sin \alpha + R_B R_C (\omega_B - \omega_C)}{R_A R_B (\omega_B - \omega_A) \cos \beta + R_A R_C (\omega_C - \omega_A) \cos \alpha} \right] \quad (1)$$

また、ボールの自転角速度 $\omega_b$ は、計算の結果次式で表される。

$$\omega_b = \frac{(r_B - R_B) R_A \omega_A + (r_A - R_A) R_B \omega_B}{R_A r_B + r_A R_B} \quad (2)$$

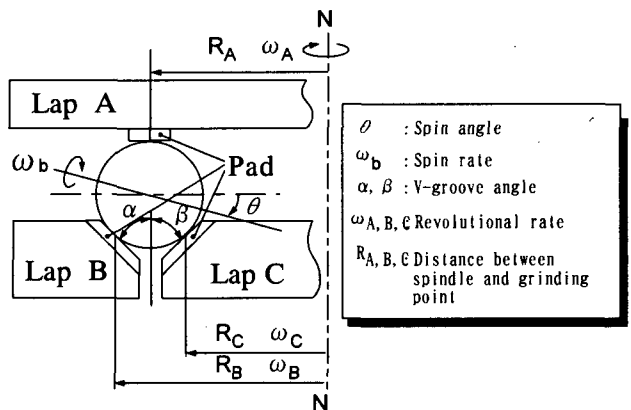


Fig.1 Kinematics of a ball in developed method

\* 原稿受付 平成14年4月16日

\*\* 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

\*\*\* 金沢大学工学部

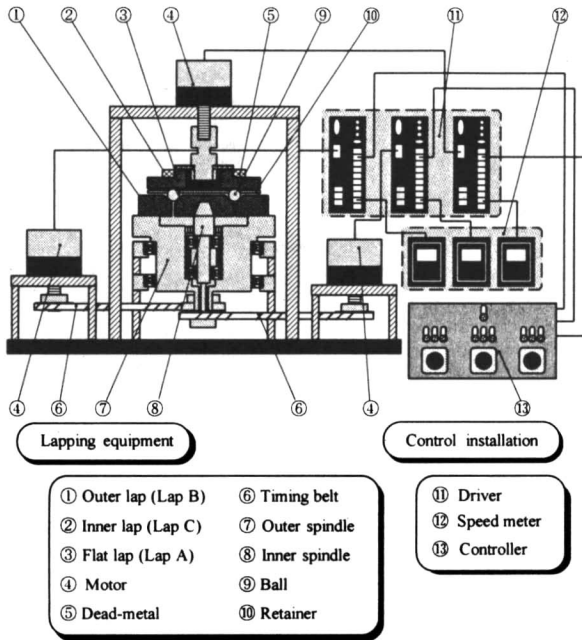


Fig.2 Schematic view of Polishing machine

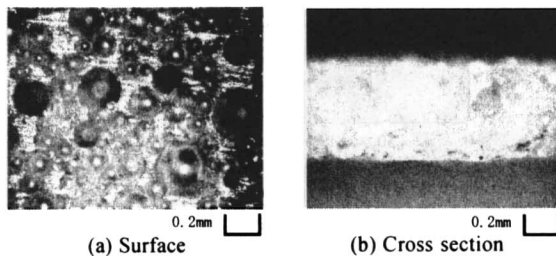


Fig.3 Surface and cross section view of virgin pad

本研磨法の場合、各ラップ盤の角速度の値を適当に選択することによって、 $\theta$ の値を任意に制御し得ることを式(1)が示している。これに対し在来法(V溝を分割しない一体型)の場合、 $\theta$ の値はラップ盤の形状で決定されるので任意の値に変えることはできない。

2.2 研磨装置

図2に、回転スピン制御型研磨装置の概略図を示す。装置は、下部内外ラップ盤①、②と上部平面ラップ盤③から成る研磨部、それらを駆動し制御する回転駆動システム、研磨槽、等から構成されている。V溝は、①、②の下定盤を互いに向かい合わせることで形成される。ラップ盤は鋳鉄で作製し、その上に発泡ポリウレタンパッドを貼付してパッドラップ盤(以後、パッドラップと呼ぶ)とした。ラップ盤の形状寸法は、下側の外ラップ盤Bの外形状寸法は13mm、内ラップ盤Cの外形状寸法は68mmである。厚さは、B、Cのラップ盤ともに25mmである。

