新しい磁気ねじの提案とその基本特性*

進士 忠彦^{*1}, 橋本 純一^{*2}, 陳 伯 青^{*3}
佐藤 海二^{*1}, 下河辺 明^{*1}

A New Magnetic Lead Screw and Its Basic Characteristics

Tadahiko SHINSHI, Junichi HASHIMOTO, Bo-Ching CHEN,
Kaiji SATO and Akira SHIMOKOHBE

This paper first proposes a magnetic lead screw which is comprised of a conventional steel lead screw and a magnetic nut. The nut is made from a helically-magnetized cylindrical permanent magnet and an external steel cover. A driving force from the screw to the nut is transmitted through the magnetic coupling without mechanical contact. So the magnetic lead screw can be used in vacuum, does not make noise and vibration, and is free from lubrication problem. However, the axial stiffness and maximum carrying load of the magnetic lead screws are smaller than those of ordinary lead screws. Experimental magnetic lead screws are made and it is proved that experimental results of the carrying load and stiffness in the axial direction agree well with simulated ones using the FEM models. It is also clarified that the thread depth and flat width of lead screw affect the carrying load of the mechanism.

Key Words: Feeding Drive, Machine Element, Magnetic Coupling, Lead Screw, Magnetic Lead Screw, Permanent Magnet, Finite Element Method

1. 緒 論

送りねじは, 対象の駆動, 位置決めに不可欠な機械要素である. 工作機械などでは, ボールねじが多く用いられるが, 振動・騒音による高速化の限界, 摩擦による発熱などの問題が指摘されている⁽¹⁾. また, ステッパーなどの精度を要求される用途には, 静圧空気を利用した空気ねじが提案されている⁽²⁾が, 真空中や特殊ガス中での使用ができない.

これらの問題を解決する手段として, 電磁力を利用した非接触式の送りねじ(磁気ねじ)⁽³⁾⁽⁴⁾の適用が考えられる. この種の送りねじでは, 軸の回転運動は, ねじ・ナット間の磁気カップリングを利用して, ナットの直進運動に変換される. ねじ・ナット間は, 非接触なため, 振動・騒音の発生や, 摩擦による発熱も少ない. また, 油や圧縮空気のような作動流体も必要としないため, 真空中や特殊ガス中での使用も可能で, クリーンな運動伝達要素である.

しかしながら, 磁気カップリングを利用して動力伝

達を行うため, 従来のねじと比較して, 軸方向力(ねじとナットが相対変位した場合に発生する復元力)や剛性が低いという問題点を有している. また, 従来の磁気ねじでは, 磁力を発生する方法として, 電磁石をもちいるものと, 永久磁石をもちいるものが報告されているが, ナット構造が複雑になるといった欠点を有している⁽³⁾. 特に, 電磁石をもちいる方法は, 電流の供給が不可欠で発熱の問題が生じると考えられる. しかも, ねじの形状と軸方向力・剛性の関係は, 実験的に数例示されているのみで, 解析的には検討されていない.

このため本報告では, まず円筒形状の永久磁石に螺旋状に着磁を施すことによって構造が単純で容易に製作できる新しいナットを有する磁気ねじを提案する. また, その試作と実験, および有限要素法を用いた静磁場解析によって, 磁気ねじの形状と軸方向力の関係などの基本特性を明らかにし, 設計指針を得る. さらに, 磁気ねじを装置に組み込む場合に問題となるねじ・ナットの偏心により発生する不平衡吸引力の問題に関して検討する.

2. 提案する磁気ねじの原理

図 1 に, 今回提案する磁気ねじの原理を示す. ねじには, 磁性体でできた角ねじが用いられている.

* 原稿受付 1997年5月2日.

^{*1} 正員, 東京工業大学精密工学研究所 (☎ 226-8503 横浜市緑区長津田町 4259).^{*2} 光洋機械工業(株) (☎ 581-0091 八尾市南植松 2-34).^{*3} 東京工業大学大学院.

