

微細周期構造による円すいころ軸受の低トルク化 —超短パルスレーザによる放射状直線周期溝付与の場合—

研究者の所属・氏名等

フリガナ 氏名	ホッタ トモヤ 堀田 智哉
所属等	関東学院大学 理工学部 理工学科 機械学系 助教
プロフィール	東京理科大学理工学研究科機械工学専攻を修了（博士（工学））。2017 年に関東学院大学理工学部助教に着任。専門は転がり軸受工学および材料工学。転がり軸受の低トルク化や疲労寿命に関する研究などに従事。所属学会は、日本機械学会、日本トライボロジー学会、日本設計工学会。

1. 研究の概要

本研究は、円すいころ軸受のしゅう動面に微小な溝（マイクログループ）を設けることにより、十分な供給潤滑油量を確保することで低トルク化を行うものであり、円すいころ軸受の組み込まれた機械すべての低燃費、省エネルギー化に直接的な効果が期待できることから、社会的・工業的な貢献度は非常に高く、また、社会的なニーズに沿った研究であると考えられる。学術的な貢献としては、軸受メーカーなどがこれまで行ってきたような、表面粗さの向上や、形状の最適化といった手法ではなく、摩擦面に微細な溝を設け、供給油量を制御するという転がり軸受においては前例のない低トルク化手法の効果について実験的に明らかにした。

2. 研究の動機、目的

近年、CO₂排出量削減を目的に、機械製品の省エネルギー化、小型軽量化への要求が高まっており、その機械製品に組み込まれる転がり軸受の回転トルクを低減することは非常に重要な課題であり、急務である。円すいころ軸受は、同サイズの玉軸受に比べ約 3 倍の大きな負荷容量を有し、ラジアル方向とアキシアル方向の両方向の大きな荷重の支持が可能であり、高い剛性を持つ軸受である。そのため、自動車のパワートレインや新幹線の車台、工作機械など産業機械の回転軸支持部に幅広く使用され、回転しゅう動部の摩擦損失低減に大きく貢献している機械要素である。しかし、この軸受は構造的に、転がり軸受でありながらすべり接触面が存在するため、低速・高荷重条件においてはすべり摩擦によるトルク損失が非常に大きくなる。したがって、通常の玉軸受などに比べ、高剛性である反面、低トルク、低発熱の面では著しく劣っている。

円すいころ軸受の構造を図 1、円すいころ軸受における回転速度とトルクの関係を図 2 に示す。円すいころ軸受の回転トルクの発生要因を分類すると、以下の四つとなる。

- ①ころ大端面と内輪大つば面のすべり抵抗
- ②ころと内輪・外輪軌道面の転がり粘性抵抗
- ③潤滑油の攪拌抵抗
- ④ころと保持器間のすべり抵抗

通常、②ころと内輪・外輪軌道面の転がり抵抗、④ころと保持器間のすべり抵抗は非常に小さく、低速領域においては、①ころ大端面と内輪大つば面のすべり抵抗、高速領域では、③潤

滑油の攪拌抵抗が支配的となる。低回転領域では、ころ大端面と内輪大つば面は境界潤滑領域であり摩擦は大きい。回転速度が上昇するとその部分の油膜厚さが大きくなり、流体潤滑へ遷移していくので摩擦は小さくなる。したがって、円すいころ軸受の低トルク化を行う場合、低速域においては厚い油膜を早期に形成することですべり抵抗を減らすことが可能である。そこで、摩擦面により多くの潤滑油を供給することで厚い油膜を形成することが可能であると考えられる。軸受メーカにおいてはこの問題に対し、内部形状の最適化や、表面粗さの向上、保持器形状の最適化など、様々な手法により低トルク円すいころ軸受を開発しているものの、玉軸受の回転トルクと比較すると依然として高い。すべり軸受の分野では、溝をしゅう動面に設けることによって潤滑油の流れを制御することで、摩擦面に、より多くの潤滑油を供給して金属接触を減らす手法が用いられている。したがって、円すいころ軸受の内輪大つば面ところ大端面はすべり接触であることから、同様の手法によりトルクを低減することが可能であると考えられるが、転がり軸受の分野においては転がり軸受の滑り摩擦面への適用例はない。そこで、本研究で滑り摩擦面である円すいころ軸受のころ大端面に微細な溝を付与することで潤滑油の流れを変化させ、円すいころ軸受の低トルク化を行うことを目的として、実際に超短パルスレーザー加工機を用いて円すいころ軸受のころ大端面に放射状の微細な溝を付与し、そのトルク試験をおこなうことによって、その効果を確認することが本研究の目的である。

