総形ドレッシングを要しないボールねじ研削法* (ボールねじ測定および形状解析システムの開発)

原 田 宏 幸*¹, 鍵 和 田 忠 男*²

Method for Ball Screw Generation without Form-Dressing (Development of Dimensional Measurement and Shape Analysis System for Ball Screw)

Hiroyuki HARADA and Tadao KAGIWADA

In a previous report, a method for ball screw generation using a standard-shape grinding wheel instead of a form-dressed grinding wheel was proposed. The result of the shape analysis of the generated ball screw performed using a conventional contour analysis system contains some errors, because in the system the cross section of the ball screw groove is assumed to be a gothic arch, a combination of circular arcs, while the actual profile of the ball screw generated by the present generation method is not always a gothic arch. In this paper, an advanced dimensional measurement and shape analysis system for a ball screw which can be applied to any cross-sectional shape is presented. The dimensional measurement method of the system, named the six ball method, similar to the three wire method for measurement of normal thread, and is more exact than the three wire method. In the shape analysis method in the present system the shape of the cross section is not assumed to be a circular arc, but the contact point of a steel ball is determined directly through the simulation of the contact between the groove surface and the steel balls. Using this system a detailed examination of a ball screw profile was performed.

Key Words: Grinding, CAM, Dressing, Ball Screw, Form Grinding, Simulation, Measurement, Accuracy, Shape Analysis, Grinding Wheel

1. 緒 言

本研究においては、総形研削方式によるボールねじ溝の仕上げ法が持つ複雑なドレッシング工程、ねじ溝のねじれに起因する砥石の干渉による目的ねじ溝形状と仕上げねじ溝形状の不一致などを解決する目的で、総形研削によらずにボールねじを加工する方法を開発してきた^{(1)~(3)}。

既報において実際に加工されたボールねじの形状解析に用いていた市販の輪郭形状測定装置に付随したボールねじ計算プログラムは、ボールねじ形状を二つの円弧からなるゴシックアーチと仮定して解析を行っている。これに対して本研究の方法により研削されたボールねじは、一般的なボールねじとは異なりねじ溝全体の形状は必ずしもゴシックアーチではない。そのため、上記のボールねじ計算プログラムによる解析結果には必然的に誤差が含まれていた。また、ねじ溝の各部分における形状を詳細に解析するためには、解析区間を狭くした上でそれを各部分について繰返す必要が

あり、多大な手間がかかった。

本論文ではボールねじ形状の正確な測定と詳細な形状解析を行うことのできるシステムの開発について述べる。システムの開発に先立ち、これまで必ずしも明確に証明されていなかった、鋼球の接触点とその運動方向に関して幾何学的に明らかにし、形状解析の理論的なよりどころとする。本システムのボールねじ測定においては、新たに開発した六球法と名づけた方法により鋼球の中心円径を測定する。この方法は通常のねじの測定における三針法に似ているが、三針法における制限条件がなく有用である。形状解析においては、輪郭形状測定装置から得られる形状データをもとに三次元化した立体的ねじ形状に対する鋼球の接触シミュレーションを行って、鋼球とボールねじの位置関係を正確に規定する。これらの結果に基づき、接触点と鋼球中心を含む平面におけるねじ溝の断面形状に対する詳細な検討を行う。

2. 鋼球の接触点の幾何学

2.1 接触点の理論的考察 本研究においては、鋼球とボールねじ面の二つの接触点の midpoint の半径におけるリード角 j の方向を法線とする平面を溝直角断面と呼んでいる。既報^{(1)~(3)}においては目的とするボー

* 1996年9月28日 北海道支部第36回講演会において講演、原稿受付 1996年11月20日。

¹ 正員、北海道大学大学院 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)。

² 正員、北海道大学工学部。

ルねじ溝の断面形状は接触点も含めてこの溝直角断面に現われるものとして、コンピュータ支援および形状解析を行ってきた。本論文では形状解析システムを構築するにあたり、形状を評価すべき断面について改めて考察する。

図1は鋼球とボールねじが接触している状態を表す模式図である。ねじ面上に描かれた実線が接触点におけるらせんであり、接触点を結ぶ直線はねじ軸方向とは傾いている。このときの鋼球上における接触点とその運動方向を模式的に表したものが図2である。 p_1 , p_2 が鋼球の接触点を表す。接触点 p_1 と p_2 を結んだ直線がZ軸となす角を j_m , 接触角を α , 鋼球径を D_a , 鋼球の中心円径を d_m とすると、接触点 p_1 における鋼球の接平面 P_{A1} の法線ベクトル A_1 は次のように表すことができる。

