

工作機械主軸の技術開発と今後の課題

中村晋哉*

1. はじめに

工作機械用主軸は1975年以降のマシニングセンタ開発によって切削効率の向上をめざして、高速化の要求が急激に高まり、高速化技術を中心に発展してきた。

その後、高精度化や高剛性化、信頼性向上など幅広い要求が出てきている。また最近では、環境対応や省エネルギー、5軸加工機や複合加工機への対応、インテリジェント化などのニーズも出てきている。ここでは、これまでの主軸高速化の変遷や今後の技術課題を述べると共に、最新の主軸技術について紹介する。

2. 主軸の高速化

2.1 主軸高速化の推移

図1は、主軸高速化の変遷を示したものであり、主軸軸受のdmm値は年代が進むと共に、切削ニーズに対応して飛躍的に増加してきている。高速化の進展のキーとなる技術としては、グリース潤滑やオイルエア潤滑、さらにジェット潤滑などの潤滑方法の改良やセラミック玉など軸受（転動体・内外輪・保持器）への新材料の適用、設計手法や解析技術の高度化があげら

れる。

図2は、1982年以降の日本国際工作機械見本市での高速主軸（10000 min⁻¹以上）出展状況の調査結果である。

JIMTOF2010でも、ここ数年、高速化の進展は足踏み状態であり、かつ最高回転数は12000min⁻¹前後、および20000min⁻¹前後に集約されている。

機械全体の特徴としては、マシニングセンタで言えば、主軸（工具側）の旋回機構やテーブル（工作物側）の旋回機構を取り入れた5軸加工機の出展が増加しており、航空機部品や金型の加工用として使用される場合には、高効率加工を達成するため、高速主軸が搭載されている。また、複合旋盤の場合はミーリング主軸での高速化傾向が顕著である。また、主軸内部に駆動用モータを内蔵した、いわゆるモータビルトイン主軸は、高速主軸には不可欠な技術として常用化されており、超高速化の達成には、ロータ・ステータのさらなる高速化・高出力化・小型化が望まれている。また最近では、環境・省エネルギー対応として、さらにグリース潤滑の高速化・信頼性向上も要求されつつある。

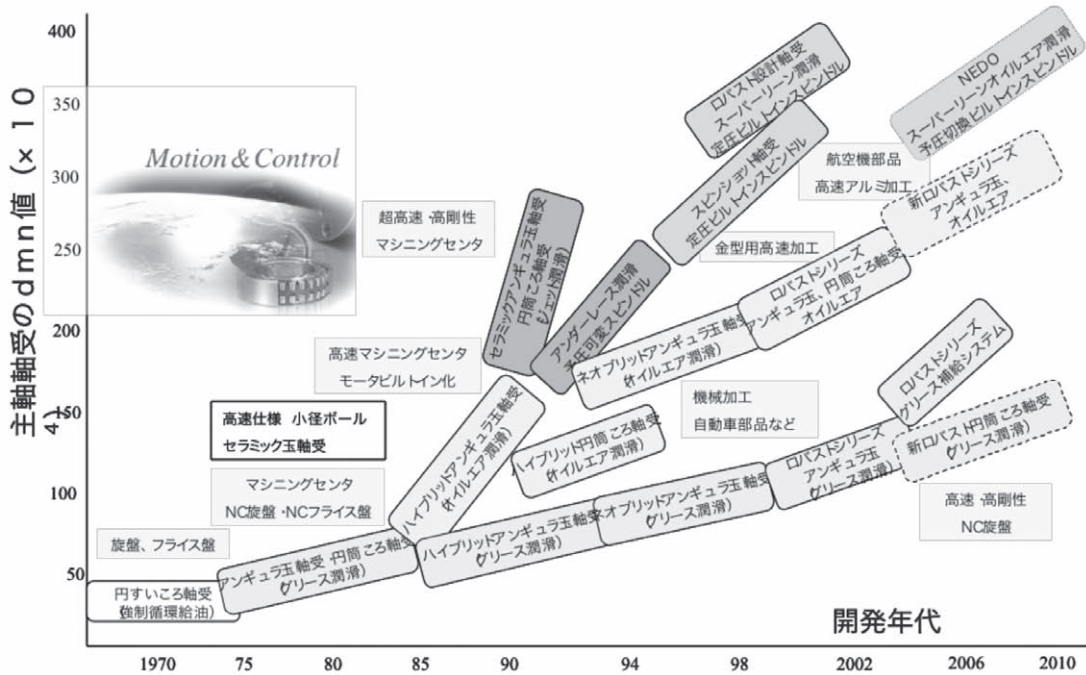


図1 工作機械主軸の高速化への推移

* 日本精工(株) (〒141-8560 東京都品川区大崎1-6-3 日精ビル)

