

工作機械の動向と工作機械主軸用軸受の取組み

Technical Trends of Machine Tools and Spindle Bearings

東本 修 O. HIGASHIMOTO

Since precision and productivity of machined products directly depend on performance of a machine tool spindle such for machining center, the spindle is especially an important component. So, spindle bearings are always required to have high performance and reliability. Here recent trends of machine tools and their spindle bearings are presented. And then, new technology of spindle bearings required for further development of machine tools is also presented.

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

1. はじめに

工作機械は「機械を作る機械」という意味で“MOTHER MACHINE”と呼ばれ、産業の根幹を支える重要な役割を担っている。工作機械の性能向上のためには工作機械を構成する各部品およびそれらのユニットの性能向上が必須である。とりわけ加工精度や加工効率に直接影響を及ぼす主軸の高性能化は重要で、その主軸に用いられている主軸用軸受の性能向上は非常に重要である。

本報では、現在までの工作機械の動向とその発展に貢献した主軸用軸受の技術、および今後の工作機械の発展に必要とされる主軸用軸受の技術について述べる。

2. 工作機械の動向と主軸用軸受の技術の変遷

2.1 マシニングセンタ普及前の工作機械と主軸用軸受の技術

図1に工作機械の動向と主軸用軸受の技術の変遷を示す。マシニングセンタが普及する1980年代以前の工作機械の市場においては、旋盤・フライス盤を代表とする低速域で重切削を行う工作機械が大半を占めており、高速域での加工は内面研削などの一部の用途に限られていた。高速性がそれほど必要とされない旋盤・フライス盤の主軸においては、剛性を重視した軸受配列が数多く採用された。一方、加工時の抵抗が小さい内面研削盤の主軸においては、剛性はそれほど必要とされないため高速性を重視した軸受配列が数多く採用された。

このように、マシニングセンタ普及前の工作機械の主軸への主な要求性能は、「高剛性」または「高速性」（2極化している）であり、適切な軸受形式や予圧方式を選定することにより標準軸受で対応することができた。

2.2 マシニングセンタと主軸用軸受の技術

マシニングセンタは数値制御された工作機械であり、加工の内容に応じて工具を自動交換し、さまざまな加工を一台で行うことができる。そのため、マシニングセンタには低速域における重切削から高速域における軽切削まで幅広い加工が要求され、主軸への要求性能として「高剛性」と「高速性」の両立が不可欠となった。しかし、図2に示すように「高剛性」と「高速性」は相反する要求性能であるため、標準軸受での対応が困難な場合がでてきた。

「高剛性」と「高速性」の両立のためには、「高剛性の軸受の高速化」または「高速性に優れた軸受の高剛性化」が必要になるが、高剛性の軸受は、一般的に軌道と転動体の接触形態などにより軸受内部での摩擦損失が大きくなる傾向があり、高速回転には適していない。

一方、高速性に優れたアンギュラ玉軸受は、軌道と転動体が点接触であるため軸受単体での剛性は低いが、複数列を組み合わせ定位置予圧で使用するることによって剛性を高めることができる。

しかし定位置予圧で軸受を使用すると、運転中の発熱による熱膨張や転動体に作用する遠心力に起因して予圧荷重が増加するため、高速回転時には焼損などの不具合が発生する場合があった。

	1970年代	1980年代	1990年代	2000年代
工作機械の性能の進化	マシニングセンタ普及前	マシニングセンタ普及期	マシニングセンタ普及後	環境対応 高精度加工 高効率加工
主軸への主要性能	「高剛性」または「高速性」(2極化している) 旋盤・フライス盤 ⇒高剛性重視 内面研削盤 ⇒高速性重視	「高剛性」と「高速性」の両立 「低速域における重切削」から 「高速域における軽切削」まで 幅広い加工への対応が必要	剛性を維持したままでの 「高速性のさらなる向上」, 「急加減速性能の向上」 さらなる高効率加工への 対応が必要 オイル飛散の抑制・低騒音など 環境負荷低減への対応が必要	
主な工作機械と代表的な軸受配列	複列円筒ころ+ 複式スラストアンギュラ玉 +複列円筒ころ 旋盤・フライス盤 アンギュラ玉のみ (定圧予圧) 内面研削盤	アンギュラ玉(定位置予圧) +単列円筒ころ マシニングセンタ	アンギュラ玉(定位置予圧) +単列円筒ころ (ビルトインモータ仕様) 高速マシニングセンタ・複合加工機	
主な主軸用軸受技術	オイルエア潤滑装置の開発 セラミック軸受の開発	高速アンギュラ玉軸受 (ACH軸受)の開発	高性能アンギュラ玉軸受 (ハイアビリー軸受)の開発	

