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 —

黒部 利次** 角田 久也*** 小野田 誠†

Spin Angle Control Lapping of Balls (1st Report)

— Theoretical Analysis of Lapping Mechanism —

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. In this paper the theoretical analysis of the ball motion mechanism for the proposed method is provided. The results obtained are as follows. (1) In the case with separated V-groove lapping plates, the spin angle θ of ball is able to be controlled by changing the revolutionary speeds of flat, outer V-groove and inner V-groove lapping plates. (2) The stock removal rate is increased with spin angle θ , because relative slide distance in the contact surface between ball and lapping plate increase with it.

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

1. 緒 言

鋼球の研磨は、図1に示すような立型ラップ盤を用いて行われ、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⁾。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。

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となってきた。しかし、セラミックスは一般に難加工材であり、図1に示す方法では加工に長時間を要することになる。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。窒化けい素球の高効率・高精度研磨を目的とする場合、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。

本報では、ラッピング中のボールの回転機構に留意し、スピン角度制御型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プ盤の回転速度の影響を明らかにして、その研磨機構について理論的な検討を行った。

2. スピン角度制御ボール研磨法の概要

V溝ラップ盤を用いてボールをラッピングする場合、最も重要な点はボールに自転軸の変化を一様に与え、真球面（理想球面）から隔たっている突出した被加工部を選択的に研磨し除去することである。ラッピング条件を選定して、直径の縮小、真球度の向上、表面粗さの低減などを図る。

ボールのラッピング機構としては、大きく分けて3つあると考えられている。それらは、①ボールとラップが相対的にすべり、砥粒が球面を引っかけて被加工部を除去する、②ボールとラップが相対的にすべり、それらの間で砥粒が転動して被加工部を除去する、③砥粒の切れ刃がボールに押し込まれ被加工部を除去する、等である²⁾。

Fig.1 Schematic diagram of conventional ball lapping method

* 原稿受付 平成8年4月24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、㈱ワクラ電子製作所；七尾市石崎町ウ部1番地）

+ NTN㈱（磐田市東貝塚1578）

Fig. 2 Kinematics of a ball in lapping

Fig. 3 Comparison between conventional method (upper) and developed method (lower)

ここでは、ボールとラップの相対的な運動に注目し、直径の縮小と真球度の向上について検討することにする。解析にあたって、ラップ剤を介するボールとラップ間の接触状態については考えないことにする。

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、ラップとボールの間で相対すべりが起こり、研磨がなされる。相対すべりは、線すべりと旋回すべりから成り、研磨は旋回すべりによってほぼ行われると言われている。また、①自転軸角度 θ が増えるにつれて、加工量は増加する傾向が見られる、②ボールの自転軸の移動は、ボールとラップ間の摩擦力に左右される、等の知見が得られている。しかしながら、ラップの構造を考えると θ の値をむやみに増やすことはできず、また、ラップの回転速度もあまり上げられない。

そこで、加工能率の一層の向上を図るため、以下に示すようなスピン角度制御型ボール研磨法を新しく考案した。在来法と新研磨法の構造上の違いを図3に示す。在来の研磨装置は、平面ラップ盤AとV溝ラップ盤Bの2つのラップ盤を相対置する形で構成されている。しかし、新研磨装置はラップ盤に工夫を

Fig. 4 Kinematics of a ball in developed method

凝らし、V溝を構成するラップ盤を、外側ラップ盤Bと内側ラップ盤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。

このような構造にした目的は次の理由による。先に記したように、V溝一体型（在来法）の場合はV溝中を転動するボールの自転軸角度 θ はV溝ラップ盤の形状で決定され、 θ の採り得る値も制限される。それに比してV溝を分割した場合には、ボールの自転軸角度 θ の値は、平面ラップ盤A、V溝外側ラップ盤B、V溝内側ラップ盤Cの回転速度の配分の仕方、自由に変えることができ、加工量の増加が期待できるためである。

また、本研磨法の場合には、A、B、Cの3つのラップ盤の回転速度の値を徐々に変化させることによって、ボールの自転軸を強制的に移動させ、ボールの表面全面を速やかに一様に研磨することが可能になる。すなわち、真球度の向上が図られることになる。