2.2 高速軸受技術

最近の工作機械の高速主軸においては、回転部のイナーシャを小さくするために、コンパクトで高出力のロータを内蔵したモータビルトイン主軸が採用されることが多くなってきている。しかし、こういった主軸構造の場合、急激な回転変動過渡期において、周囲環境変化（モータの発熱変化・外筒冷却等）が著しくなり、主軸用軸受は過酷な熱変動条件下にさらされる。軸受には、このような環境条件下でも焼付きにくい特性をもつことが最も重要であり、温度ロバスト（熱的負荷変動に対して、軸受自体の発熱量変化が少ない、すなわち、熱的外乱に対して、温度的に鈍感な特性を持つ）に富む性能を有することが必要である。これらの高速主軸には、上述の要求に応えるべく、以下のように軸受内部設計の最適化を図った超高速軸受「ロバ

ストシリーズ」が採用されている。²⁾ (図3参照)

さまざまな切削条件や回転変動を伴う加工条件下では、主軸内部の温度変化は著しく、それに伴う軸受内外輪温度差により、軸受内部すきまが減少し、玉と内外輪みぞとの接触角は急激に変化すると共に、内部予圧が増大し、内外輪みぞと玉間のころがり接触部のPV値（P：接触面圧、V：すべり速度）は増加する。ロバスト軸受は、玉径・内外輪みぞ曲率・接触角等の影響ファクターを変数としたコンピュータによる解析結果をもとに、上述のような条件下で、PV値の変化を最小限に抑えた内部仕様になっている。また、内外輪材として特殊浸炭窒化材（SHX材）の適用や耐熱性・耐磨耗性にすぐれた特殊形状の高強度樹脂保持器の採用によって、さらに耐焼付性を向上させている。また、軸受の形状を最適化し、高速運転条件下においても、

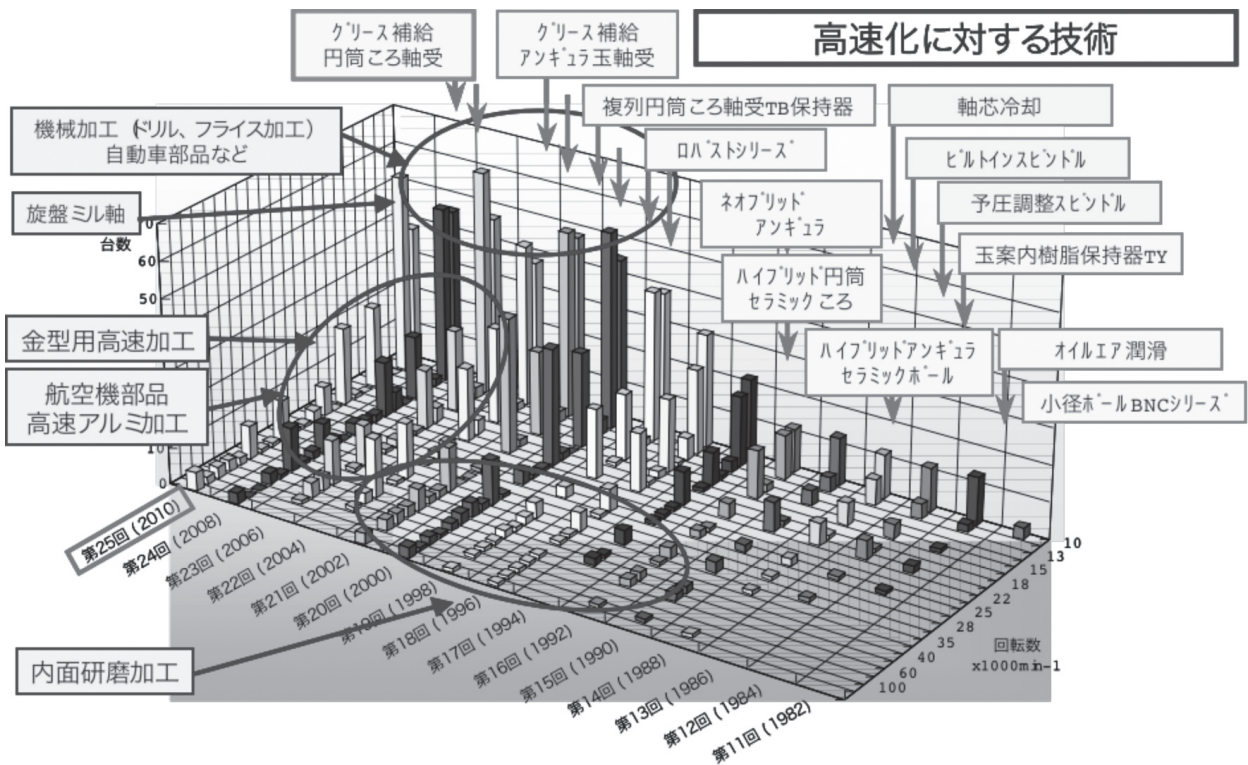
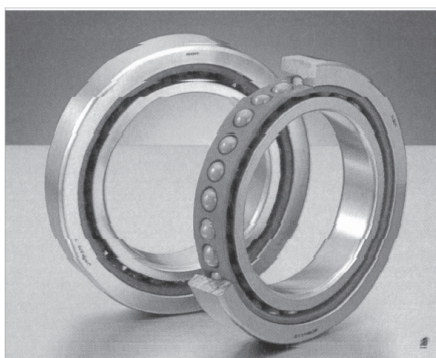


