鋼球の回転スピンの制御研磨*

- θ 角強制回転の効果 -

黒部 利次** 久保 智*** 板垣 卓***

Spin Angle Control Lapping of Steel Ball
- Effect of θ Angle Rotation on Finishing Characteristics -

Toshiji KUROBE, Satoshi KUBO and Taku ITAGAKI

Steel balls set into the bearings are finished with conventional ball lapping machine which uses a couple of flat and V-groove lapping plate. Conventional lapping method, however, needs so long machining time. Present study focuses on efficient lapping method using spin control lapping machine which V-groove lapping plate is separated into two parts and three plates are able to rotate independently. Spin angle θ of steel ball is rotated by force during lapping to promote finishing efficiency. Experiments show that spin angle rotation have great effect on finishing characteristics such as a stock removal, decrease of deviated diameter and surface roughness of ball. Lapping carried out at fixed angle of θ indicates that finishing modes change drastically at 45 degree, which is responsible for efficiency of machining of ball.

Key words: steel ball, spin angle control lapping, θ angle rotation, finishing characteristics

1. 緒 言

鋼球はベアリングに組み込まれ、機械の回転部に数多く使用されている。近年、機械の回転精度が向上するにつれて、より真球に近い球（以後ボールという）が求められてきている。鋼球の研磨は、V溝を彫ったラップ盤と平面ラップ盤との間に被研磨球を入れて、荷重を負荷しながら相対運動させることによって行われる。これによって、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。一般に、上下のラップ盤の回転速度を大きくすると、研磨速度は増大する。また、ラップ盤に非対称なV溝を円周方向に彫ることも効果がある¹⁾²⁾。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。

そこで、前報³⁾⁴⁾でV溝ラップ盤を内と外の2つのラップ盤に分割した3軸駆動型球研磨法（スピン角度制御型ボール研磨法と命名）を提案し、その有効性について理論的実験的に検討した。その結果、新研磨法は在来の研磨法（V溝一体型研磨法と呼ぶ）よりも研磨能率が優れていることがわかった。しかし、新研磨法は多くの可能性を秘めた研磨法であり検討すべき点も多い。本報では、ボールの自転軸角度 θ を制御パラメータにとって、その値を連続的に変えた場合、それが研磨能率の向上や真球度の向上、表面粗さの低減にいかなる影響を及ぼすのか調べることにした。このため、新しく θ 可変研磨装置を開発し、 θ 一定研磨の場合と強制回転の場合について比較検討を行った。

2. 実験方法

2.1 ラッピング装置

新しく開発したボール研磨法と在来の研磨法の構造上の違いを図1に示す。スピン角度制御型ボール研磨装置では、V溝を構成するラップ盤を、外側ラップ盤と内側ラップ盤に分離独立させ、それらが単独で自由に回転できる構造になっている。研磨は、V溝の中に被研磨ボールを入れ、上側ラップ盤を載置し、各ラップ盤を相互に独立に回転させることによって行われる。

(a) Conventional ball lapping (b) Spin angle controlled ball lapping

Fig.1 Comparison between conventional and developed lapping method

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、ラップ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 θ の値は、理論解析の結果³⁾から式(1)で与えられる。

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

* 原稿受付 平成11年3月4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

Fig. 2 Kinematics of a ball in the developed method

Fig. 3 Schematic view of lapping machine

Fig. 4 Schematic diagram of lapping system

本研磨法の場合、各ラップ盤の角速度 ω_A 、 ω_B 、 ω_C の値を適当に選ぶことによって、 θ の値を任意に制御し得ることを式(1)が示している。

前報⁴⁾では、スピン角度制御型ボール研磨法の原理の確認を目的に研磨装置を製作し、セラミックス球（窒化けい素球）の研磨を行った。しかしこの装置の場合、空気圧を介して荷重

