ボールねじの玉挙動とロストモーション（第2報）*

－ダブルナットあるいはオーバサイズ球予圧方式による荷重の影響－

上田 真大** 下田 博一***

Influence of Ball Behavior in Ball Screws on Lost Motion (2nd Report)

- Lost Motion and Ball Wedging Behavior under Varied Preload with Double Nut or Over-sized Balls -

Masahiro UEDA and Hirokazu SHIMODA

It is well known that preloaded ball screws with double nut produced hysteretic motion between the rotary motion of the screw shaft and the linear motion of the nut, which is called “lost motion”, affects positioning accuracies of ball screws.

Preloaded ball screws with a double nut have the characteristic that loaded balls wedge into a right angle direction to a ball rolling direction because the directions of screw shaft and nut raceways differ from the ball rolling direction. Loaded balls of preloaded ball screws with a double nut have two contact points geometrically. When the ball screw is operated under the condition of screw shaft turning and nut stationary, the balls have the velocity component perpendicular to the load line of action due to the helical raceway groove. Therefore the balls wedge into nut grooves. In the case of a ball screws with a circular-arc groove profile, “ball wedging” phenomenon is saturated when the force of resistance to ball wedging exceeds a frictional force between the ball and the raceway groove.

In the present study, the authors experimentally investigated the lost motion of the X-table which is composed of a preloaded precision ball screw and a couple of linear air bearings, and the ball wedging behaviors under the condition of varied preload with double nut or over-sized balls have also measured.

Key words: ball screw, preload, two-point contact, lost motion, positioning error, ball motion, ball wedging

1. はじめに

位置決めに用いられるボールねじは、バックラッシの消滅や軸方向変位量の限定あるいは剛性の増加を図る目的から、実用上の慣用手段として予圧が付与されている。ところが、予圧が付与されたボールねじであっても、ねじ軸の回転運動とナットの直線運動との間にロストモーションが生じるため、送り系の位置決め性能に影響を及ぼし、例えば、X-Y テーブルの輪郭運動軌跡に突起誤差を引き起こすことが知られている。

前報¹⁾では、ボールねじのロストモーション生成要因を究明する目的から、ナット軌道面上に近接変位センサを埋め込み、ボールねじの玉公転挙動の測定を実施するとともに、ボールねじのロストモーションを同時に測定することで両者の関係を実験的に調べている。また、ナットに埋め込んだ近接変位センサと公転運動している玉との接近量について CNC 三次元測定機を用いてキャリブレーションする方法を考案、開発しており、ボールねじを駆動させた際に生じる玉の食込み現象を定量的に評価することに成功している。

本報では、引き続き、玉の食込み現象とロストモーションの関係を調べる目的から、試験用ボールねじに種々のダブルナット予圧を付与することで、アキシアル荷重が両者に及ぼす影響を調べている。また、ねじ溝空間よりも僅かに大きな鋼球を組み込み、シングルナットオーバサイズ球予圧を付与した場合、ボールねじ駆動反転時において玉の食込み現象がほとんど発生しないことが報告されている²⁾。そこで、オーバサイズ球を

組み込んだ場合における玉食込み量とロストモーションの測定も実施したので、得られた結果を報告する。

2. ロストモーションと玉の食込み現象

ボールねじは、軌道がリード角だけねじれていることから、転がり軸受などとは異なり、玉と軌道との接触点の軌跡が一平面内に存在しない。図1は2点接触ボールねじにおける玉中心と玉と軌道との接触点を含む断面においてみた場合における、