図2 JIMTOF 高速主軸出展状況 (10000 min⁻¹以上) NSK調査



超高速アンギュラ玉軸受



スピッシュットII軸受



超高速単列円筒ころ軸受

図3 各種ロバストシリーズの例

潤滑油が軸受内部に効率よく補給されるスピンショット軸受も開発されている。

3. 主軸の技術課題

今後の日本における工作機械に要求される技術を図4に示す。まず、工作機械に要求される技術、次に主軸、軸受に要求される技術としてまとめてみた。従来は、高速・高精度化や高剛性化などの開発が中心であったが、最近では耐久性・信頼性向上が要求され、特にここ数年は、環境対応・省エネルギー、メンテナンスフリーのためのグリース潤滑の高性能化が要求されている。また、知能化のためのセンサを応用したインテリジェント化・スマート化の要求が高まっている。

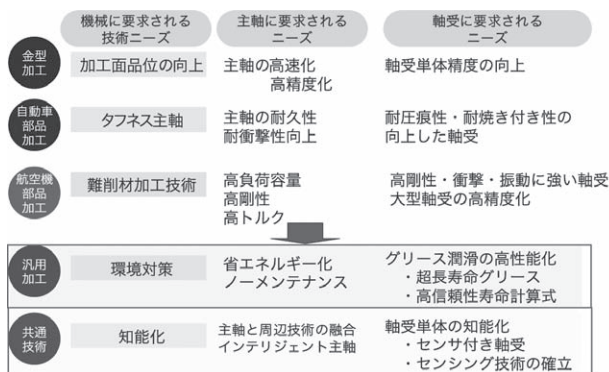


図4 今後の日本工作機械に要求される技術

3.1 高速・高精度化への対応

工作機械主軸用として一般的に採用されている潤滑方法としては、グリース潤滑・オイルエア潤滑・オイルミスト潤滑等があげられる。潤滑油を供給または保持する方法、および量の違いによって、それぞれ特徴が異なっている。工作機械の主軸としては、加工精度の向上の面から、低発熱・低温度上昇が基本的な特性として要求される。

(1) オイルエア潤滑

オイルエア潤滑はグリース潤滑とオイルミスト潤滑のそれぞれの長所を取り入れ、欠点を除くことによって、超高速回転に適した潤滑法として、開発実用化されたものである。オイルエア潤滑方式は図5に示すように、軸受側面から給油用ノズルを用いて軸受内部に高压エア+微細な油粒を供給する方式である。この方式では、高速回転に伴い発生するエアカーテン（この場合のエアカーテンとは、空気と高速回転する内輪外径表面との摩擦によって発生する円周方向の高速空気流の壁を言う）によりノズルからの油流が阻害される。その結果、軸受内部へ確実に潤滑油が供給されず焼付きに至ることがあり、 dmn 値が $(200\sim 250) \times 104$ を超える領域では不安定な面があった。

