工作機械主軸用軸受ハイアビリー JFAST ™の開発

Development of HIGHABILY-JFAST Bearings for Machine Tool Spindles

長瀬真也　S. NAGASE　加賀長門　N. KAGA　新舘佑規　Y. SHINTATE

Bearings for high-speed rotating machine tool spindles are typically lubricated with oil-air systems. However, these systems continuously consume air during operation, leading to increased energy usage. To solve this issue, JTEKT developed a new bearing series HIGHABILY-JFAST that expands the high-speed rotation area of grease lubrication without consuming air, saving energy and reducing CO_2 emissions. The design of the cage shape and material for grease lubrication has been optimized, resulting in a reduction of bearing temperature rises by approximately 30% for angular contact ball bearings and by approximately 50% for cylindrical roller bearings. The lifespan of the grease has also been improved by approximately 20% for angular contact ball bearings and by approximately 50% for cylindrical roller bearings.

Key Words: machine tool, rolling bearing, temperature rising, grease lubrication

1．はじめに

日本政府は 2020 年 10 月にカーボンニュートラルの実現を宣言した．これは，2050 年までに温室効果ガスの排出量と吸収量を相殺し，実質ゼロにすることを目指すものである．さらに，2021 年 4 月には 2030 年までに温室効果ガスを 2013 年度比で 46% 削減する中間目標を表明している．この野心的な目標を達成するには，米国・欧州との連携強化やアジアなどの新興国に対する支援を含む，グローバルな視点での取り組みが不可欠である．

近年ではカーボンニュートラルの実現を目指すにあたり，サプライチェーンを構成する取引先の選定においても環境負荷低減への対応が重視されている[1]．機械産業の基盤を支える工作機械および機械に使用される軸受にも環境対応が求められており，その実現に向けた技術開発が進められている．

2．工作機械の省エネルギー

工作機械は電力を消費して工作物を加工する装置である．発電構成における化石燃料の依存度は依然として高いため，カーボンニュートラルの実現には工作機械の省エネルギー化が重要である．工作機械が消費するエネルギーは，主に主軸，送り軸および付帯設備で使用する電力である．これら電力の削減には，運転条件の最適化や省エネルギー型の最新機器の導入が有効である．工作機械の省エネルギー化にはエアー消費量の削減が有効であり，その中でも主軸を支持する軸受の潤滑に広く採用されているオイルエアー潤滑の削減があげられる．軸受の潤滑方式をオイルエアー潤滑からグリース潤滑へ変更することにより，マシニングセンターにおけるエネルギー消費量の 20% を占めるエアー消費量の削減が可能となる（**図 1**）．

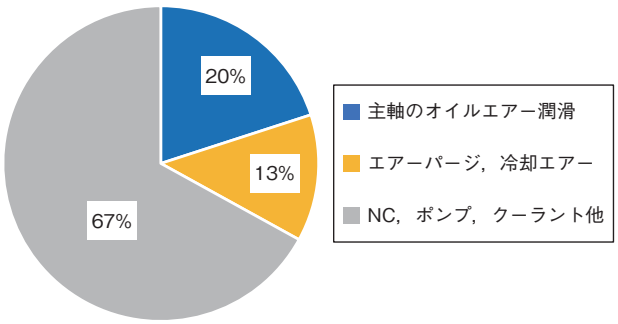


図 1　マシニングセンターのエネルギー消費割合
Energy consumption ratio of machining center

当社はグリース潤滑で 15 000 min^{-1} を実現するマシニングセンター用の #40 テーパー主軸を開発した．この主軸はオイルエアー潤滑の主軸と比べてエアー消費量を 80% 削減できる．

日本政府が発表した中間目標は依然として高く，今後

もさらなる省エネルギー化に向けた開発が必要である．本報では，これら工作機械の省エネルギー化に貢献できる製品として開発したグリース潤滑用低昇温アンギュラ玉軸受と円筒ころ軸受について紹介する．

3. 主軸潤滑方式と軸受昇温

工作機械の主軸の省エネルギー化には，前述のとおりオイルエアー潤滑からグリース潤滑への変更が効果的である．オイルエアー潤滑は微量のオイルをエアーの圧力によって軸受に供給する方式である．この方式はエアーの消費量が多く，潤滑関連の付帯装置も必要になるため，設備コストが高くなる．しかし，常に新しい潤滑剤であるオイルが供給されるため，潤滑剤の劣化がなく，主軸の信頼性の観点から特に $d_m n$ 値* 150 万以上の高速回転領域で広く採用されている．

