

スピン角度制御型ボール研磨 (第2報)*

—窒化けい素球の研磨—

黒部 利次** 角田 久也*** 小野田 誠†

Spin Angle Control Lapping of Balls (2nd Report)
—Lapping of Silicon Nitride Ball—

Toshiji KUROBE, Hisaya KAKUTA and Makoto Onoda

Ceramic balls are expected to become useful for tougher bearings than conventional ones. However, the conventional ball lapping method which uses a couple of flat and V-groove lapping plates, needs so long machining time. In present paper, efficient lapping method of silicon nitride balls has been proposed. In this method, it is designed that V-groove lapping plate is separated into two parts and three plates are able to rotate independently. This lapping equipment enables the spin angle θ of ball to control from 0° to 90° . It is found from the experiments that the spin angle θ of ball has great influence to lapping of silicon nitride one. Stock removal rate increases gradually with increase of the spin angle θ and surface roughness decreases considerably with increase of it in which lapping mode varies from the satin finished surface to scratched one. Experiments indicate that degree of the reduction of deviated diameter of ball from ideal one is dependent both upon the rotational speed and the spin angle.

Key words: spin angle control lapping, silicon nitride ball, stock removal rate, surface roughness

1. 緒 言

最近、窒化けい素等のセラミックス球を組み込んだボールベアリングが各方面で必要になってきている。しかし、セラミックスは一般に難加工材であり、加工に長時間要している。このため、セラミックス製のベアリングは必然高価なものとなり、普及があまり進まない要因ともなっている。窒化けい素球を高効率・高精度に研磨するには、従来の球（以下ボールという）研磨法を再検討する必要があると思われる。

従来、鋼球の研磨は立型ラッピング盤を用いて行われ¹⁾、これによって直径の縮小、真球度の向上、表面粗さの低減を図っている。一般に、上下のラッピング盤の回転速度を大きくすると研磨速度は増大する。また、ラッピング盤に非対称なV溝を円周方向に彫ることも効果がある。しかし、ラッピング盤の回転速度をあまり大きくすると、ラッピング液が遠心力によって飛散するのでそれにはおのずと限界がある。また、溝の形状を極端に変えることもできない。前報²⁾では、ラッピング中のボールの回転機構に留意し、スピン角制御ボール研磨法を新しく創案し、ボールの運動に及ぼす各ラッピング盤の回転速度の影響を明らかにした。そして、その研磨機構について理論的な検討を行った。

本報では、スピン角度制御型研磨装置を新しく製作し、窒化けい素球についてラッピング試験を行った。そして、理論解析の結果との比較検討を行った。

2. 実験方法

2.1 ラッピング装置

従来のボール研磨法と新しく開発した研磨法の構造上の違いを図1に示す。新研磨装置ではラッピング盤に工夫を凝らし、V溝を構成するラッピング盤を、外側ラッピング盤Bと内側ラッピング盤Cに分離独立させ、それらが単独で自由に回転できる構造になっている。図2に、研磨中のボールの回転の様子を示す。ボールは、水平軸に対して角度 θ （自転軸角度という）をなしてスピンしながら絶えずその向きを変えている。その際、ラッピングとボールの間で相対すべりが起こり、研磨がなされる。ボールの自転軸

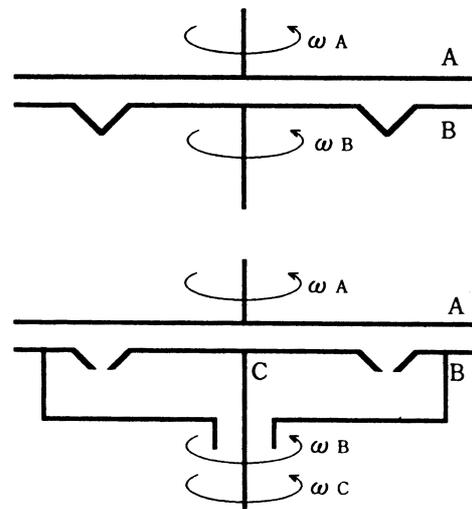


Fig.1 Comparison between conventional method (upper) and developed method (lower)

