

グリース潤滑用高速回転対応軸受の開発

Development of Grease-lubricated High-speed Bearing

秋元翔太 S. AKIMOTO

High-speed bearing rotation is required to make electric vehicle drive motors more efficient, smaller, and lighter. We have developed a resin cage with a novel shape that offers excellent centrifugal force resistance and lubrication performance, and that dramatically improved the high-speed performance of grease-lubricated bearings, achieving a $d_m n$ value of 1.85 million.

Key Words: grease-lubricated, high-speed, bearing, cage, electric vehicle

1. はじめに

世界的な課題である地球温暖化に対して、各国でカーボンニュートラルや脱炭素社会の実現に向けた取り組みが進められており、自動車業界では電動化が加速している。自動車メーカーは、電動車の航続距離延長、電費向上、充電時間の短縮や車両搭載性の向上を目指しており、駆動モーターの高効率化や小型・軽量化などが求められている。また、モーターの小型化による出力の低下を回転速度の増加によって補おうとしている。したがって、モーターシャフトを支持する軸受はさらなる高速回転への対応が求められる¹⁾。

モーターシャフトを支持する軸受は一般的に深溝玉軸受が適用されており、軸受はオイル潤滑またはグリース潤滑で使用される。ジェイテクトでは、オイル潤滑での高速回転対応玉軸受²⁾を開発し、 $d_m n^* 1200$ 万を達成しているが、グリース潤滑の場合は、オイル潤滑のような冷却効果が期待できず、 $d_m n 120$ 万程度で軸受の焼付きに至っている。その一方で、グリース潤滑の場合、ローター部にはオイルが存在せず、回転時のかくはん抵抗が無く、モーターを高効率化できるメリットがある。

本報では、グリース潤滑における高速回転化による軸受の焼付き課題を解決する、高速性に優れた新製品の開発に成功したのでその結果を以下に紹介する。なお、今回の開発では、開発期間短縮のためにMBD^{*2)}を積極活用した³⁾。

* 1 $d_m n =$ 玉のピッチ円直径 (mm) × 回転速度 (min^{-1}) : 軸受の高速性を表す指標

* 2 MBD (Model Based Development) : 開発対象

のモデルを製作し、そのモデルをベースにシミュレーション技術を活用することで、開発期間の飛躍的な短縮と製品品質を向上させる高効率な開発手法。

2. 高速回転化の課題

深溝玉軸受は図1に示すように、内輪、外輪、玉、保持器で構成されている。グリース潤滑の場合は両側面にシールやシールドが取り付けられている。モーターシャフトを支持する軸受は内輪回転で使用され、玉は自転しながら内輪と外輪の間を公転し、保持器は玉の公転速度で回転する。

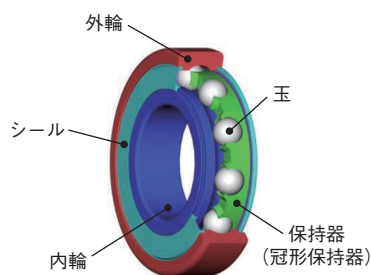


図1 深溝玉軸受 (グリース潤滑)
Deep groove ball bearing (grease-lubricated)

保持器は大きく分けて金属製と樹脂製があるが、表1に示す通り、高速回転用途では、軽量で自己潤滑性を有する樹脂保持器が適している。さらに、樹脂保持器は射出成型で製造されるため、形状の自由度が高く、さまざまな設計工夫を取り入れることができる。

表1 保持器材料の特徴
Comparison of cage materials

保持器材料/形状	重量	耐焼付き性	形状自由度	耐熱性
樹脂	○ 軽い	○ 自己潤滑性を有する	○ 高い (射出成型)	耐熱性を有する 材料の選定が必要
金属	× 重い	× 自己潤滑性を有さない	× 低い (プレス成型)	○ 高い

○：高速回転に適している
×：高速回転に適していない

深溝玉軸受用の樹脂保持器は冠形保持器が一般的である。モーターの回転速度が $20\,000\text{min}^{-1}$, $30\,000\text{min}^{-1}$ と上昇すると、作用する遠心力はそれに従い大きくなり、冠形保持器は図2に示すように、ポケット開口側の先端部分が外径側に開くような変形をする。