3. ボールの回転機構

スピン角度制御型研磨装置を用いた場合のボールの回転機構について考える。説明を容易にするために、図4にボール回転の模式図を示す。図4は、実際に製作した装置に基づいて描いているので、V溝に相当する部分は上側にある。加工中、ボールは平面下側ラップ盤A、上外側ラップ盤Bおよび上内側ラップ盤Cにはさまれながら転動する。

ここで、上外側ラップ盤Bと上内側ラップ盤Cの傾斜面はそれぞれ鉛直方向と角度 α 、 β をなしているとする。 R_A 、 R_B 、 R_C は、半径 r のボールの各ラップ盤との接触点とラップ盤回転軸との距離である。いま、ラップ盤A、B、Cをそれぞれ回転速度 ω_A 、 ω_B 、 ω_C で回転させたとき、ボールが自転軸角度 θ で転動すると仮定する。このとき、ボールとラップ盤の各接触点におけるボールの回転半径は、 r_A 、 r_B 、 r_C となる。

以下に、3つのラップ盤の回転速度 ω_A 、 ω_B 、 ω_C とボールの自転速度 ω_b および公転速度 ω_p の関係を考える。しかしながら、それらを同時に考えることは困難であるため、ここでは、 (ω_A, ω_B) と (ω_b, ω_p) の関係とおよび (ω_A, ω_C) と (ω_b, ω_p) の関係にそれぞれ分けて考えることにする。まず、 (ω_A, ω_B) と (ω_b, ω_p) の関係について考える。ボールは

Table 1 Relation between spin angle θ and rotating speed of lapping plate $\omega_A, \omega_B, \omega_C$

Spin angle θ°	Lapping plate					
	120° V-groove, R-groove			90° V-groove, R-groove		
	ω_A	ω_B	ω_C	ω_A	ω_B	ω_C
0	-400.00	329.91	364.64	-400.00	264.14	304.39
10	-393.92	357.98	322.55	-393.92	306.00	246.91
20	-375.88	375.16	270.65	-375.88	338.55	181.93
30	-346.41	380.95	210.53	-346.41	360.82	111.41
40	-206.42	475.16	244.01	-343.94	334.61	0.00
50	-330.24	284.86	0.00	-294.64	335.00	0.00
60	-200.00	329.91	0.00	-200.00	360.82	-111.42
70	-236.81	191.83	-173.12	-136.81	338.55	-181.93
80	-314.33	0.00	-388.88	0.00	375.46	-177.45
90	0.00	190.48	-210.53	0.00	264.14	-352.63

ラップ盤A, Bに挟まれながら回転するので、それらの関係は機構学の差動運動に関する理論から求めることができる。ただし、ここでは ω_C に関しては、ボールの運動に何ら影響を及ぼさないものと仮定している。

はじめに、ラップ盤Bを固定してラップ盤Aを ω_A で回転したときのボールの自転速度 ω_b と公転速度 ω_p を求める。次に、ラップ盤Aを固定し、ラップ盤Bを ω_B で回転したときのボールの自転速度 ω_b と公転速度 ω_p を求める。そして、各々を加え合わせればボールの自転速度 ω_b と公転速度 ω_p が得られる。

$$\omega_{b1} = \frac{(R_A r_B - R_A R_B) \omega_A + (r_A R_B + R_A R_B) \omega_B}{R_A r_B + r_A R_B} \quad (1)$$

$$\omega_{p1} = \frac{R_A r_B \omega_A + r_A R_B \omega_B}{R_A r_B + r_A R_B} \quad (2)$$

ここで、 ω_{b1} , ω_{p1} の添え字の1はラップ盤Bを固定した場合を表す。

同様の計算方法で、定盤A, Cを ω_A , ω_C で回転させたときのボールの自転速度 ω_b と公転速度 ω_p を求めると、

$$\omega_{b2} = \frac{(R_A r_C - R_A R_C) \omega_A + (r_A R_C + R_A R_C) \omega_C}{R_A r_C + r_A R_C} \quad (3)$$

$$\omega_{p2} = \frac{R_A r_C \omega_A + r_A R_C \omega_C}{R_A r_C + r_A R_C} \quad (4)$$