* 原稿受付 平成8年11月11日

** 正会員 金沢大学工学部 (金沢市小立野2-40-20)

*** 金沢大学大学院 (現、(株)ワクラ電子製作所; 七尾市石崎町ウ部1番地)

+ NTN(株) (磐田市東貝塚1578)

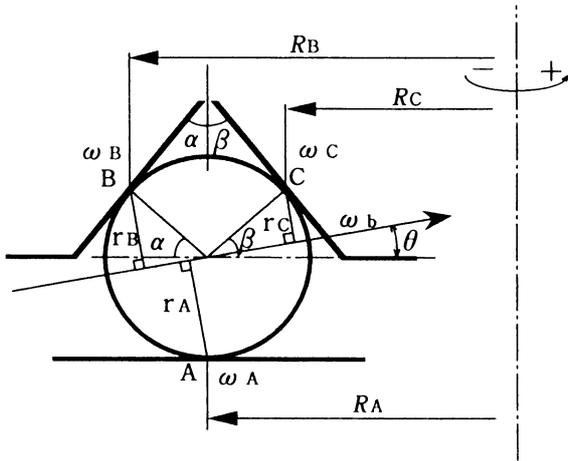


Fig.2 Kinematics of a ball in developed method

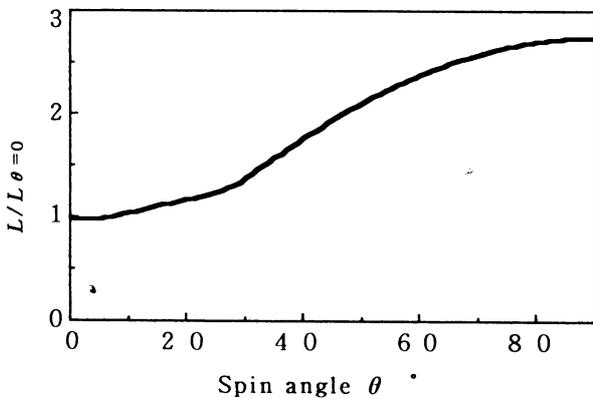


Fig.3 Effect of spin angle on relative slide distance

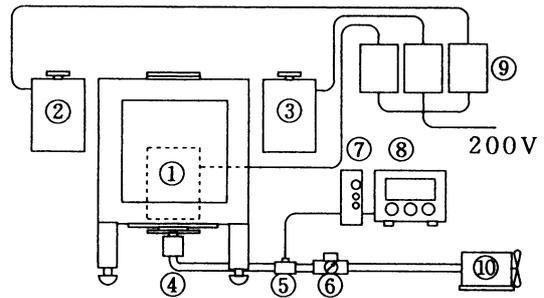
角度θの値は、理論解析の結果²⁾から式(1)で与えられる。

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

本研磨法の場合、 $\omega_A, \omega_B, \omega_C$ の値を適当に選ぶことによって、 θ の値を制御し得ることを式(1)が示している。 θ の値を 0° から 90° の範囲まで変化させることができる。

また、前報²⁾において砥粒の相対すべり距離L(研磨量に比例)について解析を行った。その結果を図3に示す。図3から、 θ の値が増すにつれて研磨量が漸次増加することがわかる。そこで、理論解析が妥当なものであるかどうかを確かめるため、スピン角度制御型ボール研磨装置を作製し、窒化けい素球について研磨実験を行った。

図4に、装置のシステム構成を示す。本システムは、ボール研磨装置、回転駆動装置、インバータ、加工荷重制御装置、エアコンプレッサ、計測・制御装置等から構成されている。ボールの研磨は、ボール研磨装置④で行われる。研磨部は、上側の内・外のラップ盤と下側ラップ盤から構成されている。被研磨ボールは、それら3つのラップ盤のすきまに挿入され、研磨剤を介して研磨される。



