超精密軸受用鋼球のラッピングシステムに関する研究*

後 藤 賢 治** 水 本 洋***

A Lapping System for Ultra-precision Bearing Balls

Kenji GOTO and Hiroshi MIZUMOTO

The lapping mechanism for obtaining ultra-precision bearing balls is analyzed by simulation and experiments, and effective lapping system for mass production of balls is proposed. In the simulation, the configuration of a ball is represented by a Fourier series. Then the ball is assumed to be lapped between two lapping plates having V-shaped grooves with several V-angles, and the configuration of the lapped ball is represented by another Fourier series. The correction in profile is evaluated by the decrease of Fourier factors. In the experiments, lapping plate with R-groove (round groove) and S-groove (round groove having a pit) are used instead of V-shaped grooves for increasing the contact area between balls and the grooves. The experiments show that the combination of R and R (R+R) is effective to reduce the waviness of even order harmonics, and R+S decreases the 3rd-harmonic in waviness. The combination of S+S decreases the 3rd, however increases the 2nd and the 4th-order. To decrease every order harmonics, a lapping system with 3 steps (R+R → R+S → R+R) is proposed. The steel balls finished by this system show the following figures; roundness=18 nm and $R_a=2$ nm.

Key words: lapping, ball bearing, ball screw, steel ball, Fourier series, roundness, profile, waviness, sphericity

1. は じ め に

近年、機器の小型化、高性能化に伴い、HDDのスピンダルモータやVTRのドラムスピンダル用の小径玉軸受には低振動で高い回転精度が要求されている。これらの機械要素に転動体として使用されている球の精度が軸受の性能に極めて大きな影響を及ぼすために、最近では真球度が50 nm以下の超精密球が必要とされ、球の高精度化への要求は今後ますます高まるものと考えられる。このような高精度の球はラッピングを最終工程として量産される。球のラッピングメカニズムは複雑であり、その技術の多くをまだ経験に頼っている部分も多いが、これまでにいくつかの真球度矯正メカニズムについての研究^{1)~3)}がなされている。これらの研究では球の形状矯正は選択原理に基づいて特定の次数の山が他の次数の山よりも多く研磨されることによるとしている。このような研磨メカニズムによると、どの次数成分も研磨とともに減少し、実際の研磨過程で見られる特定の次数成分が増加して形状が変化する現象は説明できない。

そこで本研究ではシミュレーションによって球とラップとの接触点を仮想的に除去して新たな形状を作り出し、それをFourier級数で表すことにより球の形状誤差が研磨の進行とともにどのように推移するかを解析することで従来の研究では説明できなかった研磨メカニズムについて検討する。そしてシミュレーションの結果をもとに種々の溝形状を組み合わせたラッピングシステムを編成して鋼球の加工実験を行い、従来の加工法では困難であった真球度50 nm以下の超精密軸受用鋼球が量産加工できることを明らかにする。

2. シミュレーションによる形状矯正の解析

2.1 シミュレーションの方法

量産に使用されるコンベア付き球研磨機では、球はコンベア

からラップの中に供給され、同心円状の溝の中を自転しながら公転する間に研磨される。球はラップの溝を1周した後にコンベア内に排出され、コンベアの回転によって輸送されて再びラップに供給される。このサイクルを繰り返すことによって球が少しずつ研磨される。ラップ中の球を観察したところ、その自転軸の傾きはラップ溝を1周する間、ほとんど変化しないことがわかった。そしてコンベアに排出されるたびに球の向きがランダムに変わり、次回ラップに入ったときに自転軸が変化する。そこで、このような状況を次のような2次元にモデル化して考えることとした。まず、ラップ溝の中での球は転がることなくラップとの接触位置は変わらず、滑ることによってその接触点が加工されるものと仮定する。そして球が次回再びラップに入ったときに接触点に変化して前回と別の接触点が研磨されることとした。このように考えることで球形状の矯正過程のシミュレーションを行った。

図1は溝断面がそれぞれ開き角 α と β のV溝を持ったラップの間に幾何学的な形状誤差をもった球をはさんだ状態を表している。球はX軸を自転軸としてラップと接触するのであるが、ここでは上述のように球の回転は考慮しない。またX'軸

Fig. 1 A ball having geometrical error and a pair of lapping plates holding the ball

