

深溝玉軸受の保持器形状最適化による低トルク化に関する研究^{*1}

Study on Low Torque Deep Groove Ball Bearing by Cage Profile Optimization

鎌本繁夫 S. KAMAMOTO 村田順司 J. MURATA 獅子原祐樹 Y. SHISHIHARA

Deep groove ball bearings can support radial load and axial load in both directions and are widely used as bearings for automobiles and industrial machineries because of advantages such as low torque, low noise and low cost. In recent years, the introduction of automobile fuel economy regulation has been advanced worldwide and will be further strengthened in the future. In the field of industrial machinery, energy saving is also progressing. Deep groove ball bearings used in these fields are required to have lower torque. In many cases, deep groove ball bearings are used for grease lubrication and until now low torque has been promoted by improving grease but there is a limit to the reduction of torque with only improvement of grease, we report on the achievement of low torque by developing a cage of new structure without other performance decreasing.

Key Words: deep groove ball bearing, low torque, cage, bearing, friction torque

1. はじめに

深溝玉軸受は、ラジアル荷重と両方向のアキシアル荷重を支持でき、低トルク、低騒音、低コストなどの長所もあるため自動車用、産業機械用の軸受として広く用いられている。近年、自動車の燃費規制は世界的に導入が進んでおり、今後さらに強化されていく。また、産業機械分野においても省エネルギー化が進んでいくものと予想される。これらの分野で使用される深溝玉軸受には、より低トルク化が要求されている。深溝玉軸受の転動体には玉が用いられている。内外輪に存在する左右対称で断面が円弧状の深い溝が、玉が転がる軌道として機能している。隣り合う転動体が接触すると、接触部でのそれぞれの転動体の表面速度は大きさが等しく逆方向であるため、平均速度が0となる。したがって、この接触部では潤滑油膜が形成されず、トルクの増大および転動体の摩耗を引き起こす。そのため、転動体を分け隔てる、セパレーターとして機能する保持器が存在する。特に深溝玉軸受では、内外輪を偏心させて内外輪間に玉を挿入、その後、内輪を中央に配置することで組み立てられる。このような組立て方式であることによる制限から、深溝玉軸受は、軌道長さに対する転動体の充填範囲が50%

程度と小さいので、軌道上で転動体の存在しない空間が大きく、転動体の偏在を避けるためにも保持器は必要である¹⁾。深溝玉軸受の外観および構造を図1に示す。転がり軸受のトルクは、潤滑剤のかくはん抵抗、転がり粘性抵抗、玉のスピンや差動すべりなどによるすべり摩擦抵抗、玉と保持器間のすべり摩擦抵抗に起因する^{2)~5)}。潤滑剤のかくはん抵抗、転がり粘性抵抗低減には、潤滑剤の低粘度化が有効であり⁶⁾、近年、積極的に取り組まれている。ただ、この手法は、低トルク化は達成できるものの、寿命などのその他の性能を低下させてしまう場合が多い。深溝玉軸受はグリース潤滑で用いられることが多く、これまではグリースを改善することで低トルク化が推進されてきたが^{7)~11)}、グリースの改善のみでは低トルク化にも限界がある。本報では、グリース潤滑で用いられる深溝玉軸受のトルク低減のために、深溝玉軸受内部のグリース挙動の可視化を行い、グリース潤滑で用いられる保持器形状の最適化のための指針を得る。そして、グリースせん断抵抗、グリースかくはん抵抗を低減する他の性能には影響がない新構造の保持器を開発することにより低トルク化を達成したので報告する。

*1 本報は、日本トライボロジー学会 トライボロジスト 第64巻 第3号 (2019) 186~192 を転載した。

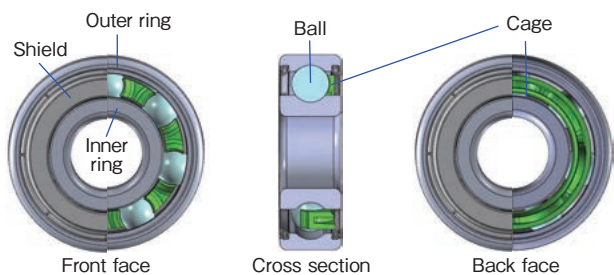


図1 深溝玉軸受（従来型）
Deep groove ball bearing (Conventional type)