- ① Motor A
- ② Motor B
- ③ Motor C
- ④ Lapping machine
- ⑤ Pressure transducer
- ⑥ Air regulator
- ⑦ Strain amplifier
- ⑧ Pen recorder
- ⑨ Inverter
- ⑩ Air compressor

Fig.4 Schematic diagram of lapping system

Table 1 Lapping condition

Work	Si ₃ N ₄
Grain	Diamond
Diameter	2.6 μm
Concentration	20vol%
Solvent	Oil soluble in water
Rate of supply	
Abrasive	0.1cm ³ every15,30min
Solvent	0.5cm ³ every15min
Ball spin rate	2000-8000rpm
Lapping load	10-30N/ball
Lapping time	10-90min
Upper lapping plate	120° V-groove type
Lower lapping plate	Flat type

上側ラップ盤は、内・外ラップ盤のなす角度が 90° と 120° の2種類製作したが、実験には主として 120° のものを使用した。また、下側ラップ盤は平板形状のものを使用した。ラップ盤の材質は軟鋼(S45C)である。

2.2 供試材と加工条件

ラッピング実験は窒化けい素球について行った。ボールはHIP処理したままの素球で、直径は3/8inchである。

1回のラッピング実験に8個のボールを供した。本実験では、下側ラップ盤に平面形状のラップ盤を使用しているため、ボールはラップ面上で安定な位置を取り得ない。そこで、ボールを保持するための器具(リテーナ)を作製した。リテーナは、直径120mm、厚さ4mmの軟鋼製の円板で、半径50mmの円周上に等間隔にφ10.5mmの穴が16個あいている。被研磨用ボールはその穴の中に一穴飛びに挿入される。

研磨用砥粒としては、粒径が2μmと6μmの2種類のダイヤモンド砥粒を使用した。実験の際、それを水溶性の油剤ラップ液に混入しラップ剤とした。ラップ液と砥粒の混合割合は体積比で4:1である。ラッピング実験に際し、ラップ面の汚れを丹念に拭きとり、ラップ剤を均一に塗布した。また、ラッピング条件によってはラップ剤とラップ液をその都度補給した。ラップ剤の1回の補給量は0.1cm³、ラップ液の1回の補給量は0.5cm³

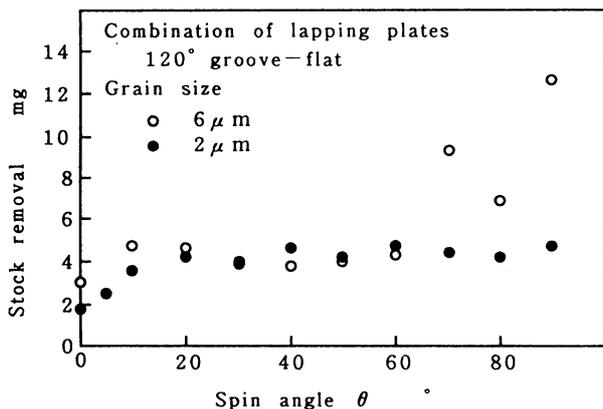


Fig. 5 Relation between stock removal and spin angle

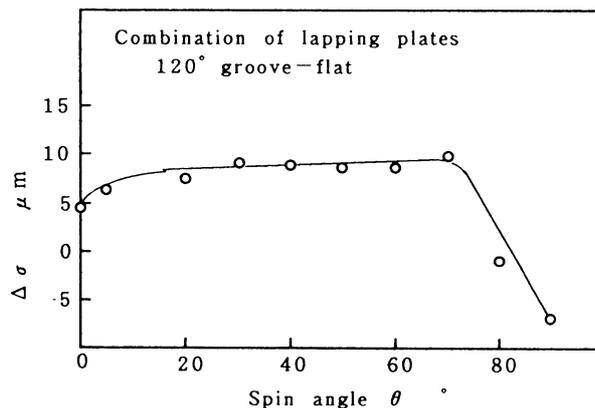


Fig. 6 Relation between decrease of deviated diameter of ball and spin angle

である。ラップ剤塗布後、ボールを装置にセットした。

加工荷重の付与は空気圧を用いて行った。空気圧の供給は、小型のエアコンプレッサを使用し、ラップ盤ハウジングに内蔵されたエアシリンダにロータリジョイントを介して供給する。荷重制御は、図4のエアレギュレータ⑥の弁を調節して行い、荷重の影響を調べる目的以外の実験では、ボール1個当たりの加工荷重は20N一定とした。

