

工作機械用 転がり軸受の技術動向

Technical Trends of Rolling Bearings for Machine Tools

林 祐一郎 Y. HAYASHI

Precision and productivity of machined products directly depend on the performance of machine tool spindles for machining center. Therefore, the spindle is an important component and spindle bearings that have high performance and reliability are being required. This report presents recent trends of machine tools and their spindle bearings, including new technology of spindle bearings required for further development of machine tools.

Key Words: machine tool, spindle bearing, high speed, high rigidity, high ability

1. はじめに

最近の、高度に効率化された生産システムを支える工作機械に対するニーズは、年々高度化、複雑化している。これらの工作機械の回転部分には必ずと言っていいほど転がり軸受（以下、軸受と称す）が使用されており、軸受の性能がそのまま工作機械の性能となっているケースも少なくない。本報では、最近の工作機械の動向と、それらに用いられる軸受の技術動向について紹介する。

2. 工作機械の動向¹⁾

最近の工作機械には以下に示す動向が見られる。

① 5軸加工機・複合加工機の進歩

従来機に比べ制御軸数を増やした5軸加工機や複合加工機は、1990年代後半ごろから市場に出され始めたが、現在では広く一般に普及している。最近の機械では切削加工だけでなく、研削加工、計測、および工作物搬送ロボットも付加され、また、さらなる制御軸数の増加など、複合化がさらに進む傾向が見られる。

② 使いやすさの向上

高度な熟練技術を必要としない「誰にでも扱える機械」の開発に機械メーカーは注力している。たとえば、

- ・ 加工中の機械熱変位を自動補正する機能
- ・ ツールと工作物の干渉チェック機能
- ・ 稼働中の主軸状態を監視する機能（温度、振動、変位など）

など、機械が作業者をサポートするインテリジェント

化（知能化）が盛んに進められている。

③ 高精度化・微細加工の進歩

DDモータやリニアモータなど構成要素の機能や性能の向上により、サブミクロンオーダの位置決め精度が可能となっている。

④ 省スペース化

大ロット生産ラインを意識したコンパクト機の高機能化も著しい。機械幅をさらに抑えたり、メンテナンス性の向上が進んでいる。機械幅1000mmの5軸加工機も発表されている。

⑤ 環境負荷の低減

オイルエア潤滑のエア流量低減やオイルエア潤滑からグリース潤滑への切替えなど、環境を意識した工作機械が市場に多く出されている。

3. 主軸用軸受の技術動向

第2章で挙げた工作機械の動向をもとに軸受へのニーズを分析した結果を図1に示す。軸受へのこれらのニーズに対応した現在の技術、および今後の技術開発動向について以下に述べる。

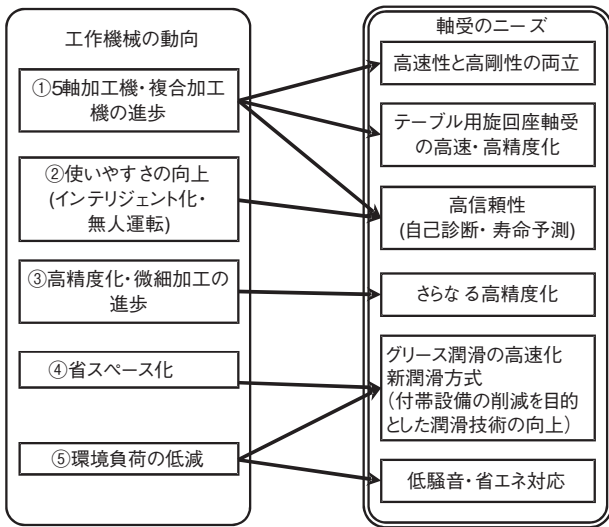


図1 工作機械と軸受へのニーズ
Needs for machine tools and bearings

3.1 高速性と高剛性の両立

工作機械の複合化が進む背景には、多品種少量生産、変種変量生産、および工程集約の傾向が一層高まっていることがある。複数の機械による複数の工作物の加工を一台の工作機械に集約することや、粗加工や仕上げ加工などの多工程を少工程に集約することは、生産性向上や省スペースに貢献できる。これに伴い工作機械の主軸は、低速回転重切削から高速回転軽切削まで広範囲の加工が必要となり、軸受性能として高速性と高剛性の両立が要求される。高速性については、軸受単体の dmn 値^{*} ¹ はアンギュラ玉軸受で 400 ~ 500 万、円筒ころ軸受で 200 ~ 300 万を実現しており、工作機械の要求にこたえている。しかし、高速性を重視する場合には剛性の面で不利になる傾向がある。そのため主軸の設計にあたっては、高速性もしくは高剛性のいずれかを重視せざるを得ないことが多い。このことから高速性を維持し、重切削側で必要な剛性をも兼ね備えた軸受の開発が今後の課題である。