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\cos \alpha \\ \sin \alpha \sin j_m \\ -\sin \alpha \cos j_m \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

また p_1 におけるねじ円筒の接平面 P_{B1} の法線ベクトル B_1 は次のように表される。

$$B_1 = \begin{bmatrix} d_m - D_a \cos \alpha \\ D_a \sin \alpha \sin j_m \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

接触点 p_1 の瞬間的な運動方向は、鋼球から見た場合には接平面 P_{A1} に含まれ、ねじ軸から見た場合には接平面 P_{B1} に含まれるから、運動方向は二つの平面の交線方向 C_1 となる。これはそれぞれの平面の法線ベクトル A_1 , B_1 の両方に直交するベクトルの方向であり、運動の向きを考慮して次のように求められる。

$$C_1 = B_1 \times A_1 = \begin{bmatrix} -D_a \sin^2 \alpha \sin j_m \cos j_m \\ \sin \alpha \cos j_m (d_m - D_a \cos \alpha) \\ d_m \sin \alpha \sin j_m \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

図示していないが p_1 におけるねじ軸の円周方向を表すベクトル T は B_1 に直交し、かつZ方向の成分を

Fig. 1 Diagram of ball and ball screw

もたないベクトルであるから、次のように表すことができる。

$$T = \begin{bmatrix} -\frac{1}{d_m - D_a \cos \alpha} \\ \frac{1}{D_a \sin \alpha \sin j_m} \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

C_1 が p_1 における円周方向となす角を j_1 とすると、

$$\cos j_1 = \frac{T \cdot C_1}{|T| |C_1|} \dots\dots\dots (5)$$

と表され、 j_1 と j_m の符号は同じとして次の関係を得る。

$$\tan j_1 = \frac{d_m \tan j_m}{\sqrt{D_a^2 \sin^2 \alpha \sin^2 j_m + (d_m - D_a \cos \alpha)^2}} \dots\dots\dots (6)$$

一方 j_1 は接触点の半径位置におけるねじのリード角であるから次のように求められる。

$$\tan j_1 = \frac{l}{\pi \sqrt{D_a^2 \sin^2 \alpha \sin^2 j_m + (d_m - D_a \cos \alpha)^2}} \dots\dots\dots (7)$$

式(6), (7)を等しく置くことにより次の関係を得る。

$$\tan j_m = \frac{l}{\pi d_m} \dots\dots\dots (8)$$

以上は p_1 を用いて述べたが、 p_2 を用いても同様に式(8)が得られる。式(8)から j_m は鋼球の中心円におけるねじのリード角にほかならないことがわかる。このことから鋼球とボールねじ溝の接触点は、接触点の半径位置や鋼球の大きさ、ねじ溝の形状には無関係に、鋼球の中心円におけるらせんに垂直な断面(j_m 断面と呼ぶ)内に存在することが明らかとなった。このことは、従来は必ずしも明確には証明されていなかったことである。

二つの接触点を結ぶ直線の中点におけるねじのリード角は次式で表される。

Fig. 2 Geometrical condition around contact point

$$\tan j = \frac{l}{\pi(d_m - D_a \cos \alpha)} \dots \dots \dots (9)$$

したがってこれまで用いてきた溝直角断面の法線方向 j [式(9)] と実際に接触点の存在する j_m 方向 [式(8)] は一致せず、ボールねじの断面形状をより厳密に解析するためには、 j_m 断面で論ずる必要がある。

2.2 研削シミュレーションにおける誤差判定

本研究では最適な砥石傾き角をコンピュータによる研削シミュレーションにより求めている。このときの誤差判定はこれまで j 断面で行っていた。これを j_m 断面に置き換えた場合に形状精度に及ぼされる影響について以下に述べる。