本ラッピング装置では、個々のラップ盤の回転速度はそれぞれ独立に設定できる機構となっている。ラップ盤の回転速度の選定は、前報²⁾の解析結果を踏まえて行った。しかし、研磨に及ぼす回転速度の影響を調べる目的以外の実験においては、ボールの自転速度を4000rpm一定とした。加工条件を表1に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 自転軸角度 θ と加工量

図5に、自転軸角度 θ と加工量の関係を示す。加工時間は30分一定としている。ラップ剤は0.1cm³供給した。

図5から、ボールの自転軸角度 θ の値が増すにつれて、加工量が徐々に増加する傾向にあることがわかる。在来形のV溝ラップ盤（一体形）の場合には、自転軸角度 θ は4.95° になるので、新研磨法は加工能率の向上を図る上で有利なことがわかる。特に、粒径6 μm の砥粒を用いた場合にはそのことは顕著である。

本実験結果は、前報の解析結果（図3）とも比較的良好に合っているとと言える。

次に、図6に自転軸角度 θ と直径不同修正量 $\Delta\sigma$ の関係を示す。直径不同量 σ とは、ボールの真球度を知る目安となるもので、ボールの直径の最大値 d_{max} と最小値 d_{min} の差で表される。図6に示す直径不同修正量 $\Delta\sigma$ は、加工前の直径不同量と30分加工後の直径不同量の差で表示している。ボールが速く真球になるためには、直径不同修正量の値が大きいことが望ましい。実験は粒径2 μm の砥粒を使用して行った。

図6から、自転軸角度 θ が増すにつれて直径不同修正量は徐々に増加し、30° 辺りで飽和する。その後、70° 近くまで一定の値となる。それ以後は、直径不同修正量の値は急激に減少する。90° では逆に直径不同修正量の値が悪くなる（負）ことがわかる。

直径不同修正量の値が図6に示すような曲線を描くのは、次の理由によると思われる。ボールの回転に伴って生ずるすべりには、線すべりと旋回すべりがあるが²⁾、自転軸角度 θ の値が増すと、旋回すべり成分が次第に増えると予想される。このた

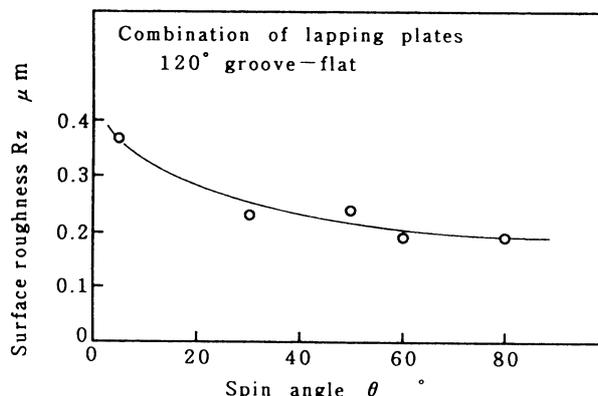


Fig. 7 Relation between surface roughness and spin angle

め、表面の研磨状態も変化すると考えられる。実際、後述するように自転軸角度 θ の値が増すにつれて、面の仕上げ様態は梨地面から引っかき面へと変化する。直径不同修正量は、この研磨状態と密接に関係していると考えられ、これがために図6に示すような曲線となったものと思われる。