* 原稿受付 平成7年8月24日

** 正 会 員 (株)天辻鋼球製作所 (門真市上野口町1-1)

*** 正 会 員 鳥取大学工学部 (鳥取市湖山町南4-101)

Fig. 2 Contact points and profile of ball lapped out

は球に固定された座標軸で、回転軸との間の角度 ω を球の傾き角とする。図中の O を原点とする極座標をとって、球の断面形状を式 (1) のように Fourier 級数により表現する。

$$r(\theta) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\{k(\theta - \omega)\} + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin\{k(\theta - \omega)\} \quad (1)$$

ここで、 a_0 は球の平均直径、 a_k, b_k は Fourier 係数、 k は Fourier 級数の次数で、 a_k, b_k が k 次の形状誤差（ウェビネス）の大きさを表している。

以下には球研磨工程のシミュレーションの具体的手順を示す。なお、球の初期形状は 2 次成分、3 次成分、および 4 次成分のみの形状誤差をもつ 3 種類とし、ラップは V 溝と平面および V 溝どうし（開き角は等しい）の組合せとした。

- (1) 球の形状誤差とラップ溝の開き角を与える。
- (2) 球の傾き角 ω を一様乱数で与える。
- (3) 傾き角 ω でラップ溝と接触している研磨前の球の幾何学的形状を式 (1) を使って Fourier 級数で表す。
- (4) このときのラップ溝と球の接触点 a, b, c（接触角 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 ）を求める（図 2 は球とラップとの接触状態を示したものである）。
- (5) 次に接触点 a, b, c に働く力を求める。

球とラップを剛体と仮定するとラップは半径方向に拘束されているので球に形状誤差があれば上側ラップの左右の面から球までの距離に差が生じる。その結果、球とラップは上側ラップのいずれかの面と下側ラップの両面との 3 点接触となる。ラップ全体には荷重 F が作用しており、球は接触点 a, b, c でそれぞれ分力 P_1, P_2, P_3 を受けているものとする、力の釣合いより

$$-P_1 + P_2 \cos\left(\pi - \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}\right) + P_3 \cos\left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}\right) = 0 \quad (2)$$

$$-F \cos \frac{\beta}{2} + P_2 \sin\left(\pi - \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}\right) + P_3 \sin\left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}\right) = 0 \quad (3)$$

が成立し、式 (2) と式 (3) から次式を得る。

$$P_2 = \xi \cdot P_1, \quad P_3 = \eta \cdot P_1 \quad (4)$$

$$\xi = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}\right) - \left\{\frac{\cos(\beta/2)}{\sin(\beta/2)}\right\} \cos\left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}\right)}{\cos\left(\pi - \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}\right) \sin\left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}\right) - \sin\left(\pi - \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}\right)}$$

$$\eta = \frac{\sin\left(\pi - \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}\right) - \left\{\frac{\cos(\beta/2)}{\sin(\beta/2)}\right\} \cos\left(\pi - \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}\right)}{\sin\left(\pi - \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}\right) - \cos\left(\pi - \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}\right) \sin\left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}\right)}$$

- (6) 接触点 a, b, c の研磨量を求める。

球をラップ間で θ 方向に回転させたときの球上端の上下動は次式で与えられる。

$$H(\theta) = \mu(a, k) \left[\sum_{k=2}^{\infty} a_k \cos\{k(\theta - \omega)\} + \sum_{k=2}^{\infty} b_k \sin\{k(\theta - \omega)\} \right] \quad (5)$$

ここで $\mu(a, k)$ は拡大係数と呼ばれ、次式で与えられる。

$$\mu(a, k) = 1 + \frac{\cos\left\{k\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\alpha}{2}\right)\right\}}{\sin \frac{\alpha}{2}} \quad (6)$$

色々な姿勢の球がラップにはさまれているものとして $H(\theta)$ が最小になる方向を向いた球の振幅 $H(\theta)_{\min}$ を基準にすると、干渉量 $\Delta H(\theta)$ は次式で与えられる。

$$\Delta H(\theta) = H(\theta) - H(\theta)_{\min} \quad (7)$$

そこで、研磨量は干渉量に比例するものと仮定すると任意の傾き角をもった球の上側ラップとの接触点の研磨量 G_1 は次式で表される。

$$G_1 = \lambda \cdot \Delta H(\phi_1) + \epsilon \quad (8)$$

ここで、 λ および ϵ は定数である。

他の接触点の研磨量はそれぞれ接触点にかかる力に比例するものと考えれば式 (4) より、接触点 b, c の研磨量 G_2, G_3 を次式により求めることができる（図 2 参照）。

$$G_2 = \xi \cdot G_1, \quad G_3 = \eta \cdot G_1 \quad (9)$$

- (7) 研磨されて新たにできた面の式を求める。

球は図 2 に示すように接触点で加工を受け、ラップの溝に平行にフラットに研磨されるものとする、ハッチングの部分が研磨除去され、ラップに平行な面（直線） S_1, S_2, S_3 が現れる。

