

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04157

研究課題名(和文) 電動射出成形機を用途とした非対称ねじ溝形状を有するボールねじの開発

研究課題名(英文) Development of ball screw having the asymmetric thread groove for the electric injection moulding machine

研究代表者

野口 昭治 (Noguchi, Shoji)

東京理科大学・理工学部機械工学科・教授

研究者番号：80349836

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ボールねじは転がりを利用した機械要素であるが、近年射出成形機の動力伝達機構に使用されている。一方で、ボールねじはねじ面とボールとの接触面圧が高くなるので力の伝達には不向きとされてきた。そこで本研究では、ボールねじの溝形状をアンギュラ玉軸受のように非対称にすることで一方のアキシャル剛性を向上できると考え、試作を行い、性能確認を行った。市販品と同じレベルの加工精度で試作を行い、基準とした対称ねじ溝ボールねじと比較して約1.6倍のアキシャル方向剛性となることを実験的に確認した。さらに、数値解析上では、基本動定格荷重が1.15倍、基本静定格荷重が1.25倍に向上する結果も得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、ボールねじとしての応答性を維持したままで、射出成型機型締め時に加えるアキシャル荷重を増加させることが可能となった。同じサイズのボールねじを用いた場合には型締め力の向上、同じ型締め力の成型機においては小型のボールねじを使用することができるので装置の小型化を実現することが可能となる。また、従来のボールねじ性能向上対策とは重複しておらず、非対称ねじ溝という新しい構造的な対策を加えることによって、更なる性能向上も期待できる。このように、射出成型機業界において大きな貢献が期待できる。さらには装置小型化による省資源・省エネにも貢献できるので、社会的な意義も有していると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Ball screw is a mechanical component using rolling phenomenon, and also applied recently in power transmission devices. On the other hand, a ball screw is not appropriate for power transmission due to high contacting pressure between screw and ball surfaces. Therefore, in this research, in order to improve axial stiffness, the groove geometry was designed as asymmetry and manufactured by way of trial. Then the performance was checked by experiment. Manufacturing was performed in the same machining accuracy to marketed product. Consequently, the axial stiffness of this prototype was larger by the factor of 1.6 than that of a basic ball screw having symmetrical groove geometry. Furthermore, the results presented that the basic dynamic load rating and basic static load rating became larger by the factor of 1.15 and 1.25 respectively.

研究分野：機械要素

キーワード：ボールねじ 非対称ねじ溝形状 アキシャル負荷容量 アキシャル剛性 走行耐久試験

1. 研究開始当初の背景

射出成形機は樹脂部品の普及によって市場は拡大しているが、従来は型締めにおいて油圧を使用していた。油圧は大きな力を伝達できるが、型締めしない時でも油圧モータを稼働させておく必要があるため、無駄にエネルギーを消費していた。また、油圧モータの音・振動による工場環境の悪化も問題視されるようになった。そのため、2000年を過ぎた頃から型締めに油圧から電動に置き換えた電動射出成形機が開発され、大型射出成形機においても電動化が進められていた。

電動射出成形機における型締めには、ボールねじが使われている。高い伝達効率、高い応答性があり、型締めにおける必要な機能を有しているためである。しかし、元来ボールねじは搬送用途であり、大きな力の伝達を目的としてはいなかった。大きな力を伝達できない原因は、ボールとねじ溝面は点接触であり、大きな力を伝えようとすると接触面圧が上昇して、塑性変形が生じやすいためである。力の伝達においては、三角ねじ等平面で接触する滑りねじが有利であるが、ねじ面の摩擦が大きいため、エネルギー効率や応答性が悪いので電動射出成型機には使用されなかった。電動射出成型機の力伝達機構としては、ボールねじの高負荷容量・高剛性化が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、非対称ねじ溝形状を施したボールねじを開発することによって、現行品の寸法とボールねじの特性を維持したままで、型締め方向の伝達力を大きくすることである。玉軸受におけるアングュラ玉軸受は、深溝玉軸受では対称であったボール溝形状を非対称にすることにより、一方向のアキシャル荷重負荷能力を向上させた転がり軸受である。大きな力が加わる方向の接触角を大きく、その逆方向の接触角を小さくして、電動射出成形機用ボールねじの性能向上を図ることである。滑りねじにおいても“この歯ねじ”は実在するので左右の接触角が異なるねじ溝は実現可能であり、ねじ面の間にボールを介在させればよいので、詳細に設計を検討すれば、非対称ねじ溝を有するボールねじも実現できると考えられる。