実験は、対称型V溝ラップ盤を使用して行った。V溝角度は90度に設定した。実験に際し、研磨槽内にスラリー(溶媒に砥粒を懸濁した液)を注入し、槽内に設置している①、②、③の各ラップ盤が埋没するまで入れる。

2.3 実験条件

鋼球の研磨は、厚さ0.5mmの発泡ポリウレタンパッドを用いて行った。図3に、未使用のパッド(バージンパッド)の表面と断面の光学顕微鏡写真を示す。図3から、研磨に供したパッドは、

Table 1 Visco-elastic properties of pad

	Dry		Wet	
Soaking time min	0	20	40	60
Instantaneous displacement $U \mu\text{m}$	4.45	9.83	9.23	9.91
Retardational displacement $V \mu\text{m}$	3.58	4.51	4.97	4.90
Visco-elastic displacement $\alpha \mu\text{m}/\text{min}$	0.21	0.21	0.23	0.24
Retardation time $\tau \text{sec}$	26.8	21.3	20.1	19.5

Table 2 Polishing condition

Pad	Vesicant polyurethane pad
Grain	$\text{Al}_2\text{O}_3$
Grain size	5.5, 1.0, 0.3 $\mu\text{m}$
Concentration	20wt%
Solvent	City water
V-groove angle	90deg
Revolution radius	35mm
Spin rate $\omega_b$	1600rpm
Polishing load	5N
Polishing time	0~120min
Spin angle $\theta$	0~80°

ベース層の無い発泡層のみから成るパッドであることがわかる。パッドは粘弾性体であるので、その粘弾性特性を天秤型粘弾性測定装置<sup>4)</sup>を用いて測定した。パッドに荷重を負荷したときのCRT画面上に描画される出力特性曲線から、パッドの粘弾性値 $U$ 、 $V$ 、 $\alpha$ 、 $\tau$ の各値<sup>4)</sup>を求めた。 $U$ は瞬間弾性に基づく変位を表し、 $V$ は遅延弾性、 $\alpha$ は粘性に基づく変位を表す。 $\tau$ は、遅延時間を表す。測定結果を表1に示す。表1中の乾式は、室内(室温)で測定した結果を表し、湿式はパッドを水中に浸漬した後に測定した結果を示す。表1から、湿式の場合 $U$ 、 $V$ 、 $\alpha$ の値は乾式の値よりも若干大きくなるのがわかる。 $\tau$ の値は、乾式に比べ湿式の方が幾分小さな値となる。

実験には、被研磨球として直径3/8インチの高炭素クロム軸受鋼(SUJ2)のボールを供した。実験は、ボールをアクリル樹脂製のリテーナの穴に挿入して行った。それは、ボールが研磨中互いにぶつかりあわないようにするためと、ボールが円周上で等間隔を保って回転するようにするためである。リテーナの形状・寸法は、外形84mmx内径56mmx厚さ2mmの円環で、半径35mmの位置に直径11mmの穴が6個等間隔を保ってあけられている。1回の実験に3個のボールを供した。

実験は、平均粒径0.3、1.0、5.5  $\mu\text{m}$ の3種類のアルミナ砥粒を用い、粗粒(5.5  $\mu\text{m}$ )から細粒(0.3  $\mu\text{m}$ )へと段階的に変化させて行った。各段階での砥粒濃度はいずれも20wt%とした。表2に、研磨条件を示す。

2.4 評価方法

ボールの加工状態の評価は、次の方法で行った。ボールの加工前後の総質量を計量し、その質量減をボールの数(3個)で割った値をボール1個あたりの加工量と定義している。質量の秤量にあたっては、精密直示天秤を使用した。ボールの表面粗さの測定は、3個のボールについて方向を適宜3回変えて測定し、都合9個