- (8) 手順 (2) にもどり研磨面 S_1, S_2, S_3 と研磨されなかった面の形状から、研磨後の球の新しい形状を改めて Fourier 級数で表す。

- (9) このようなプロセスを 1 球につき 10 回ずつ繰り返し、10 球について各次数のウェビネス振幅の変化を計算することでラップの組合せの影響を評価する。

2.2 シミュレーションの結果

V 溝付きと平面の場合の計算結果を図 3 (a)~(d) に示す。図 3 (a) は 10 個の球のウェビネスの 3 次成分の研磨回数に伴う振幅変化を表したものである。毎回、乱数により与えられる傾き角 ω の推移が異なれば、個々のウェビネスの変化の状態にも差が生じているが、研磨回数が増加するにつれてどの球も定性的には類似の傾向を示していることがわかる。したがって、図 3 (b)~(d) ではラップの溝形状とウェビネス変化の関係を 10 個の球の平均値の変化で評価することとする。図 3 より 2 次成分および 4 次成分は V 溝開き角 α が大きいほど振幅矯正速度が大きい、3 次成分の矯正には小さな角度の α が適

(a) The change in amplitude of 3rd-order in waviness of ten balls

(b) The average of amplitude of balls (2nd-order)

(c) The average of amplitude of balls (3rd-order)

(d) The average of amplitude of balls (4th-order)

Fig. 3 Simulated change in waviness (V-groove+Flat)

(a) The average of amplitude of balls (2nd-order)

(b) The average of amplitude of balls (3rd-order)

(c) The average of amplitude of balls (4th-order)

Fig. 4 Simulated change in waviness (V-groove+V-groove)

(a) 2nd-order

(b) 4th-order

Fig. 5 Increase of 2nd-order and 4th-order waviness in a ball having large 3rd-order waviness

Fig. 6 Comparison of lapping amounts in V+F and V+V

していることがわかる。

次にV溝どうしの組合せの場合の結果を図4(a)~(c)に示す。図4より2次成分および4次成分の振幅を下げるには図3の場合と同様に大きな角度の α が効果的であり、一方、3次成分を低減するには小さな角度の α が適していることがわかる。しかも、V溝どうしの場合は、 α が 90° 以上では、V溝と平面の組合せに比べて矯正能力が大きい。ただし、図4(b)からわかるように、3次成分のみの球を研磨した場合、 α が 90° より小さくなると矯正速度が 90° のときよりも低下する現象が見られる。このことを次に考察する。

図5は初期形状の誤差が3次成分のみの素球をV溝どうしで研磨した場合の、2次および4次成分の変化の状況を表したものである。最初は当然これらの成分は零であるが、 α が小さい場合には研磨回数が増えるにつれて2次、4次成分が増加している。初期形状誤差が2次、あるいは4次成分のみからできている球の場合でも研磨を進めていく過程で同様に最初には存在しなかった他の次数の山が発生するが、これらの次数成分の増加量は小さい。このような初期形状による差は接触点の研磨量の比の違いに起因するものと考えられる。

図6は、3次成分のみの素球についてV溝と平面および両面V溝どうしで研磨した場合について、図2の接触点aの研磨量 G_1 に対する接触点b,cの研磨量 G_2 および G_3 の比を表したものである。両面がV溝どうしの場合は、 α が小さくなるにつれて接触点a,b,cの研磨量 G_1, G_2, G_3 の差が急激に増加する。この現象は3次成分のみの素球に起こり、2次および4次成分のみの素球には起こらない。その原因は拡大係数 μ にある。式(6)を計算すると、 α が小さくなるにつれて、2次および4次成分の拡大係数が減少するのに対して、3次成分の拡大係数は増加していることがわかる。拡大係数が小さければ干渉量(研磨量)が小さいので各接触点の間に研磨量の差が生じて