の負荷が行われていたため、荷重の設定は必ずしも容易ではなかった。そこで、鋼球の研磨用に新たに図3に示す装置を製作し直し、下方からばね圧を利用してラップ圧を与える構造としている。また、本装置は θ の値を連続的に変えられる構造となっている。図4に本研磨装置のシステム構成図を示す。本システムは、ボール研磨装置、荷重負荷装置、回転駆動装置、ラップ盤回転制御装置、等から構成されている。ボールの研磨は、上側の内・外側のラップ盤と下側のラップ盤のすきまにボールを挿入し、研磨剤を塗布して行われる。

ラップ盤は鋳鉄 (FC20) で作製されている。ラップ盤の形状寸法は、上側の内ラップ盤Cの外径寸法は68mm、外ラップ盤Bの外径寸法は102mmである。厚さはC、Bのラップ盤ともに14mmである。ラップ盤C、Bを組み合わせることで、溝角 90° の円弧状分割V溝を形成する。

2.2 供試材と加工条件

ラッピング実験は鋼球について行った。ボールは、高炭素クロム鋼 (SUSJ2) の素球で直径は $3/8$ inch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、アクリル樹脂製の円環(外径85mm×内径55mm×厚み3mm)である。円環には、外径70mmの円周上に等間隔に直径10mmの穴が8個うがたれている。被研磨ボールはその穴に挿入される。このため、研磨中に各ボールが互いに衝突し傷つく恐れはない。

研磨用砥粒は、平均粒径 $3\mu\text{m}$ のアルミナ砥粒(Al_2O_3)を用いた。ラップ剤には、菜種油に5.88vol%の濃度で砥粒を添加したものを用いた。ラップ剤は、実験前に $1.0 \times 10^3 \text{ mm}^3$ をラップ面に塗布し、実験開始後15分毎に $0.5 \times 10^3 \text{ mm}^3$ 補給した。

3. 実験結果および考察

3.1 θ 一定研磨

θ が研磨特性に及ぼす影響を及ぼすのかについて検討した。その際の、各ラップ盤の回転数 ω_A 、 ω_B 、 ω_C の値は、次式により算出した。その結果を表1に示す。

Table 1 Relation between spin angle θ and rotating speed of lapping plate ω_A , ω_B , ω_C

Spin angle θ °	ω_A rpm	ω_B rpm	ω_C rpm
0	-229	147	180
10	-225	170	146
20	-215	188	107
30	-198	201	66
40	-175	207	22
45	-162	208	0
50	-147	207	-22
60	-114	201	-66
70	-78	188	-107
80	-40	170	-146
90	0	147	-180

Fig. 5 Relation between stock removal and spin angle θ Fig. 6 Relation between deviated diameter of ball and spin angle θ Fig. 7 Relation between surface roughness and spin angle θ

$$\omega_A = \frac{r\omega_b \cos \theta}{R_A}, \quad \omega_B = \frac{r\omega_b \sin(\alpha + \theta)}{R_A + r \cos \alpha}, \quad \omega_C = \frac{r\omega_b \sin(\beta - \theta)}{R_A - r \cos \beta} \quad (2)$$

θ が加工量に及ぼす影響を図5に示す。加工量の算出は次の方法で行った。すなわち、一度に加工できる鋼球の個数は8個なので、鋼球の総質量を加工前後で計量し、その質量減をボールの数で割った値をボール1個当たりの加工量としている。図5から、 θ の値が45°の点を境にして、0～45°の範囲と45～90°の範囲では、加工量に明りょうな差があることがわかる。いま、0～45°までの範囲を領域I、45～90°の範囲を領域IIと定めると、領域Iでは加工量が比較的多く、ほぼ一定の値を示す。一方、領域IIでは、加工量は領域Iの値に比して少なく、80°付近で極値を示すカーブを描く。領域IとIIの境界(45°)の値は、I、IIの領域における加工量のほぼ中間