3. 研究の方法

本研究では、以下の3項目を順番に行うことによって、非対称ねじ溝ボールねじの実用性を検証した。

(1) 金属三次元プリンタを用いたプロトタイプを試作して非対称ねじ溝ボールねじ実現の可能性を確認する。

市販品のボール循環機構が取り付けられるように非対称ねじ溝を有するねじ軸とナットを設計し、学内で所有する金属3Dプリンタを用いて製作する。組立後にボールの循環を確認し、アキシャル荷重に対するアキシャル変位を測定することによって、接触角増加によるアキシャル剛性向上を確認する。

(2) 市販されているボールねじと同程度の加工精度を有する非対称ねじ溝ボールねじを試作し、アキシャル剛性、耐圧痕性などの性能確認を行う。

ボールねじメーカーに依頼して、現在市販されているボールねじと同じ程度の加工精度にて製作した非対称ねじ溝ボールねじを用いて、アキシャル剛性、アキシャル負荷容量向上の確認を行う。

(3) 試作した非対称ねじ溝ボールねじを用いて、耐久性の確認を行う。

ボールねじメーカーに依頼して、試作した非対称ねじ溝ボールねじの走行試験を行い、耐久性の確認を行う。電動射出成型機への実用化においては、大きな荷重を負荷できることに加えて、耐久性も必要であり、そのための検証を行う。

4. 研究成果

(1) 金属三次元プリンタを用いたプロトタイプの試作と性能確認

金属3Dプリンタを用いて試作した非対称ねじ溝を有するねじ軸とナットを図1に示す（接触角は 55° と 15° 、材料はステンレス）。組立後、ナットにボール循環機構を取り付けてねじ軸を回転させたところ、ボールがうまく循環していることが確認され、非対称ねじ溝であってもボールねじとして機能することを確認できた。

このボールねじをアムスラー試験機に取り付けて、アキシャル荷重-アキシャル変位を求め、アキシャル剛性に変換した結果を図2に示す。ねじ溝とボールの接触角が大きくなるとアキシャル剛性が向上していることが確認されており、本研究の有効性を検証することができた。しかし、アキシャル剛性の値は設計値よりも小さくなっていた。その原因としては、ボールと比較してねじ軸、ナットの硬さが低く、ねじ面に圧痕（塑性変形）が形成されやすかったこと、加工精度が悪く、ねじ面とボールの接触圧力が不均一になり特定の範囲で大きな変形が起こった懸念があること、すきま調整も不十分であったこと等が考えられた。そこで、市販されているボールねじと同等の加工精度、硬さを有する非対称ねじ溝ボールねじの試作が必要となり、第2段階へ進展した。

(2) 市販ボールねじと同程度の加工精度を有する非対称ねじ溝ボールねじの試作と性能評価



図1 金属3Dプリンタで試作したボールねじ

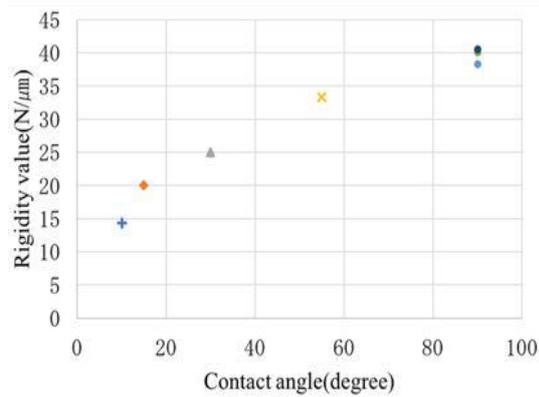


図2 接触角とアキシアル剛性

ボールねじメーカーに依頼して試作した非対称ねじ溝を有するねじ軸（接触角 60° と 30° ）の写真を図3に示す。試作の基準となった対象溝ボールねじ（接触角 40° 対称）の写真も併記するが、ねじ溝の違いがよく観察できる。これらのボールねじを図4に示す装置に取り付けて、アキシアル荷重とアキシアル変位を測定した結果を図5に示す。図4の装置ではアキシアル荷重を負荷するとねじ軸が若干回転してしまうので、その分の補正も行って図5を求めている。実験は3回行ったが、ばらつきが非常に小さく、1本の線とみなしてよいレベルであった。データの傾きとして求められるアキシアル剛性は、標準品（ $287\text{N}/\mu\text{m}$ ）と比較して、大きくなっており（ $455\text{N}/\mu\text{m}$ ）、同じねじ軸直径において約60%の剛性向上を達成できていることが確認された。