Fig. 1 Difference in direction between raceways and ball track

* 原稿受付 平成 22 年 5 月 19 日

** 学生会員 明治大学大学院理工学研究科（川崎市多摩区東三田 1-1-1）

*** 正 会 員 明治大学理工学部（川崎市多摩区東三田 1-1-1）

Fig. 2 Ball wedging behavior

玉公転方向と軌道方向を表わす。図において、ボールねじの軸方向を z 軸、軸直角平面を xy 平面とすれば、玉中心 m の軌跡の方向、すなわち、玉公転方向は y 軸をリード角 γ_m だけ回転させた y 軸方向となる。これに対し、玉とねじ軸あるいはナットとの接触点 B , M を通る軌跡の方向は、 m 点を通るつる巻線の半径 $d_m/2$ と B 点および M 点を通るつる巻線の半径 $d_B/2$ ならびに $d_m/2$ が互いに異なることに起因して、玉公転方向に対して不可避的なずれ角 γ_{LB} , γ_{LM} をもつ。その結果、 B 点ならびに M 点における軌道の速度は、玉と軌道との接触荷重の作用線に対して直角な u 軸方向に $\sin \gamma_{LB}$, $\sin \gamma_{LM}$ だけ速度成分をもつことになる³⁾。

いま、軸方向荷重 F_a が作用しているボールねじを、ナットの回転を拘束し正方向作動状態になるよう駆動させた場合について考える。この場合における、 u 軸方向の玉と軌道の速度を図 2(a) に示す。●点は軌道速度を表わし、○点は玉の速度を表わす。ここで、 B 点および M 点がいずれも純転がり状態にあると想定すれば、玉中心点 m も u 軸方向の速度をもつ。そのため、玉は転がりながらねじ軸との接触点の軌道の方向に引張られることになり、玉は荷重作用線に対して直角方向にナットのねじ溝に向かって移動しようとする。これは玉の食込み現象と呼ばれ、村瀬、下田ら^{4)~6)}によってその存在が示唆されている。玉の食込みは狭いねじ溝空間に向かって進行するため、食込みに対する抵抗力は大きく、この抵抗力が玉と軌道間の摩擦力を超えたとき食込みは飽和状態に到達し、玉は定常的なすべりを伴って公転運動するものと考えられる。また、一般のボールねじは、単一ナットのすきまと初期接触角の変動を抑制する目的から、ねじ溝はゴシックアーチ形状を有しているために、玉は 3 点接触し食込みが飽和状態に至ることも考えられる。図 (b) は逆方向作動状態の場合であり、ボールねじの駆動方向が反転すると食込み方向も反転し、玉はねじ軸側に移動しようとする。

次に、ボールねじを往復運転した際における、ねじ軸の回転運動とナットの直線運動との関係をモデル化したものを図 3(a) に示す。前報の測定結果から、両者の関係はボールねじにロストモーションが発生しなければ理想的には実線で描かれた直線となるのに対し、実際はボールねじの始動時あるいは駆動反転時においてロストモーションを引き起こすために破線で描かれたヒステリシスループで表わされる。また、玉の食込み挙動については図 (b) に示すように始動時 (図中 I) あるいは駆動反転時 (図中 III) において食込みが進行し、それ以外の範囲 (図中 II, IV) では食込みは飽和し、玉は定常的な玉すべりを

(a) Lost motion

Fig. 3 Relationship between lost motion and ball wedging behavior in two-point contact ball screw

伴いながら公転運動しているものと考えられる。したがって、予圧が付与されたボールねじにおいて生じるロストモーションは、ボールねじ固有の軌道のねじれに起因する玉食込み現象が主要因となって引き起こされると考えられる。

3. 玉食込み挙動の定量的測定

本研究では、ボールねじ運転中における玉の公転挙動ならびに食込み/すべり挙動を調べる目的から、表 1 に示す試験用ボールねじのナット軌道面上には直径 3.0mm のシールド型金属近接センサ (分解能 0.3 μ m, (株)電子応用) が埋め込まれている。センサはリターンチューブに対向する 1 箇所挿入されていて、1 個の玉が近接センサ上を通過すると 1 周期分の出力波形が現れるので、波形の極値から玉通過の時間とセンサと玉との近接距離 (以下ではセンサ - 玉間距離 ε_s と呼ぶ) が測定できる。ただし、センサの出力電圧とセンサ - 玉間距離 ε_s の関係は CNC 三次元測定機を用いて校正を行っており、図 4 にその概要