(2) スピンショット軸受

本問題を解決する軸受として開発された図6に示す

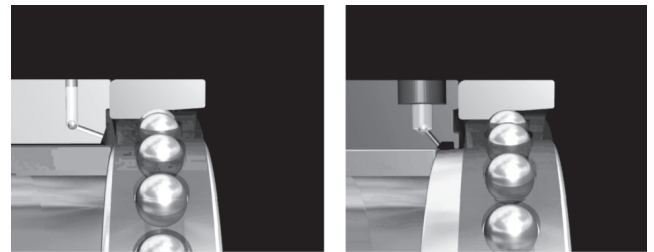


図5 従来オイルエア方式 図6 スピンショット方式

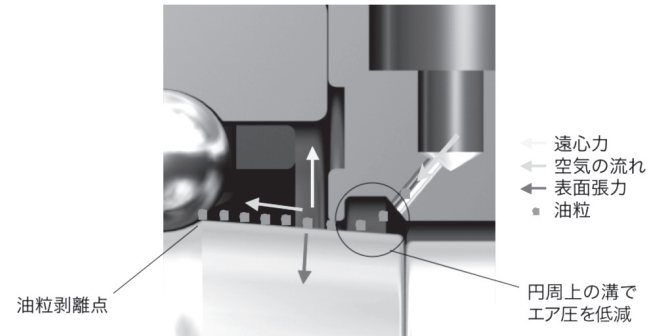


図7 スピンショットIIの潤滑原理

新軸受「スピンショットII」3)は、2.2項で紹介した温度ロバスト性を向上させた設計仕様に加え、内輪幅を外輪幅よりも伸長させ内輪の外径面をテーパ形状とした特殊な軸受構造を採用している。本形状により、エアにアシストされた潤滑油が外輪間座から、この内輪外径テーパ面に吹き付けられ、図7に示すように、潤滑油が回転による遠心力によりテーパ面を移動して軸受内部へ導かれ、転動体に確実に供給される。また、軸受内部に直接エアを吹き付けない構造のため、高速回転時に発生するエアによる耳障りな高周波の風きり音を抑制することができる。さらに、エアカーテンによる給油阻害の影響を受けないので、エア流速を高める必要がなくなりエア圧を下げるのが可能となった。エア給油量は、ノズル1本あたり10 L/min (Normal) と従来のオイルエアと比較して、約60%のエアの消費量削減が達成できた。また、外部から潤滑油を給油する方式の場合、潤滑油が確実に潤滑装置から主軸側に供給されているかを監視するセンサを取り付けることが、超高速での安定回転を実現する上で重要となる。

(3) スーパーリーンオイルエア潤滑の開発

オイルエア潤滑のより高速化を図るために、さらに極微量な潤滑油を軸受に供給する潤滑法として、スーパーリーンオイルエア潤滑を開発した。スーパーリーン潤滑は、オイルエア潤滑と同様に、潤滑油を空気で運ぶ方式であるが、1ショット吐出量を0.001cc以下に管理可能となっている。

スーパーリーンオイルエア潤滑を採用したスピンドルとして、主軸端テーパをHSK-E50、主軸径60mmで最高回転数 50000min^{-1} ($dmn380 \times 10^4$)の世界最高速ス

表1 50000min⁻¹スピンドル仕様

主軸端テーパ	HSK-E50
最高回転数 (dmn値)	50000min ⁻¹ (dmn380×10 ⁴)
軸受内径	前側φ60mm、後側φ50mm
潤滑	スーパーリーンオイルエア潤滑
予圧方式	定圧予圧 (DT+DT組合せ)
予圧切換	3段予圧切換

1. 新給排油システムの採用

- ①スーパーリーンオイルエア潤滑
- ②油吸引・排油システム

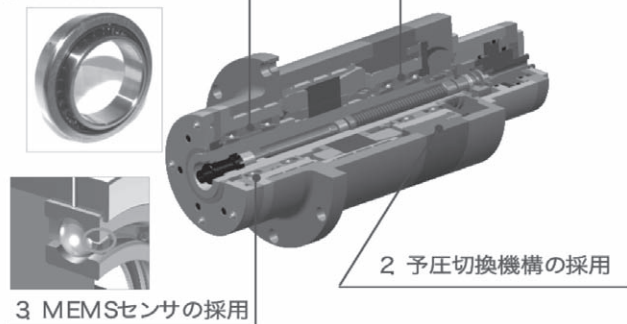


図8 50000min⁻¹スピンドルの特徴

通常オイルエアの配管内油粒イメージ

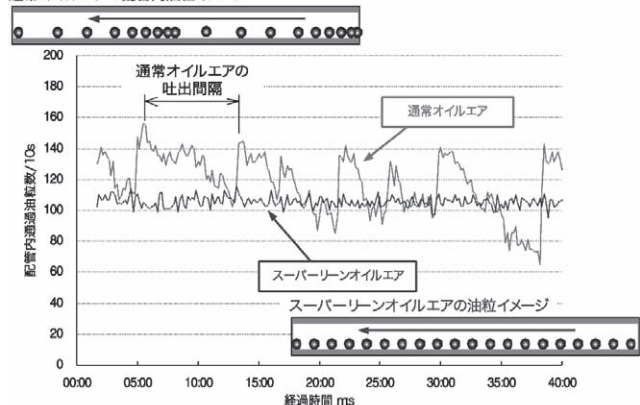


図9 配管内通過油粒量の比較結果

スピンドルを開発した。表1に本スピンドルの仕様を示し、図8に本スピンドルの特徴を示す。

まず、1つ目の特徴として、新給排油システムを採用した。給油側としては、上述したスーパーリーンオイルエア潤滑を用いて、図9のようにオイルエア潤滑に比べて配管内の油粒の流れが安定化でき、軸受の発熱・温度上昇の変化を抑えることが可能となる。また、排油側では新たに油吸引・排油システムを採用した。この機構により、スピンドルが上下・旋回しても軸受内部に潤滑油が溜まらずに排出されやすく、軸受あるいはスピンドル内の発熱の変化を抑え、温度上昇が安定化できる。図10に軸受内部の潤滑油給排油の流れ方を示す。