Fig. 8 Optical micrographs and profiles of ball surface

の値となっている。

図6に、 θ と直径不同量の関係を示す。直径不同量は次のようにして求めた。研磨後、リテーナに挿入されている鋼球(8個)について、1個1個その直径を測定(測定部位を変えて20回測定)し、都合160か所の直径の標準偏差を求めて直径不同量を算出した。一概にはいえないが、この値が小さいほど、ボールの真球度が良いことになる。

図6から、素球の直径不同量に比して研磨後の鋼球の直径不同量が小さくなっており、回転スピン制御型ボール研磨法により鋼球の真球度が向上していることがわかる。

図7に、 θ と表面粗さRaの関係を示す。プロットした値は、加工済みの鋼球8個から無作為に4個を抽出し、それらのボールについて粗さを測定して求めたものである。その際、1個のボールについて方向を適宜変えて3回測定し、都合12個のデータの平均値を表面粗さとしている。実験に供した素球の表面粗さはRa値で353.14nmであるので、研磨によっていずれの θ の場合も著しく表面粗さが低減している様子がわかる。図7から、表面粗さに関しても45°のところで値が急変していることが知れる。領域Iでは、 θ の値が増えるにつれて徐々に表面粗さは増加する傾向がある。一方、領域IIでは約90nm辺りで一定の値を示す。

図8に、研磨した鋼球の光学顕微鏡写真と触針式粗さ計で測定したプロフィールを示す。図8には、 θ が20°と60°の結果と、さらに比較のため素球の測定結果も記載している。図8から、 θ が20°の場合表面粗さは最も小さく、60°の場合は表面粗さは幾分大きい。以下に、なぜ θ の値が45°を境に著しく研磨様態が変化するのか考察する。

鋼球の研磨は、ラップ剤を各ラップ盤に所定量塗布して行った。このため、研磨中は鋼球の表面にスラリー(溶媒中に砥粒を懸濁した液)がまとわりつきながら研磨がなされていると考

Fig.9 Slurry distribution depending on spin angle θ

えられる。鋼球は回転スピン運動をしているので、スラリーには遠心力と重力が同時に作用し（図9）、その合力方向にスラリーが流動することになる。このため、スラリーの分布形態は θ の値によって変わることになり、研磨様態も θ 依存性を示すと予想される。図9は、領域Iと領域IIにおけるスラリーの分布状態をそれぞれ表している。図に示す一点鎖線の円は、スラリーの分布の様子を模式化して示している。また、 $\rightarrow$ 印はスラリーが力を受けて流れようとする方向を表している。

実験に使用したラップ盤のV溝角度は 90° であるため、図2から、 $\alpha = \beta = 45^\circ$ となる。したがって、 $\theta = 45^\circ$ の所でボールの赤道面がラップ盤Bに丁度接することになる。このため、 $\theta = 45^\circ$ の角度を境に研磨特性が変化することが予想される。

図9の一点鎖線で示すように、 θ が領域Iの場合は、上側の内外ラップ盤B、Cのラップ面にスラリーが行き渡りやすくなると考えられる。一方、領域IIの場合は、ラップ盤B、Cにスラリーがそれほど多く行き渡らなくなる。このため、領域IIでは加工量が減少したものと推察される。

もし、鋼球がラップ剤で完全に満たされた状態で研磨がなされると仮定すると、理論解析³⁾に準じた加工量が得られると推察される。

3.2 θ 連続変化の研磨

ボールの研磨は、真球面から隔たっている凸部を選択的に取り除く作業であり、より早く高精度に加工することが求められている。そこで、ラッピング中における被研磨球の θ を強制的に変化させることによって、真球度が向上するのかどうか検討した。

実験は、研磨時間を60分とし、被研磨鋼球1個当たりの荷重を0.147N、自転速度を1600rpmに設定して行った。

各ラップ盤の回転数を、図10のように360秒を1サイクルとして時間に対して連続的に変化させて、 θ が $0 \sim 360^\circ$ に連続的に変化するように設定した。図10には、そのときのボールの θ の値も併記している。