を示す。CNC 三次元測定機のプロープ先端には供試ボールねじに組み込まれている銅球（玉径 $D_a = 7.934 \text{ mm}$ ）が取り付けられているため、測定機のロータリテーブルに設置した試験用ナットを回転させるとプロープ球はナット軌道面を沿って軸方向に移動する。このとき、ナットに埋め込まれたセンサがプロープ球を通過すると、1 周期分の出力波形が現れる。ここで、プロープの拘束条件はナット半径方向を固定、軸方向を自由としている。

図 5 はプロープ球をナット半径方向に $\varepsilon_s = 0 \sim 25 \mu\text{m}$ まで変位させて校正を実施した際のセンサ出力の極値 V_{sp} とセンサ - 玉間距離 ε_s との関係を表わす。図より、近接センサと玉との近接距離がこの範囲にある場合において、 V_{sp} と ε_s との間に線形的な関係が成立することが確かめられる。ここで、 $\varepsilon_s = 0 \mu\text{m}$ のときの校正結果は求心プロープ法⁷⁾によってプロープ球がナットゴシックアーチ溝の両側フランクと接触し、半径方向すきまが 0 となる場合を示している。そのため、ボールねじを正作動させたときに玉はナットゴシックアーチ溝に向かって食込みを生じるものの、 $\varepsilon_s < 0$ となる場合においてはその範囲が僅少であると考えられるので、この場合においても線形性が成り立つものとして取り扱っている。また、校正を行う際は測定ピッチ 11.25° で 1 リードあたり 32 箇所（ナットねじ溝に対して CNC による連続測定を行い、予め、ねじ溝円筒基準座標系を設定している。したがって、このような校正を行うと、ボールねじ運転中の玉公転挙動に関して、玉と軌道との接触荷重の作用線を含む断面における玉食込み量の垂直方向成分を測定することができる。

4. 実験方法

試作した実験装置の概要を図 6 に示す。送り系は試験用ボールねじと 2 つの静圧空気直動案内（給気圧 0.4 MPa 、剛性値 $127 \text{ N}/\mu\text{m}$ ）で構成されており、ステッピングモータを用いてオープン制御方式で駆動される。ねじ軸回転角はねじ軸の軸端に設置されたロータリエンコーダにより測定し、ナット移動量の測定にはレーザ測長システムを用いている。このような構造から、試作した実験装置のテーブル送り系において生じるロストモーションは、ボールねじのみを対象として取り扱うことができる。また、供試ボールねじは、ダブルナット定位予圧方式を採用しており、予圧を付与する際に通常用いられるスペーサの代わりに、2 つのシムプレート間に水晶圧電式荷重変換器（定格 7.5 kN ）を 3 個挿入したものをを用いている。このため、試験用ボールねじに対して任意の引張予圧を設定することが可能であるとともに、ボールねじ運転中の予圧量を実測できる。

ボールねじの運転条件は、ねじ軸回転数を $n_B = 30 \text{ min}^{-1}$ 、ナ

ット片道ストロークを $l_s = 84 \text{ mm}$ （7 リード）に一定とし、フルストロークを定常運転させた際の実験データだけを取り扱っている。また、ボールねじの潤滑にはタービン油 2 号（ISOVG46）を用いており、リターンチューブは下向きになるよう配置されている。ここで、実験中における室温は約 21.0°C の恒温状態にあるとともに、テーブル送り速度が低速に設定