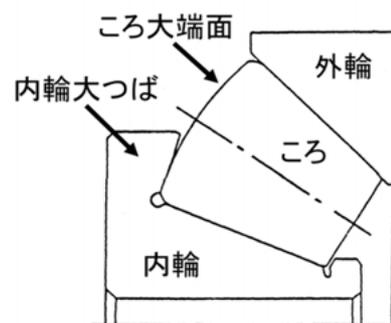


図1 円すいころ軸受断面

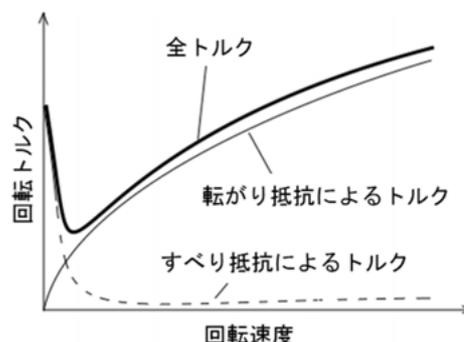


図2 円すいころ軸受断面

3. 研究の結果

本研究では円すいころ軸受（30306C：内径 30 mm、外径 72 mm、組立幅 20.7 mm、接触角 20° ）を試験軸受として、溝の加工には、超短パルスレーザー加工機を用いるが、当研究室には設備がないため加工を外部に依頼した。ピコ秒パルスレーザーなどの超短パルスレーザーによる加工はナノ秒パルスレーザーのような短パルスレーザーによる加工のように物体を熱で溶解させるのではなく、極短い時間で高出力のレーザーを照射することで物体の原子結合を切断し、蒸気化、除去する加工法である。この加工法により、短パルスレーザーによる加工よりも、バリ、マイクロクラック、熱影響層、加工で発生する残骸が極めて少ないため、追加工が不要である。本研究においても、溝加工は超短パルス（ピコ秒）レーザーによる溝加工のみを行い、バリ除去等の追加工はおこなわない。パターンの詳細な形状、寸法を図2に示す。ころ回転軸を中心とする同心円上（P. C. D. 7.9 mm）に144個配置し、幅 $2.6 \mu\text{m}$ 、深さ $14 \mu\text{m}$ 、全幅 $800 \mu\text{m}$ とする。迎え角 α は $45 \sim 135^\circ$ で変化させたものをそれぞれ製作した（表1）。

試作した円すいころ軸受の回転トルクの評価には当研究室が所有する回転トルク試験機を改良したものをを用いた。本試験機の試験概要を図3に示す。本試験機は円すいころ軸受の正面を上にして組付け、軸受内輪を回転させ、外輪が連れ回るときの力をハウジングに取り付けられたトルクバーに接続したロードセルによって測定し、その値に回転中心から測定位置までの距離を乗じることで軸受の回転トルクを得るが、回転始動直後は回転トルクが安定しないため、回転始動から120 min間はなじみ運転させ、その後の10 minの平均値を回転トルクとする。ハウジングはロードセルに取り付けられており、外輪が回転しようとする力（外輪の連れ回りトルク）を測定することで、回転トルクを測定が可能である。試験条件を表2に示す。荷重はアキシアル方向のみ10 kNを負荷し、内輪回転速度を 500 min^{-1} とした。潤滑油はVG32無添加タービン油（鉱油）を軸受正面よりポンプを用いて 0.5 L/min の速度で強制的