図1 工作機械の動向と主軸用軸受の技術の変遷
Technical trends of spindle bearings for machine tools

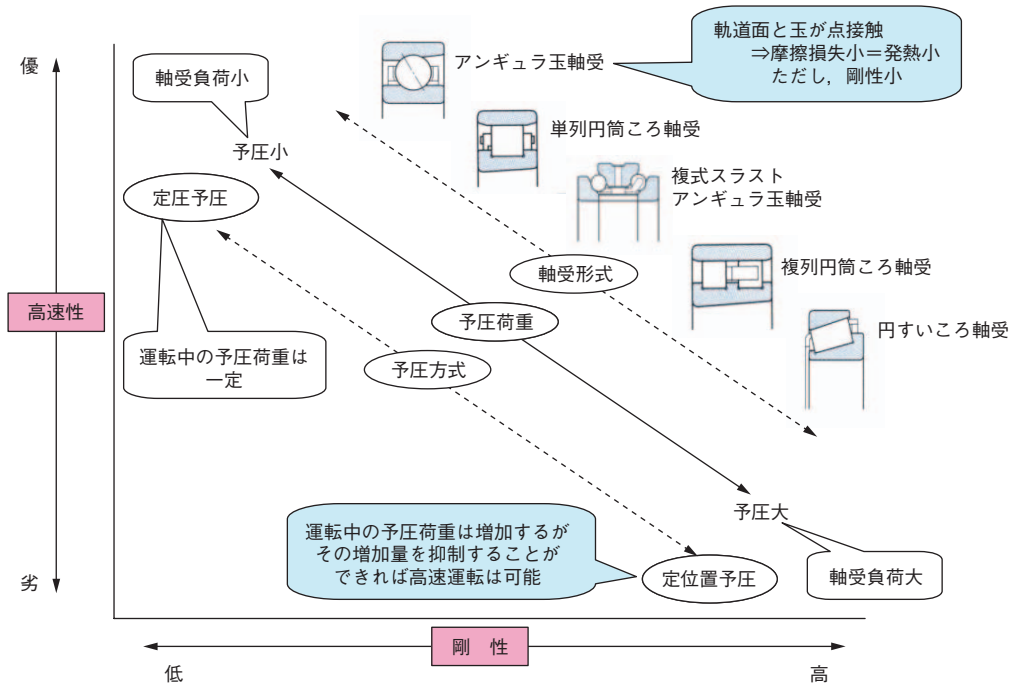


図2 主軸用軸受における高剛性と高速性の関係
Rigidity and speed for spindle bearings

そのため、定位置予圧での高速化においては、運転中の予圧荷重の増加を抑制することが不可欠であり、対策としては熱膨張量の減少や転動体に作用する遠心力の軽減が有効である。

1984年に開発した「セラミック軸受（転動体にセラミックスを採用）」は、セラミックスの特性（表1参照¹⁾）である小さな線膨張係数と密度によって、転動体の熱膨張量を減少させるとともに転動体に作用する遠心力も軽減し、予圧荷重の増加の抑制に貢献した。さらに、セラミックスは縦弾性係数が大きく、軸受単体剛性の向上にも寄与した。（当社比で約1.1倍に向上）