ねじの目的形状および寸法を表1、図3に示す。使用した砥石は直径 $D_s=65$ mm、厚さ $T=5$ mm、縁形状 F の1号平形砥石である。目的形状から $j=4.76^\circ$ 、 $j_m=4.24^\circ$ である。砥石旋回角 $\phi=0$ を想定し、 j 断面において誤差判定を行った場合、砥石切込み深さ $D_c=3.32$ mm において砥石の最適傾き角 $j_c=19.810^\circ$ が得られ、このとき接触点近傍における最大高さ誤差 $e_{HMAX}=2.6 \mu\text{m}$ (値は負)、鋼球の中心円径 $d_m=51.506$ mm であった⁽²⁾。

これを j_m 断面における誤差判定によって最適傾き角を求めた結果、砥石切込み深さ $D_c=3.32$ mm において最適傾き角 $j_c=19.806^\circ$ が得られた。このとき接触点近傍における最大高さ誤差は $e_{HMAX}=2.4 \mu\text{m}$ (値は負) であり、鋼球の中心円径は $d_m=51.506$ mm である。ここで得られた j_c と上記の j 断面における j_c との差は 0.04° であり加工時の設定誤差に含まれる程度

Table 1 Specifications of ball screw to be generated

Nominal shaft diameter, d	50 mm
Lead, l	12 mm
Ball diameter, D_a	7.938 mm
Ball center diameter, d_m	51.5 mm
Conformity factor, γ	0.55
Contact angle, α	45°
Radius of gothic arch, R	4.366 mm

Fig. 3 Dimensions of ball screw to be generated

の微少なものである。また e_{HMAX} の差はわずか $0.2 \mu\text{m}$ であり、 d_m は全く同じである。以上のことから、本目的形状に対しては j と j_m の差はほとんど影響していなかったことがわかる。

3. 六球法による鋼球の中心円径測定

鋼球の中心円径 d_m はボールねじの実用において重要な寸法であるが、2章の結果から、鋼球の接触点を論ずる上でも重要であることがわかった。しかしこれまで用いてきた輪郭形状測定装置による測定では、鋼球の中心円径はボールねじ外径からの相対的な値として求められ、絶対的な値を正確に測定することは不可能であった。 d_m の絶対的な測定法としては、通常のねじの測定に用いられる三針法や鋼球を用いる方法に準じた方法が考えられる。しかし三針法に準じた方法においては円筒の長さあるいは径の制限に考慮する必要がある⁽⁵⁾、鋼球と同じ径の円筒の入手あるいは製作が困難である。また鋼球を用いる方法では、鋼球を正しくねじ直径上に配置することが困難である。

そこで本研究では鋼球2個を互いに接触させた状態で接着したもの(これを双球子と呼ぶ)を3組用意し、それらを三針法に準じた形で用いる方法を開発し、これを六球法と呼ぶことにした。

図4は六球法による測定の模式図であり、定盤上に2組の双球子を配置して測定対象のボールねじを乗

Fig. 4 Schematic view of 'six ball method'

Fig. 5 Dimensions in six ball method

せ、その上に1組の双球子を置き、ハイトメータを用いて定盤からの高さを測定する。ボールねじと双球子は互いに安定な位置を保つため測定は容易である。図4, 5より高さの測定値 h から鋼球の中心円径 d_m は次のように計算される。

$$d_m = \sqrt{(h - D_a)^2 + D_a^2 \cos^2 j_B} \dots\dots\dots (10)$$

ここで j_B は接触した二つの鋼球の中心を結んだ直線が周方向となす角度である(図5参照)。また図5から次式が得られる。

$$h - D_a = d_m \cos\left(\frac{\pi d_a \sin j_B}{l}\right) \dots\dots\dots (11)$$

式(10), (11)から j_B を消去すると d_m と h の関係が一義的に求められるが、式が複雑になり実用的でない。そのため、以下のような数値解法を用いる。式(11)において j_B の初期値を仮定して d_m を求め、その d_m を式(10)に代入して j_B を求め、求められた j_B を再び式(11)に代入して d_m を求める。これを d_m, j_B が収束するまで繰返すことにより、式(10), (11)が満たされ、このときの収束値が d_m の真値である(表2参照)。

4. 形状解析

4.1 市販のボールねじ計算プログラム 輪郭形状測定装置におけるボールねじ計算プログラムは、二つの円弧の組合せであるゴシックアーチ断面をもつボールねじの形状解析を目的としている。そして測定された輪郭形状に対し最初に解析区間を任意に設定してその区間内における輪郭形状に最も一致する円弧を仮定し、その円弧上に接触点を求める。このため接触点を含むように小さい解析区間を設定することは大変困難であり、鋼球の接触点近傍における曲率半径を正確に求めることは難しい。