それに伴い、外輪やシールとの干渉、玉詰まり（保持器のポケット内径部が玉に押し付けられる現象）が生じる（図3、図4）。その結果、保持器が摩耗し保持器の摩耗粉がグリースに混入することによって、グリースの劣化が進行する。また、高速回転時は遠心力によってグリースが偏り、軌道と玉や玉と保持器の接触面へのグリース供給が不足する課題もある。グリースの劣化や供給不足などの潤滑不良が発生した軸受は、最終的に焼付きに至る（図5）。

保持器の遠心力による変形を抑制する手法として、高剛性材料の適用や、円環部の幅拡大による保持器の剛性向上（以下、高剛性冠形保持器）が採用されているが、グリースの供給不足を解決できない上に、コストが高くなる。そのため高価な高剛性材料を使用せず、形状工夫によってグリース潤滑高速性に優れる保持器を検討する。

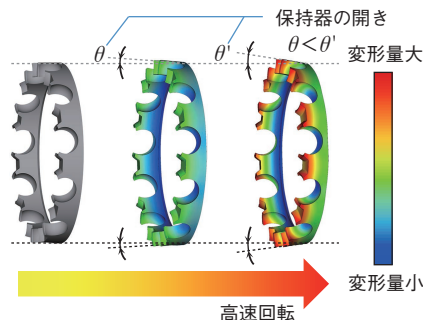


図2 遠心力による冠形保持器の変形 (CAE 解析)
Deformation of snap cage due to centrifugal force (by CAE analysis)



図3 変形による冠形保持器と他部品の干渉 (CAE 解析)
Interference between snap cage and other parts due to deformation (by CAE analysis)



図4 高速回転試験後の冠形樹脂保持器
Resin snap cage after high-speed test

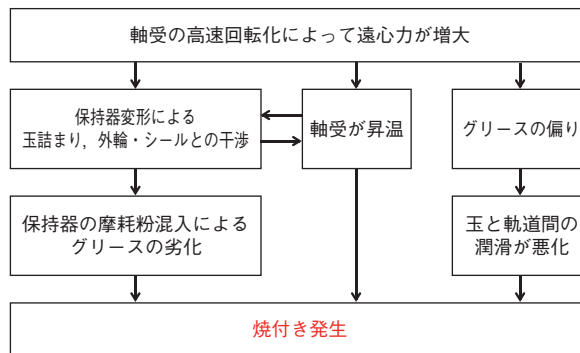


図5 軸受の高速回転化による焼付き発生メカニズム
Seizure generation mechanism due to high-speed rotation of bearing

3. 開発品の特長

本開発では、今後のモーター高速回転化を見据え、内径 $\phi 40\text{mm}$ の軸受が $25\,000\text{min}^{-1}$ で回転することを想定し、高速性目標値を $d_m n 150$ 万以上とした。目標を達成するため、遠心力の影響が小さく、グリース潤滑性向上効果を有する新たな保持器形状を考案した (図6)。

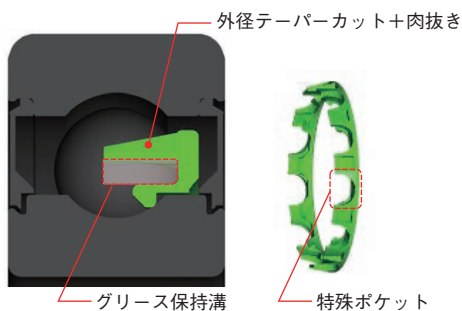


図6 開発保持器
Development cage

- ・玉詰まりを抑制する特殊ポケット形状

冠形保持器は球面ポケットのため、遠心力の変形による玉詰まりを回避することはできない。そこで、ポケットが玉を抱きかかえないように、半円筒と平面を複合した特殊形状のポケットとした。玉は保持器の平面で接触し、遠心力の変形によって玉詰りが発生することはない。保持器の軸方向の位置決めのために、内輪軌道に接する爪を設けた。

- ・遠心力による変形を抑制する超軽量化設計 (外径テーパカット+肉抜き)

遠心力による変形が大きければ外輪やシールとの干渉が発生する。遠心力の影響を抑制するには、円環部の剛性強化や、円環部以外での軽量化が挙げられる。肉厚を厚くすることで円環部の剛性強化が図れるが、幅寸法が大きくなり、保持器は軸受内に収まらなくなる。そこで、円環部以外での軽量化 (外径テーパカット+肉抜き) に取組み、冠形保持器と比較して重量を約 40% 軽減した。