Fig. 4 Calibration method of the gap sensor

Fig. 5 Gap sensor calibration results

(1) Linear air bearing (3) Rotary encoder
(2) Stepping motor (4) Laser head

Fig. 6 Experimental device

Table 1 Testing ball screw specifications

Screw shaft diameter D_B , mm	40
Ball center diameter d_m , mm	42.0
Ball diameter D_a , mm	7.934 (5/16"-4 μm)
Ball / shaft diameter ratio $\rho = D_a / d_m$	0.189
Lead l , mm	12
Conformity factor f_p	0.54
Initial contact angle α_0 , °	42
Lead angle γ_m , °	5.20
Number of thread turns ζ	3.5
Number of circuits ξ	1
Number of loaded balls Z	58

(0.36 m/min) されていることから、ボールねじに及ぼす温度の影響は無視して差し支えないものと考えられる。

5. 実験結果と考察

5.1 予圧量による影響

試験用ダブルナット位置予圧ボールねじに予圧量 $F_p = 0.93 \text{ kN}$, 2.47 kN ならびに 6.15 kN を付与した場合におけるロストモーションと玉食込み挙動の測定結果を、それぞれ図 7(a)～(c) および図 8(a)～(c) に示す。ここで、ロストモーション Δe_p は往路と復路における位置決め誤差の差 $\Delta e_p = e_{pB} - e_{pF}$ として求められる。図 7 より、ロストモーション Δe_p はボールねじ駆動反転後から $\theta = 2515 \sim 2520^\circ$ の範囲において発生し、その後はほぼ一定となっていることがわかる。前報の測定結果によれば、ロストモーションは始動時あるいは駆動反転時において生じ、他のストローク範囲においてロストモーションは発生しないことが明らかにされている。また、付与する予圧量を大きくするとロストモーション Δe_p が増大する結果となる。

次に、図 8 の測定結果から玉食込み量の半径方向成分は往路と復路におけるセンサ - 玉間距離の差 $\Delta \varepsilon_s = \varepsilon_{sB} - \varepsilon_{sF}$ として求められる。図から、測定結果においてボールねじの製作誤差等の影響により最大で $1.7 \sim 3.1 \mu\text{m}$ 程度の変動があるものの、往路と復路でのセンサ - 玉間距離 ε_{sF} , ε_{sB} が一定の値となることが確かめられる。これは、ボールねじ始動時あるいは駆動反転時に

玉の食込みを引き起こし、やがてそれが飽和状態に至ると、玉は定常的なすべりを伴って公転運動していることを表わしていると考えられる。また、予圧が大きくなると玉の食込みも顕著となることがわかる。これは、予圧の増大によって、食込みを引き起こす要因である玉転動方向に対して直角方向に生じる摩擦力 μP が大きくなり、さらに、ボールねじの弾性接触変位の増加によって玉とゴシックアーチ溝の非負荷側フランクとの間にできる「空間」が増大したためと考えられる。すなわち、この「空間」を低減すれば玉の食込みが抑制されるため、ロストモーションは低減するものと推察される。

5.2 オーバサイズ球による影響

オーバサイズ球予圧ボールねじは、ねじ軸およびナットのねじ溝空間よりも大きめの玉を組み込むことにより 1 個のナットだけで予圧の保持を行うことができるが、玉はねじ軸およびナットのゴシックアーチ溝と 4 点接触するため、差動すべりの影響によって摩擦トルクが増大してしまうことが知られている⁸⁾。しかしながら、2 点接触しているボールねじと比較すると 4 点接触状態においては前述の「空間」が存在しないことから、玉の食込みは抑制されるものと考えられる。そこで、試験用ボールねじに、オーバサイズ球 $D_a = 7.934 \text{ mm} + \Delta D_a$ ($\Delta D_a = +4 \mu\text{m}$) を組み込み、シングルナット予圧を付与した場合におけるロストモーションと玉の食込み挙動の測定結果を、それぞれ図 9(a) および図 10(a) に示す。両図から、4 点接触ボールでは玉の食