一方，グリース潤滑は，コンパクトでメンテナンスフリーといった低環境負荷の利点があるが，軸受内部に封入されているグリース寿命が有限のため，使用温度の影響を受ける．高速回転領域でグリース潤滑を適用すると，グリースのかくはんによる発熱などで温度が上昇し，早期にグリース寿命に達するという課題がある．したがって，オイルエアー潤滑からグリース潤滑への変更には軸受を低昇温化し，グリース寿命を延ばすことが重要となる．また，軸受の低昇温化は以下の観点から主軸性能の向上に対しても重要である．

① 軸径が同じ場合，主軸の回転速度をさらに高めることができ，単位時間あたりの切削量の増加によって高効率加工が可能となる．

② 回転速度が同じ場合，軸径を大きくすることによって主軸の剛性をさらに高めることができ，重切削が可能となる．

③ 軸径，回転速度ともに同じ場合，高速回転領域でのグリース寿命の信頼性が向上し，さらに安定した加工が可能となる．

当社では工作機械主軸用軸受として高速回転領域での適用が可能なハイアビリーシリーズ（アンギュラ玉軸受および円筒ころ軸受）を取り揃えている [2]．ハイアビリーシリーズは高速性や昇温特性などの軸受性能が「High Ability（高性能）」であることから名づけられた．軸受の性能に影響を及ぼす転動体直径，軌道曲率，接触角などの軸受内部諸元は，自社開発の設計解析プログラムを用いて最適な設計としている．また，転動体には軽量・耐熱・低熱膨張などの材料特性に優れたセラミックスを採用し，鋼製転動体に対して高速化を実現した．さらに，近年高まる高速回転領域でのグリース潤滑のニーズに応えるため，保持器の新開発にも取り組んだ．これら技術的改良を組み合わせることで，これまで以上に高速回転時の昇温特性に優れた新シリーズ「ハイアビリー JFAST™」を開発した．

＊ $d_m n$ 値：転動体ピッチ円径（d_m）と回転速度（n）との積

3.1 アンギュラ玉軸受の低昇温化

従来品と開発品の比較を**表 1** に示す．ここでの従来品は，グリース潤滑で使用されるハイアビリーシリーズのアンギュラ玉軸受とする．従来品では，ポリアミド樹脂の保持器を転動体で案内する「転動体案内方式」が採用されており，転動体が入るポケット部の形状や隙間量の最適化などによってグリースのかくはん抵抗を抑えた設計がされていた [3]．しかし，高速回転領域では遠心力によって転動体と保持器との間に発生する摩擦力が増大し，高速化に限界があった．そこで，開発品には「外輪案内方式」の保持器を採用した．この案内方式では，保持器が外輪と一点で接触するため，転動体案内方式に比べて発熱箇所が少ない．また，案内隙間の最適化で保持器の動きを抑え，保持器と外輪との接触で生じる力を低減させた．さらに，保持器の軽量化で遠心力による接触力の低減を図るとともに，強度を低下させないため，保持器の材質に PEEK（ポリエーテルエーテルケトン）樹脂を採用した．これにより，従来品よりも保持器の強度，耐熱性および耐摩耗性が向上し，耐久性を向上させた．

表 1　アンギュラ玉軸受の従来品と開発品の比較
Comparison between conventional bearing and newly developed bearing（angular contact ball bearing）

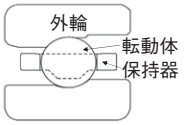
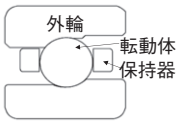
	従来品	開発品
軸受断面図		
案内方式	転動体案内方式	外輪案内方式
保持器材質	ポリアミド樹脂	PEEK 樹脂
使用可能 $d_m n$ 値	1 300 000	1 800 000

表2に高速・昇温性能評価の試験条件，**図2**に評価試験機の構造，**図3**に従来品と開発品の昇温試験結果を示す．従来品に対して，開発品は優れた低昇温特性を示すことが確認された．グリース寿命は温度に依存するため，低昇温化によって寿命が向上する．工作機械での使用において，十分なグリース寿命が得られる実使用領域を想定した場合，開発品では $d_m n$ 値 180 万までの高速回転領域で使用可能と判断できる．また，$d_m n$ 値 180 万での昇温は従来品に比べて約 30% 低減するため，グリース寿命は計算上で約 20% 向上する．開発品の保持器によって，工作機械主軸用アンギュラ玉軸受のグリース潤滑の適用可能領域を広げることができた．