2. 新保持器開発の基礎実験

2.1 試料軸受

試料軸受として用いた深溝玉軸受の寸法諸元を表1に示す。自動車用、産業機械用として一般に用いられるものを選定した。本報では、保持器以外の要因がトルクに及ぼす影響を排除するため、接触シールを用いず、非接触方式であるシールド付きの深溝玉軸受を選定した。試料軸受として用いた従来の深溝玉軸受には、近年主流となった樹脂製の冠形保持器を用いた。従来の深溝玉軸受到に用いられている冠形保持器を図2に示す。従来の冠形保持器は転動体ガイド方式と呼ばれ、保持器の爪が転動体を抱きかかえることで保持器の位置決めがなされる。

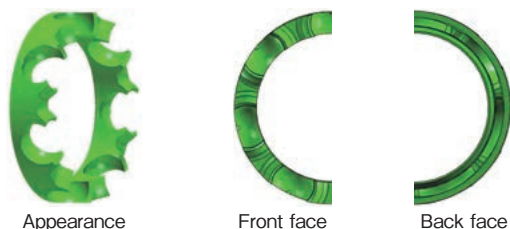


図2 保持器（従来型）
Cage (Conventional type)

表1 試料軸受の寸法諸元

Specification of sample deep groove ball bearing

Sample bearing	6302 ZZ
Bearing bore diameter, mm	15
Bearing outside diameter, mm	42
Bearing width, mm	15
Basic dynamic load rating, kN	14.3
Basic static load rating, kN	5.45
Number of ball	7
Material of cage	66 polyamide

2.2 グリース分布可視化試験

深溝玉軸受内部のグリースの状態を把握し、低トルク化方法について検討するために、回転試験後の深溝玉軸受内部をX線CTシステムを用いて可視化した。可視化用軸受の外観写真を図3に、構成部品の詳細を表2に示す。また、X線照射条件を表3に、可視化試験前に実施する回転試験の条件を表4に示す。グリースはX線透過率が高いため、グリースと空気との違いが判別できるよう、低出力のX線（管電圧100kV）を照射した。ここで、低出力のX線でも深溝玉軸受の内部が可視化できるように、構成部品をX線透過率の高い材質で構成した。内外輪にはアクリル樹脂を、転動体には石英ガラスを、保持器には66ポリアミドを、シールドにはABS樹脂を用いた。可視化試験前の回転試験では、アキシャル荷重20Nを負荷し、内輪を1800min⁻¹で5分間回転させた。回転試験は、次節で述べる軽荷重下のトルク測定に用いた試験機で行った。



図3 可視化用軸受
Sample bearing for visualization

表2 可視化用試料軸受の構成部品

Components of sample bearing for visualization

	Inner ring	Acrylic resin
	Outer ring	Acrylic resin
	Ball	Quartz glass
	Cage	66 polyamide
	Shield	ABS resin
Grease	Thickener	Lithium soap
	Penetration	250
	Kinematic viscosity of the base oil, 40°C, mm ² /s	26
	Amount of grease, g	0.84