(a) $F_p = 0.93 \text{ kN}$, $\Delta e_p = 0.162 \mu\text{m}$

(b) $F_p = 2.47 \text{ kN}$, $\Delta e_p = 0.349 \mu\text{m}$

(c) $F_p = 6.15 \text{ kN}$, $\Delta e_p = 0.658 \mu\text{m}$
 $[n_B = 30 \text{ min}^{-1}$, $l_s = 84 \text{ mm}$, turbine oil]

Fig. 7 Measurements of lost motion

(a) $F_p = 0.93 \text{ kN}$, $\Delta \varepsilon_s = 2.20 \mu\text{m}$

(b) $F_p = 2.47 \text{ kN}$, $\Delta \varepsilon_s = 3.80 \mu\text{m}$

(c) $F_p = 6.15 \text{ kN}$, $\Delta \varepsilon_s = 7.86 \mu\text{m}$
 $[n_B = 30 \text{ min}^{-1}$, $l_s = 84 \text{ mm}$, turbine oil]

Fig. 8 Measurements of vertical ball wedging

込み現象が発生しないために、ボールねじ駆動反転時においてロストモーションはほとんど生じないものと考えられる。

次に、オーバサイズ球を試験用ボールねじに組み込み、ダブルナット予圧 $F_p = 2.48 \text{ kN}$ を付与した場合でのロストモーションと玉の食込み挙動の測定結果を、それぞれ図 9 (b) および図 10 (b) に示す。これらの図から、ロストモーション Δe_p と玉食込み量 $\Delta \varepsilon_s$ が生じていることが確かめられるが、予圧の値がほぼ等しくなる図 7 (b) と図 8 (b) における Δe_p ならびに $\Delta \varepsilon_s$ とそれぞれ比較すると、両者がともに低減しているのがわかる。

ところで、オーバサイズ球をボールねじに組み込んだ際、オーバサイズ量 ΔD_a と玉荷重 P_0 との関係は、ねじ軸とナットの Hertz 定数を c_B , c_M とすると、次式で表わされる。

$$\Delta D_a = (c_B + c_M) P_0^{2/3} \quad (1)$$

同様に、オーバサイズ球を組み込んだボールねじに対して、ダブルナット予圧を付与した場合の弾性接触変形量 δ と玉荷重 P の関係は、

$$\delta = (c_B + c_M) P^{2/3} \quad (2)$$

このとき、ゴシックアーチ溝の両側フランクにおいて、ダブルナット予圧によって負荷が作用する側と除去される側の弾性接触変形量をそれぞれ δ_w , δ_r とすれば、予圧荷重による両側フランクの軸方向変位増加分と変位減少分は方向が逆向きで大きさが等しい⁹⁾から次式が成立する。

$$\frac{\delta_w \sin \alpha_w - \Delta D_a \sin \alpha_0}{\cos \gamma_m} = \frac{\Delta D_a \sin \alpha_0 - \delta_r \sin \alpha_r}{\cos \gamma_m} \quad (3)$$

ここで、 α_w : 負荷作用側の接触角, α_r : 負荷除去側の接触角, α_0 : 初期接触角, γ_m 玉中心リード角。

したがって、式(3)に式(1), (2)を代入して整理すると、

$$\frac{P_w^{2/3}}{\sin \alpha_w} + \frac{P_r^{2/3}}{\sin \alpha_r} = \frac{2P_0^{2/3}}{\sin \alpha_0} \quad (4)$$

作用側玉荷重の増加分 $P_w - P_0$ と除去側玉荷重の減少分 $P_0 - P_r$ の軸方向成分の総和はダブルナット予圧 F_p に等しいから、

$$Z(P_w \sin \alpha_w - P_r \sin \alpha_r) \cos \gamma_m = F_p \quad (5)$$

また、玉中心とねじ軸ならびにナットのねじ溝率中心の幾何学的関係から、 α_w および α_r は次式により求められる。

$$\left. \begin{aligned} [2\lambda_b + (c_B + c_M) P_w^{2/3}] \cos \alpha_w &= [2\lambda_b + (c_B + c_M) P_0^{2/3}] \cos \alpha_0 \\ [2\lambda_b + (c_B + c_M) P_r^{2/3}] \cos \alpha_r &= [2\lambda_b + (c_B + c_M) P_0^{2/3}] \cos \alpha_0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで、 $\lambda_b: (f_p - 0.5) D_a$, f_p : ねじ溝適合度。