となる。ここで、 ω_{b2} , ω_{p2} の添え字の2はラップ盤Aを固定した場合を表す。

解析に当たって、ボールの自転速度 ω_b は空間に対する自転運動を考えているので、計算式には公転分も含んでいる。したがって、ボールの自転軸周りの自転速度 ω_{b0} は、式(1), (3)で求めた自転速度から、式(2), (4)で求めた公転速度を差し引いたものである。

$$\omega_{b01} = \omega_{b1} - \omega_{p1} = \frac{R_A R_B (\omega_B - \omega_A)}{R_A r_B + r_A R_B} \quad (5)$$

$$\omega_{b02} = \omega_{b2} - \omega_{p2} = \frac{R_A R_C (\omega_C - \omega_A)}{R_A r_C + r_A R_C} \quad (6)$$

次に、自転軸角度 θ と ω_A , ω_B , ω_C の関係について考える。式(5), (6)は、同一のボールの自転速度なので、これらの式は等しくなければならない。したがって、

Fig.5 Linear slide and rotary slide of a ball

$$\frac{R_A R_B (\omega_B - \omega_A)}{R_A r_B + r_A R_B} = \frac{R_A R_C (\omega_C - \omega_A)}{R_A r_C + r_A R_C} \quad (7)$$

ここで、

$$\begin{aligned} r_A &= r \cos \theta \\ r_B &= r \sin(\alpha + \theta) \\ r_C &= r \sin(\beta - \theta) \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)を式(7)に代入し整理すると、

$$\begin{aligned} \theta = \tan^{-1} \{ & \frac{R_A R_B (\omega_B - \omega_A) \sin \beta}{R_A R_B (\omega_B - \omega_A) \cos \beta + R_A R_C (\omega_C - \omega_A) \cos \alpha} \\ & - \frac{R_A R_C (\omega_C - \omega_A) \sin \alpha}{R_A R_B (\omega_B - \omega_A) \cos \beta + R_A R_C (\omega_C - \omega_A) \cos \alpha} \\ & + \frac{R_B R_C (\omega_B - \omega_C)}{R_A R_B (\omega_B - \omega_A) \cos \beta + R_A R_C (\omega_C - \omega_A) \cos \alpha} \} \quad (9) \end{aligned}$$

となる。いま、 $\omega_B = \omega_C$ とすると、式(9)は在来型のV溝ラップ盤におけるボールの回転式に一致する。

以上の理論式をもとに、自転軸角度 θ と ω_A , ω_B , ω_C の関係について計算した。その結果を表1に示す。

4. ボールの回転運動と研磨

ボールを効率よく研磨するには、研磨の素過程を把握しておく必要がある。先に述べたように、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。

この相対すべりは、図5に示すように水平成分と垂直成分に分けられ、水平成分は線すべりに相当し、垂直成分は旋回すべりに対応する。線すべりはラップ平面に平行であり、旋回すべりはそれに垂直である。線すべり成分は旋回すべり成分に比して研磨に寄与する割合が著しく小さいと言われている³⁾。したがって、何らかの方法で旋回すべり成分を大きくできれば、研磨効率を向上できることになる。

Fig. 6 Schematic diagram of slide in contact surface

そこで、旋回すべりはボールの自転軸角度 θ の値が増えるにつれて増加するのではないかと推論のもとに、次のような仮定をおいて、相対すべり距離を求めることにする。

- ①ボールは真球である。
- ②各接触面内の砥粒は様に分布する。
- ③ボールに作用する遠心力は無視する。
- ④接触面内の圧力中心ですべりは起こらない。
- ⑤各接触面のすべり摩擦係数は等しく一定である。
- ⑥研磨はボールとラップの相対すべりに起因する砥粒の微小切削作用によって営まれる。

