

Spin angle controlled ball lapping method developed recently, is to have an excellent performance to finish the ball, in which V-groove lapping plate is separated into two parts and three plates are able to rotate independently. However, lapping of ceramic ball such as a silicon nitride one is very hard. Present paper focuses on both of the grinding characteristics and polishing ones of a silicon nitride ball. Grinding is conducted using the diamond wheels with grain size degradation, and then polishing is performed with very fine diamond of average grain size of nano-meter. It is found that the grain size degradation grinding method has very effective performance of finishing of the silicon nitride ball. Polishing of the ceramic ball with slurry mixed super fine diamonds into an ion-exchanged water yields higher decrease of nano-meter level of surface roughness. Spin angle controlled finishing method describes that higher finishing performance rather than conventional one.

Key words: ceramic ball, spin angle controlled grinding, grain size degradation diamond wheel, super fine diamond, surface roughness

1. 緒 言

機械が高速化・高精能化するに伴って、機械の要素部品の一つであるベアリングの加工精度に対する要求も厳しくなっている。ベアリングは、内外輪の隙間にボールを嵌合して作製されるが、ボールの加工精度がベアリングの回転精度に直接影響を及ぼす。近年、機械の使用環境が過酷劣悪化してくるにつれて、ベアリングの素材も鋼製からセラミックス製へと一部移りつつある。しかしながら、ファインセラミックスは一般に難加工材であり、高精度なベアリングを製造することは容易ではない。そのため、セラミックス製ベアリングは必然高価なものとなる。セラミックス製ベアリングには、機械的強度が大きく熱的・化学的性質に優れている窒化ケイ素球(以後ボールと呼ぶ)が一般に使用されている。セラミックボールは焼結によって造られるため、寸法不安定性があり所定の寸法に仕上げるには何らかの方法で加工を施す必要がある¹⁾。

ボールの加工は、V溝を彫ったラップ盤に被研磨ボールを入れ、上部ラップ盤との間で相対運動をさせることによって行われる²⁾。最近、加工能率の向上を図る視点から、回転スピン制御研磨法が創案・開発された⁴⁾。本研磨法は、V溝を分離して2つの内外ラップ盤とし、上ラップ盤と合わせて3軸独立回転方式としているところに特徴がある。難加工材の窒化ケイ素球を研磨するのに、本研磨法が有効であると考えられる。前報⁵⁾では、#800番、#1500番のダイヤモンド砥石⁶⁾を製作して研削加工を行なったが所期の表面粗さを得ることはできなかった。

そこで、本報では表面粗さの一層の低減を図ることを意図して、数種類のグレードの微粒のダイヤモンド砥石を新たに作製して研削加工を行った。さらに、ナノメータオーダの超微細ダイヤモンドを用いて研削加工後のボールについて研磨加工を行った。そして、表面粗さの低減機構について考察を行った。

2. 実験方法

2.1 回転スピン制御研削加工法

図1に、回転スピン制御研削加工法を示す。図1は、ボールの運動の様子を表わしている。被研削ボールは、ダイヤモンド砥石A、B、Cで構成される3軸駆動研削盤の間に挿入される。加工は、それら研削盤(砥石)を独立に回転させることによって行われる。ここで、R_Aはボール公転半径である。図1に示すように、ボールはダイヤモンド砥石に挟まれながら回転し研削される。その際、ボールは水平軸に対し角度θ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θを自転軸角度と呼ぶ。θ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、ボールの自転速度 ω_b は、計算の結果次式で表される。

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

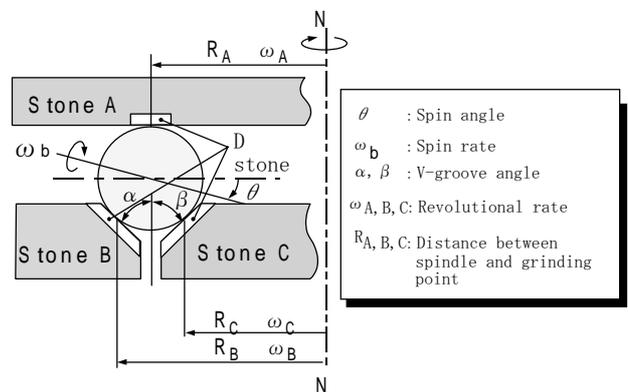


Fig.1 Kinematics of a ball in spin angle controlled method

* 原稿受付 平成 16 年 3 月 22 日
 ** 正 会 員 金沢大学工学部・元(金沢市小立野2) : 本研究は金沢大学に在職中に行ったものである
 *** 金沢大学工学部(金沢市小立野2)

