

解析技術を活用した世界最高レベルの 超高速回転深溝玉軸受の開発

Development of World-Class Ultra-High-Speed Deep Groove Ball Bearings Through Advanced Analysis Technologies

秋元翔太 S. AKIMOTO 南 智也 T. MINAMI 永井摂男 S. NAGAI
村山智昭 T. MURAYAMA 平山堅太郎 K. HIRAYAMA

With the advancement of electrification in the automotive field, eAxe systems are required to achieve higher efficiency in smaller form factors. To meet these demands, motors need to operate at higher rotational speeds, which requires improved high-speed performance of bearings. However, high-speed operation presents specific challenges for bearings, including increased centrifugal forces and heat generation. This paper focuses on deep groove ball bearings capable of operating at rotational speeds exceeding $40\,000\text{ min}^{-1}$ and presents the core technologies developed to enhance their performance, including design optimization based on CAE analysis, resin material selection, injection molding technology, and testing techniques. Through these technologies, stable operations with relatively low temperature rise have been achieved under ultra-high-speed conditions, which can extend the application range of deep groove ball bearings.

Key Words: ball bearing, cage, high-speed, CAE analysis

1. はじめに

自動車分野では脱炭素社会の実現に向けて電動化が進展しており、車両全体の高効率化が従来以上に重要な技術課題となっている。電動パワートレインの中核であるeAxeは、モーター、インバーター、減速機が一体化したユニットであり、航続距離の延伸や電費性能向上には、ユニット全体の小型・軽量化と高効率化が求められている。その有効な手段の一つがモーターの高速回転化である。モーターの回転速度を上げることで小さなトルクでも高出力が可能となる。

しかし、モーターの高速回転化は回転体に作用する遠心力や摩擦による発熱量の増大を伴うため、軸受にはきわめて厳しい使用環境となる。特に、深溝玉軸受では玉や保持器の挙動変化、発熱に起因する材料変性や寸法変化が生じる。そのため、保持器の形状および材質や転走面形状の改善による負荷分布の適正化や摩擦損失の低減が必要である。

当社は、これらの課題を解決し、さらに高速回転用途への適用範囲を拡大するため、 $40\,000\text{ min}^{-1}$ の回転速度

で利用できる軸受を開発した。

本報では、超高速回転深溝玉軸受の開発を支えた当社のコアコンピタンスを紹介する。

2. 超高速回転深溝玉軸受

2.1 深溝玉軸受の構成

深溝玉軸受は、内輪・外輪・玉（転動体）・保持器で構成される最も基本的な転がり軸受である。簡素な構造でありながら汎用性が高く、自動車から産業機械に至るまで電動機や減速機、補機類など幅広い用途で使用されている。

深溝玉軸受の構成を図1に示す。内輪および外輪には円弧状の転走面が形成され、その間に配置された複数の玉によって軸に作用する荷重を支持する。保持器は玉を等間隔に保ち、玉同士の接触を防止するとともに回転中の挙動を安定させる部品である。超高速回転の条件下では、保持器の挙動が軸受性能に大きく影響する。

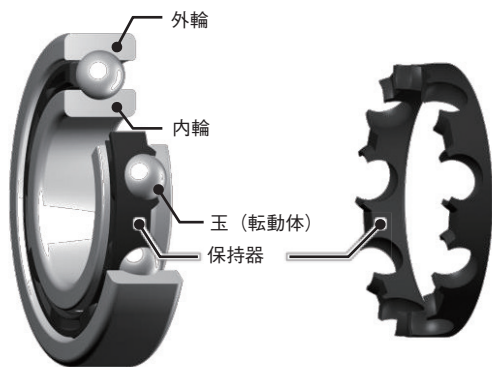


図1 深溝玉軸受の構成
Components of deep groove ball bearings

2.2 高速回転時の課題

深溝玉軸受において、玉は内輪または外輪の回転に伴って転走面上を自転しながら公転する。この際、保持器は玉の公転運動に追従して回転し、遠心力を受けるが、遠心力は回転速度の二乗に比例して増大するため、高速回転では変形が発生する（図2）。保持器が変形すると外輪との干渉の発生や玉との接触力の増加などが生じ、保持器の摩耗や回転性能低下につながる。さらに、玉の自転および公転運動が阻害されて玉と転走面間に滑りが発生し、摩擦発熱が増加する。その結果、保持器による玉の保持性能の低下や保持器自体の破損が生じ、最終的には焼付きなどの重大な軸受損傷に至る可能性がある。