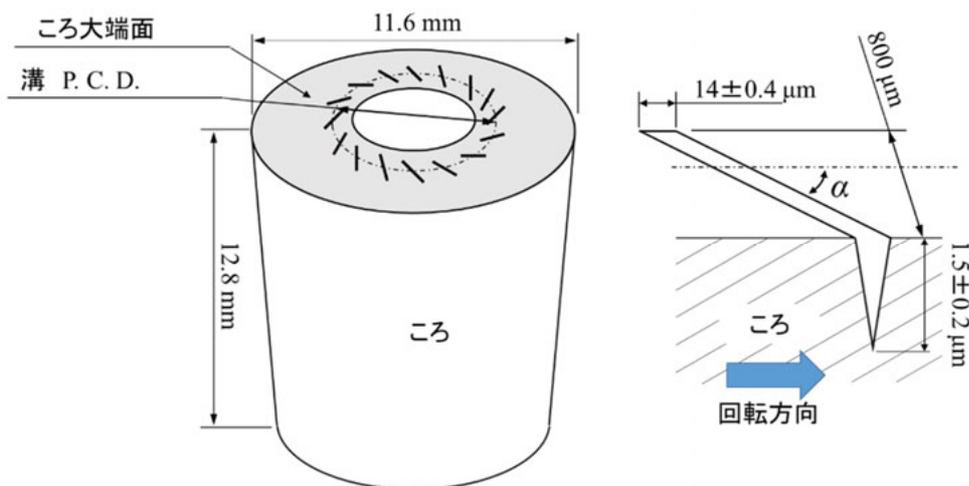


図2 パターンの詳細図

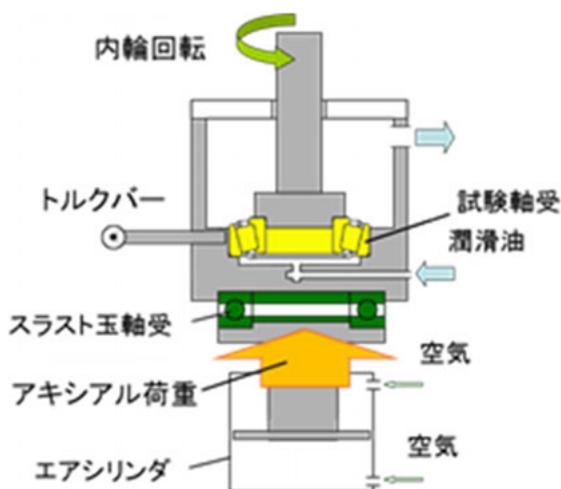


図3 トルク試験概略図

表1 パターンの記号と迎え角 α

記号	α [°]	面積率 [%]	試験個数
S45	45	2.5	3個×2回
S90	90	2.5	3個×2回
S135	135	2.5	3個×2回

表2 トルク試験条件

アキシアル荷重 [kN]	10
回転速度 [min ⁻¹]	500
潤滑油	VG32
供給油量 [L/min]	0.5
環境温度 [°C]	24 ± 3

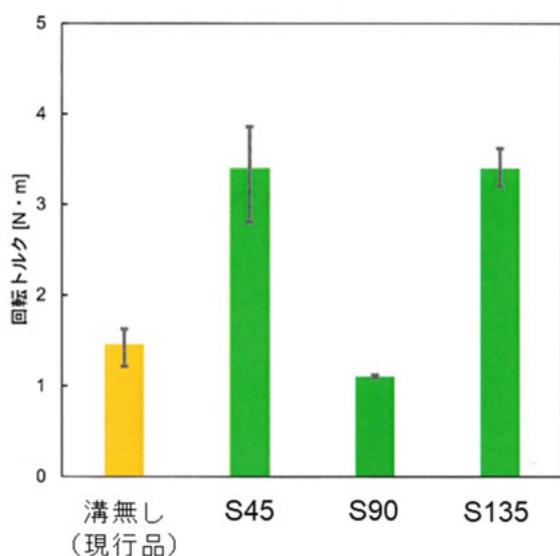


図4 各パターンの回転トルク

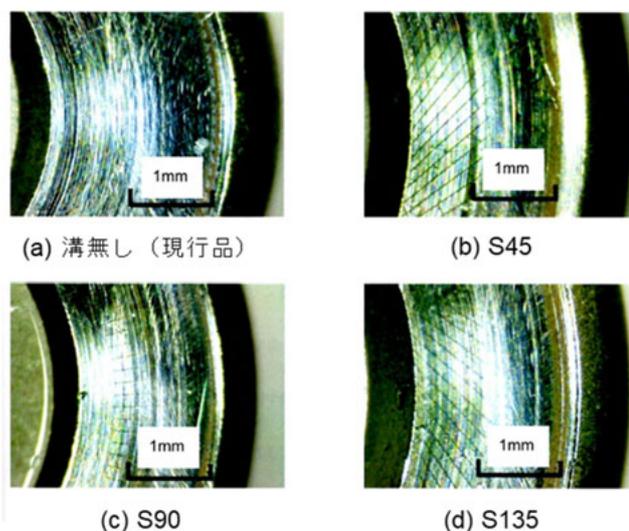


図5 試験後のしゅう動面の状態

に給油し、ハウジングよりオーバーフローさせて循環させている。軸受のしゅう動面は常に

十分な量の潤滑油で満たされており、実験中の潤滑切れによる焼付きを回避できる潤滑方法となっている。

図4に各パターンのトルク試験結果を示す。現行品は $1.4 \text{ N} \cdot \text{m}$ 程度であるが、迎角 $\alpha = 90^\circ$ の場合は、 $1.2 \text{ N} \cdot \text{m}$ となり、トルクが減少した。しかし、 45° と 135° の場合においては、現行品の2倍以上のトルクとなった。図5にトルク試験後の各試験片ころ大端面表面状態を示す。現行品と迎角 90° の表面状態にはほとんど違いは確認できないが、 45° と 135° は接触面外縁が茶色く変色しており、潤滑不足であったことが確認できる。

本研究で明らかになったことをまとめると、軸受30306Cのころ大端面に短パルスレーザによって放射状パターンを付与し、トルク試験（内輪回転速度： 500 min^{-1} 、アキシアル荷重： 10 kN 、潤滑：VG32タービン油）をおこなった結果以下の2点が明らかとなった。

- ・回転方向に対し、迎角 90° でパターンを付与した場合、現行品よりもトルクが減少した。
- ・回転方向に対し、迎角 45° および 135° でパターンを付与した場合、潤滑不良となり、現行品の2倍以上のトルクとなった。

4. これからの展望