また、1985年に開発した「高速アンギュラ玉軸受（ACH軸受）」は、従来軸受より小さな径の転動体を採用して遠心力を軽減し、予圧荷重の増加の抑制に貢献した。さらに、径が小さいために数多くの転動体を配置することが可能になり、軸受単体剛性の向上にも寄与した。（当社比で約1.1倍に向上）

セラミックスおよび「高速アンギュラ玉軸受（ACH軸受）」の採用は、オイルエア潤滑の普及と併せて定位置予圧での高速化を大幅に進展させ、マシニングセンタ主軸の「高剛性」と「高速性」の両立を実現させた。

表1 セラミックスと軸受鋼の特性比較

Comparison of properties between ceramics and bearing steel

項目	単位	セラミックス	軸受鋼	セラミックスの効果
耐熱性	℃	800	180	高温環境に対応可能
密度	g/cm ³	3.2	7.8	遠心力の軽減
線膨張係数	1/℃	3.2 × 10 ⁻⁶	12.5 × 10 ⁻⁶	熱膨張量の減少
ピッカース硬さ	HV	1 300 ~ 2 000	700 ~ 800	
縦弾性係数	GPa	320	208	剛性の向上
ポアソン比	-	0.29	0.3	
熱伝導率	W/m·K	29.3	41.9 ~ 50.2	
耐食性	-	良	不良	
磁性	-	非磁性体	強磁性体	
導電性	-	絶縁体	導電体	電食防止
素材の結合形態	-	共有結合	金属結合	耐焼付き性向上

2.3 マシニングセンタ普及後の工作機械と主軸用軸受の技術

生産性の向上、生産コストの低減といった高能率加工に対する要求はさらに高まり、主軸用軸受への要求性能としては、加工時間を短縮する「高速性のさらなる向上」はもちろんのこと、非加工時間を短縮する「急加減速性能の向上」も不可欠となった。

また、主軸のビルトインモータ化の進行によって発熱量が増大し、そのためハウジングを冷却することが行われた。このことは内外輪の温度差の拡大による予圧過大を引き起こすため、外的な熱要因の影響を受けにくい軸受の開発も必要とされた。

さらに、オイル飛散の抑制・低騒音・省エネなどの環境負荷低減も重要視されるようになった。

このような状況に対応するために開発されたのがハイアビリー軸受である²⁾。ハイアビリー軸受は、軸受の性能に大きな影響を及ぼす、玉径、軌道溝半径、接触角などの軸受内部諸元を最適化した高性能アンギュラ玉軸受である。（高速限界が、当社比で約1.3倍に向上）

図3に示す高速試験結果より、グリース潤滑時のハイアビリー軸受は、オイルエア潤滑時のACH軸受（従来型高速アンギュラ玉軸受）と比較して同等以上の高速性能を有している。このように高性能なハイアビリー軸受は、オイルエア潤滑仕様の主軸をグリース潤滑仕様に置き換えることを可能にし、オイル飛散の抑制・低騒音などの環境負荷低減のみならず、潤滑装置の廃止・主軸構造の簡素化による低コスト化に対しても効果を発揮した。

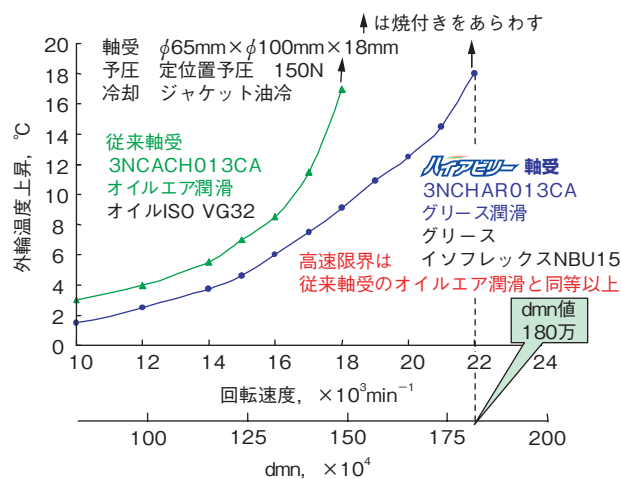


図3 ハイアビリー軸受の高速試験結果
Result of high speed test for High Ability Bearing

3. これからの軸受技術

日本国際工作機械見本市（JIMTOF）における工作機械メーカー各社の出展内容にも見られるように、近年の工作機械市場においては、複合加工機の増加や機械の小型化が進展している。