2番目の特徴は、予圧方式として並列組合せ (DT+DT) の定圧予圧を用いて、低速では大予圧、中高

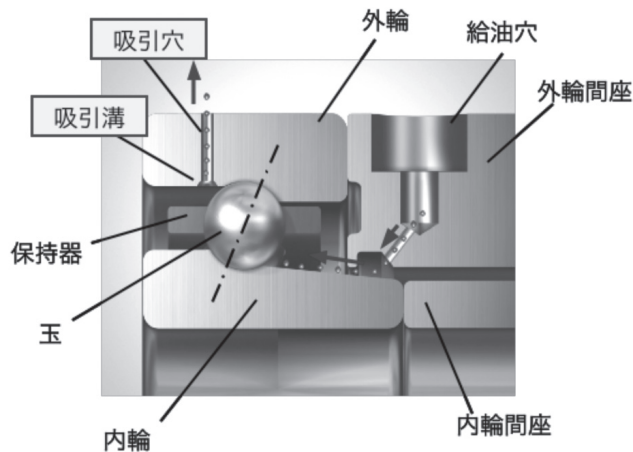


図10 軸受内潤滑油の流れ

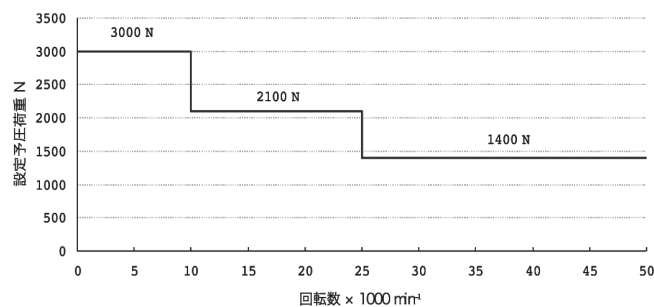


図11 定圧3段予圧切換

速では中予圧、高速・超高速では軽予圧に制御した予圧切換機構 (図11) を採用した。本方式により、低速重切削から超高速切削まで、実現可能となっている。3番目の特徴として、軸受内部にMEMS温度センサを取り付け、軸受の発熱源近傍の温度を測定した。MEMS温度センサの採用により、温度測定の応答性を向上することができた。

さらに、主軸の高速・高精度化ニーズに対しては、高速スピンドルになるほど、高速回転時における多面バランス修正や軸受の高精度化など、技術的に高度な対応が必要となる。また、ビルトインモータの場合、ステータ冷却油の経路を主軸軸心に対し線対称な経路をとらないと、ラジアル方向への熱変位が発生しやすく、軸の伸びも加工面品位に大きな影響を及ぼすので、高速かつ発熱特性に優れた軸受やモータ、あるいは低線膨張係数材料の登場が待たれる。

3.2 高剛性化への対応

一方、航空機部品に代表されるアルミ加工用プロファイラにおいては、アルミ系材料の持つ良好な被削性から、高速 (高送り) 加工が主流であり、スピンドルに対しては、高速化に加え、高剛性という相反する性能を求められる。しかも、この種の機械はワークサイズが大きい傾向にあり、スピンドル旋回形の方が一般的である。このような場合において、複雑、かつ小円弧の細やかなプロファイル加工の達成には、スピン

表2 旋回するスピンドルへの要求特性と問題点

(1)全長の短縮化	(2)軸受潤滑構造の信頼性
<ul style="list-style-type: none"> ・軸受列数の選択 ・軸受システムの小型化 ・ビルトインモータの小型化 ・ツールクランプ機構の短縮 	<ul style="list-style-type: none"> ・潤滑油のスムーズな排油 ・配管の取りまわし ・グリースの脱落抑制 ・クーラントの侵入防止

ドルの小形化がより有利であり、高剛性化との両立には、さらに高い技術的レベルが要求される。

3.3 5軸加工機、複合加工機への対応

(1)工具側旋回の場合の要求機能

工具側を旋回する工作機械において、スピンドルに求められる特性は、表2に示すように、(1)スピンドル全長をいかに短縮するか(2)姿勢変化に対応できる軸受潤滑構造の信頼性の二つに大別される。(1)の短縮化ニーズは、スピンドルを短縮することにより旋回の振りスペースを小さくし、直線運動軸への影響を抑え、機械の無駄な大型化を避けたいということや、スピンドルを軽量化して旋回用モータの容量を下げたい、ということなどから出てきた。(2)の姿勢変化については、主に軸受潤滑の信頼性が姿勢変化によって損なわれない設計であるかということである。