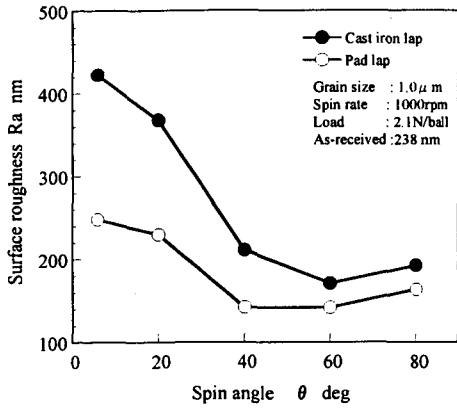


Fig.4 Schematic view of Polishing machine

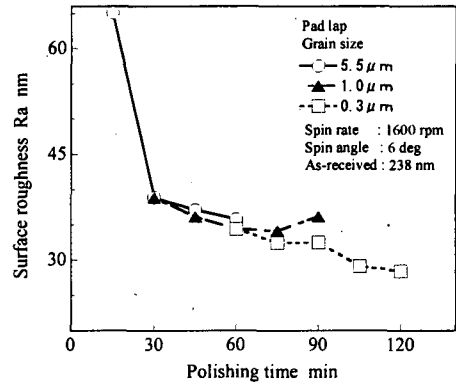


Fig.6 (a) Effect of polishing time on surface roughness (Conventional)

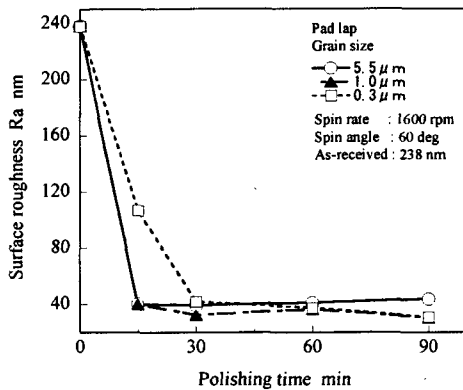


Fig.5 Effect of polishing time on surface roughness

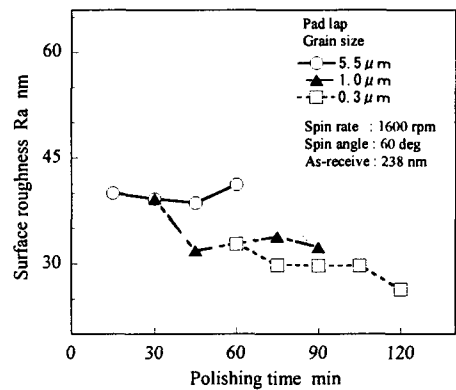


Fig.6 (b) Effect of polishing time on surface roughness (Spin angle controlled)

のデータの平均をとり、その値を表面粗さとした。表面粗さの測定にあたっては、触針式表面粗さ計（東京精密製：サーフコム1400A）を使用した。ボール表面の観察は、光学顕微鏡を用いて行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 粒径一定とした場合の無段階研磨

図4に、砥粒の平均粒径を一定にして60分間研磨（無段階研磨と呼ぶ）した場合の実験結果を示す。図4には、平均粒径1.0  $\mu\text{m}$ の砥粒を用いて研磨したときの実験結果を表わす。図4には、铸铁ラップを用いて鋼球を研磨した場合の結果<sup>5)</sup>も併記している。実験条件は、両ラップとも同じである。砥粒濃度を3wt%、研磨荷重を2.1N、ボールの自転速度を1000rpmとして実験を行った。

図4は、表面粗さと自転軸角度 $\theta$ の関係を示している。図4から、 $\theta$ の値が増えるにつれて表面粗さは次第に低減し、パッドラップの場合40度付近で、一方铸铁ラップは60度付近で極値を示した後、緩やかに増加する傾向を示すことがわかる。表面粗さの絶対値は铸铁ラップの方がパッドラップよりも大きい。すなわち、铸铁ラップで研磨した面はパッドラップの場合よりも粗面であることを示している。このため、以後の実験はパッドラップを用いて行った。図4から、パッドラップの場合、 $\theta$ 角が40度と60度で表面粗さの値にあまり大きな差は見られないので、以後の実験は铸铁ラップの $\theta$ 角60度（表面粗さの極値）に合わせて行った。