表3 X線観察の条件
X-ray condition

X-ray tube voltage, kV	100
X-ray tube current, A	460

表4 回転試験条件
Rotation test condition

Axial load, N	20
Rotational speed, min ⁻¹	1 800
Operating time, min	5

2.3 トルク測定試験

トルク測定は、異なる2種類の荷重条件で実施した。深溝玉軸受の代表的な使用条件として、アキシアル荷重のみを支持する場合と、アキシアル荷重とラジアル荷重の両方を支持する場合がある。アキシアル荷重のみ作用させる条件では転動体-保持器間の作用力は小さくなると考えられ、ラジアル荷重、アキシアル荷重を同時に作用させる条件では、転動体に進み遅れが存在し、転動体-保持器間の作用力は大きくなるものと考えられる。軽荷重条件のトルク測定に用いた試験機を図4に、試験条件を表5に示す。高荷重条件でのトルク測定に用いた試験機を図5に、試験条件を表6に示す。深溝玉軸受の内輪を回転させ、外輪に発生するトルクをロードセルで測定した。軽荷重条件では、深溝玉軸受にアキシアル荷重のみを負荷し、高荷重条件では、深溝玉軸受にアキシアル荷重とラジアル荷重との合成荷重を負荷した。空気軸受を介してアキシアル荷重、ラジアル荷重を負荷することで、深溝玉軸受のトルクを高精度に測定した。回転速度は各荷重条件での最高回転速度から、2 000min⁻¹へと、2 000min⁻¹ずつ低減させた。各回転速度において、1分間保持し、その間のトルクの平均値を、各回転速度におけるトルク値として読み取った。

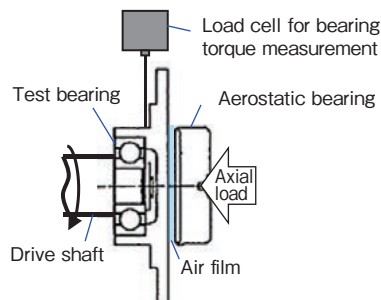


図4 軽荷重用試験機
Test rig (Light load condition)

表5 試験条件 (軽荷重)
Test condition (Light load condition)

Axial load, N	1
Radial load, N	0
Rotational speed, min ⁻¹	14 000 → 12 000 → 10 000 → 8 000 → 6 000 → 4 000 → 2 000

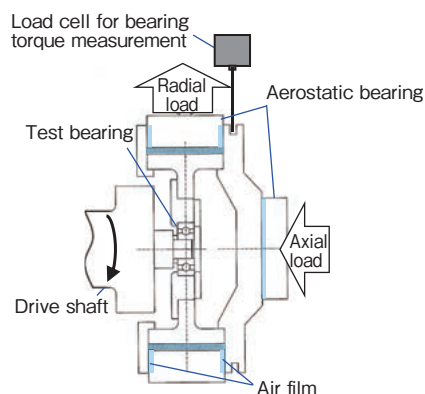


図5 高荷重用試験機
Test rig (High load condition)

表6 試験条件 (高荷重)
Test condition (High load condition)

Axial load, N	1 000
Radial load, N	1 000
Rotational speed, min ⁻¹	10 000 → 8 000 → 6 000 → 4 000 → 2 000

2.4 グリース分布可視化試験結果

X線CTシステムを用いて、回転試験後のグリース潤滑深溝玉軸受内部のグリース分布の観察を行った。結果を図6に示す。各軸受構成部品がX線透過率に応じた濃淡の違いとして表れており、軸受内部のグリース分布が可視化できた。グリースは塊となって遠心力で外輪側に付着していた。内輪側とグリースの塊との間には微

小さなクリアランスが存在していた。従来保持器ではポケットと転動体は面で接触しており、ポケットと転動体の間にグリースが入り込んでいるため、グリースのせん断によるトルクが生じていると考えられる。

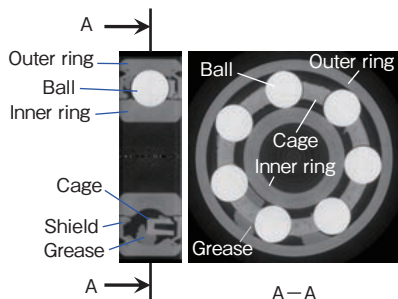


図6 X線CT観察結果(従来保持器)
X-ray CT observation results (Conventional)

3. 低トルク化のための保持器形状

新構造の保持器を開発することによって、深溝玉軸受を低トルク化するための方法を検討する。X線CTによる観察結果によれば、以下のような低トルク化指針が見えてくる。

- ①保持器-転動体間でのグリースのせん断はトルクの発生要因となるので最小化すべきである。
- ②グリースは遠心力で外輪側に付着するので、保持器はできるだけ内輪側に位置させたほうがグリースのかくはん抵抗、せん断抵抗が低減できる。