一方、自転軸角度 θ の値がほぼ70° を過ぎる辺りから、直径不同修正量の値が急激に減少するのは次の理由によるのではないかと考えられる。自転軸角度 θ の値が大きくなると、ボールの旋回に対する抵抗が急速に増加することが予想される。実際、90° 近辺ではボールは回転しなくなる。角度が大きい側で直径不同修正量の値が急減したのは、旋回に対する抵抗の急増が原因していると考えられる。

図7に、自転軸角度 θ と表面粗さの関係を示す。研磨は、粒径2 μm の砥粒を用いて行った。被研磨試料として、表面粗さ R_z 1.0 μm の素球を使用した。図7から、自転軸角度 θ の値が増加するに伴って、表面粗さは次第に低減していく様子が見られる。

図8に、30分加工後の表面粗さのプロフィールを示す。粗さの測定は触針式粗さ計（タリステップ）を用いて行った。図7、図8を通観すると、表面粗さの低減を図るには、自転軸角度 θ の値を大きくした方がよいことがわかる。先に示した図8から、自転軸角度 θ の値が増すと加工量が次第に増えることが知られる。加工量の増大は、ボールの体積の減少によってもたらされるが、それは主としてボールの凹凸（表面粗さ）の低減によって賄われるので、自転軸角度 θ の値を大きくすることは粗さの低減には有効である。

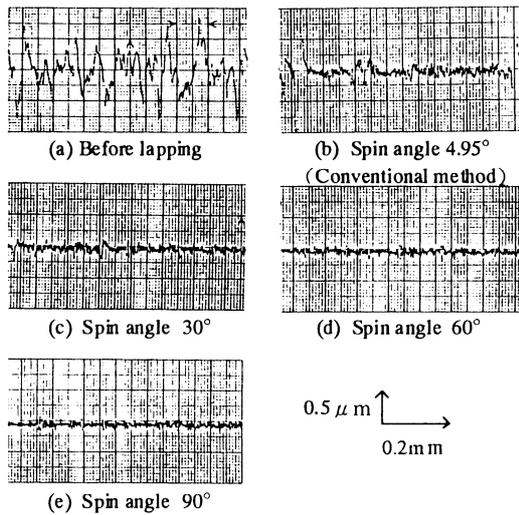


Fig. 8 Surface profiles of balls after lapping for 30min

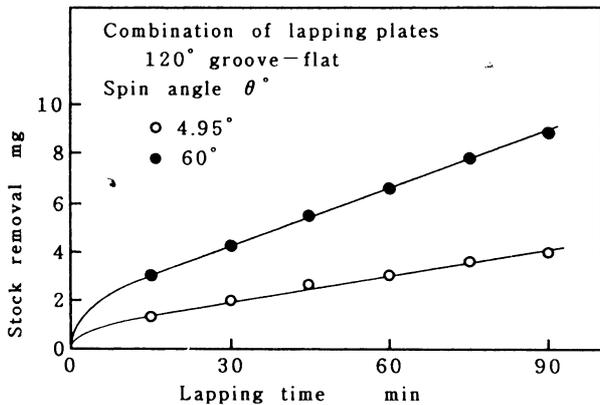


Fig. 9 Relation between stock removal and lapping time

次に、60分加工後のボール表面を光学顕微鏡で観察した。その結果、ボールの加工のされ方が自転軸角度の違いによって異なることがわかった。自転軸角度が小さい場合には、加工表面は梨地状の面になるが、自転軸角度が大きくなるにつれてその割合は減少し、代わって、砥粒による引っかき痕が多く見られる面となる。これは、自転軸角度の増加に伴って、ボールとラップ間の相対すべりが増えるために生じたのではないかと推察される。

3.2 加工時間の影響

図9に加工時間と加工量の関係を示す。ラップ剤およびラップ液は15分ごとに供給した。

図9から、自転軸角度が4.95°、60°のいずれの場合とも、加工量は加工時間にほぼ比例して増加することがわかる。しかし、上ラップ盤を一体型とした従来の研磨法(4.95°)の場合よりも、上ラップ盤を左右に分離した新研磨法(60°)の場合の方が加工量が多いことがわかる。このことから、加工能率の観点からみて新研磨法が球研磨に適していると言える。