また一方で、本研究における研削されたボールねじ溝の断面形状は、必ずしもゴシックアーチではなく、輪郭上の各点において曲率半径は変化する。したがって、この計算プログラムを用いた場合に接触点の位置が解析区間の位置と大きさの選択によって変化する。結果的に設定した解析区間の外側に接触点が求まる場合も存在し、誤差を生じ易い。また、ねじ溝の各部分における形状を詳細に解析するためには、解析区間を狭くした上で、それを各部分について繰返す必要があり、多大な手間を要する。

4.2 本システムの概要 本システムにおいてはねじ軸方向のねじ溝断面形状を輪郭形状測定装置によって測定し、測定された相対的な形状を数値データとしてコンピュータに取込み、形状解析を行う。解析項目は鋼球の中心円径 d_m 、接触角 α 、接触点を含む平面

(j_m 断面)内におけるねじ面の曲率 $1/R$ とした。このうち d_m は4章の方法により直接に測定されるので、ここでは計算される d_m を測定値に一致させることで相対的な形状データから絶対的なねじ形状を求める。

図6に d_m の測定を含む本形状解析システムのフローチャートを示す。処理の流れは以下のとおりである。

- (1) 六球法により d_m を求める。
- (2) 輪郭形状測定装置によりねじ軸方向の形状を測定し、測定データをコンピュータに取込む。
- (3) 測定データを三次元ねじ形状に展開し、 d_m の測定結果に基づいて鋼球とねじの位置関係および接触点位置を三次元的に決定する(4.3節)。
- (4) j_m 断面におけるねじ溝の断面形状を求める(4.4節)。
- (5) j_m 断面内の各点の曲率 $1/R$ 、傾き α_p を算出し、処理を終了する(4.5節)。

4.3 接触点の三次元的決定 鋼球とねじ溝の接触点の位置はねじ溝がどのような形状をしていても特定されるはずである。しかしその位置を物理的測定によって知ることは困難である。そこでここでは輪郭形状測定装置によって得られた二次元のねじ溝断面形状を三次元化してねじの立体形状を求め、その立体形状に対する鋼球の接触状態を探るコンピュータシミュレーションを行ってその接触点位置を見出す。

測定対象のボールねじを、円柱座標系(r - θ - z)で表す。輪郭形状測定装置を用いてねじ溝の断面形状を z

Fig. 6 Flow chart of ball screw shape analysis system

方向に測定し、測定を行った断面を $\theta=0$ 面として結果を $f(z_{\theta=0})$ と表す。 $f(z_{\theta=0})$ は相対的形状を表しており、絶対的な r 位置は一定値 r_T, z_T を用いて

$$r_{\theta=0} = r_T + f(z_{\theta=0} + z_T) \dots \dots \dots (12)$$

で表される。 z_T, r_T は未知数であり以下の過程で決定される。式(12)は $\theta=0$ における関数であるが、ある θ 断面においては式(12)に準じて次式で表される。

$$r_{\theta} = r_T + f\left(z_{\theta=0} + z_T - \frac{l}{2\pi}\theta\right) \dots \dots \dots (13)$$

式(13)によりねじの立体形状を得ることができる。

六球法により測定された d_m の位置に直径 D_a の鋼球が存在すると仮定した場合に、鋼球と式(13)で表されるねじが2点で接触するように、 r_T, z_T の値をコンピュータシミュレーションにより決定する。これにより鋼球とねじの位置関係および接触点の位置が三次元的に規定される。

4.4 j_m 断面内の溝形状 六球法によって測定された d_m から式(8)により j_m が求められる。ねじ溝の各点のうち、次式の幾何学的関係を満たす点が j_m 断面上に存在する。

$$\tan j_m = \frac{\left\{ r_T + f\left(z_{\theta=0} + z_T - \frac{l\theta}{2\pi}\right) \right\} \sin \theta}{z_{\theta=0} + z_T} \dots \dots \dots (14)$$