試験用ダブルナット予圧ボールねじに $D_a = 7.934 \text{ mm}$ とオーバサイズ球 $D_a = 7.934 + \Delta D_a \text{ mm}$ ($\Delta D_a = +4 \text{ }\mu\text{m}$) を組み込み、種々の予圧を付与した場合における玉荷重 P と軸方向変位 δ の計算結果をそれぞれ図 11 (a), (b) に示す。ただし、オーバサイズ球を組み込んだ際の P_w , P_r , α_w , α_r に関して、式(4)~(6)を連立して数値解を求めている。図(a)より、オーバサイズ球を組み込んだボールねじについて、負荷除去側での接触荷重 P_r が $F_p = 6.55 \text{ kN}$ で $P_r = 0$ になることから、この予圧荷重以上の領域において玉はねじ軸およびナットの軌道と各々1点で接触して、2点接触状態となることがわかる。一方、負荷作用側の玉荷重 P_w は F_p が大きくなるにつれて、通常の玉径を組み込んでいる場合の玉荷重 P に漸近していき、 $P_r = 0$ のとき $P_w = P$ が成立する。また、図(b)からオーバサイズ球による剛性増加効果が明瞭に表れており、予圧を大きくすると変位曲線はほぼ直線となる。

したがって、図 10 (b) において付与したダブルナット予圧 $F_p = 2.48 \text{ kN}$ から、玉は4点接触状態にあるにもかかわらず食込みを引き起こしているのは、予圧を付与したことにより $P_w > P_r$ となるためと考えられる。すなわち、ボールねじを駆動させた際に玉とねじ軸との接触点に作用する摩擦力が $\mu P_w > \mu P_r$ となり、玉に働く諸力のつり合いに不均衡が発生し玉食込みが引き

(a) Single nut, $\Delta e_p = 0.017 \text{ }\mu\text{m}$

(b) Double nut, $F_p = 2.48 \text{ kN}$, $\Delta e_p = 0.174 \text{ }\mu\text{m}$
 $[n_B = 30 \text{ min}^{-1}, l_s = 84 \text{ mm, turbine oil}]$

Fig. 9 Measurements of lost motion in ball screw with over-sized balls ($\Delta D_a = +4 \text{ }\mu\text{m}$)

(a) Single nut, $\Delta \varepsilon_s = 0.02 \text{ }\mu\text{m}$

(b) Double nut, $F_p = 2.48 \text{ kN}$, $\Delta \varepsilon_s = 1.08 \text{ }\mu\text{m}$
 $[n_B = 30 \text{ min}^{-1}, l_s = 84 \text{ mm, turbine oil}]$

Fig. 10 Measurements of vertical ball wedging in ball screw with over-sized balls ($\Delta D_a = +4 \text{ }\mu\text{m}$)

(a) Ball load vs preload

(b) Axial displacement vs preload

Fig. 11 Stiffness of preloaded ball screw with over-sized balls

起こされる。また、通常の玉径に比べて玉食込み量が抑制されたのは、オーバサイズ球を組み込んだことによる剛性増加効果と食込みを生じる「空間」の低減によるものと推察される。その結果、ボールねじのロストモーションも軽減されたものと考えられるが、差動すべりの影響による摩擦トルクの増大や玉すべりの増大が摩擦特性に及ぼす影響が懸念される。