※ 1 dmn 値：軸受の P.C.D. (mm) × 回転速度 (min^{-1})

3.2 新潤滑方式

潤滑はオイル潤滑とグリース潤滑に大きく区分される。一般に高速性が重視される場合にはオイル潤滑が採用され、比較的低速回転でコストや取扱性および環境負荷の低減が重視される場合にはグリース潤滑が採用される。しかし工作機械の進歩に伴い、上記のいずれの要求事項をも満足する潤滑方式が望まれるようになってきている。

軸受メーカーとしては、オイル潤滑を改良し高速性を維持したまま省エネルギーや環境性を向上させることや、グリース潤滑を改良し、省エネルギーや環境性を維持したまま高速性を向上させる技術の開発に取り組んでいる。すなわち、潤滑技術は、軸受の性能に大きく影響する要素であり、今後さらに開発すべき課題が多いと考える。

3.3 軸受の設計²⁾

当社では工作機械主軸用に、高速性、高剛性、環境負荷の低減など種々の要求性能に応じて、R,C,D,F の 4 タイプから成るハイアビリーアンギュラ玉軸受シリーズ^{*} (図2) を提供している。表1 にシリーズのラインナップを示す。R タイプは玉径を小さくし玉数を多くして剛性を重視した設計、C タイプは玉径を大きくしセラミックスの玉を使用して寿命を重視した設計、D タイプはオイルの供給方法を工夫して高速性を重視した設計、F タイプは遠心力を考慮し D タイプ以上に高速可能な設計としている。顧客が使用用途に応じて最適なタイプを選択可能で、各軸受とも主寸法を ISO 規格に準拠させており、軸やハウジングの最小限の設計変更で従来品からの置換えを可能とし、既存機種のパフォーマンス向上にも対応可能である。



図2 ハイアビリー軸受シリーズ
High Ability Angular Contact Ball Bearings

表 1 ハイアビリーアングュラ玉軸受の形式
High Ability Bearing types and principal applications

適用	形式	仕様		
		軸受寸法系列	接触角	転動体材料
高速・高剛性形	Rタイプ	10	15°	鋼 または セラミックス
		19	20° 30°	
高速・高定格荷重形	Cタイプ	10	15°	セラミックス
		19	20°	
超高速・低騒音形 オイルエア潤滑用	Dタイプ	10	20°	セラミックス
極超高速形 オイルエア潤滑用	Fタイプ	10 19	20°	セラミックス

ハイアビリー軸受の性能を従来の高速タイプ軸受(ACHシリーズ)と比較した結果の一例を以下に紹介する。

図3はグリース潤滑におけるRタイプ軸受(玉材料=軸受鋼)の高速限界と外輪温度上昇(室温との差)を評価した結果である。図3より、Rタイプ軸受は高速限界が従来軸受の約1.3倍に向上し、温度上昇を20~30%低減できることが確認できた。

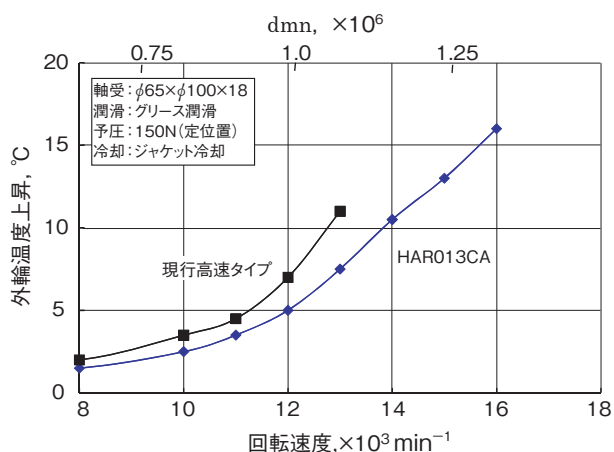


図 3 Rタイプ軸受(鋼製玉)の昇温特性

Temperature Increase Characteristics of R-type(steel ball) Bearings

玉にセラミックスを採用したRタイプ軸受、およびCタイプ軸受においても、従来軸受に対して同様の傾向を確認済みであり、使用される回転速度に応じて剛性を重視した設計のRタイプと負荷能力を重視した設計のCタイプを選択することが可能である。