図10に、加工時間とボールの直径不同量 σ の関係を示す。直径不同量 σ の値は加工直後に急減し、その後ゆるやかとなってやがて一定の値に近づく。図10から、自転軸角度が60°の新研磨法の場合には、4.95°の従来の研磨法の場合よりも直径不同

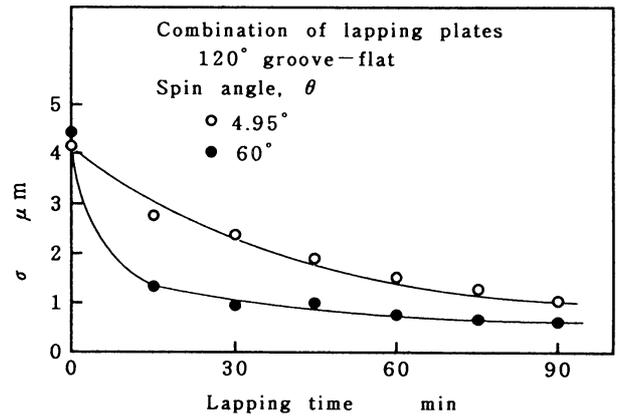


Fig. 10 Relation between deviated diameter of ball and lapping time

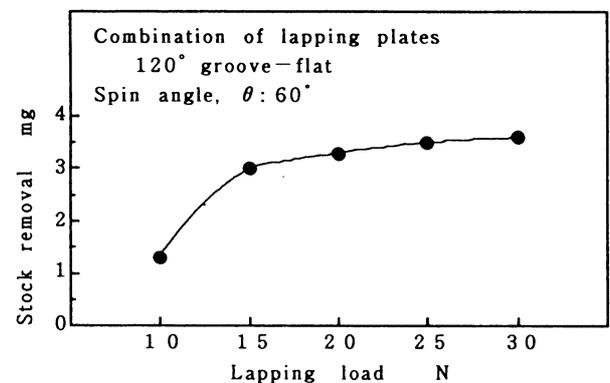


Fig. 11 Relation between stock removal and lapping load

修正の能率が良いことがわかる。

3.3 加工荷重と球の自転速度の影響

図11に、加工荷重と加工量の関係を示す。図中の加工荷重は、試料1個当たりの加工荷重を表す。

図11から、加工荷重が増加するに伴って加工量が次第に増えることが分かる。加工量は、加工荷重が15N/個当たりまでは高い増加率を示すが、その後は増加の割合は緩やかになる。これは次の理由によるのではないと思われる。一般に、加工荷重が増すにつれてボールとラップの間に働く摩擦も次第に増えると予想される。加工荷重が高くなって摩擦力も大きくなると、ボールの自転軸の移動が効率よく行われなくなる恐れが出てくる。高荷重側で加工能率が飽和したのは、これが原因していると思われる。

図12に、球の自転速度と加工量の関係を示す。加工時間は30分である。図12から、自転軸角度が4.95°、60°の場合とも、上に凸の曲線となり極大値を示すことがわかる。しかし、両者で極値の現れる場所が異なっている。

球の自転速度と加工量の間が上に凸の曲線になるのは、次の理由によると思われる。一般に、加工距離は球の自転速度に比例して増加すると考えられる。したがって、加工量は球の自転速度の増加に伴って徐々に増えると思われる。しかし、球の自転速度があまりにも高くなると、ラップ盤の回転による遠心力の作用によってラップ剤が飛散しやすくなる。さらにまた、高速になるとボールとラップ間の摩擦状態も変化し、境界潤滑から混合潤滑に移行³⁾することも考えられる。高速度域で加工