図5に、砥粒の平均粒径を0.3、1.0、5.5  $\mu\text{m}$ の3通りに変えて、回転スピン制御法（ $\theta = 60$ 度）で研磨した場合の実験結果を

示す。実験はパッドラップを用い、砥粒濃度を20wt%、研磨荷重を5N、ボールの自転速度を1600rpmとして行った。図5から、いずれの砥粒の場合も時間の経過とともに表面粗さは急激に減少する様子がわかる。粒径が、5.5  $\mu\text{m}$ の砥粒の場合は約15分で表面粗さは一定になり飽和し、1.0  $\mu\text{m}$ の場合は約30分で飽和することがわかる。また、粒径が0.3  $\mu\text{m}$ の砥粒の場合は、90分研磨を続けても緩やかに低減を続ける様子がわかる。しかしながら、90分経過後の表面粗さの絶対値は、いずれの砥粒の場合もほぼ同じである。

実験では、真球度についても実測しているがデータにバラツキが見られた。この点に関して、今後詳細な検討を行う予定である。

#### 3.2 多段階研磨

多段階研磨に関する実験は、次のようにして行った。一次研磨として平均粒径5.5  $\mu\text{m}$ の砥粒を用いて30分間行い、次に平均粒径1.0  $\mu\text{m}$ の砥粒に切り替え30分間研磨（二次研磨）を行う。その後、平均粒径0.3  $\mu\text{m}$ の砥粒を用いてさらに30分間研磨（三次研磨）した。30分ごとに砥粒の粒径を変えたのは、図5の実験から、いずれの砥粒の場合でも、30分研磨すると表面粗さがほぼ飽和したので、砥粒（径）の切り替え時間を30分とした。

図6に、多段階研磨を行ったときの表面粗さと研磨時間の関係を示す。図6(a)は在来法（ $\theta = 6$ 度）で研磨した結果を、図6(b)は回転スピン制御法（ $\theta = 60$ 度）の結果を示す。図中に記す各プロット点（データ）は、それぞれ別の鋼球を用いて研磨したときの結果を表す。図6(a)から、在来法で研磨した場合には、砥粒（径）の切り替え効果は小さいことがわかる。すなわち、同一砥粒を用

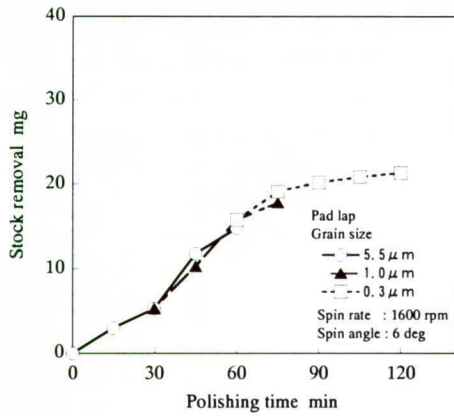


Fig.7 (a) Relation between stock removal and polishing time (Conventional)

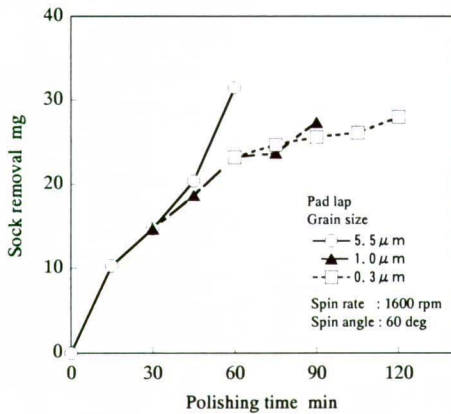


Fig.7 (b) Relation between stock removal and polishing time (Spin angle controlled)

いて30分以上研磨した場合の表面粗さと微細砥粒に切り替えて研磨したときの表面粗さの差が小さい。一方、図6(b)の回転スピン制御法の場合は、砥粒切り替えの効果が明瞭で表面粗さに大きな差が認められる。