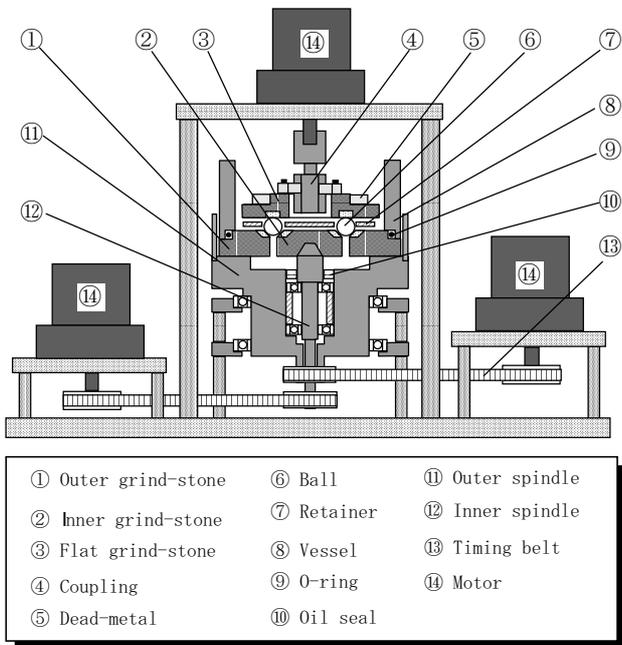


Fig.2 Schematic view of grinding machine

- | | | |
|---------------------|------------|-----------------|
| ① Outer grind-stone | ⑥ Ball | ⑪ Outer spindle |
| ② Inner grind-stone | ⑦ Retainer | ⑫ Inner spindle |
| ③ Flat grind-stone | ⑧ Vessel | ⑬ Timing belt |
| ④ Coupling | ⑨ O-ring | ⑭ Motor |
| ⑤ Dead-metal | ⑩ Oil seal | |

本加工法の場合、各砥石の角速度 ω_A , ω_B , ω_C の値を適当に選択することによって、 θ 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溝非分割型)の場合、 θ 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。

一方、ボールの研磨はラップ(ラップ盤)に研磨パッドを貼付して行った。研磨は、パッド上に砥粒を散布して行う。パッドは粘弾性体であるため、被研磨ボールは粘弾性支持された状態で回転駆動させられる。

2.2 研磨装置

図2に、加工装置の概略図を示す。装置は、下部内外定盤①、②と上部平面定盤③の研磨部、それらを駆動・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。ここで、研削加工の場合定盤はダイヤモンド砥石となり、一方研磨加工の場合パッドを貼付したラップ盤が定盤となる。

ボールの研削加工は、粒度番号#800, #1500, #3000, #12000, #64000, #128000 の計6種類の砥石を用いて行った。いずれのダイヤモンド砥石も、集中度100でメタルボンドの仕様となっている。研削加工は、加工槽内に菜種油を入れて行った。その際、槽内に設置している①、②、③の各砥石が埋没するまで菜種油を入れた。

一方、ボールの研磨加工はラップ盤に発泡ポリウレタンパッドを貼付して行った。研磨の際、パッド上に超微細なダイヤモンド砥粒を散布した。

2.3 実験条件

表1に、研削加工条件を示す。実験は、直径1/4inchの窒化ケイ素球(Si_3N_4)を用いて行った。研削加工は、粒度の異なる6種類のダイヤモンド砥石を製作して行った。加工液には菜種油を用いた。研削時にボールが常に加工液に浸かった状態とするため、加工を行う前に菜種油を研磨槽に100 cm³供給した。

また、加工中に加工液が少しずつ減っていくので、15分ごとに10 cm³の量の加工液を補給した。研磨荷重は、ボール1個につき2.2Nとした。

Table 1 Grinding conditions

Ball	Silicon nitride (Si_3N_4)
Diameter	1/4 inch
Lot size	4
Grinding Fluid	Rape seed oil
Initial supply	100 cm ³
Every 15 min	10 cm ³
Wheel	Diamond wheel
Grain	Synthesis diamond
Grain size	#800, #1500, #3000, #12000 #64000, #128000
Revolution radius R_A	35 mm
V-groove angle	90 deg
Grinding load	2.2 N
Grinding time	0 - 205 min
Spin rate ω_b	3000 rpm
Spin angle θ	
Spin angle controlled	60 deg
Conventional	3.5 deg