Fig. 1 Principle of proposed magnetic lead screw

ナットは、永久磁石と磁性体の2層構造で、内周は、中空円筒状の永久磁石が装着されており、N極、S極の2条の螺旋状に着磁されている。また外周は、磁性体のカバーになっている。図(a)の点線で示されるように、ねじ、ナット内周部の永久磁石、外周部の磁性体のカバーによって、閉ループの磁気回路が構成されている。

ナットとねじに、軸方向の相対変位が生じた場合、図(b)に示すように、磁気カップリングによって、元の安定な状態に戻そうとする軸方向力が発生する。つまり、この力が、ナットをねじ山に沿って移動させるための推力となる。この最大値が大きいほど、質量の大きな物体を高速に搬送できる。

3. 磁気ねじの試作と磁場解析モデル

3.1 試作磁気ねじ 提案する磁気ねじの静的特性を検証するため3種類の形状をもつ磁気ねじを試作した。図2、表1に試作した磁気ねじの寸法諸元を示す。試作したねじの材質は、SCM445、ナット外周部の材質は、S25Cを用いている。また、ナットの永久磁石は、ラジアル異方性リング磁石を用い、これを軸方向に5～8個積み上げることにより、ナット内周面を構成している。材質は、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系（住友特殊金属 NEOMAX 32H 保磁力 884kA/m ）⁽⁶⁾である。また、ナットの螺旋着磁は、磁性体のねじにコイルを巻

Fig. 2 Profile of magnetic lead screw

Table 1 Experimental magnetic lead screw

Type		A	B	C
Nut	tc mm	5.0	3.0	3.0
	tp mm	2.5	1.65	1.65
	Fn mm	2.5	1.25	2.5
	turn	5	8	5
Screw	D mm	25.0	15.0	15.0
	hs mm	4.0	2.0	3.0
	Fs mm	2.5	1.25	2.5
	P mm	5.0	2.5	5.0
	L mm	10.0	5.0	10.0
	a deg.	0.0	0.0	0.0
Gap	g mm	0.1	0.1	0.1

き、それを着磁用ヨーク(着磁用ねじ)として、円筒形の永久磁石に挿入し、通電することによって行われる。

3.2 磁気ねじの静磁場解析モデル 磁気ねじの磁束密度および軸方向力を計算する。計算方法としては、仮定磁路法⁽⁶⁾や有限要素法がよく知られている。解析対象の磁気ねじは、ナットとねじのずれが生じた場合、磁路の仮定が困難であるため、後者の解析手法を用いた。但し、ナット内面の着磁は上述の方法によって行なわれており、厳密な着磁状態を把握することが困難である。このため、本研究では、ねじの山幅に相当する範囲で、ナットは着磁されていると仮定して計算した。

計算モデルは、図3のように、磁気ねじの三次元形状をそのまま、モデル化する方法と、図4のようにねじの進みを考慮せず、ねじの軸方向に対して垂直に、リング磁石が配置されていると仮定し、軸対称問題としてモデル化する方法が考えられる。表1の試作Aの形状に対して、三次元(節点数 9975、要素数

Fig. 3 3D model (lead angle considered)

Fig. 4 Axisymmetric model (lead angle unconsidered)

Fig. 5 Comparison of axisymmetric model and 3D model results

8064)および、軸対称(節点数2145, 要素数 2048), のモデルを作成し、ねじとナットに相対変位をあたえた場合の軸方向力を計算した。

計算結果を図5に示すが、試作Aのようにリード(10mm)が小さい場合は、三次元モデルと軸対称モデルの計算結果には、大差がないことが分かる。このため、以下の計算は、特に断わりのないかぎり、モデルの作成が容易で、計算時間が短縮できる軸対称モデルを用いて行った。但し、リードが30mmの場合は、軸対称モデルが3次元モデルよりも、10%近く大きな最大軸方向力が得られることを別のモデルにより確認している。解析コードとしては、市販の磁場解析ソフ

Fig. 6 Nut flux density measurement

Fig. 7 Magnetic flux density of experimental nuts

ト(フォトン, EDDY2DおよびEDDY 3D)を用いた。なお、計算では、ねじおよびナット外周部の磁性材料のB-H曲線は、データの入手できたS45C⁽⁷⁾で代用した。また、Nd₂Fe₁₄B系の減磁曲線は、常温では直線性が良いため、保磁力(H軸の切片)とリコイル透磁率1.05(傾き)から求まる直線でモデル化している。

4. 試作した磁気ねじの特性

4.1 ナット表面磁束密度の計測 ナットの着磁状態を検証するため試作したナットの表面磁束分布を測定した。図6に示すように、ホール素子を用いたガウスプローブをナット内面に対して一定距離(1.5mm)に保ち、径方向に向かう磁束密度分布を、プローブを軸方向に沿って移動することにより測定した。測定および計算結果の比較を図7に示す。いずれの試作ナットも、周期的な磁束密度分布が軸方向に形成されていることが分かる。計算結果は、図4の軸対

Fig. 8 Axial carrying load measurement

称モデルのねじ部分を空気に置き換えたモデルにより計算している。また、保磁力は、実験値と計算値の最大値が一致するように、同定した結果である。試作A, B, Cに対して、それぞれ保磁力を、780 kA/m, 780 kA/m, 750kA/mにした場合、実験と計算値はよく一致した。この保磁力は、カタログの標準値 884kA/mと比較して低く、着磁時に、モデルで仮定した着磁幅や磁石の厚み方向が完全に磁化するまでの着磁力を与えることができなかったためと考えられる。