表2　アンギュラ玉軸受の高速・昇温性能評価の試験条件
Test conditions of angular contact ball bearing

軸受寸法 mm（内径×外径×幅）	$\phi 70 \times \phi 110 \times 20$
潤滑方法	グリース
予圧	300 N（定圧予圧）
主軸姿勢	水平
冷却方法	自然放熱

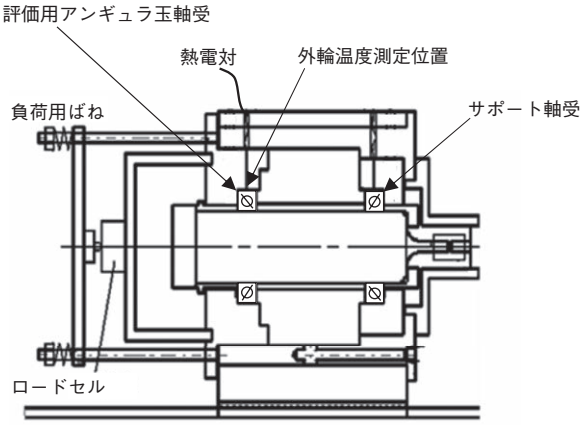


図2　アンギュラ玉軸受の評価試験機
Test apparatus for angular contact ball bearing

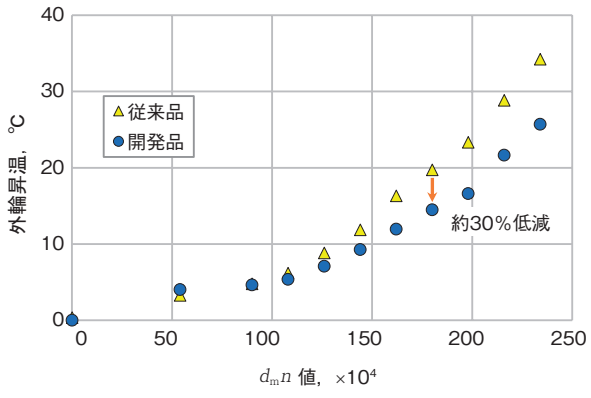


図3　アンギュラ玉軸受の昇温試験結果
Results of temperature rise testing of angular contact ball bearing

3.2　単列円筒ころ軸受の低昇温化

工作機械の主軸において，アンギュラ玉軸受と組み合わせて使用される円筒ころ軸受の低昇温化も不可欠である．従来は円筒ころ軸受の高速性能（使用可能 $d_m n$ 値）が低く，高速回転用の主軸は熱による軸の伸縮を吸収させるため，リア側を「アンギュラ玉軸受＋サブハウジング」の構造にする必要があった．これに対し，低昇温のハイアビリー JFAST 円筒ころ軸受の適用により，主軸構造の簡素化が可能となった（**図4**）．

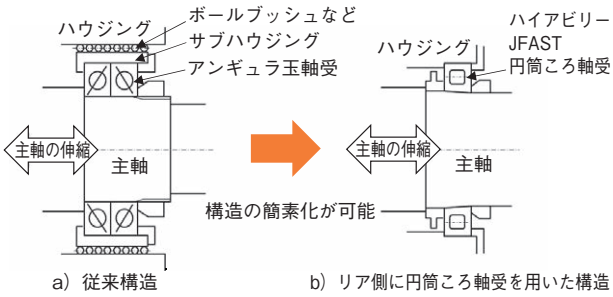
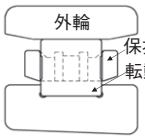
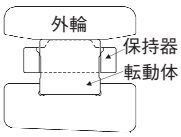


図4　ハイアビリー JFAST 円筒ころ軸受による効果
Effect of cylindrical roller bearing HIGHABILY-JFAST

従来品と開発品の比較を**表3**に示す．アンギュラ玉軸受と同様，グリース潤滑で使用される転動体案内方式のポリアミド樹脂保持器から構成される円筒ころ軸受を従来品とする．従来品の保持器は転動体案内方式であったが，より高速化を実現するため外輪案内方式を採用した．一般的に外輪案内方式の保持器は，保持器外径の両端部が「案内部」として設計される．しかしながら，この案内面形状では外輪の軌道中央部に滞留するグリースの排

表3　円筒ころ軸受の従来品と開発品の比較
Comparison between conventional bearing and newly developed bearing（cylindrical roller bearing）

	従来品	開発品
軸受断面図		
案内方式	転動体案内方式	外輪案内方式
保持器材質	ポリアミド樹脂	PEEK 樹脂
使用可能 $d_m n$ 値	900 000	1 500 000