1回の実験に、ボールを4個供した。研磨中ボールが互いにぶつからないように、またボールが等間隔を保って回転するようにアクリル樹脂製のリテーナを作製した。ボールは、リテーナに開けられている穴に挿入される。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8個等間隔を保って穿孔されている。

一方、研磨は発泡ポリウレタンパッド(図3)を使用した。研磨用砥粒としては、爆射法で製造された超微細なダイヤモンド(UDDと呼ぶ)⁹⁾を用いた。その超微細ダイヤモンドの平均粒径は5nmである。図4に、超微細ダイヤモンドを透過電子顕微鏡で観察したときの写真を示す。

研磨は、イオン交換水に懸濁したダイヤモンドスラリーを適量パッド面上に滴下して行った。加工条件は、研磨荷重をボール1個当たり2.2N、自転軸角度 θ を60度、自転角速度 ω_b を3000rpm、加工時間を0~50時間、としている。

2.4 評価方法

ボールの研削加工の評価は、表面粗さの測定と光学顕微鏡観察によって行った。表面粗さの測定は、触針式表面粗さ計(Taylor-Hobson社製: Form Talysurf 4型)を用いて行った。測定は、加工したボール4個について行った。そして、ボール1個当たり測定方向を適宜変えて3回測定し、都合12回のデータの平均値を求めて表面粗さとした。

さらに、ボールの研磨(研削仕上げ)状態を詳しく調べるため、白色干渉顕微鏡(Zygo社製: New View)および光学顕微鏡を用いて表面の観察を行った。

3. 実験結果

3.1 ダイヤモンド砥石による研削加工

粒度一定のダイヤモンド砥石を用いて研削加工を続けると、表面粗さはその粒度で規定される固有の値(飽和した一定の値)になることが知られている。このため、平滑な表面を創成するためにはダイヤモンド(粒)の大きさを粗粒から微粒へと順次変えて研削を行なう必要がある。そこで、本研究では粒度番号

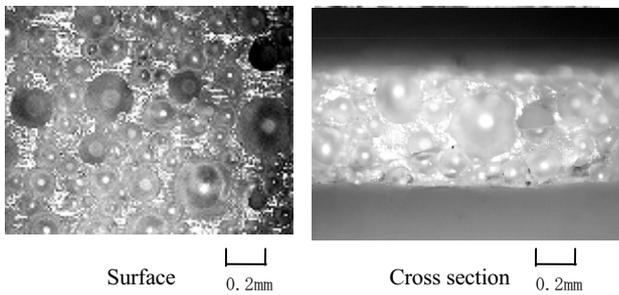


Fig.3 Optical micrographs of formed polyurethane pad

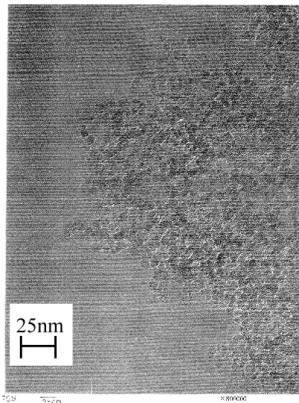


Fig.4 Optical micrograph of super fine diamond(UDD)

を#800, #1500, #3000, #12000, #64000, #128000 と順次変えて, すなわち粗粒の砥石から微粒の砥石へと段階的に砥石を変えて研削実験を行った. ここでは, 本研削法を多段階研削法と呼ぶことにする. 研削加工は, V溝を分離しない在来法 ($\theta = 3.5$ 度) と分離した回転スピン制御法の2通りについて行った. 回転スピン制御法で研削加工を行うとき, θ の値を60度とした.