4.2 軸方向力の測定 図8に、軸方向力の測定方法を示す。この装置では、ねじの回転、およびナットの並進、回転運動は拘束されている。ねじの端部に軸方向の強制変位を与え、変位をダイヤルゲージで測定する。その時の強制力を、ロードセルで測定する。但し、ナットの両端部には、ねじの歯とナット内面が接触しないように、ポリイミド製のガイドリングを挿入し、ねじとナット間のギャップを0.1mmに保持している。

図9に、試作した3種類の磁気ねじの軸方向力の実験と計算結果を示す。軸方向力の最大値は、ほぼ一致しており、軸対称モデルを用いて、磁気ねじの最大軸方向力を比較的良い精度で推定できることが分かる。但し、実験と計算の曲線のわずかなずれは、ナットに取り付けたガイドリングによって生じる摩擦の影響によるものと考えられる。なお、保磁力は、前節で同定した値を用いている。

図から分かるように、ねじとナットの軸方向のずれの増加に従って、徐々に軸方向力が増加し、ねじのピッチの30%程度のずれ量のとき、軸方向力は最大値となる。試作A,BおよびCでそれぞれ、最大値180N, 80N, 100Nである。ナットとねじのずれがない状態から、約0.3mm変位させた場合の、軸方向力の変化の傾きを、磁気ねじの剛性とここで定義すると、試作ねじA, BおよびCのそれぞれの剛性は、 2.3×10^5 , 1.76×10^5 , 1.5×10^5 N/mである。

上図のような変位-軸方向力の関係が得られる理由

Fig. 9 Axial carrying load

Fig. 10 Magnetic flux flow

は、図10のように考えられる。ねじ・ナット間の磁束の流れは、ねじとナットのずれ量が少ない状態(a)では、 $m1 \rightarrow t1 \rightarrow t2 \rightarrow m2 \rightarrow m1$ の経路で流れる。このためずれの増加に従い、通常の磁気カップリング

と同様に、復元力が増加する。ずれ量が大きくなる (b) の場合、 $t3 \rightarrow m2$ の経路でも磁束が流れ、逆に、ずれを増加させる力が働く。最終的に、ピッチの2分の1のずれが生じた (c) の場合、左右に働く力が相殺され、軸方向力は零となる。

5. 磁気ねじの最適形状

5.1 形状諸元が軸方向力、剛性に与える影響

磁気ねじの軸方向力、剛性の向上のための設計指針を得るため、形状諸元が軸方向力、剛性に及ぼす影響を前述の有限要素モデルをもちいて計算した。解析対象としては、表1に示した試作Aをもちいる。また、ここでは、ナットの永久磁石は、図2で示した範囲で理想的に着磁されていると仮定し、保磁力はカタログ値 884kA/m をもちいる。

(1) ねじの山幅 試作Aのねじの山幅 2.5mm を、 $0.9 \sim 3.1\text{mm}$ の範囲で変更した場合の軸方向力、剛性の計算結果を図11に示す。但し、各々の軸方向力、剛性は、形状変更による増減の割合を明確にするため、表1の形状諸元にに基づき計算から得られる最大軸方向力と剛性でそれぞれ無次元化している。各剛性は、約 0.3mm のねじ・ナットの相対変位によって発生する復元力をその変位で割った値である。以降の形状変更の結果も同様である。ねじの山幅 1.6mm の形状において、軸方向力が約20%、初期形状と比較して向上していることが分かる。また、剛性も、最大軸方向力とほぼ同様な山幅で最大となることが分かる。

(2) ねじの山高さ 図12にねじの山高さを試作Aの 4mm に対して、 $0.5 \sim 7\text{mm}$ の範囲で変化させた場合の軸方向力、剛性の計算結果を示す。山高さを 1.0mm 以下、および、 7mm に変更した場合に、大幅に軸方向力が低下している。この原因は、前者は、ねじの谷が浅くなることから、谷底からナットへの磁束の漏れが大きくなるためと考えられる。逆に、後者は、歯の高さを高くするにつれ、相対的にねじ中心部の磁路が狭くなる。このため、磁気抵抗が大きくなり、磁束が流れ難くなり、軸方向力が低下したと考えられる。剛性の場合も、同様な傾向がみられる。