ボールの回転は、ラップ盤 A, B, C の相対運動によって起こるので、ボールの自転速度、自転軸角度が同じ場合でも、ラップ盤 A, B, C の回転速度の設定の仕方次第で、ボールの公転運動は、ラップ盤間の相対運動によってボールを自転させるときに付随して起こるものであり、遠心力等の作用を除けばボールの研磨に対しては何ら影響を及ぼさないと考えられる。そこで、議論を簡単にするためにボールが公転しない場合について解析を進めることにする。

ボールがラップ盤上の円形のくぼみに弾性接触しているときの接触面内の様子を図 6 に示す。ボールは圧力中心 O ですべりなく転がり、その方向は Y 軸方向である。以下に、接触面内の (X, Y) の位置にある砥粒の相対すべり距離を求める。相対すべりは、相対線すべりと相対旋回すべりに分けられ、それらの値を A, B, C の各点についてそれぞれ求める。

A 点の接触面内の (X, Y) でのボールの線速度 v_a は、

$$\begin{aligned} v_a &= \omega_b \times (r^2 - X^2)^{1/2} \\ &= \omega_b \cos \theta (r^2 - X^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (10)$$

ただし、 $\omega_b \times$ はボールの自転速度のラップ盤の円周方向の成分である。

また、下ラップ盤のこの位置における線速度 v_A は、

$$\begin{aligned} v_A &= \omega_A (R_A + X) \\ &= \frac{r}{R_A} \omega_b \cos \theta (R_A + X) \end{aligned} \quad (11)$$

したがって、単位時間当たりの相対線すべり距離 l_a は、

$$\begin{aligned} l_a &= v_a - v_A \\ &= \omega_b \cos \theta \left\{ (r^2 - X^2)^{1/2} - \frac{r}{R_A} (R_A + X) \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

相対旋回すべり距離 q_a は、

$$q_a = \rho \omega_{vA} = \rho \frac{R_A}{r} \omega_A \tan \theta = \rho \omega_b \sin \theta \quad (13)$$

となる。ただし、 ω_{vA} はボールの相対旋回速度である。 ρ は次式で表される。

$$\rho = (X^2 + Y^2)^{1/2} \quad (14)$$

B 点についても同じように考えると、接触面内の (X, Y) の位置におけるボールの線速度 v_b は、

$$v_b = \omega_b \sin(\alpha + \theta) (r^2 - X^2)^{1/2} \quad (15)$$

また、上外ラップ盤の (X, Y) における線速度 v_B は、

$$\begin{aligned} v_B &= \omega_B \{ R_B + X \sin(\alpha + \theta) \} \\ &= \frac{r}{R_B} \omega_b \sin(\alpha + \theta) \{ R_B + X \sin(\alpha + \theta) \} \end{aligned} \quad (16)$$

したがって、単位時間当たりの相対線すべり距離 l_b は、

$$\begin{aligned} l_b &= v_b - v_B \\ &= \omega_b \sin(\alpha + \theta) \left[(r^2 - X^2)^{1/2} - \frac{r}{R_B} \{ R_B + X \sin(\alpha + \theta) \} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

また、単位時間当たりの相対旋回すべり距離 q_b は、

$$\begin{aligned} q_b &= \rho \omega_{vB} = \rho \frac{R_B}{r} \omega_B \cot(\alpha + \theta) \\ &= \rho \omega_b \cos(\alpha + \theta) \end{aligned} \quad (18)$$

C 点の接触面内の (X, Y) でのボールの線速度 v_c は、

$$v_c = \omega_b \sin(\beta - \theta) (r^2 - X^2)^{1/2} \quad (19)$$

また、上内ラップ盤のこの位置における線速度 v_C は、

$$\begin{aligned} v_C &= \omega_C \{ R_C + X \sin(\beta - \theta) \} \\ &= \frac{r}{R_C} \omega_b \sin(\beta - \theta) \{ R_C + X \sin(\beta - \theta) \} \end{aligned} \quad (20)$$