Fig. 7 Shape of grooves on lapping plates

も形状の変化には影響しない。このように3次成分のみをもつ球を小さい開き角 α のV溝どうしで研磨すると、各接触点の研磨量の差が著しく増加するためにはなかつた2次および4次成分が徐々に増加し、偶数多角形状に変化するものと考えられ、結果として矯正速度が低下、あるいはとときとして真球度が悪化することになる。このようなシミュレーション結果は実際のラッピングにおいても経験される現象である。

以上のシミュレーション結果をまとめると下記のようになる。

- (1) 球面上のラップとの接触点（接触軌跡）分布はランダムであり、個々の球のウェビネスの変化の状態には差が生じるが、研磨回数が増加するにつれてどの球も定性的には類似の傾向を示すようになる。
- (2) V溝+平面およびV溝+V溝のいずれの場合も、2次および4次成分はV溝の開き角 α が大きいほどよく矯正される。逆に3次成分の矯正には小さい α が効果的である。
- (3) しかし、小さい α のV溝どうしの場合、3次成分の大きい球を研磨すると、研磨回数が増加するにつれて、3次成分が減少する代わりに2次および4次成分が増加する。

3. ラッピングの実験的解析

3.1 実験方法

シミュレーションの結果、ウェビネスの2次、3次および4次成分を矯正するにはそれぞれの成分に有効なV溝の開き角があり、ただひとつの開き角のV溝ですべての成分を矯正できないことがわかった。したがって、すべての成分を短時間で矯正して真球度を向上させるには、いくつかの開き角のV溝を組み合わせる必要がある。また、純粋なV溝や平面のラップで加工を始めると球との間の接触面積が小さく非常に研磨速度が低い。球と接触するラップの接触点は、研磨工程の初期を除けば摩擦して面接触になる。その結果、初期形状が平面の場合は加工を続けていくと球とはほぼ同じ曲率をもった丸溝になる。V溝の場合も摩擦して球との接触面は球とはほぼ同じ曲率の丸溝になるが、この場合、溝底は球と接触しない。そこで、初期から高い研磨速度を得るために、平面の代わりに図7(a)のような球の曲率と等しい丸溝(R溝と呼ぶ)を、V溝の代わりに図7(b)に示すように溝底が球と接触しないように底にくぼみをつけた球の曲率と等しい丸溝(S溝と呼ぶ)を使用した。実験後のS溝の底を観察すると全面均一な光沢をしており、鋼球は溝の全面と接触しているものと考えられる。したがって、S溝の深さ方向の中心と鋼球の中心を結ぶ直線がV溝の法線に一致するものとみなすと、このS溝は開き角 α が約86°のV溝が摩擦した状態とほぼ等価と考えられる。本研究の目

Table 1 Lapping process

Lapping process	Step 1	Step 2	Step 3
Test No. 1	R+R	—	R+R
Test No. 2	R+R	S+S	R+R
Test No. 3	R+R	R+S	R+R

Symbols show combination of grooves

Fig. 8 Measured profiles of lapped balls

的は形状誤差の矯正に有効な溝を選択して高精度の球を効率的に製作することにあるので、表1に示すような溝の組合せからなる工程を編成して実験を行った。ラップの材質は铸铁で最外径 $D_{\max} = \phi 640$ mmで8本の溝を同心円状に持っている。研磨は3工程とし、研磨材は各工程ごとに Step 1: WA # 4 000, Step 2: GC # 4 000, Step 3: ダイヤモンド 0~1.5 μ mを用いた（ただし試験 No. 1 では Step 2 を省略した）。研磨機はコンベア付きの球研磨機を用い、熱処理と粗研削の完了した呼び5/16（直径：約8 mm）の高炭素クロム軸受鋼球を研磨した。加工個数は55 000 個/ロットである。

3.2 実験結果

各研磨工程後の球の形状誤差の変化を図8に示す。また、ボール・ウェビネスメータで測定した低次（3~15次）のウェビネスの測定値の変化を図9に示す（これは1球につきランダムな5断面の平均値を求め、それを5球について測定し、さらにその平均値を示したものである）。すべての試験のStep 1で、R+R（両ラップともにR溝）の組合せで加工した後は、球形状は偶数次のウェビネスの振幅が減少し、三角形になることがわかる。このような三角形形状はその後、試験 No. 1に示す