式(14)を数値解法によって解くことにより、 θ が求められる。ここで j_m 断面内の各点を直交座標系 ($Z_{jm} - X_r$) で表すことにする。ただし Z_{jm} は z の j_m 断面への投影であり、 X_r は図2の X の原点を z 軸上にずらしたものである。 j_m 断面内における位置 (Z_{jm}, X_r) は式(14)の θ を用いて次式で表される。

$$Z_{jm} = \frac{z_{\theta=0} + z_T}{\cos j_m} \dots \dots \dots (15)$$

$$X_r = \left\{ r_T + f\left(z_{\theta=0} + z_T - \frac{l\theta}{2\pi}\right) \right\} \cos \theta \dots \dots \dots (16)$$

式(14)～(16)により j_m 断面の溝形状が求められる。

Fig. 7 Change of $1/R$ and α_p with b_{zjm}

4.5 曲率とねじ面の傾き 求められた j_m 断面の溝形状から、各点の曲率と面の傾きを以下のように求める。各点の形状データ、 $[Z_{jm}(I), X_r(I)] (I=1, 2, \dots)$ には表面粗さやうねりの成分が含まれており、局所的な幾何形状に対してはノイズとなって現れる。これを除去するため平均化によるスムージングを行い、位置 $[\bar{Z}_{jm}(I), \bar{X}_r(I)]$ は

$$\bar{Z}_{jm}(I) = \frac{\sum_{J=I-k}^{I+k} Z_{jm}(J) - Z_{jm}(I)}{2k},$$

$$\bar{X}_r(I) = \frac{\sum_{J=I-k}^{I+k} X_r(J) - X_r(I)}{2k} \dots \dots \dots (17)$$

として求め、面の傾き $\alpha_p(I)$ は以下のように求める。

$$\tan \alpha_p(I) = \frac{\sum_{J=I+1}^{I+k} \bar{X}_r(J) - \sum_{J=I-k}^{I-1} \bar{X}_r(J)}{\sum_{J=I+1}^{I+k} \bar{Z}_{jm}(J) - \sum_{J=I-k}^{I-1} \bar{Z}_{jm}(J)} \dots \dots \dots (18)$$

ただし k は平均化にかかわる領域の幅 b_{zjm} を以下のように決定する数である。

$$b_{zjm} = Z_{jm}(I+2k) - Z_{jm}(I-2k) \dots \dots \dots (19)$$

b_{zjm} は本節の後半に述べる方法により決定される。

曲率 $1/R(I)$ は次のように求める。

$$1/R(I) = \frac{\{\alpha_p(I+k) - \alpha_p(I-k)\}}{\sqrt{\{\bar{Z}_{jm}(I+k) - \bar{Z}_{jm}(I)\}^2 + \{\bar{X}_r(I+k) - \bar{X}_r(I)\}^2} + \sqrt{\{\bar{Z}_{jm}(I) - \bar{Z}_{jm}(I-k)\}^2 + \{\bar{X}_r(I) - \bar{X}_r(I-k)\}^2}} \dots \dots \dots (20)$$

図7は6章に述べる解析例において、 b_{zjm} の変化に対する曲率 $1/R$ と面の傾き α_p の変化をいくつかの点を例として表したものである。例示した3点のいずれにおいても、 b_{zjm} の小さい範囲では $1/R$ の変化が激しく不安定であり、 b_{zjm} の大きい範囲ではゆるやかに変化していることがわかる。また α_p の値は b_{zjm} によらずほぼ一定であることがわかる。 $1/R$ に関しては、 b_{zjm} の小さい範囲では粗さやうねりの影響を受け、一方 b_{zjm} の大きい範囲では、場所によって変化する曲率を平均化し、局所的な値からは遠ざかっていると考えられる。したがってここでは粗さやうねりの影響がなく、かつ局所的な曲率の値を現すと考えられる $b_{zjm}=0.4$ mm を採用した。

Table 2 Calculation process of d_m

	j_B ° [Eq. (10)]	d_m mm [Eq. (11)]
1	0 (initial)	51.6066
2	4.262	51.6032
3	4.250	51.6032
4	4.250	51.6032

Fig. 8 Measurement of d_m by six ball method

5. 測定と解析の結果

前報⁽²⁾において実際に研削されたボールねじを対象として本システムを適用した結果を以下に示す。ねじのリード $l=12.0$ mm, 使用鋼球径 $D_a=7.938$ mm である。