(3) ねじの圧力角 台形ねじを、磁気ねじとして用いた場合の圧力角の影響を検討するため、図13に、試作Aの圧力角 0° と 13.2° の場合の軸方向力の計算結果を示す。圧力角を持たせることによって多少軸方向力は低下するものの影響は小さいことが分かる。この傾向は、試作Bにおいても実験、計算により確認し

Fig. 11 Width of flat (Simulation)

Fig. 12 Depth of thread (Simulation)

Fig. 13 Pressure angle (Simulation)

ている。

(4) エアギャップ 試作Aのねじ・ナット間のエアギャップ 0.1mm を、 $0.01\text{mm} \sim 0.15\text{mm}$ に渡って変化させた場合の軸方向力、剛性の計算結果を図14

Fig. 14 Air gap (Simulation)

に示す. ギャップ0.01mmと0.15mmの場合の最大軸方向力は, 0.1mmと比較して, それぞれ, +13%, -10%増減することが分かる. 剛性も同様な結果を示す. 電磁石の吸引力の概略計算で用いられる, ギャップの2乗に逆比例して力が大きくなるという関係は, この場合は必ずしも成立せず, ギャップを現状より小さくしても, 軸方向力, 剛性の大幅な向上は期待できないことが分かる.

(5) 永久磁石の厚さ 試作Aの永久磁石の厚み2.5mmを, 0.5mm~12mmの範囲で変化させた場合の軸方向力, 剛性の計算結果を図15に示す. 但し, 永久磁石の厚み方向は完全に着磁していると仮定している. 永久磁石の厚みの増加に従って, 軸方向力, 剛性とも増加していくが, 増加の傾きは, 徐々に減少し, 4mm以上に厚みを増加しても, 軸方向力, 剛性の向上に影響は少ないことが分かる.

(6) ナットの外周部磁性体の厚み 試作Aに対して, ナット外周部の磁性体の厚み5mmを, 0.5mm~5mmの範囲で変化した場合の軸方向力, 剛性の計算結果を図16に示す. 2mm以下に, 厚みを低下すると, 軸方向力, 剛性の低下がみられるが, 2mm以上厚みを増加してもあまり影響はない.

5.2 形状を変更したねじの試作と特性

図11より, 試作Aの軸方向力の向上には, ねじの山幅 F_s を2.5mmから1.6mmへ変更することが有効であることが分かる. よって, 山幅のみを, 1.6mmに変更したねじを試作し, 軸方向力を測定した. また, ねじは, ねじ山の高さ h_s が低いほど製作が容易である. このため, 図12の結果に基づいて, 軸方向力を低下

Fig. 15 Thickness of permanent magnet (Simulation)

Fig. 16 Thickness of external cover (Simulation)

Fig. 17 Axial carrying load of optimally designed screws (Experiment)

させないよう山高さを4mmから2mmまで低くし, 山幅を1.6mmにしたものを製作した. 形状変更した試作ねじの軸方向力の測定結果を図17に示す. ねじ山

Fig. 18 Eccentricity of nut and screw

幅を, 1.6mm にすることで 13% の軸方向力の向上が実現された。また, ねじ山高さを 2mm にしても, ピーク近傍の軸方向力は多少低下したものの, 山高さ 4mm の場合と同様な変位-軸方向力曲線が得られることが確認された。

6. ねじ・ナットの偏心

ねじ, ナットに偏心がない場合, ナット内面の永久磁石による半径方向の吸引力の総和は零となり, ねじのたわみは発生しない。ところが, ねじとナットを厳密に同心に設置することは実機において困難であり, 通常ねじとナット間に偏心に伴う吸引力が発生する。図 18 に示すように, この吸引力 W により, ねじにたわみが発生し, 最悪の場合, ねじとナット内面が接触する。ここでは, 表 1 で示した試作 A の磁気ねじに対して, ナットとねじが接触することなく駆動できるねじの最大長さと取り付け時の許容偏心量の関係を解析的に導出する。

最初に, ねじとナットが偏心した場合の不平衡力を, ねじとナットが偏心した三次元有限要素モデルを用いて計算した。モデルに, ねじの進みの影響は考慮していない。永久磁石の保磁力は, カタログ値の 884kA/m をもちいた。図 19 に偏心量 0 ~ 0.095mm までの偏心力の計算結果を示す。ほぼ, 偏心量に比例して, 吸引力が大きくなることが分かる。よって,

$$W = K_s \cdot e \quad (1)$$

と, 偏心量と吸引力の関係を定義する。ここで, e は, ナットとねじの偏心量, K_s は, 偏心量と吸引力を関係づける係数であり, 計算結果の最小二乗近似から, $6.0 \times 10^5 \text{ N/m}$ を得た。