図7に、多段階研磨を行ったときの加工量と研磨時間の関係を示す。図7(a)は在来法 ( $\theta = 6$ 度) で研磨した結果を、図7(b)は回転スピン制御法 ( $\theta = 60$ 度) の結果を表す。図7から、いずれの研磨法の場合も砥粒を切り替えた後も加工量は徐々に増加することがわかる。しかし、増加の割合(直線の傾き)は在来法よりも回転スピン制御法の方が大きい。すなわち、回転スピン制御法を用いて研磨した方が加工量が多く(研磨能率が大きく)なることをデータは示している。

図8に、多段階研磨したときのボール表面の光学顕微鏡写真を示す。図8(a)は研磨前のボールを、図8(b)は回転スピン制御法 ( $\theta = 60$ 度) で一次研磨したときの写真を、図8(c)、図8(d)は回転スピン制御法で二次研磨、三次研磨を行ったときの写真を表わす。また、図8には、触針式粗さ計で測定したプロフィールも併記している。図8から、多段階研磨によって表面粗さが著しく低減する様子がわかる。

図9に、砥粒の粒径を一定(無段階研磨)にして60分(粒径  $1.0 \mu\text{m}$ )、90分(粒径  $0.3 \mu\text{m}$ ) 研磨を行った場合の光学顕微鏡写真とプロフィールを示す。図8に示す多段階研磨(同一研磨時間)の光学顕微鏡写真と比べると、無段階研磨(図9)の場合は表面の研磨状態はあまりよくないことがわかる。