これらの知見を踏まえ低トルク化のために以下のような保持器構造とした。

- ①保持器-転動体間は点接触化する。
- ②保持器が転動体を抱きかかえる転動体ガイド方式ではなく、軌道ガイド方式とする。軌道ガイド方式には、内輪軌道ガイド方式および外輪軌道ガイド方式が考えられるが、グリースのかくはん抵抗、せん断抵抗低減のために内輪軌道ガイド方式とする。

従来保持器と新構造の開発保持器を図7, 8に示す。図7a)には、従来保持器における保持器ポケット部と転動体との接触状態を示す。従来保持器は転動体ガイド方式であるため、従来保持器と転動体とは面で接触している。図7b)には、開発保持器における保持器ポケット部と転動体との接触状態を示す。開発保持器と転動体とは、点で接触しているのがわかる。図8には従来保持器と開発保持器のガイド方式を示す。従来保持器は転動体ガイド方式であり、転動体に保持器を組み付ける。開

発保持器は、内輪軌道ガイド方式であり、内輪に組み付ける。

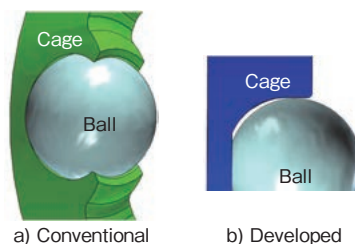


図7 深溝玉軸受における玉と保持器の接触
Ball-cage contact in the deep groove ball bearing

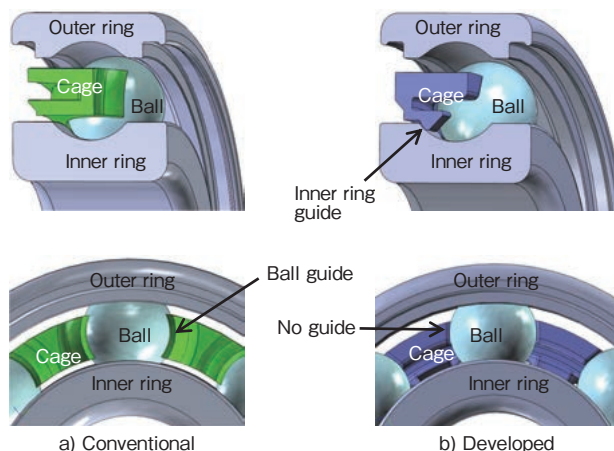


図8 深溝玉軸受のガイド
Guide of deep groove ball bearing

4. 新構造の開発保持器での測定結果

4.1 グリース分布可視化試験結果

新構造の開発保持器が、設計の狙い通りに機能していることを確認するため、開発保持器を組み付けた深溝玉軸受内部のグリース分布の観察を行った。結果を図9に示す。開発保持器と転動体の接触部は、設計の狙い通り点接触となっていることが確認できた。またグリースは塊となって遠心力で外輪側に付着しており、内輪側には付着しているグリースが少ないため、内輪軌道ガイド方式とすることで、グリースがかくはんおよびせん断を受けにくい構造となっていることが確認できた。

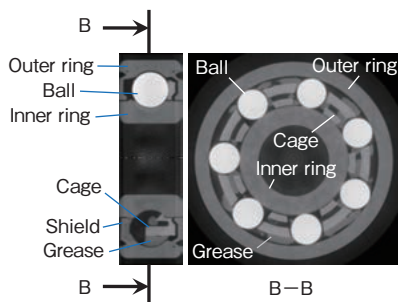


図9 X線CT観察結果（開発保持器）
X-ray CT observation results (Developed)