(2)スピンドル全長の短縮化

スピンドルの負荷容量を上げるには軸受の列数を増やし、軸受1列あたりの負荷を軽減させるのが一般的であるが、スピンドルが長くなり、スピンドル回転式の5軸加工機には使いづらい。アンギュラ玉軸受で言えば、4列背面組合せ(DBB)2列背面組合せ(DB)の方が短くでき、円筒ころ軸受なら、複列よりも単列の方が短くできるが、いずれも負荷容量は小さくなる。特に複合旋盤などでは、5軸加工マシニングセンタに比べこの点を妥協せざるを得ないケースが見られる。マシニングセンタの場合は、工作物側に回転2軸を持たせればこの点はあまり問題にならない。また、スピンドル回転方式を採る機械でも、その構成では機械自体が大型のものが多いため、問題が顕在化しにくい。しかしながら、今後の5軸加工機の種々の加工への展開や発展性を考えると、潤滑機構も含めたコンパクトな軸受システムの構成やスピンドル内への最適な軸受配置を行ない、全長をできるだけ短くする方策が必要である。

また、近年ではビルトインモータ化により、スピンドル自体がコンパクトになっているので、スピンドル回転形5軸加工機用としても、ビルトインモータスピンドルが最適である。この場合、モータがスピンドルの全長を決める要因になっていることが多いので、さらに、より小型・高出力モータの製品化が望まれる。

(3)姿勢変化への対応

高速スピンドルの潤滑方式として今や完全に定着したオイルエア潤滑では、連続給油された潤滑油のスムーズな排油が、潤滑面での安定性を実現するための重要なポイントである。スピンドルが旋回する構成の場合、旋回角度に対応したドレーン経路の設計に細心の注意を払う必要がある。

また、旋回動作のあるユニットには、配線や配管をできるだけ施したくないこともあり、可能であればグリース潤滑を採用するのも解決方法のひとつである。しかしながら、この場合もグリースの脱落による寿命低下が、少なくとも姿勢変化の無いスピンドルに比べれば懸念される。さらに、スピンドルが抱える大きな課題として、いかにスピンドル内部へのクーラントの侵入を防ぐか、という問題があるが、この点も、立形、横形、旋回形の順に侵入リスクが高くなる。

3.4 グリース潤滑への対応

(1)シール付きアンギュラ玉軸受

工作機械主軸用軸受においても、環境にやさしいクリーン技術への注目度は高く、このような要求に対応する軸受として、シール付き精密アンギュラ玉軸受(図12参照)が採用され始めている。本軸受にはコンパクト化された非接触シールが採用されており、従来の軸受との互換性を保持しつつ、グリース封入済みによる作業性向上・軸受外部へのグリース飛散の防止・高速性の向上が図られている。また、本軸受の使用により、グリース寿命の延長が図れると共に、立形主軸の場合、グリースの落下を防止することができる。

(2)グリース補給潤滑軸受

グリース潤滑は、軸受取付けの際に、あらかじめグリースを所定量封入するだけで長時間使用できるた

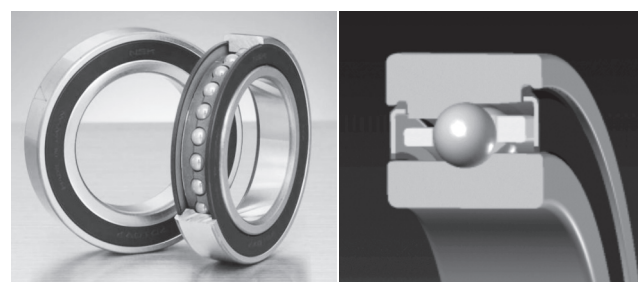


図12 シール付きアンギュラ玉軸受

め、非常に簡単であり、最も一般的な潤滑方法として広く採用されている。しかし、モータビルトイン主軸の場合、急加減速を伴う高速回転での連続加工条件が増加しており、従来のグリース潤滑では短時間では回転可能ながら、高速連続回転するとグリースが劣化、あるいは枯渇し、焼きつきに至るケースが増加しつつある。

したがって、既存のグリース潤滑ではグリース寿命を考慮した場合、最高回転数が限定されてしまうことになる。グリース補給潤滑は、オイル潤滑と同様、外部から潤滑剤を供給することにより、グリース寿命を飛躍的に向上させた潤滑方式であり、グリース潤滑でありながら、最高回転数 20000min^{-1} を達成している。

図13に弊社で開発した新グリース補給潤滑システムの構造を示す。工作機械主軸分野以外の用途では、従来から、グリース補給配管・グリースニップル等を用いて、軸受内部に給脂する方法はあった。しかし、本方式では、供給する潤滑剤の量が非常に微量であり、かつ高速回転する軸受内部に直接グリースを供給する点が最大の特徴である。オイルエア潤滑の場合、給油量は軸受一列あたり24時間で $1\sim 3\text{cm}^3$ 程度の潤滑油を消費するのに対し、グリース補給潤滑では、 0.1cm^3 以下と非常に少なく、潤滑剤を外部に排出しなくてもよい。