5.3 玉食込み現象とロストモーションの関係

試験用ダブルナット予圧ボールねじに $D_0 = 7.934 \text{ mm}$ とオーバサイズ球 $D_0 = 7.934 + \Delta D_0 \text{ mm}$ ($\Delta D_0 = +4 \mu\text{m}$) を組み込み、種々の予圧を付与した場合における玉食込み量 $\Delta \epsilon_s$ とロストモーション $\Delta \epsilon_p$ の測定結果を、それぞれ図 12(a), (b) に示す。両図において、 F_p が增大すると $\Delta \epsilon_s$ と $\Delta \epsilon_p$ がともに増大する結果となる。これより、玉の食込みが大きくなるとロストモーションも増大することが明らかである。また、図 11(b) および図 12(a), (b) において、通常の鋼球 ($D_0 = 7.934 \text{ mm}$) を組み込んだ場合とオーバサイズ球 ($\Delta D_0 = +4 \mu\text{m}$) を組み込んだ場合とを比較すると、両者の大小関係がそれぞれ一致していることがわかる。これより、ダブルナット予圧ボールねじにオーバサイズ球を組み込むと軸方向剛性が增大することに起因して、玉食込み量ならびにロストモーションが低減するものと考えられる。

6. おわりに

本研究では、ボールねじ駆動反転時における、ねじ軸の回転運動とナットの直線運動との間に生じるロストモーションの発生機構を究明する目的から、供試ボールねじのナット軌道面上に近接変位センサ埋め込み、種々の予圧荷重条件下においてボールねじの玉食込み挙動とロストモーションの同時測定を実施した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(a) Difference of sensor-ball distance vs preload

(b) Lost motion vs preload

$[n_B = 30 \text{ min}^{-1}, l_s = 84 \text{ mm}, \text{Turbine oil}]$

Fig. 12 Influence of ball wedging behavior on lost motion

- (1) ボールねじに生じるアキシアル荷重が増加すると、玉の食込みが増大するためにロストモーションも増大する。
- (2) シングルナット／オーバサイズ球予圧ボールねじにおいては、玉の食込みが生じないためにロストモーションはほとんど発生しない。
- (3) オーバサイズ球をボールねじに組み込み、アキシアル荷重を付与した場合、玉の食込みおよびロストモーションが低減する。これは、オーバサイズ球予圧ボールねじの剛性増加効果によるものと考えられる。

終りに臨み、試験用ボールねじを製作、提供して下さった NSK プレジジョン(株)に対し、厚く御礼申し上げます。また、実験の遂行に協力してくれた明治大学理工学部機械工学科の嶋岡拓也氏(現、全日空整備(株))に対し、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 上田真大, 下田博一: ボールねじの玉挙動とロストモーション (第1報) - 実験装置および玉公転挙動とロストモーションの測定結果 -, 精密工学会誌, 投稿中。
- 2) 熊野次朗, 下田博一: ボールねじの玉挙動とロストモーション (第2報), 2004 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2004) 47-48。
- 3) 下田博一: ボールねじの設計解析-第1章 ボールねじ構造の幾何学的解析-, 設計・製図, **26**, 10 (1991) 479。
- 4) 村瀬善三郎: ボールスクリュウの研究 (第6報) - 軽負荷領域における静摩擦 -, 精密機械, **29**, 8 (1963) 568。
- 5) 二宮瑞穂: ボールねじの摩擦と温度上昇, NSK Bearing Journal, **637**, (1978) 11。
- 6) 下田博一: ボールねじの設計解析-第2章 ボールねじの運動機構学-, 設計・製図, **26**, 11 (1991) 524。
- 7) Shimoda, H.: Evaluation of Ball Screw Accuracies by CNC 3-D CMM, Proc. of Int. Conf. on Design Engineering and Science, (2005) 169-174。
- 8) 下田博一: オーバサイズ球予圧ボールねじにおける摩擦トルクの評価, トライボロジスト, **38**, 7 (1993) 656。
- 9) 下田博一: ボールねじの剛性解析, 精密工学会誌, **64**, 11 (1998) 1582。