ハイアビリー軸受の高速性向上と温度上昇低減効果によって、高速回転主軸へも剛性の優れた定位置予圧の採用が可能となった。

図4はグリース潤滑条件下における玉にセラミックスを使用したRタイプ軸受とオイルエア潤滑条件下における従来軸受の昇温特性の比較試験結果である。図4より、ハイアビリー軸受は従来軸受ではオイルエア潤滑が必要であった領域をグリース潤滑で使用可能であることが確認でき、オイル飛散防止による環境負荷低減、潤滑装置廃止によるコスト低減などに対しても効果がある。Rタイプに関しては、適正量のグリースを封入済みのシール付タイプもラインナップしている(図5)。

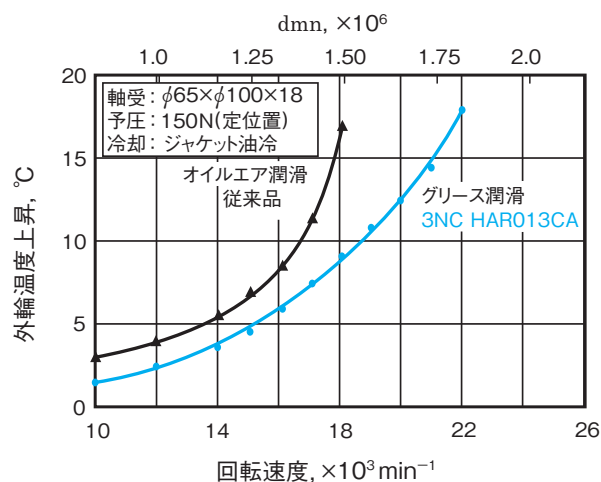


図 4 Rタイプ軸受(セラミック玉)の昇温特性

Temperature Increase Characteristics of R-type(ceramic ball) Bearings



図 5 ハイアビリーシール付アングュラ玉軸受

High Ability Angular Contact Ball Bearings with seals

これらのR,Cタイプの軸受は従来軸受と同様にグリース潤滑またはオイルエア潤滑の両方の潤滑方法で使用できる標準タイプであるが、さらに高速回転で使用できるオイルエア潤滑専用タイプとして図6に示すD,Fの2タイプがある。これらの軸受は高速回転時に発生するエアカーテンの影響を考慮して開発した軸受形状を採用している。

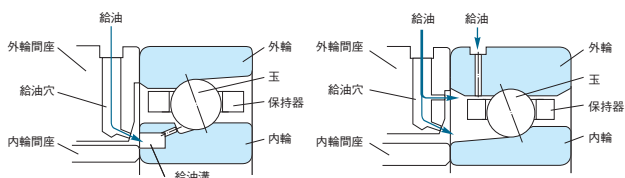


図6 D,Fタイプ
D and F-Type

図7はDタイプ軸受についてRタイプ軸受（玉材質＝セラミックス）との比較試験の結果である。図7よりDタイプはRタイプ軸受の約1.1倍の高速性と5～10%の温度上昇低減が確認できた。

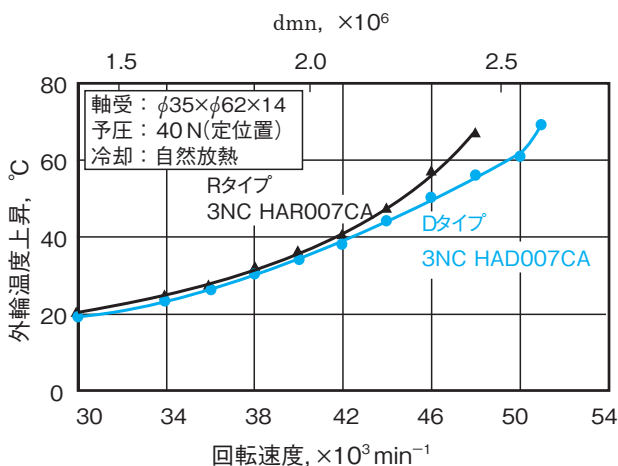


図7 Dタイプ軸受の昇温特性

Temperature Increase Characteristics of D-type Bearings

Dタイプ軸受は軸受内輪側面に設けた溝から軌道部分へオイルエアを直接供給する構造であるため、エアカーテンの影響を受けにくく、従来のオイルエア潤滑に比べてエア流量を20%削減することが可能である。さらに、図8に示す通り、玉による風切音も低減可能であり、これらの優れた特徴によって省エネルギーや低騒音化に大きく貢献ができる。Fタイプ軸受は従来の軸受側面からの給油に加えて、外輪に設けた給油ノズルから保持器案内面にオイルエアを供給する超高速回転用軸受である。すべり接触である保持器案内面では急加減速時や超高速回転時には保持器の挙動が不安定になりがちで