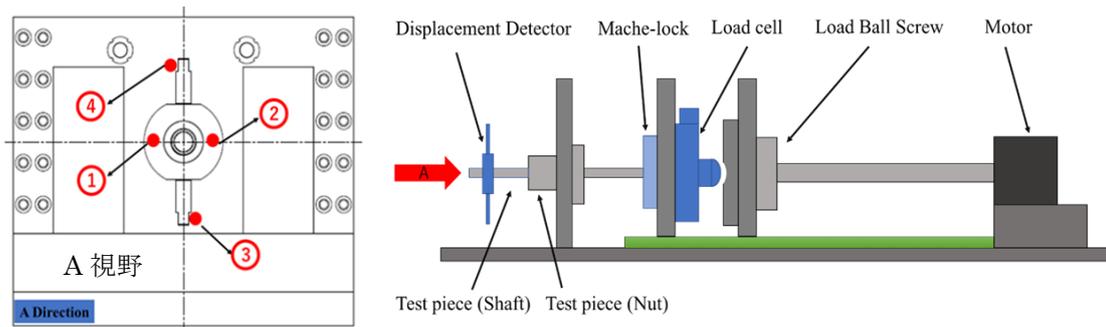
試作した非対称ボールねじを用いて形成される圧痕からアキシアル負荷容量の向上についての検証も行っている。ねじ面に形成される圧痕の深さが $0.4\mu\text{m}$ になる荷重を事前に計算し、そ



(a) 対称溝ねじ軸

(b) 非対称溝ねじ軸

図3 ボールねじのねじ軸の写真



①と③：回転角測定、②と④：変位測定

図4 アキシアル荷重-アキシアル変位測定実験装置

の荷重を負荷した際に形成される圧痕深さを測定した。ねじ面は傾斜しているので、図6に示すようにねじ軸を傾けて、ねじ面が水平になるように表面形状測定機に固定した。

表面形状は図7のように得られるので、圧痕深さはボールと接触していない部分の平均線を基準として一番深い部分までの距離として求めることとした。実際に加えたアキシアル荷重と圧痕深さを整理して、ねじ溝に深さ $0.4\mu\text{m}$ の圧痕が形成される平均的な荷重を求めた結果を図8に示す。

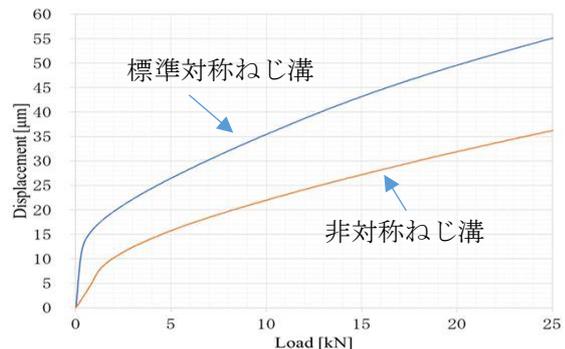


図5 アキシアル荷重とアキシアル変位の関係

深さ $0.4\mu\text{m}$ の圧痕を形成するために必要なアキシャル荷重は、接触角が大きくなるほど大きくなっていることがわかる。言い換えれば、同じ深さの圧痕を形成するためには大きなアキシャル荷重が必要となるので、アキシャル荷重容量が向上したことと同義である。

これらの実験結果から、非対称ねじ溝ボールねじでは、アキシャル剛性、アキシャル荷重容量を向上させることが可能であることを実験的に検証することができた。

(3) 市販ボールねじと同程度の加工精度を有する非対称ねじ溝ボールねじの耐久性評価

機械装置に組み込まれるボールねじには走行耐久性も要求されている。試作した非対称ねじ溝ボールねじにおいても同様な要求は当然求められるので、本研究でも走行耐久試験を行った。

図 9 に示す装置に試作した非対称ねじ溝ボールねじを取り付けて、走行試験を行っている。アキシャル荷重の負荷は、1 本のねじ軸にナットを 2 個取り付け、ナット間に油圧でアキシャル荷重を加える方式で行っている。