代表的な複合加工機である複合旋盤は、旋盤の機能に加えて切削を行うための主軸（以下、ミル軸と呼ぶ）を

搭載した工作機械であり、複雑な形状の工作物でも着脱することなく加工することができるため、生産リードタイムの短縮に大きな効果を発揮している。ミル軸は限られたスペースの中であらゆる角度に姿勢を変えるため、コンパクトかつシンプル（潤滑用の配管が無いなど）であることが望ましい。

一方、機械の小型化は、単位面積あたりの生産性の向上に貢献しており、その主軸もまたコンパクトかつシンプルであることが望ましい。

このような主軸の実現のためには、付帯潤滑装置および潤滑用の配管が不要であることから、グリース潤滑の採用が有効であり、併せて低コストやオイル飛散の抑制・低騒音・省エネなどの環境負荷低減の効果も期待できる。

ハイアビリー軸受の開発によって、グリース潤滑での対応可能領域は大幅に拡大された。しかし、グリース自身に寿命が存在するために、補給を行うことなく長時間の高速運転を続けることは困難である。

このような背景から、現在当社では、図4に示すような潤滑装置一式を軸受部に内蔵したオールインワン軸受の開発に注力して取り組んでいる。極微量の潤滑油が必要な時、必要な箇所にだけ供給することができるため、高速主軸の潤滑方法の主流であるオイルエア潤滑と比較して、下記に示す効果が期待できる。

- ・主軸構造の簡素化（潤滑用の配管が不要）
- ・機械の小型化（外部潤滑装置が不要）
- ・低コスト（外部潤滑装置および配管のための穴加工が不要）
- ・オイル飛散の抑制（供給する潤滑油が極微量）
- ・低騒音（エアを使用しない）
- ・省エネ（エアを使用しない）

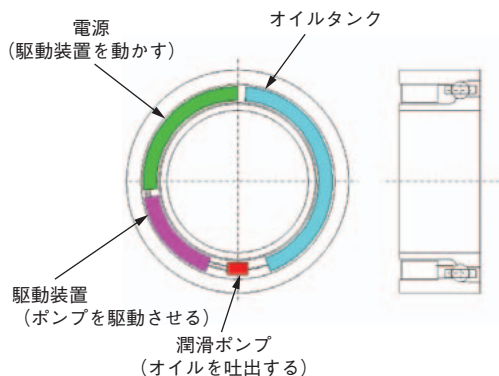


図4 オールインワン軸受の概要
Scheme of All-in-One Bearing

4. おわりに

主軸用軸受の技術と工作機械は密接に関わり合いながら発展してきており、JTEKTの発足に伴って、基盤技術としてのさらなる深耕が求められる。

今後は、実機での評価結果などの「生きたデータ」を開発中の軸受へより効果的にフィードバックして、開発の指針をより明確にするとともに開発期間の短縮を図りながら、軸受単体の技術のみならず、ユニット視点でとらえた解析技術（例：軸受精度および取付け条件とワーク精度の相関関係の解明など）の向上にも尽力し、工作機械用軸受の技術のさらなる発展に貢献できるよう努力していきたい。

また将来的には、センサ技術などを駆使して運転中の軸受をリアルタイムでモニタリングし、予圧荷重や潤滑条件を運転条件に合わせて最適な状態に自己調整できる主軸ユニットなど、夢のある製品を開発していきたい。

参考文献

- 1) 光洋精工株式会社：工作機械用精密転がり軸受，CAT. no. 297-1(2002).
- 2) 下村利明：KOYO Engineering Journal, no. 161(2002) 39.

筆者



東本 修*

O. HIGASHIMOTO

* 軸受事業本部 産業機器技術部