あった。しかし、外輪ノズルからオイルエアを供給することで保持器の挙動を安定させ、図9に示す通り従来はジェット潤滑など多量油潤滑下でなければ対応できなかったdmn値330万を、微量油潤滑であるオイルエア潤滑で実現でき、優れた高速性能が確認できた。急加減速運転に対しても従来軸受では実現できなかったdmn値280万/3sを10⁵回繰り返す試験をクリアし、優れた急加減速安定性が確認できた。これらのハイアビリー軸受は工作機械を中心とした高速用途に幅広く使用されている。

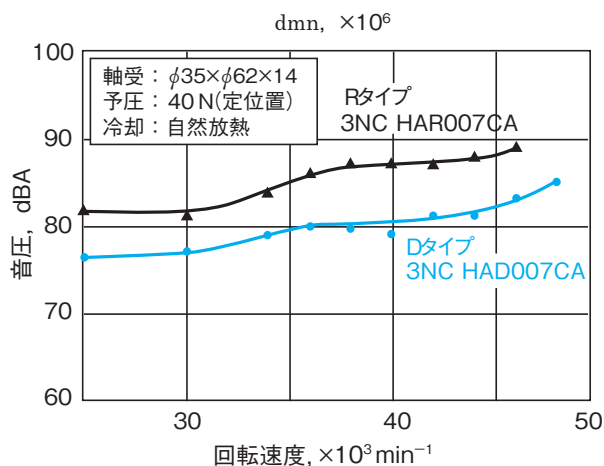


図8 RタイプとDタイプの騒音比較
Comparison of noise by R and D-Type

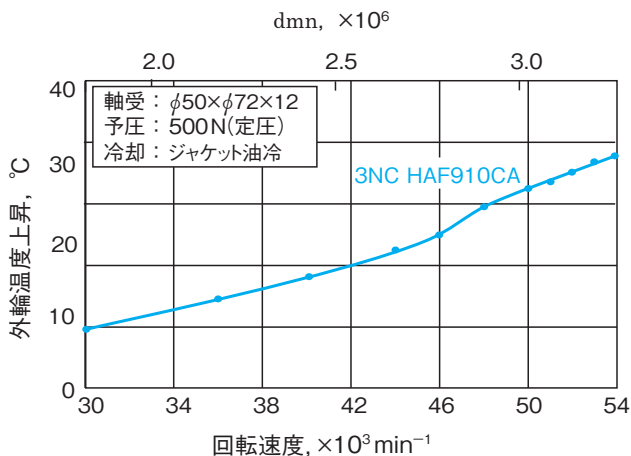


図9 Fタイプ軸受の昇温特性

Temperature Increase Characteristics of F-type Bearings

また円筒ころタイプについても、最近、ハイアビリー円筒ころ軸受の新タイプ（以下、新ハイアビリー円筒ころ軸受と称す）を開発した。図10はオイルエア潤滑における新ハイアビリー円筒ころ軸受（ころ材料＝軸受鋼）の高速限界と外輪温度上昇を評価した結果である。

現行ハイアビリー円筒ころ軸受と比較し、約 1.5 倍の高速性と約 15% の温度上昇の低減が確認できた。円筒ころ軸受の高速化による利点は主軸の構造を簡素化できることである。通常、主軸のリア側支持構造は温度変化による軸の伸縮を吸収する役割が必要である。円筒ころ軸受はこの役割に適しているが、これまでは円筒ころ軸受の高速性能が十分で無かったため、高速主軸においてはリア側支持に「アンギュラ玉軸受+サブハウジング」の構造を採用することが一般的であった。しかし今回開発した新ハイアビリー円筒ころ軸受は高速主軸にも対応できるため、軸受回りの構造を大幅に簡素化することが可能となる (図 11)。

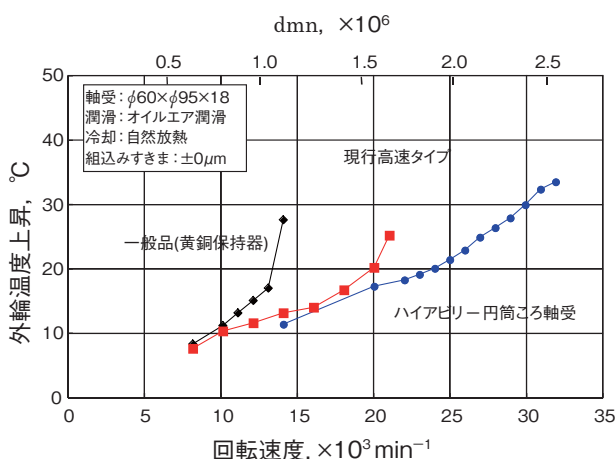


図 10 新ハイアビリー円筒ころ軸受の昇温特性
Temperature Increase Characteristics of New High Ability Cylindrical Roller Bearings