4.2 トルク測定結果

従来軸受と新構造の開発保持器を組み付けた深溝玉軸受（以下、開発軸受）のトルク測定を実施した。図10a), 11a)には、トルクの測定結果の値を示し、図10b), 11b)には、従来軸受と開発軸受のトルクの比（開発軸受のトルクの従来軸受のトルクに対する百分率）を示す。従来軸受も開発軸受も2個測定しており、Conventional 1, 2, Developed 1, 2と示している。転動体ガイド方式の保持器を組み付けた従来軸受に対し、軌道ガイド方式の保持器を組み付けた開発軸受では軽荷重条件、高荷重条件ともに低トルク化の効果が認められた。図10より、軽荷重条件では、トルクの絶対値は低いものの、開発軸受の大幅なトルク低減効果が認められた。従来軸受では、回転速度の増加に伴ってトルクも増加する傾向にあるが、開発軸受では回転速度の増加に伴うトルクの変化が少ないため、高速回転領域ほど大きなトルク低減効果が認められた。測定した最高回転速度である $14\ 000\text{min}^{-1}$ においては、開発軸受では従来軸受より

も80%程度の低トルク化が確認された。軽荷重条件では軸受トルクに占めるグリースのかくはん抵抗、せん断抵抗低減の割合が高いと考えられる。新構造の保持器では、グリースのかくはん抵抗、せん断抵抗を大きく低減しているため軸受のトルク低減効果が大きく表れたものと考えられる。図11より、従来軸受、開発軸受ともに、荷重の増加に伴ってトルクが増加するのが認められた。しかしながら、開発軸受の方が従来軸受よりも、荷重の増加に伴うトルクの増加が小さく、高荷重条件においても、測定した全ての回転速度領域で開発軸受のトルク低減効果が認められる。開発軸受では、従来軸受よりも20～40%程度の低トルク化が確認された。高荷重条件では保持器以外のトルク発生要因である、転がり粘性抵抗や差動すべりなどの因子の影響が大きくなるため、軽荷重よりも保持器によるトルクの低減割合は小さくなっていると推定されるが、効果は十分に得られた。ラジアル荷重、アキシアル荷重を同時に作用させることで、それぞれの転動体が内外輪に接触する角度が異なるため、転動体が軌道上を通過する回転半径が変化することになり、転動体の速度は不均一になる。転動体の速度の不均一は転動体の進み遅れと呼ばれる現象である。転動体速度の不均一さに起因して、保持器-転動体間の接触部を押し付ける荷重がより大きく作用する。しかし、新構造の保持器ではその部分のグリースのかくはん、せん断する際に発生する抵抗を低減できたためトルクを低減できていると考えられる。

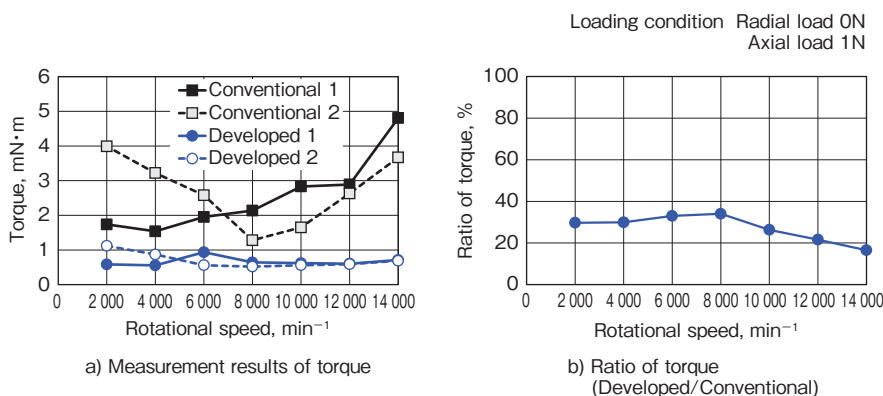


図10 深溝玉軸受のトルク（軽荷重）
Torque of deep groove ball bearing (Light load condition)