ボールねじは転がり軸受と同じく、疲労寿命を計算できる機械要素である。走行距離として疲労寿命が求められるので、ボールねじのリードと回転速度がわかれば、寿命を時間に換算することができる。

現在、ボールねじメーカーの協力を得て、3 台の試験装置で走行耐久性試験を行っており、定格寿命の 3 倍以上の寿命があることは検証済みである。不具合が生じるまで走行試験を継続する予定（長寿命で試験を打ち切る必要があれば、打ち切り時間は定格寿命の 10 倍と考えている）であり、結果がまとまるのは 2022 年度になる予定である。結果がまとまり次第、学会等で報告する予定である。

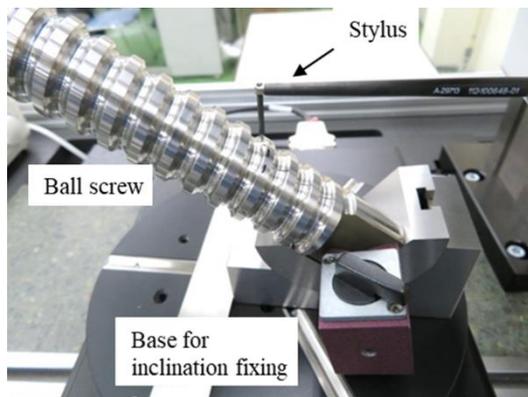


図 6 ねじ表面形状測定の様子

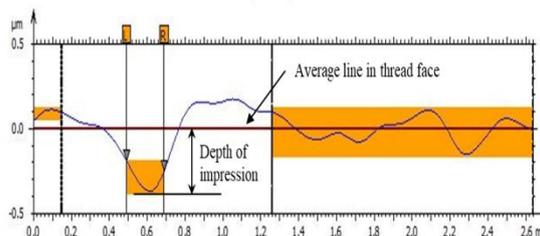


図 7 ねじ面の表面形状測定結果の例

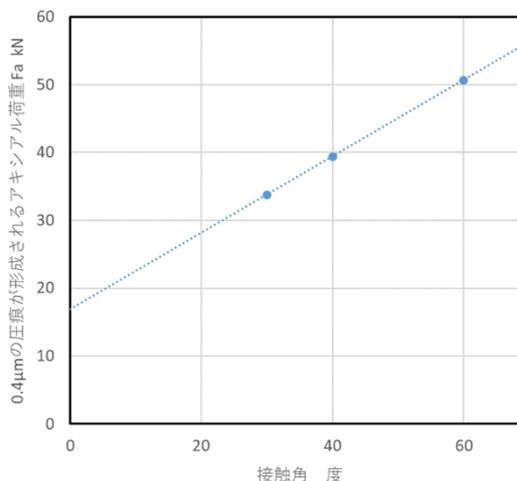


図 8 $0.4\mu\text{m}$ の圧痕を形成させるアキシャル荷重



図 9 ボールねじ走行試験装置写真

〈引用文献〉

- ①野口昭治、李 俊一、徳村洋輝、中村 太、濱田喜大、高橋 徹、非対称ねじ溝形状を有するボールねじの開発（第 1 報、ボールねじの試作とアキシャル剛性の評価）、設計工学、54 巻、2019、299-308
- ②野口昭治、高橋 徹、濱田喜大、非対称ねじ溝ボールねじのアキシャル方向負荷容量評価、日本機械学会 2021 年度年次大会、2021

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 野口昭治, 李 俊一, 徳村洋輝, 中村 太, 濱田喜大, 高橋 徹	4. 巻 54
2. 論文標題 非対称ねじ溝形状を有するボールねじの開発（第1報, ボールねじの試作とアキシアル剛性の評価）	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 設計工学	6. 最初と最後の頁 299 ~ 308
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14953/jjsde.2018.2825	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 野口昭治
2. 発表標題 転がり機械要素の最新技術動向
3. 学会等名 精密工学会2019年度春季大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野口昭治
2. 発表標題 非対称ねじ溝ボールねじのアキシアル方向負荷容量評価
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野口昭治
2. 発表標題 ねじ溝形状を非対称にしたボールねじの開発
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

野口研究室 [機素潤滑研究室]
<https://www.rs.noda.tus.ac.jp/nog/index.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------