出が阻害され，残留したグリースによるかくはん抵抗により，外輪軌道面において異常発熱が生じる原因となる．そこで，開発品は保持器の中央部を案内面とすることにより，高速回転領域での低昇温化を可能とした．また，保持器の材質を PEEK 樹脂にしたことで従来品と比較して，強度，耐熱性，耐摩耗性が向上し，高速回転時の案内面およびポケット面の耐久性が向上した．

表4に高速・昇温性能評価試験条件，**図5**に評価試験機の構造，**図6**に従来品と開発品の昇温試験結果を示す．$d_m n$ 値 100 万以上の高速回転領域において，開発品は従来品に対して軸受昇温が抑制されている．$d_m n$ 値 150 万の高速回転領域では昇温が約 50% 低減し，温度の影響を受けるグリース寿命は従来品より計算上で約 50% 向上する．開発品の保持器によって，実使用領域で $d_m n$ 値 150 万までの高速回転領域でグリース潤滑の円筒ころ軸受の適用が可能となった．

表4　円筒ころ軸受の高速・昇温性能評価試験条件
Test Conditions of cylindrical roller bearing

軸受寸法 mm （内径×外径×幅）	$\phi 100 \times \phi 150 \times 24$
潤滑方法	グリース
組付時ラジアル隙間	− 1 μm
主軸姿勢	水平
冷却方法	外筒冷却

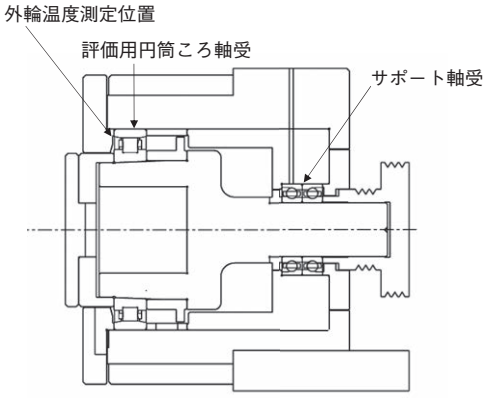


図5　円筒ころの軸受評価試験機
Test apparatus for cylindrical roller bearing

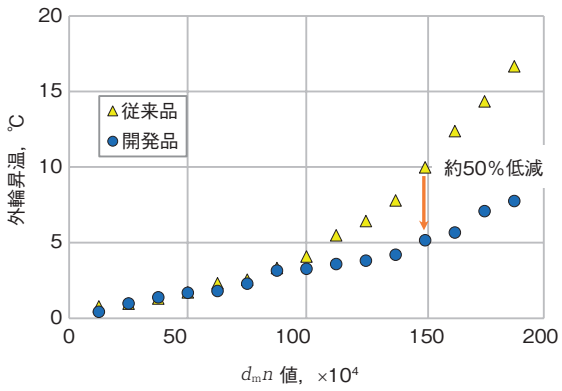


図6　円筒ころ軸受の昇温試験結果
Results of temperature rise testing of cylindrical roller bearing

3.3　保持器音の抑制

保持器の転動体案内方式から外輪案内方式への変更は，軸受低昇温化に対して有効であったが，背反として保持器と外輪との接触による「保持器音」とよばれる異音が発生することがある．当社は，この保持器音について挙動解析と考察を行っている[4]．外輪案内方式の保持器は，低速回転領域では外輪の案内面の一点に集中的に接触している．回転速度の増加に伴い，不規則に保持器が動き回る不安定な中間状態を経て，高速回転領域では外輪の案内面全体にわたって振れ回る状態になる．中間状態における保持器の不規則な挙動メカニズムは複雑であり，この状態で保持器音が発生する．軸受の回転中，保持器には以下の力が作用していると考えられる．

1）保持器の公転による遠心力
2）外輪との接触による摩擦力
3）転動体の自転による摩擦力
4）公転する転動体からの押し圧力

これらの力は，回転速度に応じて相対的な大きさが変化し，中間状態の回転速度領域では保持器の挙動が不安定となる．**図7**に示すように試験機の側面から保持器の挙動をカメラで撮影したところ，保持器音が確認された回転速度領域では，保持器が激しく振動している様子が観察された．保持器音の抑制には保持器の動きを制限し，不安定な挙動を抑える必要がある．そこで，保持器の案内諸元およびポケット諸元の異なる 5 種類のサンプルで保持器音を抑制できる条件を調査した．