図5に, 在来法で研削加工を行ったときの実験結果を示す. 図5は, 表面粗さと加工時間の関係を示す. 実験は, 負荷荷重を2.2N, ボールの自転速度 ω_b を3000rpmとして行った. 図5は, 粒度番号#800, #1500, #3000, #12000の砥石を用いて研削加工したときの実験結果を示している. 図5に示すデータは, 表面粗さが飽和したと思われるところで粗粒の砥石(粒度番号小)から微粒の砥石(粒度番号大)に順次変えて研削加工を行ったときの各段階での表面粗さの値を表わしている. 図5から, 砥石を粗粒から微粒のものに変えるにしたがって表面粗さが順次小さな値になっていく様子がわかる. 飽和した時点での表面粗さRaの値は, 素球の351nmから粒度#800砥石による第一段階研削加工で115nm, #1500砥石の第二段階で85nm, #3000砥石の第三段階で75nm, #12000砥石の第四段階で65nm, となる.

図6に, 回転スピン制御法 ($\theta = 60$ 度) により多段階研削を行った場合の実験結果を示す. 図6から, 回転スピン制御法の場合も在来法の場合と同様な粗さ低減の様態を示すことがわかる. 砥石を切り替えたときの表面粗さRaの値は, 素球の351nmから第一段階で110nm→第二段階で80nm→第三段階で65nm→第四段階で55nm, となることがわかる. 図5と図6の実験結果を比較すると, 在来法よりも回転スピン制御法の方が表面粗さの低減度合が幾分か大きいことがわかる.

3.2 超微粒ダイヤモンド砥石による研削加工

四段階にわたる加工を続行しても表面粗さはある一定の値

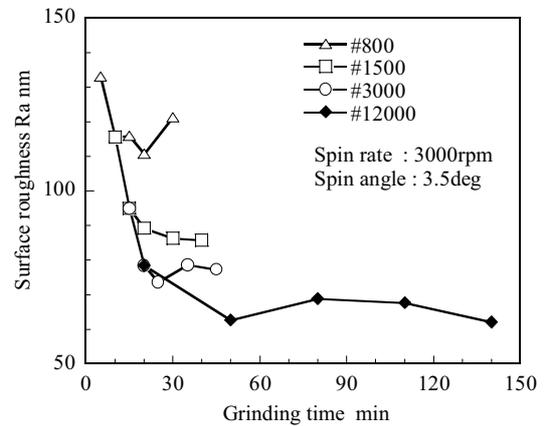


Fig.5 Relation between surface roughness and grinding time (Conventional)

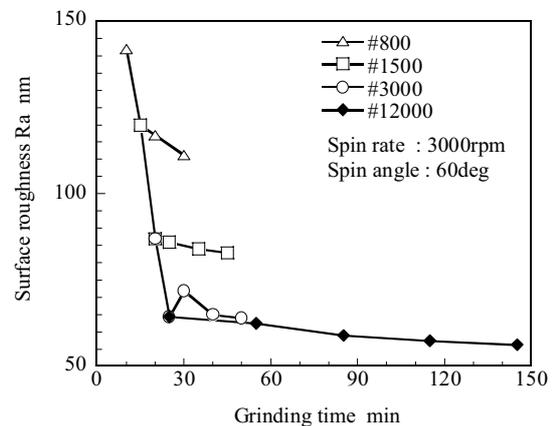


Fig.6 Relation between surface roughness and grinding time (Spin angle controlled)

に収束し, 加工時間を増加させても表面粗さのさらなる低下は認められなかった. そこで, 四段階目の研削加工を研削時間が55分経過した時点で終了し, 新しく製作した超微粒ダイヤモンド砥石(#64000, #128000)を用いて多段階研削を続行することとした. すなわち, 四段階目の研削終了後のボールを用いて五段階目(#64000), 六段階目(#128000)の研削実験を行った.

図7に, 実験結果を示す. 実験は, 回転スピン制御法 ($\theta = 60$ 度) により行なった. 実験条件は, 図6の場合と同じである. 図7から, #64000砥石で研削加工を続行すると表面粗さが#12000砥石で研削した値よりもさらに低減する様子がわかる. また, #64000砥石で1時間研削加工した後に, 砥石を#128000のものに取り替えて加工を続行するとさらに表面粗さが低減する.

図8に, 五段階目, 六段階目の研削加工を行ったボールの光学顕微鏡写真を示す. 図8には, 表面あざプロフィールも併記している. 図8から, 研削時間が増えるにつれて次第に表面が平滑になっていく様子がわかる.