- ・潤滑性を向上するグリース保持溝

高速回転時のグリースの偏りによって、玉と軌道間の潤滑性が悪化し、焼付きが発生する。玉や軌道へのグリース供給性を向上させるために、玉近傍でグリースを保持することが可能な溝を設けた。この溝から回転する玉にグリースを供給し、玉と軌道間の良好な潤滑を維持することが可能となる。

開発保持器の効果確認のために、遠心力によるポケット先端の変形量を CAE 解析で検証した結果 (図7)、冠形保持器と比較して約 70% 低減することを確認した。

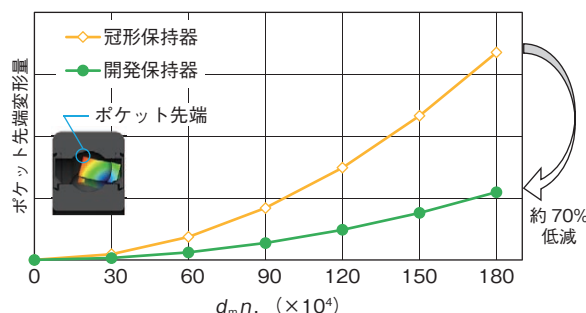


図7 遠心力による保持器の変形量 (CAE 解析)
Amount of deformation of cage due to centrifugal force (CAE analysis)

4. 開発品の性能

4.1 高速性

開発保持器の高速性を確認するために、回転速度を段階的に加速する試験を実施した。この試験では、軸受の外輪温度を測定し、温度の安定と加速を繰り返し、異常昇温 (回転速度の加速に伴う軸受の昇温が安定せずに上昇し続け、やがて焼付きに至る現象) の発生有無を確認した。試験条件を表2に、試験結果を図8に示す。高剛性冠形保持器 (円環部の幅拡大によって剛性を向上させた冠形保持器) は、 $d_m n 120$ 万を超えると異常昇温が発生

表2 高速性確認試験条件
High-speed test conditions

軸受サイズ	内径 $\phi 40\text{mm}$ × 外径 $\phi 80\text{mm}$ × 幅 18mm
回転速度	$d_m n 185$ 万まで段階的に加速

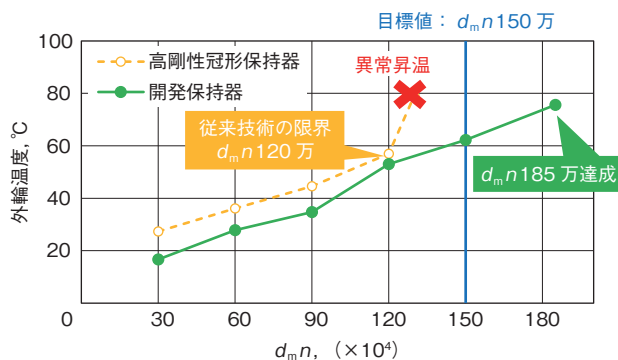


図8 高速性確認試験結果
High speed test results

生したのに対し、開発保持器は $d_{mn}185$ 万でも異常昇温が発生しないことが確認できた。また、試験後の保持器を観察したところ、他部品との異常な干渉はなく、保持器の溝にはグリースが保持されていた（図9）。保持したグリースが玉に供給されることにより、高速回転でも良好な潤滑が維持され、高速性の目標値を大幅に上回ったと考えられる。

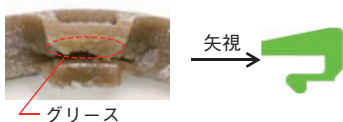


図9 試験後保持器
Development cage after test

4.2 保持器単体疲労強度

軸受に合成荷重が負荷された状態で回転すると、玉が1公転する間に軌道との接触角が変化する。それによって各玉の公転距離がわずかに変動し、玉と保持器の接触力が増加する。接触力が繰り返し作用することにより、保持器が疲労破壊する恐れがある。開発保持器の疲労強度を確認するために、実機を模擬して強制的に接触力を繰り返し負荷する試験を実施した（図10）。試験条件を表3に示す。

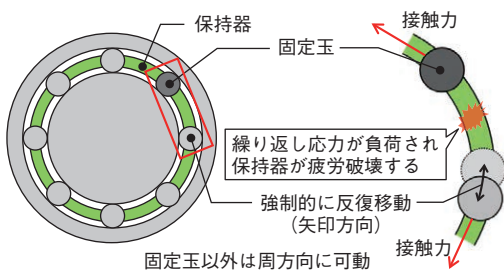


図10 保持器への接触力の負荷方法
Method of adding contact force to cage

表3 保持器単体疲労強度試験条件
Fatigue strength test conditions for cage

荷重負荷回数	1.5×10^7 回
負荷荷重	40N

試験荷重として、動的シミュレーション*3（図11）によって算出した接触力（ $d_{mn}185$ 万の高速回転時に発生する接触力）を適用した。試験の結果、保持器は破断することなく目標を達成した。また、白化や損傷が発生しなかったことから、開発保持器は十分な疲労強度を有していることが確認できた。