このように高速回転域では、遠心力に起因する保持器の変形や摩耗と転がり接触部の発熱が相互に影響する。したがって、軸受を構成する各要素の総合的な最適化が不可欠である。

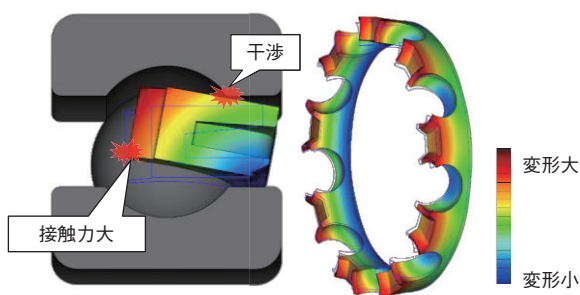


図2 遠心力による保持器の変形
Cage deformation due to centrifugal force

2.3 超高速回転に向けた設計

当社が開発した超高速回転深溝玉軸受を図3に示す。本軸受では、高速回転時の保持器挙動の把握を目的としてCAE（Computer Aided Engineering）解析を活用し、保持器の形状を検討した。また、高速回転下でも寸法安定性および機械的強度を維持できる材料を適用した。

そのうえで、高速回転化に伴う昇温抑制を目的として、内外輪の軌道曲率を再設計した。すなわち、遠心力を考慮した玉の接触状態を解析し、玉と転走面の接触応力および負荷分布を適正化することで転がり抵抗の低減を図った。その結果、高速回転下においても温度上昇を抑え、従来軸受より優れた低昇温特性を実現した。

次章では、このような深溝玉軸受の性能向上を支えたコア技術について解説する。

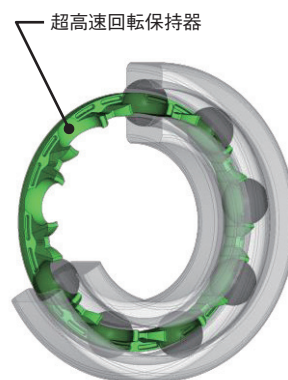


図3 超高速回転深溝玉軸受
Ultra-high-speed deep groove ball bearing

3. 超高速回転深溝玉軸受のコア技術

3.1 CAE 解析技術

当社では従来、遠心力による保持器の変形をCAE解析によって評価し、軸受設計に反映させてきた。超高速回転深溝玉軸受の開発では、高速回転時に生じる現象を高精度に把握するため、保持器の変形だけでなく、玉の公転運動、玉と保持器の接触、保持器の振れ回り挙動を含めた軸受全体の解析モデルを構築した¹⁾。

まず、標準品を対象にして本解析モデルの妥当性を検証した。その結果、図4（a）に示すように、高速回転時には遠心力による保持器の変形に起因して外輪との干渉が発生した。同様の現象は図4（b）のCAE解析でも再現できた。

さらに、本解析モデルを用いて高速回転域での開発品の保持器挙動を予測した。開発品の試験結果を図5 (a) に示し、CAE 解析結果を図5 (b) に示す。両者はよく一致しており、構築した CAE 解析モデルは高速回転域でも保持器の挙動を高精度に予測可能であることを確認した。

このように、CAE 解析は軸受開発の基盤となるコア技術であり、長年にわたり蓄積した解析技術と知見の活

用によって、保持器設計、材料選定、さらには試験条件の設定に至るまで各技術要素の高度化を実現している。

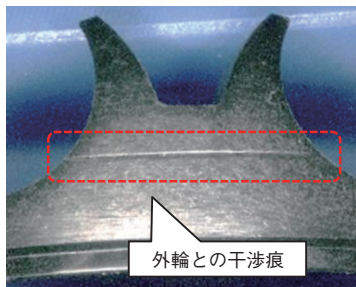
3.2 樹脂材料技術および射出成形技術

本節では、保持器の材料特性と、その特性を発揮させる射出成形技術を紹介する。

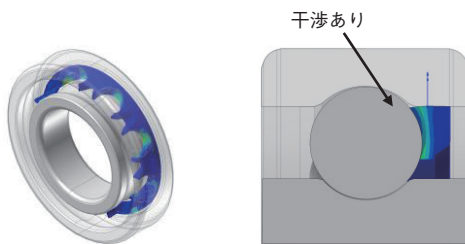
高速回転域で使用する保持器には、前述のとおり増大する遠心力や玉接触による繰返し応力への耐久性にくわえ、高温環境下でも形状と機能を維持できる特性が求められる。