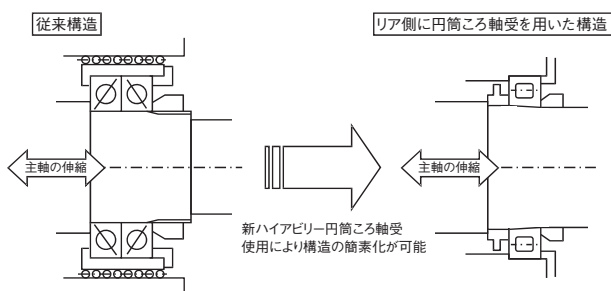


図 11 新ハイアビリー円筒ころ軸受による効果
Effect of New High Ability Cylindrical Roller Bearings

現行のハイアビリー円筒ころ軸受では、高速回転時に、保持器の破損が生じて高速性には限界があったが、これを改善することで高速性能をさらに向上させた。まず保持器材料には、従来のポリアミド樹脂に比べより高速回転に適した軽量・高強度の樹脂を採用し強度を向上させた。さらに高速回転時にネックとなる保持器ところの接触部において、保持器ポケット内のころ当たり形状を最

適化して、摩擦低減および低温度上昇を実現した。また軌道輪材料には従来品同様、入手性の良い軸受鋼を採用し、高速回転に最適な内部設計により高速性能を向上させた。

*ハイアビリーは(株)ジェイテクトの登録商標です。

3.4 高信頼性

工作機械の信頼性向上のためには、軸受の信頼性の向上が必須である。そのためには軸受の温度や振動の検知によって、寿命の予測技術を確認させることが不可欠となってきている。さらに、軸受にかかる負荷を検知できれば、加工状態に応じた最適な予圧や潤滑を自己制御でき、その結果、高速性と高剛性を兼ね備えた幅広い加工領域に対応できる軸受の実現が可能となる。その関連技術として、回転速度に応じて最適予圧を軸受に付与する当社独自の機構を開発し、当社 FH1250SX 横形マシンングセンタに搭載している。この機構により低速から高速まで十分な剛性を有し、高出力ビルトインモータと合わせて高負荷の加工を高効率に行なうことができる。図 12 は軸受予圧に従来の定位置予圧方式を採用した場合と本機構を用いた場合の主軸剛性の比較結果を示している。従来の定位置予圧方式においては、回転速度の増加に伴い主軸剛性が増加していたが、本機構を用いた場合は、特に高いトルクが発生する低速回転域の主軸剛性が飛躍的に増加しており、高負荷の加工に適した予圧方式であることが分かる。³⁾

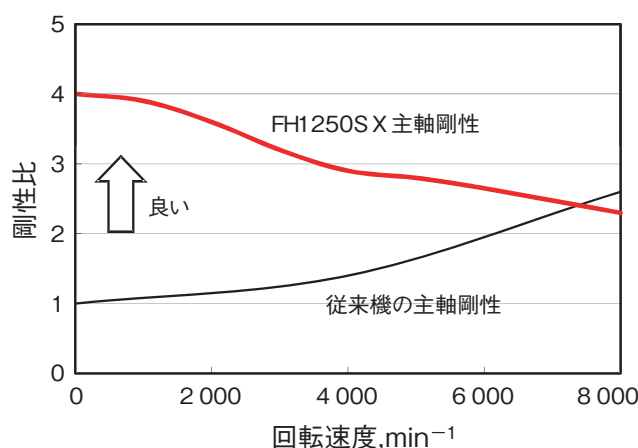


図 12 主軸剛性
Rigidity of spindle

4. おわりに

JTEKT となって工作機械事業と軸受事業が一緒になった今、関係部署との連携をとりながら基盤技術の深耕を進めるとともに、常に時代を先取りした商品開発に取り組んでいきたい。そして工作機械の発展に貢献できれば幸いである。

参考文献

- 1) 林祐一郎：月刊トライボロジー 4月号, (2008) 22.
- 2) 福田晋治：機械と工具, Vol.48, (2004) 22.
- 3) 今西耕造：JTEKT Engineering Journal, no.1004 (2007) 105.

筆者



林祐一郎*

Y. HAYASHI

*軸受・駆動事業本部 産業機器技術部