3.3 超微細ダイヤモンドによる研磨加工

図6~図8の実験結果をみると, #128000の超微粒のダイヤモンド砥石を用いて研削した場合でも, 表面粗さRaは約20nmにしか低減しないことがわかる. 表面粗さのさらなる低減を図るには, 超微細なダイヤモンドを用いて研磨加工(ポリシング)

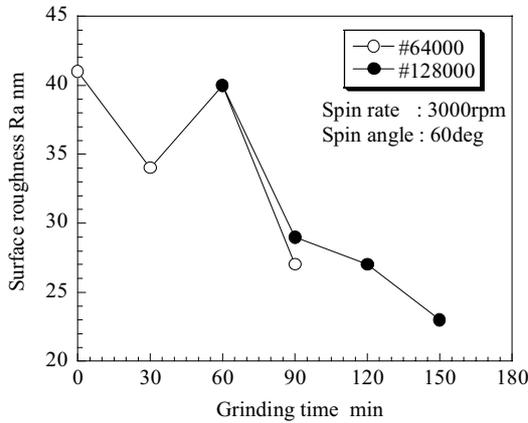


Fig.7 Effect of #64000 and #128000 diamond wheel

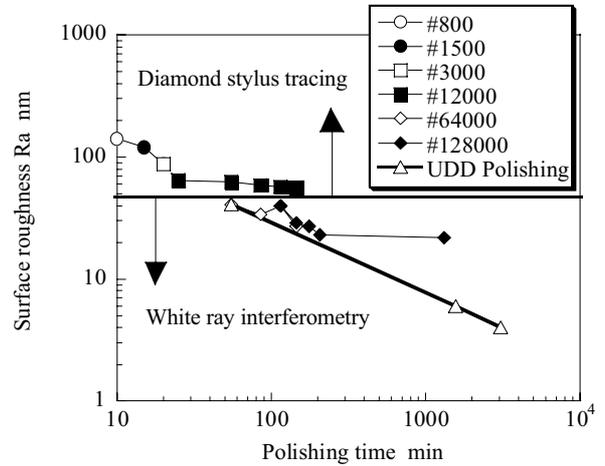


Fig.9 Relation between surface roughness and polishing time

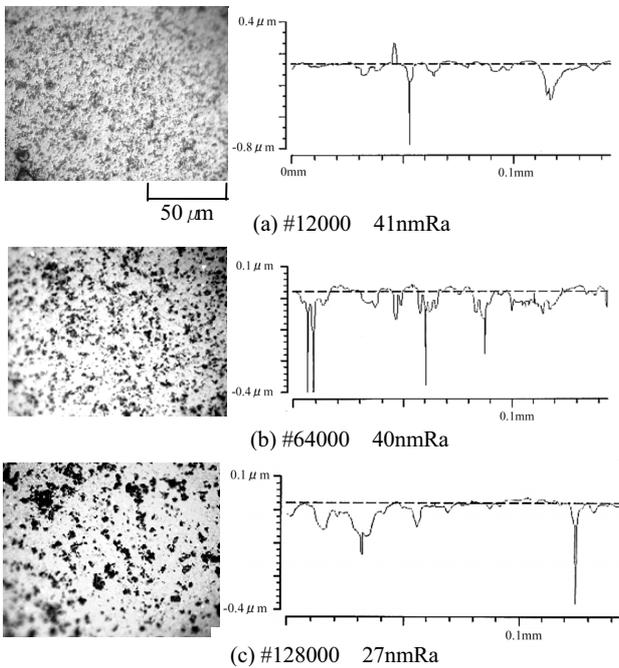


Fig.8 Optical micrographs and profiles of ground surface

を行う必要があると考えた。

そこで、研削加工に使用したダイヤモンドホイールに発泡ポリウレタンパッドを貼付してポリシングを行った。ポリシングは、回転スピ制御法を用いて行った。実験の際、超微細ダイヤモンドをイオン交換水に 5wt%の割合で懸濁させてスラリーとした。そして、その液を加工部に適量塗布してポリシングを行った。実験中、スラリーが少しずつ飛散するので 15 分加工後装置を止め、スラリーを再塗布した。研磨条件は、ダイヤモンド砥石による研削加工の場合と同じである。すなわち、負荷荷重を 2.2N/個、ボールの自転角速度 ω_b を 3000rpm、自転軸角度 θ を 60 度、とした。