そこで当社では、実機での使用状態を考慮し、「高温環境における剛性保持」と「劣化後の強度保持率」に着目して材料を選定した。

適用した樹脂材料の性能を発揮させるには、射出成形における樹脂流動および収縮の制御も重要である。特に、薄肉部や爪部の形状は保持器の挙動に直接影響するため、樹脂流動解析(図6)を活用し、適切な金型構造およびゲート配置を検討した。また、樹脂の合流部であるウェルド位置を設計に反映させ、真円度を 28% 向上させた(図7)。



(a) 試験結果

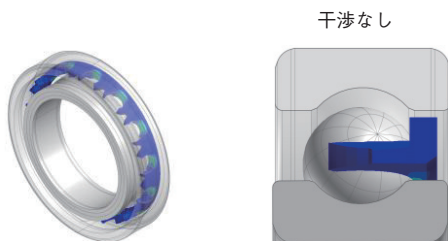


(b) CAE解析結果

図4 標準品での試験結果と CAE 解析結果
Testing and CAE analysis of standard product



(a) 試験結果



(b) CAE解析結果

図5 開発品試験結果と CAE 解析結果
Testing and CAE analysis of developed product



図6 樹脂流動シミュレーション
Simulation by resin flow analysis

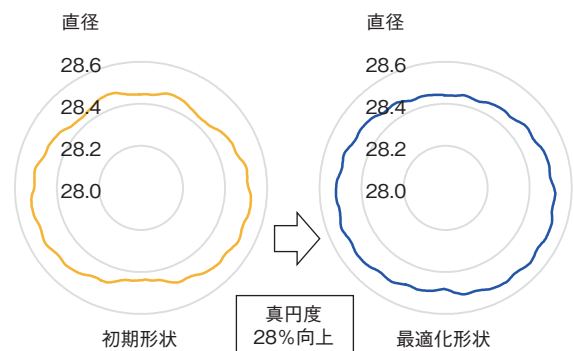


図7 樹脂流動解析前後の真円度比較
Comparison of roundness before and after resin flow analysis

以上の樹脂材料の選定と射出成形技術の融合によって変形抑制、強度維持および真円度を含む寸法精度の向上を実現した。開発した保持器の回転速度に対する変形量は、CAE 解析の結果、標準品と比較して 70% 低減された（図 8）。

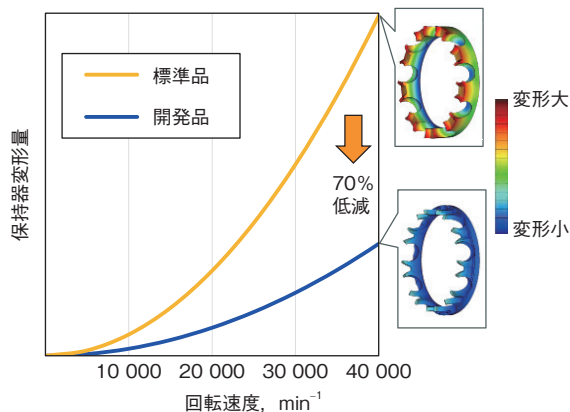


図 8 保持器変形量の比較（CAE 解析）
Comparison of cage deformation (CAE analysis)

3.3 評価技術

本節では、解析および設計の妥当性を検証する技術について紹介する。

当社では軸受の限界性能を把握するため、従来試験機を上回る高速回転にくわえ、急加速・急減速条件にも対応可能な評価試験機を開発した（図 9）。本試験機では、主軸を駆動するモーターユニットに当社のコア技術である磁気軸受²⁾を用いている。磁気軸受は電磁力により回転軸を完全非接触で支持できるため、摩擦ゼロ、潤滑油不要、メンテナンスフリーといった特長を有する。これにより、高速回転性能は $45\,000\text{ min}^{-1}$ 、急加速・急減速回転性能は $15\,000\text{ min}^{-1}/\text{s}$ まで評価できるようになった（図 10）。これらの性能は市場要求を十分に満足している。

開発試験機によって超高速回転深溝玉軸受の開発においても $40\,000\text{ min}^{-1}$ を超える回転速度における安定性、昇温特性および信頼性を評価できた。高速限界試験の一例を図 11 に示す。標準品では $28\,000\text{ min}^{-1}$ で焼付きが発生したのに対し、開発品では $40\,000\text{ min}^{-1}$ まで異常なく回転することを確認した。また、これらの試験結果を解析モデルに反映させ、さらなる精度向上を図っている。