したがって、単位時間当たりの相対線すべり距離 l_c は、

$$\begin{aligned} l_c &= v_c - v_C \\ &= \omega_b \sin(\beta - \theta) \left[(r^2 - X^2)^{1/2} - \frac{r}{R_C} \{ R_C + X \sin(\beta - \theta) \} \right] \end{aligned} \quad (21)$$

単位時間当たりの相対旋回すべり距離 q_c は、

$$\begin{aligned} q_c &= \rho \omega_{vC} = \rho \frac{R_C}{r} \omega_C \cot(\beta - \theta) \\ &= \rho \omega_b \cos(\beta - \theta) \end{aligned} \quad (22)$$

以上、A, B, C 各点での接触面内の (X, Y) の位置における、単位時間当たりの相対線すべり距離と相対旋回すべり距離を、図 6 に示すように合成すると、単位時間あたりの相対すべり距離 L_i が求まる。それは次式のようになる。

Fig.7 Effect of spin angle on relative slide distance

$$L_i = \{(q_i \sin \phi)^2 + (l_i + q_i \cos \phi)^2\}^{1/2} \quad (23)$$

ただし、 $i = A, B, C$ である。また、

$$\cos \phi = \frac{X}{\rho}, \quad \sin \phi = \frac{Y}{\rho} \quad (24)$$

である。

ところで、式(23)は砥粒1個当たりの相対すべり距離である。したがって、各接触面内に散在する各々の砥粒の相対すべり距離を式(23)を用いて算出し、それらを合計したものがトータルとしての相対すべり距離となる。すなわち、

$$L = \sum L_A(X, Y) + \sum L_B(X, Y) + \sum L_C(X, Y) \quad (25)$$

以上の計算式をもとに、ボールの自転軸角度と相対すべり距離の関係を概算してみた。計算に使用した各パラメータの数値を以下に示す。各接触面とラップ盤回転軸の距離はそれぞれ $R_A = 50\text{mm}$, $R_B = 52.5\text{mm}$, $R_C = 47.5\text{mm}$, ボールの半径 $r = 5\text{mm}$, ボールの自転速度 $\omega_b = 4000\text{rpm}$, ラップ盤のV溝角は $\alpha = \beta = 60^\circ$, ボールとラップの接触面の長短径は $a = 0.3\text{mm}$, $b = 0.2\text{mm}$ とした。これらの値は、製作した加工装置から求めたものである⁴⁾。

計算は有限個の砥粒について行った。その結果を図7に示す。図中の縦軸は、ボールの自転軸角度 $\theta = 0^\circ$ のときの相対すべり距離を基準にして、そのときの相対すべり距離の比を表している。図7から、自転軸角度 θ の増加に伴って、ボールとラップの接触面内の相対すべり距離が増えることがわかる。したがって、相対すべりに起因する加工量は増加すると考えられる。この解析結果は、別報の実験結果ともよく対応している⁵⁾。

5. 結 論

窒化けい素球等の高能率・高精度研磨を目的として、スピン角度制御型ボール研磨法を新しく創案し、その研磨機構について理論的検討を行った。その結果、次のような結論を得た。

- (1) V溝ラップ盤を分割した場合では、ボールの自転軸角度 θ の値は、平面ラップ盤、V溝外側ラップ盤およびV溝内側ラップ盤の回転速度の配分の仕方で、自由に変えることができる。
- (2) 自転軸角度 θ の増大に伴って、ボールとラップの接触面内の相対すべり距離が増加する。その結果、相対すべりに起因する加工量は増加すると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 曾田範宗：軸受，岩波全書，(1975) 92.
- 2) 井戸 守，羽地 務：ミニアチュア玉軸受，日刊工業新聞社，(1961) 147.
- 3) 軸受・潤滑便覧編集委員会編：軸受便覧，日刊工業新聞社，(1961)
- 4) 黒部利次，角田久也，小野田 誠：回転スピン制御形球研磨法の開発（第1報）－加工原理と研磨装置－，1990年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1990) 257.
- 5) 黒部利次，角田久也，小野田 誠：回転スピン制御形球研磨法の開発（第2報）－窒化けい素球のラッピング－，1990年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1990) 259.