六球法による鋼球の中心円径 d_m の測定のようすを図8に示す。高さの測定値は $h=58.930$ mm であった。この h を用いて、式(10)、(11)による繰返し計算により d_m を求めた。表2に計算の過程を示す。 j_B の初期値は零とした。得られた結果は $d_m=51.603$ mm である。なおこれに対するリード角は $j_m=4.23^\circ$ である。

次に、輪郭形状測定装置を用いてねじ溝断面形状を測定しデータをコンピュータに取込んだ。測定方向はねじ軸方向であり、サンプリングピッチ 0.01 mm とした。

輪郭形状測定装置により得られたねじ溝断面形状から、六球法により測定された d_m を満足するように三次元接触点解析を行った結果を表3に示す。接触点 p_1 における $j_m=4.23^\circ$ は六球法により測定された d_m に対応する $j_m=4.23^\circ$ と完全に一致している。 p_2 における $j_m=4.18^\circ$ は測定された d_m による j_m と一致してはいないが、角度の差は 0.05° であり、これは鋼球表面の位置の差にして 0.0023 mm である。これはサンプリングピッチの $1/4$ 以下であり、不一致の原因は形状データが離散データであることに起因する接触点の計算結果のわずかなずれであると考えられる。以上のことから本システムによる接触点解析の精度が十分で

Table 3 Result of calculation of contact point

	Z_{jm} mm	α °	j_m °
p_1	-3.030	49.77	4.23
p_2	2.683	42.53	4.18

Fig. 9 Result of $1/R$ and α_p analysis in j_m -plane

あることがわかる。

図9は $b_{zjm}=0.4$ mm($k=10$) とした場合の j_m 断面内の各点の曲率 $1/R$ とねじ面の傾き α_p を表す。図9中の三角形は鋼球とボールねじの接触点の位置であり、左側が p_1 、右側が p_2 を表す。図から研削されたボールねじ断面の曲率は必ずしも滑らかに変化していないことがわかる。これは研削に使用した砥石の輪郭形状が完全ではなかったことがおもな原因と考えられる。溝全体の形状は、溝の中央部から外側に向かって曲率は小さく(曲率半径は大きく)なっていく傾向が現れている。また左右とも溝中央からの距離約 1.7 mm 付近に曲率が大きく乱れる部分が存在するが、これは加工前にあらかじめ設けた逃げ溝と研削されたねじ面との境界部であり、曲率が負になる部分があることから、ここに変曲点が存在することがわかる。

以上のように本システムによりボールねじ溝形状に対するより詳しい検討が可能になった。

6. 結 言

本論文では総形研削によらずにボールねじを加工する方法において、これまで用いてきた市販の輪郭形状測定装置とボールねじ計算プログラムに代わる新しいボールねじ測定および形状解析システムの開発を行った。その結果、以下の成果が得られた。

(1) 鋼球とねじ溝の接触点とその運動方向に対する幾何学的考察から接触点は鋼球の中心円径におけるらせんに垂直な平面に存在することが明確に証明された。

(2) 六球法と名づけた測定法が開発され、鋼球の中心円径を正確に測定することが可能となった。

(3) 軸方向の形状データからボールねじ溝の三次元的な形状構築がなされ, 接触点の位置を三次元的に求めることが可能となった。

(4) 局所的なボールねじ溝形状の詳細な解析が可能となった。

本研究の遂行にあたり協力を得た北海道大学大学院学生 飯田重幸, 浦池隆文の両君に感謝する。

本研究の一部は平成7年度文部省科学研究費一般研究(B)(06452155)の助成を得て実施したことを明記し関係各位に感謝する。

文 献

- (1) 鍵和田忠男・原田宏幸, 総形ドレッシングを要しないボールねじ研削法, 機論, **62**-596, C(1996), 1612-1618.
- (2) 原田宏幸・鍵和田忠男, 総形ドレッシングを要しないボールねじ研削法(砥石軸二次元設定と1パス加工法), 機論, **63**-605, C(1997), 247-253.
- (3) Kagiwada, T., Harada, H., Method for Ball Screw Generation without Form Dressing, *JSME Int. J., Ser. C*, **39**-4 (1996), 871-877.
- (4) 青木保, 精密測定, **2**(1966), 328, コロナ社.
- (5) 村瀬善三郎, ボールスクリーの研究(第3報), -ねじ棒およびナット球心径の測定理論-, 精密機械, **28**-6(1962), 309-316.