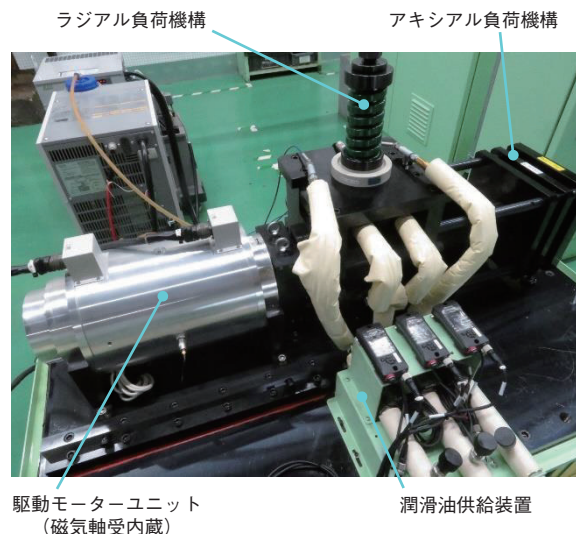


図 9 磁気軸受を用いた軸受評価試験機
Bearing test rig incorporating magnetic bearings

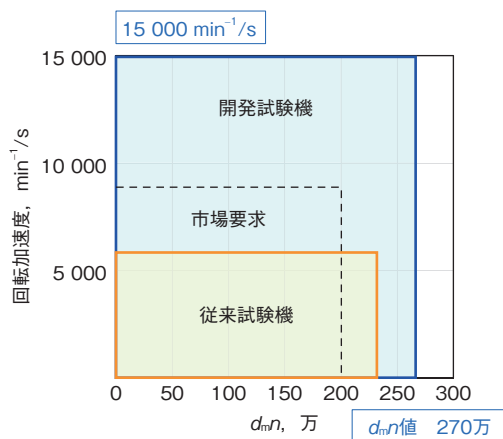


図 10 磁気軸受を用いた軸受評価試験機の評価能力
Assessment capabilities of the bearing test rig

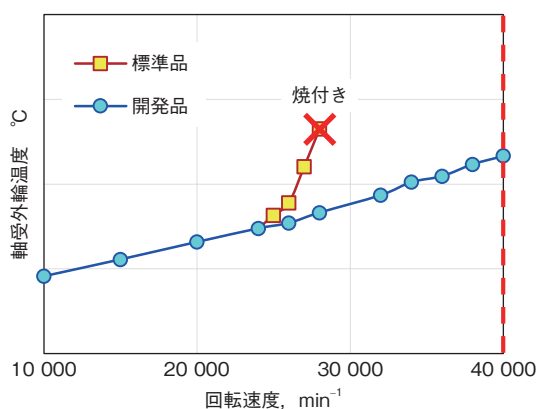


図 11 高速限界試験の一例
Example of a high-speed limit test

4. おわりに

本報では、超高速回転深溝玉軸受の開発を支える当社のコア技術について紹介した。長年蓄積してきたCAE解析技術を基盤とし、樹脂材料技術、射出成形技術および評価技術を融合することで、高速回転下における保持器の安定挙動と優れた低昇温特性を実現した。

これにより、自動車駆動モーター用深溝玉軸受として世界最高レベルの $40\,000\text{ min}^{-1}$ まで回転速度域を拡大し、eAxle用モーターをはじめとする高速回転への適用を可能とした。今後も軸受技術の高度化を追求し、自動車の高性能化および電動化の進展に貢献していく。

参考文献

- 1) 株式会社ジェイテクト：BEV用高速玉軸受開発～それを支えるMBD技術～，JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1019(2022)87-88.
- 2) 株式会社光洋マグネティックベアリング：制御型磁気軸受，JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1018(2021)85-86.

筆者



秋元翔太^{*}
S. AKIMOTO



南 智也^{**}
T. MINAMI



永井摂男^{***}
S. NAGAI



村山智昭^{****} 平山堅太郎^{*****}
T. MURAYAMA K. HIRAYAMA



- ^{*} 産機軸受事業本部 軸受技術部
- ^{**} 産機軸受事業本部 技術企画部
- ^{***} イノベーション本部 材料研究部
- ^{****} 生産技術本部 素形材革新部
- ^{*****} 産機軸受事業本部 実験検証部