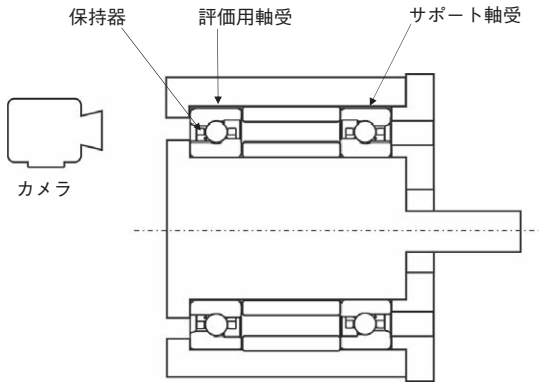


図7　保持器の挙動観察試験機
Test apparatus for observation of cage

保持器音は聴感で評価し，試験機から 0.3 m の距離で確認できれば音レベル「小」，1.0 m の距離で確認できれば音レベル「大」と判定した．保持器音の評価結果を**図8**に示す．サンプル D および E は回転速度を変化させても保持器音が確認されなかった．この結果から保持器音の発生しない案内諸元・ポケット諸元の傾向が明確となり，ハイアビリー JFAST には保持器音が発生しない保持器の仕様を設定した．

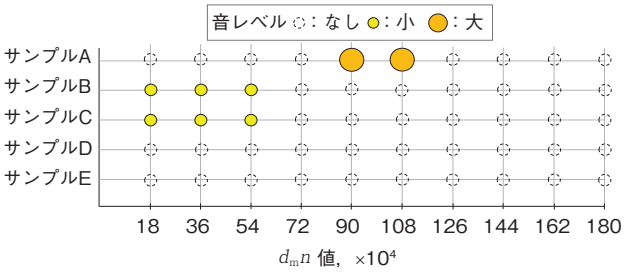


図8　保持器音の評価結果
Results of cage noise test

4. 今後の展望

カーボンニュートラルの必要性が高まる中，今後はさらにオイルエアー潤滑からグリース潤滑への移行が進むと予想される．その際，グリース潤滑の適用領域拡大のため，さらに軸受の低昇温化が必要になると考えられる．また，カーボンニュートラルだけでなく，近年は少子高齢化および働き方改革などから労働力不足が問題となり，メンテナンスフリーの需要が高まると予想される．このニーズに対応するため，軸受にはさらなるグリース寿命の向上が不可欠となると考えられる．当社では**図9**のように間座内にグリースたまりを設けることで封入可能なグリース量を増加させ，約 2 倍のグリース寿命の延長を実現した．

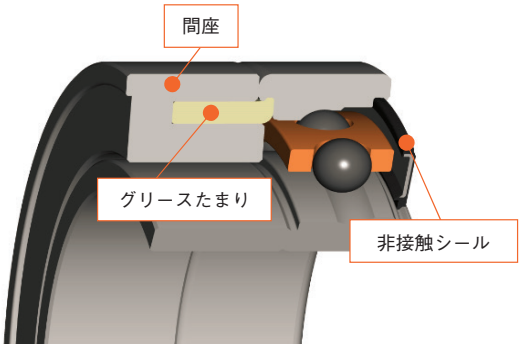


図9　グリースたまり付き間座イメージ図
Image of bearing spacer with grease pool

5. おわりに

ハイアビリー JFAST は，多くのお客様の困りごとをヒアリングしながら開発を進めてきた．工作機械を取り巻く環境が変化し，ニーズが多様化する中，軸受に求められる性能も大きく変化している．今後もジェイテクトグループの高い技術を結集してお客様のご要望に合った製品を開発し，ソリューションカンパニーとして世の中に貢献していきたい．

＊ハイアビリー，ハイアビリー JFAST は，ジェイテクトの登録商標です．

参考文献

1）内閣官房，経済産業省，内閣府，金融庁，総務省，外務省，文部科学省，農林水産省，国土交通省，環境省：2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（本文），経済産業省，2021-6-18, https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf（参照 2025.5）129-134.
2）下村利明：工作機械主軸用高速アンギュラ玉軸受ハイアビリー軸受の開発，Koyo Engineering Journal，No. 161（2002）39-46.
3）本條隼樹，挟間健太，濵ノ上道郎，大西　良：工作機械主軸用軸受の高機能化への取り組み，JTEKT ENGINEERING JOURNAL，No. 1016（2018）48-54.
4）多田誠二：高速回転下における保持器音および振動・挙動の解析，Koyo Engineering Journal，No. 160（2001）31-38.

筆　者


長瀬真也*
S. NAGASE


加賀長門*
N. KAGA


新舘佑規*
Y. SHINTATE

*　産機・軸受事業本部　産機ソリューション技術部