図 9 に、実験結果を示す。ポリシング面の表面粗さの測定は、白色干渉顕微鏡を用いて行った。図 9 には、研削加工したときの測定結果も併記している。図 9 から、超微細ダイヤモンドで研磨加工を行うと表面粗さが格段に小さくなるのがわかる。実験範囲内での最終到達表面粗さは、Ra で約 2.5nm である。

図 10 に、ポリシング加工を行ったボール表面の光学顕微鏡写真を示す。図 10 から、ポリシングによって極めて平滑な面が得

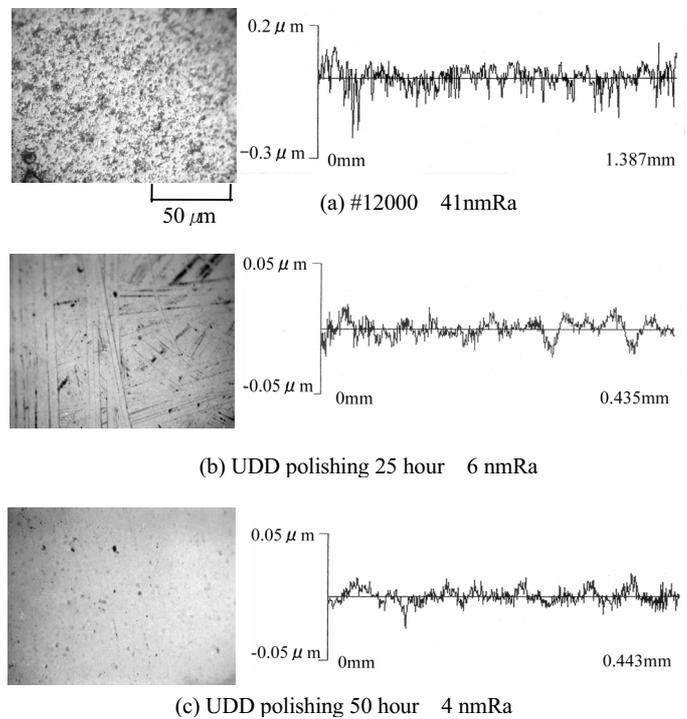


Fig.10 Optical micrographs and profiles of UDD polished surface

られることがわかる。

4. 考 察

窒化ケイ素球を粗粒から微粒のダイヤモンド砥石を用いて多段階研削 (図 5 ~ 図 7) すると、それぞれの段階で得られる表面粗さ (飽和表面粗さ) は、ステップ状に順次低減していく様子がわかる。これは次の理由によると考えられる。

図 11 に、粗粒から微粒に渡るダイヤモンド砥石の研削素過程を模式的に示す。研削は、いずれの砥石の場合も研削条件を同一とした負荷荷重も一定として行なっている。粗粒の砥石と微粒の砥石では、研削点でのボール表面上の単位長さ当たりに存在する砥粒の数は当然異なると考えられる。このため、砥粒一個当たりに負荷される荷重の大きさも粗粒と微粒の砥石では違った値になると考えられる。粗粒の砥粒の場合には、図 11 に示すように一つの砥粒の研削作用域は広い範囲に及び研削深さも深い。このことは、一つの砥粒による研削除去体積は大き