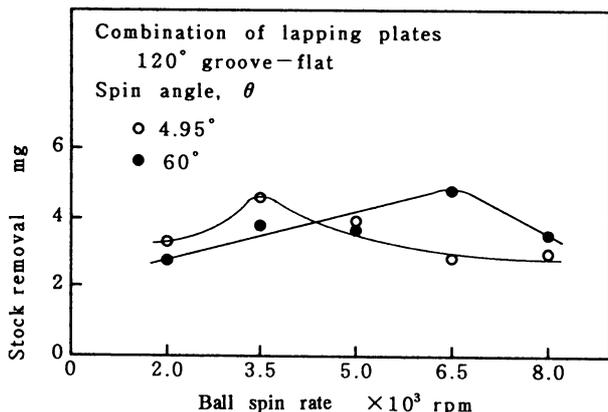


Fig. 12 Relation between stock removal and ball spin rate

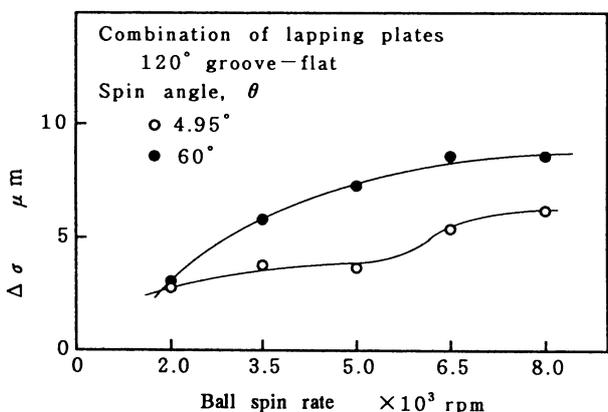


Fig. 13 Relation between decrease of deviated diameter of ball and ball spin rate

量が減少したのは、これらの要因が重なり合って生じたものと考えられる。

次に、自転軸角度によって極値の現れる場所が異なるのは次の理由によると思われる。前報²⁾から、ラップ盤A（下ラップ盤）、ラップ盤B（上ラップ盤）の回転速度は自転軸角度を4.95°に設定した場合の方が、60°に設定した場合よりも高いことがわかる。したがって、自転軸角度を4.95°に設定した場合の方が、遠心力による砥粒の飛散が起りやすいと言える。

このため、4.95°の場合に極値が低い球の自転速度域で現れたのではないかと考えられる。

図13に、球の自転速度と直径不同修正量 $\Delta\sigma$ の関係を示す。図13から、球の自転速度が増すのに伴って、直径不同修正量の値が徐々に増加する様子がわかる。また、自転軸角度60°の方が4.95°の場合よりも増加の割合が多い。直径不同修正量の値が一樣増加するのは、次の理由によるものと思われる。回転速度が大きい方が単位時間当たりのすべり距離も大きい。加工量はすべり距離に比例するので、これが要因して直径不同修正量が増加したものと考えられる。

4. 結 論

スピン角度制御型研磨装置を製作し、窒化けい素球についてラッピング実験を行った。その結果、次のような結論が得られた。

- (1) 自転軸角度 θ が増すにつれて加工量は次第に増加する。
この結果は、前報の解析結果ともよく対応している。また、高い加工能率を得るには、自転軸角度 θ の値を4.95°（在来法）以上の適当な値に設定することが望ましい。
- (2) 自転軸角度 θ が増加するにつれて、ボールの表面粗さは低減する。
- (3) 自転軸角度 θ が増加するにつれて、加工面は梨地状の面から砥粒による引っかき面へと移行していく。
- (4) 自転軸角度 θ が60°の新研磨法の場合には、4.95°の在来の研磨法の場合よりも直径不同修正の能率が良い。
- (5) ボールの直径不同を効率的に修正するには、球の自転速度を高めることが望ましい。

参 考 文 献

- 1) 井戸 守, 羽地 務: ミニアチュア玉軸受, 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1報) - 研磨機構の理論的解析 -, 精密工学会誌, 62, 12 (1996) 1773.
- 3) H. チコス (桜井俊男訳): トライボロジ, 講談社, (1980) 103.