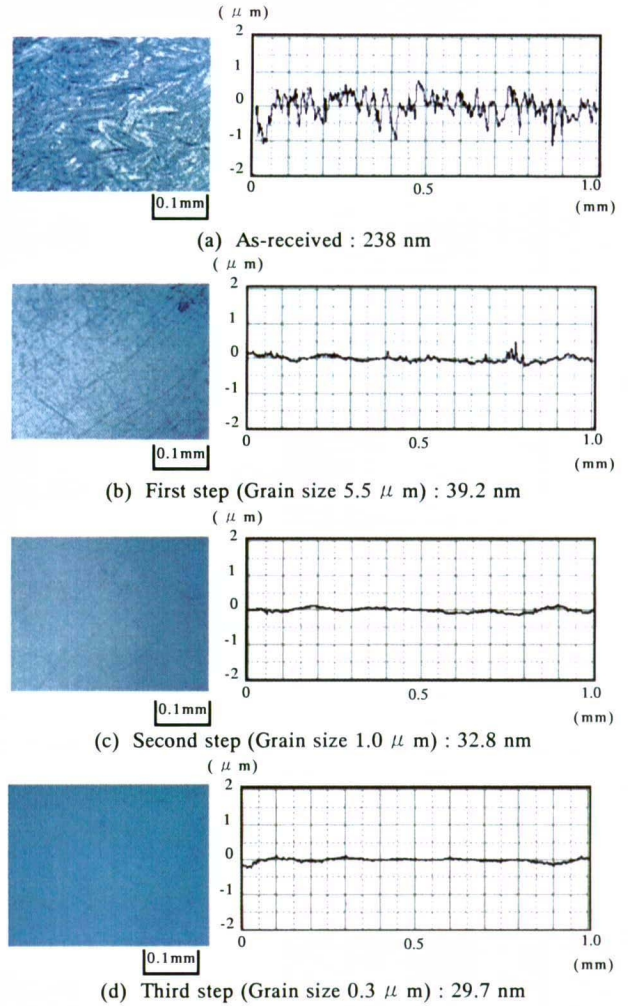


Fig.8 Optical micrographs and profiles of surface

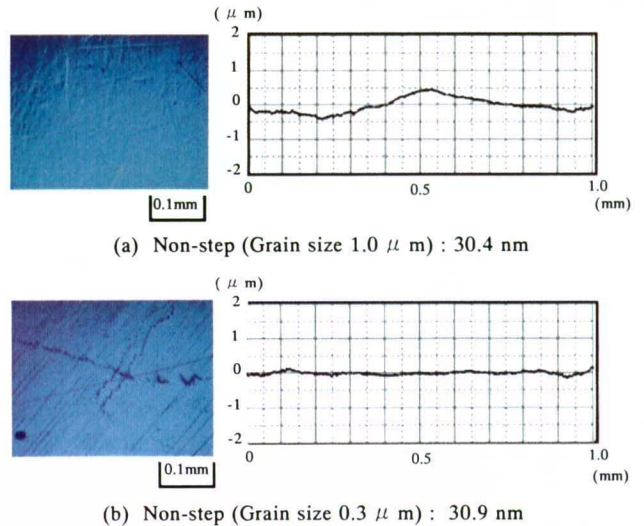


Fig.9 Optical micrographs and profiles of surface

#### 4. 考 察

本研究では、ラップ盤に発泡ポリウレタンパッドを貼付したパッドラップを用いて研磨を行っているので、鋳鉄ラップによる研磨の場合とは研磨機構が幾分異なるのではないかと考えられる。鋳鉄ラップは弾性体であり、一方パッドラップは粘弾性体である

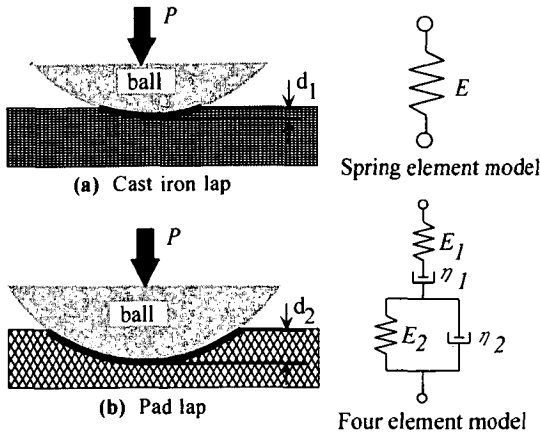


Fig.10 Schematic view

ので、ボールが荷重を受けたときのラップの接触変形状態は、鑄鉄ラップとパッドラップでは異なると考えられる。

いま、平面ラップ上にボール（半径R）が置かれて鉛直方向から荷重Pが負荷された場合を考える（図10）。図10(a)は鑄鉄ラップを、図10(b)はパッドラップの場合を表す。ボールに荷重が負荷されると、鑄鉄ラップもパッドラップもボールとの接触点で接触変形を起こす。鑄鉄ラップの場合、その変形量 $d_1$ はHertzの接触理論<sup>6)</sup>から求められる。その値は次式で表される。

$$d_1 = 1.23 \sqrt[3]{\frac{P^2}{E^2 R}} \quad (3)$$

一方、パッドラップの変形量 $d_2$ は次式で表される<sup>1)</sup>。

$$d_2 = \frac{P}{E_1} + \frac{P}{E_2} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_2}\right) \right\} \quad (4)$$

パッドの力学特性（粘弾性特性）は、VoigtモデルとMaxwellモデルを直列結合した4要素モデル（図10(b)）で表記されると仮定している。式(4)から、 $U=P/E_1$ 、 $V=P/E_2 \cdot (1 - \exp(-E_2 t / \eta_2))$ 、 $\alpha = Pt / \eta_1$ 、 $\tau = \eta_1 / E_1$ 、と書き表される。tは、時間を表す。天秤型の粘弾性測定装置を用いて発泡ウレタンパッドの粘弾性特性値を測定した結果、その出力特性は4要素モデルの表記が妥当なことを示している。