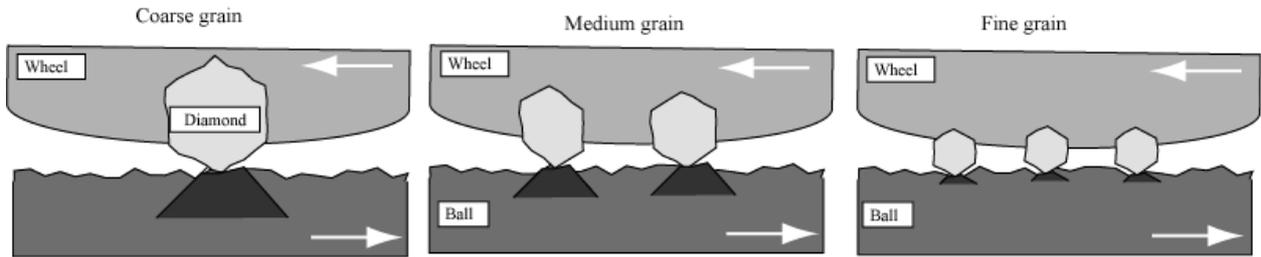


Fig.11 Grinding mechanisms of ball with grain size degradation

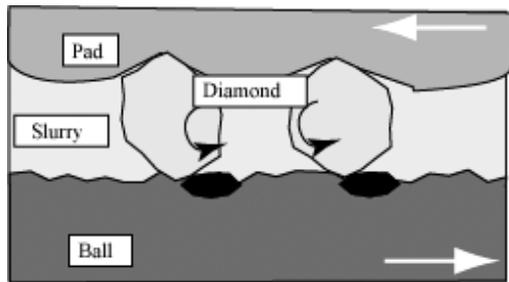


Fig.12 Polishing mechanism of ball with super fine UDD grain

くなることを意味する。除去後の表面性状は、相当に荒れたものになると考えられる。すなわち、凹凸の大きい幾何学模様を描くと推察される。一方、微粒の砥粒の場合は砥粒一個当たりの負荷荷重は小さい。そのため、一個の砥粒の研削作用範囲も狭くなる。深さ方向の研削作用力も小さくなると考えられる。その結果、研削除去体積も少なく研削後の表面凹凸形状も小さなものになると推察される。図5～図7に示す実験結果は、以上のような理由によって生じたものと考えられる。

超微粒のダイヤモンド砥石の製造は現段階では#128000の砥石が限度であり、それよりも平均粒が二桁も小さい超微粒なダイヤモンドによる加工は遊離砥粒方式によるポリシング加工によって行なわなければならない。このため、超微粒砥石による加工機構と超微粒ダイヤモンドによる加工機構はかなり異なることが予想される。超微粒ダイヤモンドによるポリシング加工は、図12に示すように粘弾性体のパッドに支持された砥粒によって行われる。研磨荷重が加工物を介して砥粒に負荷されると、砥粒は加工物とパッドの双方に反作用力を及ぼす。このため、パッドは変位・変形し砥粒を支持することになる。加工の際、加工物とラップ盤に貼付したパッドは互いに相対運動させられるため、砥粒は粘弾性支持された状態で移動すると同時に転がり運動も行なう。粘弾性支持された砥粒は引っ掻き作用を加工物に及ぼし、さらに回転運動を行う砥粒は引っ掻きもしくは擦過作用を加工物に及ぼす。すなわち、加工は粘弾性支持砥粒による引っ掻き作用と転動作用による研磨作用が重畳した形で行なわれると考えられる。

しかしながら、超微粒ダイヤモンドはあまりにも小さいので、パッド面上に散布された砥粒がどの程度加工に寄与しているのかはわからない。超微粒ダイヤモンドによる加工機構に関しては、今後理論および実験の両面から精力的に研究を積み重ねる必要がある。

5. 結 言

回転スピン制御法により窒化ケイ素球の多段階研削を行ない、その後超微粒ダイヤモンドを用いて研磨加工を行った。その結果、次の結論を得た。

- (1) ダイヤモンド砥石を用いて回転スピン制御法により窒化ケイ素球を研削すると、在来法（V溝非分離）の場合よりも表面粗さの低減が大きい。
- (2) 砥石の粒度番号を粗粒の#400番から超微粒の#128000番まで順次変えて多段階研削を行なうと、それに応じて表面粗さは低減する。
- (3) 発泡ポリウレタンパッドに超微粒ダイヤモンドを散布してポリシング加工を行うと、表面粗さは格段に低減し Ra でナノメートルオーダーの表面粗さが得られた。

謝 辞

ボール研磨装置は、金沢大学技術支援センターで製作されたものであり、また、ダイヤモンド砥石はノリタケダイヤ（株）、超微粒ダイヤモンドはビジョン開発（株）より提供を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1)今中 治:セラミックス加工ハンドブック, 日刊工業新聞社, (1987)2.
- 2)井戸 守, 羽地 務: ミニアチュア球軸受, 日刊工業新聞社, (1961)147.
- 3)曾田範宗: 軸受, 岩波書店, (1975)92.
- 4)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) - 研磨機構の理論解析 -, 精密工学会誌, **62**, 12(1996)1773.
- 5)黒部利次, 森本泰夫: θ 角制御法による窒化ケイ素球の研削加工, 精密工学会誌, **67**, 9(2001)1468.
- 6)Danilenko V.V. : Synthesizing and sintering of diamond by explosion, Energoatomizdat (in Russian), Moscow (2003) 87.