*3 当社が自社開発した軸系解析プログラム⁴⁾

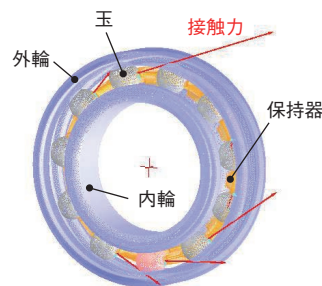


図11 接触力の解析例
Contact force analysis example

4.3 耐久性評価

開発保持器の耐久性を確認するため以下の耐久試験を実施した。






- ・高速耐久試験：高速連続運転を想定した条件
- ・急加減速耐久試験：急発進、急停止を想定した条件

これらの試験では、外部ヒーターによる加温で軸受を加熱し、温度負荷を与えることで耐熱性も同時に確認した。試験条件を表4に示す。結果、両試験共に目標時間・サイクル数を達成し、保持器に破損はなかった（表5）。よって、開発保持器は十分な耐久性を有していることを確認できた。

表4 耐久試験条件
Endurance test conditions

試験名	高速耐久試験	急加減速耐久試験
軸受サイズ	内径 $\phi 40$ mm × 外径 $\phi 80$ mm × 幅 18mm	
d_{mn}	150 万	6 万 ⇄ 108 万
外輪温度	140℃	80℃
目標試験時間 / 目標サイクル数	20h	150 000 サイクル

表5 耐久試験結果
Endurance test results

試験名	高速耐久試験	急加減速耐久試験
試験後品 	A  外輪との干渉なし	A  外輪との干渉なし
	B  ポケット／爪部に破損なし	B  ポケット／爪部に破損なし
試験結果	目標時間を達成	目標時間を達成

4.4 まとめ

グリース潤滑高速性を向上させる新形状の開発保持器を適用した軸受の試験結果を表6に示す。高速性試験では回転速度を段階的に加速させ、目標を大きく上回る $d_m n 185$ 万を達成した。保持器単体疲労強度試験では、保持器そのものに動的シミュレーションで算出した接触力を負荷し、目標荷重負荷回数を達成したことから十分な疲労強度を保持していることを確認した。耐久試験では高速耐久試験と急加減速耐久試験を実施し、両試験において目標を達成したことから、十分な耐久性を満足していることを確認した。

表6 試験結果一覧
List of test results

試験項目	試験結果	
高速性試験	○ $d_m n 185$ 万を達成	
保持器単体疲労強度試験	○ 目標の荷重負荷回数を達成	
耐久性試験	高速耐久試験	○ 目標時間を達成
	急加減速耐久試験	○ 目標サイクル数を達成

5. おわりに

本報のグリース潤滑高速回転対応軸受用保持器の開発では、従来の高剛性冠形保持器に対して高速性が1.5倍以上となり、世界トップクラスの $d_m n 185$ 万の高速回転を達成することができた。開発した保持器を採用した高速回転対応軸受は電動車駆動ユニットのモーター用としてシリーズ化⁵⁾済みであり、モーターの高効率化、小型・軽量化のための高速回転に対応し、電費向上と航続距離の延長に貢献できる。今後も自動車の電動化に貢献すべく、高付加価値商品の開発を推進する。

参考文献

- 1) 株式会社三栄：よくわかるモーター, Motor Fan illustrated, Vol. 184(2022)32.
- 2) 谷口陽三, 梅野 剛：高速回転対応深溝玉軸受の開発, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1015 (2017) 49.
- 3) Nikkei Business Publications, Inc.：クルマのデジタル開発最前線, 日経 Automotive, 第131号(2022)44.
- 4) 大島吉雄, 長谷川賢一, 鬼塚高晃：軸受動解析システムの開発, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1017(2019)83.
- 5) 株式会社ジェイテクト：高速EVモーター用軸受, CAT, No. BA019JA-0MY.

筆者



秋元翔太*
S. AKIMOTO

* 産機・軸受事業本部 技術企画部