今後の展望としては、さらなる低トルク化を行うために、低トルクとなった原理を解析等により明らかにしていく。また、同時に、直線パターン以外のパターンの試作およびトルク試験を実施し、最適なパターンを明らかにする。さらに、ころ大端面以外の個所、たとえば、内輪大つば面や転走面などにマイクロパターンを施し、さらなる低トルク化を目指す。

5. 社会に対するメッセージ

本研究を実施するにあたり、研究助成を交付していただいた、日本私立学校振興・共済事業団ならびに関係者の方々に深く感謝いたします。

前述のとおり、現在の機械においては、いかに省エネルギーであるかが重要な要素になっております。とくに自動車においては、省エネルギー化＝低燃費となり、環境負荷の低減だけでなく、自動車自体の売り上げにも影響をおよぼす要素となります。これらの理由により、自動車の省エネルギー化には自動車関連メーカーが力を入れてきました。中でも軸受の低トルク化の効果は大きく、急速に低トルク化が進められてきました。たとえば、本研究で用いた、円すいころ軸受は、自動車のデファレンシャルユニットに使用されますが（図6）、従来品の25%もの低トルク化に成功したのも出てきており、この軸受を乗用車のデファレンシャルに適用した場合、1.5%の燃費向上と 3.4 g/km の CO_2 排出量削減の効果が得られるとされております。しかし、これまでの低トルク化の方法ではさらなる低トルク化を望むことができなくなっております。

本研究では、これまでにない、転がり軸受の転動体にパターン溝を付けるといった、新しい手法を用いた試作軸受を制作することができ、その効果についても明らかにすることができました。本研究結果が、さらなる低トルク化のための足掛かりになればと考えております。また、この結果に満足せず、トルクが限りなくゼロとなるような転がり軸受の開発に向けて、研究を続けていきたいと思っております。

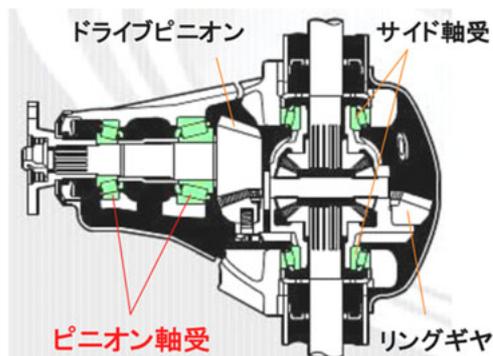


図6 デファレンシャル内部構造²⁾
(サイド軸受とピニオン軸受が円すいころ軸受)

参考文献

- 1) 大島宏之：デファレンシャルピニオン用低トルク軸受，JTEKT ENGINEERING JOURNAL, 1009(2011), p.37-43.
- 2) 松山博樹：超低トルク円すいころ軸受の開発，日本フルードパワーシステム学会誌, 38, E1(2007), E42-E49.