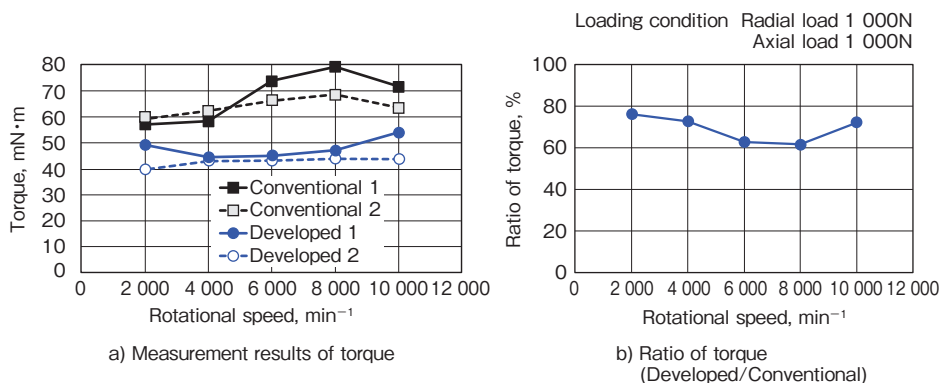


図11 深溝玉軸受のトルク (高荷重)
Torque of deep groove ball bearing (High load condition)

5. まとめ

従来、グリースの改良によって進められてきた深溝玉軸受の低トルク化を、負荷容量に影響を与えない新構造の保持器を開発することで試みた。その結果を以下に示す。

- 1) グリース潤滑の深溝玉軸受をX線CTにより観察を行った結果、トルク損失には保持器-転動体間でのグリースのせん断が寄与していることが示唆された。
- 2) X線CTによる観察の結果、グリースは遠心力で外輪側に付着していた。このグリースによるかはん抵抗やせん断抵抗を低減させるには、保持器は内輪案内であるべきことが示唆された。
- 3) 新構造の保持器を開発することで軽アキシャル荷重の作用下でのトルクを全速度領域において60%以上低減できた。
- 4) また新構造の保持器を開発することでラジアル荷重、アキシャル荷重の高合成荷重の作用下でのトルクを大きく低減できた。

- 5) 綿林英一・田原久禎：ベアリングのおはなし、日本規格協会(1987)p. 105.
- 6) E. OIKAWA, N. INAMI, M. HOKAO, A. YOKOUCHI & J. SUGIMURA : Bearing Torque Characteristics of Lithium Soap Greases with Some Synthetic Base Oils, J. Engineering Tribology, 226, 6 (2012)p. 575.
- 7) 大野賢次・阿部信夫：グリースと軸受トルク、潤滑, 8, 4(1963)p. 243.
- 8) 星野道男：グリースの流動特性ところがり軸受におけるトルク(第2報), 潤滑, 25, 8(1980)p. 555.
- 9) 小口敏太郎：グリース見掛粘度について, 潤滑, 3, 3 (1958)p. 135.
- 10) P. V. LIDDEL & D. V. BOGER : Yield Stress Measurements with the Vane, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 63, 2-3(1996)p. 235.
- 11) 新田真理子・津田武志・新井大和・坂本清美・酒井一泉：転がり軸受のトルクにおけるジウレアグリースの粘性移行応力と増ちょう剤分子構造の影響—脂肪族ジウレアの末端アルキル鎖長の影響—, トライボロジスト, 61, 10 (2016)p. 699.

筆者

参考文献

- 1) ジェイテクト編著：ベアリングの基本と仕組み、秀和システム(2011).
- 2) 山下龍城：転がり軸受とEHL, トライボロジスト, 49, 4(2004)p. 330.
- 3) 素材技術先導プロジェクト：超低摩擦技術領域, Newsletter, 4(2014).
- 4) J. BRANDLEIN, P. ESCHMANN, L. HASBARGEN & K. WEIGAND : Die Walzlagerpraxis, 工業調査会(1996)p. 193.



鎌本繁夫*

S. KAMAMOTO



村田順司**

J. MURATA



獅子原祐樹**

Y. SHISHIHARA

* 研究開発本部 材料研究部 博士(工学)
Doctor of Engineering

** 研究開発本部 材料研究部