また、潤滑油供給のためのエア消費もなく、大気中への油の飛散もないので、エコロジーの点でも、オイルエア潤滑やオイルミスト潤滑等に比べ優れている。図14は本潤滑システムに用いられるグリース補給ユニット

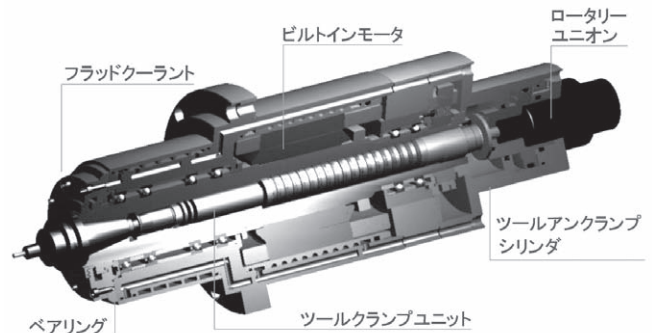


図15 高速ビルトインモータスピンドル

表3 B1スピンドル仕様 (Lタイプ)

主軸端テーパ	NT40/HSK-A63 (Op)
最高回転数	20000min^{-1}
最大出力	22/18.5kW (15分/連続)
最大トルク	118N・m (25%ED)
軸受内径	$\phi 70\text{mm}$
予圧方式	定位置予圧 (DBB組合せ)

ット「ファインループⅡ」である。

NSKでは、グリース補給潤滑を採用したNT40クラスの標準スピンドルとして、「高速ビルトインモータスピンドル」⁴⁾を開発した(図15)。本スピンドルは世界初でグリース補給潤滑という、新しい潤滑方式を採用することにより、グリース潤滑ながら最高回転数 20000min^{-1} を達成している。表3にスピンドルの主な仕様を示す。

3.5 インテリジェント化への対応

工作機械主軸の今後の方向として、主軸の知能化の要求が高まっているが、まだまだ市場で実用化されたというものは少ない。NSKでは前述のMEMSセンサの他に、切削加工中のアキシャル変位を検知するための荷重変位センサ・エンコーダを組み込んだスピンドル⁵⁾を開発してJIMTOF2010にて回転実演を行った。