ラップ剤の補給は、実験開始後2.5サイクル（15分間）経過ごとに行った。そして、総研磨時間が60分となった時点で実験を終了した。

図11に、 θ を連続的に変化させた場合の直径不同量を示す。図11には、比較のため素球、在来法（ $\theta = 6^\circ$ ）、 θ を 20° 一定にして研磨した場合の結果を併記している。

図11から、在来法および θ を 20° 一定で研磨した場合に比べ、 θ を連続的に変化させて研磨した場合には、直径不同量が著しく低減する様子がわかる。したがって、ラッピング中に θ の値を連続的に変化させることは、ボールの真球度を向上させる上で極めて大きな効果を有すると推察される。

図12に、加工量と θ の関係を示す。図12には、 θ を 20° 、 60° 、連続変化、とした場合の実験結果が示されている。図12

Fig.10 Number of revolutions of each lap and spin angle θ of balls

Fig.11 Deviated diameter of balls

Fig.12 Stock removal of balls

Fig.13 Surface roughness of balls

から、 θ を連続的に変化させた場合の加工量は、 θ が 20° 一定の場合の結果とほぼ同じ値であることがわかる。一般には、 θ を連続的に変えた場合、その加工量は θ 一定の条件で研磨した場合の加工量の平均値となるはずである。ところが、 θ を連続的に変化させた場合には、予測値よりも大きな値となった。この結果は、次のことを物語っている。 θ をラッピング中に強制的に変化させることによって、理想球面から隔たった突出部を選択的に除去する能力が増大すると考えられる。

図13に、 θ を連続的に変化させた場合の表面粗さの測定結果を示す。図13には、素球の値と在来法で研磨したときの値、それに 20° の場合の値も併記している。図13から、在来法と 20° の場合の表面粗さの値はほぼ等しいことがわかる。一方、 θ を連続的に変化させた場合には、若干ではあるが前二者に比して表面粗さの値は小さくなっている。

図14に、研磨した鋼球の光学顕微鏡写真を示す。図14には、比較のため素球の観察結果も併記している。図14から、在来法で研磨した場合と θ を 20° に設定して研磨した場合の表面粗さはほぼ同じであることがわかる。しかし、 θ を連続的に変化させた場合は、表面粗さの値は幾分小さくなる。

4. 結 言

新しく製作した回転スピン制御型研磨装置を用いて、鋼球の研磨を行った。自転軸角度 θ を一定にして研磨した場合と θ を強制回転させた場合について、研磨特性の比較検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 新規に開発した θ 強制回転研磨装置は所定の性能を有していることを確認した。
- (2) θ を一定にして研磨した場合には、加工量および表面粗さの値が領域I ($0^\circ < \theta < 45^\circ$) と領域II ($45^\circ < \theta < 90^\circ$) で明らかに異なることがわかった。また、直径不同量もそれらの領域で違いがみられた。 θ を一定にして研磨する場合、 45° 以下の値に θ を設定して研磨することが望ましい。

領域Iと領域IIで研磨特性が異なるのは、ラップ剤の

Fig.14 Optical micrographs and profiles of ball surface

分布がそれらの領域で異なることに起因していると考えられる。

- (3) θ 連続変化研磨の場合には、ボールの真球度が飛躍的に向上する。また、加工量も比較的多く、 θ 角一定の実験の場合の最高値と同程度であった。

謝 辞

鋼球研磨装置は金沢大学工学部工作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) 曾田範宗：軸受，岩波全書，岩波書店（1975）92.
- 2) 井戸 守，羽地 務：ミニチュア玉軸受，日刊工業新聞社，（1961）147.
- 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1報）－研磨機構の理論的解析－，精密工学会誌，**62**，12（1996）1773.
- 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2報）－空化けい素球の研磨－，精密工学会誌，**63**，5（1997）726.