Fig. 9 Measured change in waviness

ように細かい砥粒でさらに R+R の組合せで続けて加工しても矯正することができない。これは 2 点接触の場合、偶数次成分はよく矯正されるが、3 次成分の矯正力は弱いので、平面どうしの場合のシミュレーション結果と一致している。

試験 No. 2 の Step 2 で示されるように S+S の組合せで研磨すると球形状は四角形になり、ウェビネス Low Band 値はあまり減少しなかった。この結果は開き角 α が 90° 以下の V 溝どうしのシミュレーション結果とよく一致している。シミュレーションでは、3 次成分のみの球は V 溝どうしの研磨によって、3 次成分が矯正される代わりに、最初は存在しなかった 2 次、4 次成分が次第に増加することが示された。したがって S+S で研磨した場合には、3 次成分は矯正されて小さくなるが、2 次および 4 次成分は逆に増加したために三角形が四角形に変化したと考えることができ、ウェビネス Low Band 値があまり減少していないことになる。引き続き、試験 No. 2 の Step 3 で示されるように、この四角形の形状は次の R+R の組合せで矯正された。これは、偶数次成分は平面どうしの組合せで矯正されることが示されたシミュレーション結果と一致している。しかしウェビネス Low Band 値は次の試験 No. 3 ほどは減少しなかった。これは試験 No. 2 と試験 No. 3 の Step 2 完了時のウェビネス Low Band 値の差によるものと考えられる。

試験 No. 3 において、Step 1 でできた三角形形状を Step 2 の

R+S の組合せで加工すると、球の形状は 3 次成分がよく矯正されて、振幅の小さい多角形になった。そして、ウェビネス Low Band 値が非常に低い値にまで減少した。この結果は、平面と開き角 α が 90° 以下の V 溝との組合せのシミュレーション結果と一致している。先の S+S およびこの R+S の実験結果から、S 溝に対応する V 溝の開き角 α の推定値 (86°) はほぼ妥当な数値と考えられる。R+S の組合せの場合は 2 次および 4 次成分を増加させることなく、3 次成分のみを矯正することができる。R+S の組合せで加工されたウェビネス Low Band 値の低い多角形の球は、次の Step 3 で R+R の組合せで研磨することにより、さらに真球度が向上しウェビネス値が減少した。このような試験 No. 3 で製作した球の形状精度は真球度が 18 nm、表面粗さ $R_a=2$ nm であった。この精度は従来のシステムでは困難であった、現在最も要求精度の厳しい（真球度 50 nm 以下）HDD 用軸受に使用される球の仕様を満足している。

4. ま と め

球の研磨における形状誤差の矯正過程をシミュレーションと実験によって解析した結果、次のことが明らかになった。

- (1) 両面ともに R 溝どうしの組合せは平面どうしの組合せに対応しており、偶数次成分はよく矯正されるが、3 次成分の矯正力は弱い。
- (2) R 溝と S 溝の組合せは平面と開き角 α が小さい V 溝との組合せに対応しており、偶数次成分の矯正力は小さいが、3 次成分はよく矯正される。
- (3) S 溝どうしの組合せは開き角の小さい V 溝どうしの組合せに対応しており、3 次成分は矯正されるが、2 次および 4 次成分が増加する。このような現象は従来の研磨メカニズムでは説明できなかった。
- (4) 異なった溝形状を組み合わせた 3 工程からなるラッピングシステム (R 溝+R 溝で偶数次成分を、R 溝+S 溝で 3 次成分を、最後に R 溝+R 溝で残った成分をさらに矯正する) で加工すれば超精密軸受用鋼球が効率的に量産加工できることを明らかにした。このシステムにより従来のシステムでは困難であった真球度 18 nm、表面粗さ $R_a=2$ nm の超精密軸受用鋼球が量産加工できた。

参 考 文 献

- 1) 津和秀夫：機械加工学，養賢堂，(1979) 14.
- 2) 市川茂樹，小奈 弘，吉本 勇：セラミックスボールのラッピング加工，塑性加工春季講演会論文集，(1991) 353.
- 3) 糸魚川文広，中村 隆，船橋鉦一：V 溝ラップを用いた鋼球ラッピングの機構，日本機械学会論文集 (C 編)，59, 562 (1993) 1906.