切削加工時の荷重変化を検知して工具寿命管理、異常荷重を検知して自動加工停止や、加工条件の見直し、

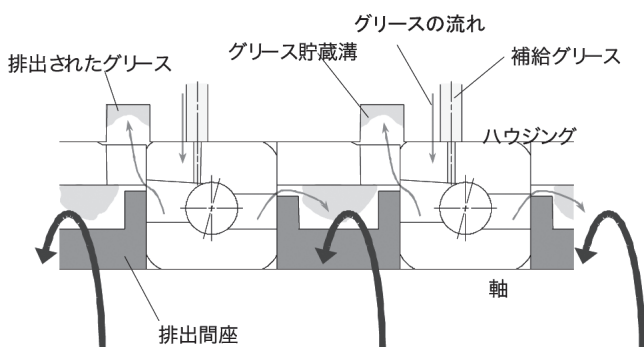


図13 グリース補給潤滑システム

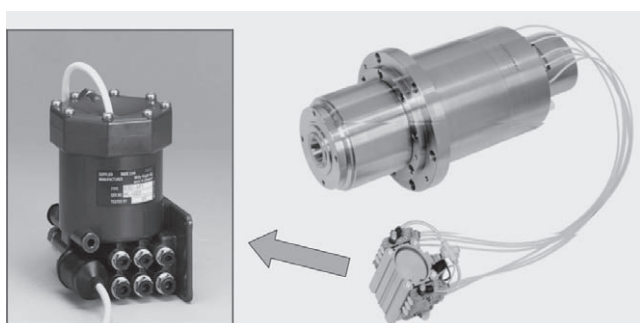


図14 グリース補給ユニット ファインループⅡ

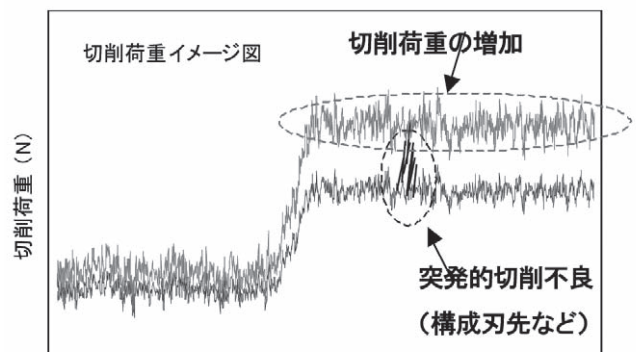


図16 切削荷重イメージ

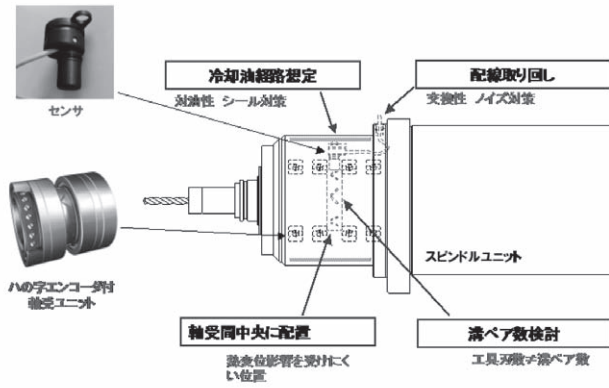


図17 荷重変位センサ付きスピンドル

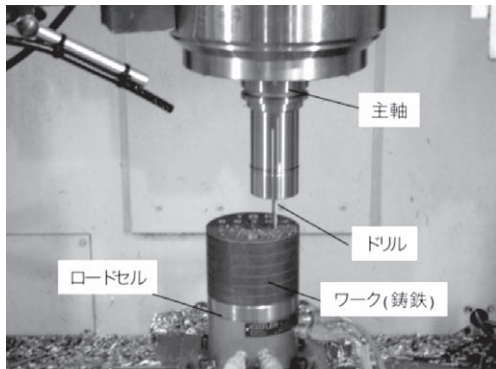


図18 実機による切削加工試験

実験条件
 ・ドリル径 : $\Phi 5\text{mm}$
 ・回転数 : 1500min^{-1}
 ・送り速度 : 200mm/min
 ・ワーク材質 : 鋳鉄

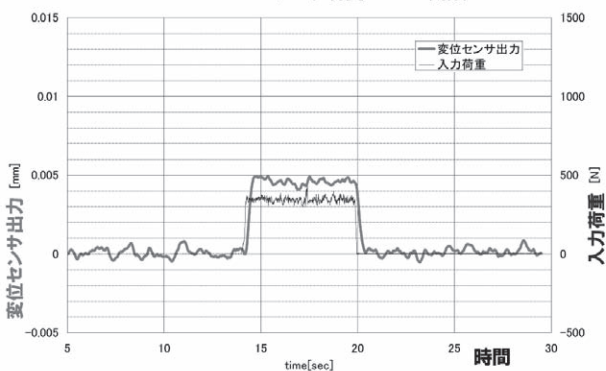


図19 切削加工試験結果の比較

軸受の予圧荷重を検知して軸受損傷未然防止などを目的に開発を行った。図16は切削加工時の荷重変化のイメージ図である。切削荷重の増加や突発的な切削不良が検知可能となる。図17は荷重変位センサのスピンドルへの取付け構造を示している。センサの形状はオイルエア潤滑のノズルコマのような取付けで、エンコーダは軸受内輪間座となっている。

本スピンドルをマシニングセンタ実機に取り付けて、キスラーの動力（荷重）計の上にワーク（鋳鉄）を乗せて、図18のようにドリル加工した時の変位センサ出力と入力荷重の比較をしながら切削加工試験を行った。その比較結果を図19に示す。他のエンドミル切

削等も含めて、入力荷重に対する変位センサ出力がほぼ同じ値が得られている。

4. おわりに

工作機械主軸の高速化を中心に、約35年間に渡る主軸の技術開発について説明してきたが、ここ数年は高速化も足踏み状態となり、市場要求は高速・高精度から高剛性、信頼性向上、また最近では環境対応・省エネルギー、インテリジェント化と変遷してきている。

本年はJIMTO2012が開催される年であり、日本工作機械として今後も省エネルギーやエコロジー指向を目指すと共に、さらにCFRPなどの新材料の採用や3次元の曲面加工を容易に行なえるなど、付加価値の高い工作機械がますます増加していくと思われる。その中で、主軸の更なる高速化をめざす技術もグリース潤滑の長寿命化や信頼性向上と共に、新たに復活するのではないかと考えている。

今後とも、主軸技術の面から世界をリードし、日本独自の工作機械技術向上をめざした、新たな研究開発を継続していく所存である。

参考文献

- 1) 杉田澄雄、勝野美昭、大浦行雄：工作機械主軸用超高速アングュラ玉軸受、NSK TECHNICAL JOURNAL 673: (2002) 54-56)
- 2) 青木満穂、中村晋哉：工作機械用軸受の技術動向と新技術：精密工学会誌 Vol.74 No.9 (2008) 913-916
- 3) 青木満穂：第39回工作機械関連技術者会議テキスト：主軸の最新動向と超高速スピンドル技術：(2009)
- 4) 青木満穂、森田康司：グリース補給潤滑ベルトインモータスピンドルの開発、NSK TECHNICAL JOURNAL 676: (2003) 16-25
- 5) 稲垣好史：第40回工作機械関連技術者会議テキスト：主軸の技術動向とインテリジェント化技術：(2011)