ねじの変形計算において, ねじの自重, ベアリングおよびナットの固定される移動テーブルの弾性変形の

Fig. 19 Unbalanced force of type A (Simulation)

影響は無視する。また, ナット・ねじに働く吸引力は集中荷重と仮定する。ねじの両端の境界条件は, 図 18 に示すように単純支持・単純支持と, 単純支持・固定支持の 2 つの場合を考える。それぞれの境界条件における偏心力 W によって発生するねじの最大たわみは,

$$\begin{aligned} v_{\max 1} &= \frac{WL^3}{48EI} \quad (\text{pin-pin}) \\ v_{\max 2} &= \frac{WL^3}{48\sqrt{3}EI} \quad (\text{pin-fix}) \end{aligned} \quad (2)$$

となる⁽⁸⁾。ここで, E はねじのヤング率で, $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, I は, ねじの歯の部分を除いた断面 2 次モーメント, L は, ねじの長さである。不平衡力とねじのたわみにより生ずる復元力が釣り合うので,

$$W = K_s (e_0 + v_{\max 1,2}) \quad (3)$$

が成立する。ここで, e_0 は, ねじ・ナット間に不平衡力が働かない場合の, 取り付け時の偏心量である。また, ねじとナットが接触しないためには,

$$0 \leq e_0 + v_{\max 1,2} < g \quad (4)$$

が満たされる必要がある。ここで, g は, 試作 A の初期ギャップ 0.1mm である。

上記の式から, 試作 A のねじの歯高さが 4mm と 2mm の場合の, 取り付け時の偏心量とねじの許容長さの関係を計算した。結果を, 図 20 に示す。例えば, 歯高さ $h_s=4$ で軸長 500mm のねじを装置に取りつける場合, ねじ軸の一方が完全拘束, 一方が単純支持されている条件では, 0.02mm 以内に偏心量を抑えないと, ねじとナットが接触してしまう。また, 軸長の長いねじを装置に取り付ける場合は, 取り付け時の偏心量を減らし, 前節で検討したように, 軸方向力, 剛性に影響しない程度に, ねじ山の高さを低減し, ねじの断面 2 次モーメントを増加する設計が必要であることが

$hs=4$ と $hs=2$ の比較で分かる.

7. 結 論

本研究では，新しい磁気ねじを提案し，その軸方向力などの基本特性を明らかにした．得られた主な結論は以下の通りである．

- (1) 永久磁石の螺旋着磁を利用した新しい磁気ねじを提案し、試作した直径25mm、リード10mmの磁気ねじで、最大軸方向力180N、軸方向剛性 $2.3 \times 10^5 \text{ N/m}$ を実現した。
- (2) 磁気ねじをねじの進みを考慮しない軸対称モデルで仮定し、有限要素法による磁場解析により軸方向力を計算したところ、計算結果は実験結果と比較的良く一致した。
- (3) 上記の軸対称モデルを用いて、ねじとナット

の形状探索を行い、軸方向力、剛性に関して、ねじの山幅、山高さに最適値があることを明らかにした。

- (4) (3) の計算結果に基づき、ねじの山幅を2.5mmから、1.6mmに変更したねじを試作したところ、13%の最大軸方向力の向上を実験にて確認した。
- (5) 磁気ねじのナットとねじの偏心に伴う不平衡力と軸のたわみの関係から、磁気ねじを非接触駆動させるために必要な取り付け時の許容偏心量、ねじの長さの関係を導出した。

また、現在、以下の点に関して検討中であり、次報にて報告の予定である。

- (1) 磁気ねじの動特性
- (2) 磁気ねじを用いた位置決め装置の性能

なお、本研究の一部は、日本学術振興会平成8年度
未来開拓学術研究推進事業委託研究補助金（複合集
積マシン）を得て実施したものである。

参 考 文 献

- (1) 例えば，井澤実編，精密位置決め技術，（1989），53，工業調査会
- (2) 福田真ほか，セラミック空気静圧送りねじによる超精密位置決め，精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，348（1994）
- (3) 鈴木悦四，橋本進，保科直美，磁気ねじとその応用，機械の研究，28-2（1976），27.
- (4) 清野慧，水沼守，非接触駆動空気浮上ステージの研究，精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，151（1988）
- (5) 住友特殊金属，希土類磁石カタログ
- (6) 回転機電磁界ソフトウェアの最適技術調査専門委員会，「回転機電磁界ソフトウェアの適用技術」，電学技報，No. 486（1994），21
- (7) 日本機械学会編，機械工学便覧 A4 材料力学，（1984），30.
- (8) 例えば，中田高義ほか，交直電磁石の設計と応用，（1991），森北出版