Hertzの式(3)から求められる変位量 $d_1$ は、荷重Pの値を2.1Nとすれば、約0.28 $\mu\text{m}$ となる。一方、発泡ウレタンパッドの変位量 $d_2$ は、瞬間弾性にもとづく変位量Uの値（表1）で表されると仮定すれば約4.5 $\mu\text{m}$ である。パッドの粘弾性測定は、ガラス球（半径約3.2mm）で行っているの、被研磨球の大きさ（半径約4.8mm）とはその大きさが幾分異なる。しかし、オーダー的にみて大差はないと考えられる。これらの結果から、パッドラップの変位量は鑄鉄ラップのそれに比して格段に大きいといえる。このため、同一荷重を負荷して研磨した場合でも、ラップの材質によってボールが相手面と接触する面積が異なることになる。接触面積が大きくなることは、ボールが研磨作用を受ける面積が増えることを意味する。研磨は、砥粒による引っ掻き作用と転動作用によって行われるので、接触している単位面積当りに存在する砥粒数が一定であるとすれば、接触面積が多い方が研磨量が多くなると考えられる。パッドラップの場合、鑄鉄ラップに比して表面粗さの絶対値が小さくなったのはこのことが原因していると推察

される。

しかしながら、パッドラップの変位（変形）特性がUの他、Vや $\alpha$ にもとづく変位もあり、また、パッドの材質が異なると変位特性も変わるので、研磨にはどの程度の値であればよいのか検討しておく必要がある。軟らかい変形容易なパッドを使用した場合、荷重負荷に伴ってボールとパッドの接触面積が増大する。接触面積の増大は、ボールの回転に対する抵抗が増すことを意味し、場合によってはボールが回転しなくなる。実際、シリコンウエハの最終仕上げ（鏡面研磨）に用いられている軟質のパッドをボールの研磨に適用してみたが、ボールはスムーズに回転しなかった。ボールの真球度も悪くなった。このため、ボールの研磨には適度の剛性を有するパッドを使用する必要があると考えられる。

多段階研磨を在来法と回転スピン制御法で行った場合、加工量の増加割合は両者で異なる（図7、図8）ことがわかった。これは次の理由によるものと考えられる。ボールの研磨は、砥粒を介してラップとボールが接触界面で相対すべりを起こすことによって行われるが、自転軸角度 $\theta$ の値が増すにつれて旋回すべり成分が増加する。旋回すべり成分が大きくなると加工量が増加することが理論解析<sup>3)</sup>から明らかにされており、このことが原因して在来法と回転スピン制御法で研磨能（力）に違いが生じたものと考えられる。砥粒切り替え効果も回転スピン制御法の方が有効に作用したものと考えられる。

## 5. 結 言

回転スピン制御法を適用して鋼球の多段階研磨を行った。研磨は、発泡ポリウレタンパッドをラップ盤に貼付し砥粒の粒径を粗粒から細粒に順次変えて行った。実験の結果、次の結論を得た。

- (1) 研磨面の表面粗さの絶対値は、鑄鉄ラップよりもパッドラップの方が小さい。
- (2) パッドラップを用いて無段階研磨を行った場合、表面粗さは粗粒の方が細粒よりも速く低減する。
- (3) 多段階研磨を行った場合、在来法に比べて回転スピン制御法の方が表面粗さの低減度合いが大きく、かつ加工量の増加割合が大きい。

## 謝 辞

回転スピン制御研磨装置は、金沢大学技術支援センターで製作されたものであり記して謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 井戸守, 羽地務: ミニチュア玉軸受, 日刊工業新聞社, (1961)147.
- 2) 黒部利次, 角田久也, 小野田誠: スピン角度制御型ボール研磨 (第一報) - 研磨機構の理論解析 -, 精密工学会誌, 62, 12(1996)1773.
- 3) 黒部利次, 角田久也, 小野田誠: スピン角度制御型ボール研磨 (第二報) - 窒化ケイ素球の研磨 -, 精密工学会誌, 63, 5(1997)726.
- 4) 黒部利次, 西川勝信, 高山昌也: ポリシャの粘弾性挙動, 材料, 38, 434(1989)1346.
- 5) 黒部利次, 石山陵司: 回転スピン制御研磨による鋼球の研磨 - 鑄鉄ラップとパッドの研磨能比較 -, 2002年度精密工学会春季大会講演論文集, (2002)310.
- 6) S. Timoshenka, J. N. Goodier: Theory of elasticity, McGraw-Hill & Kogakusha, (1951)372.