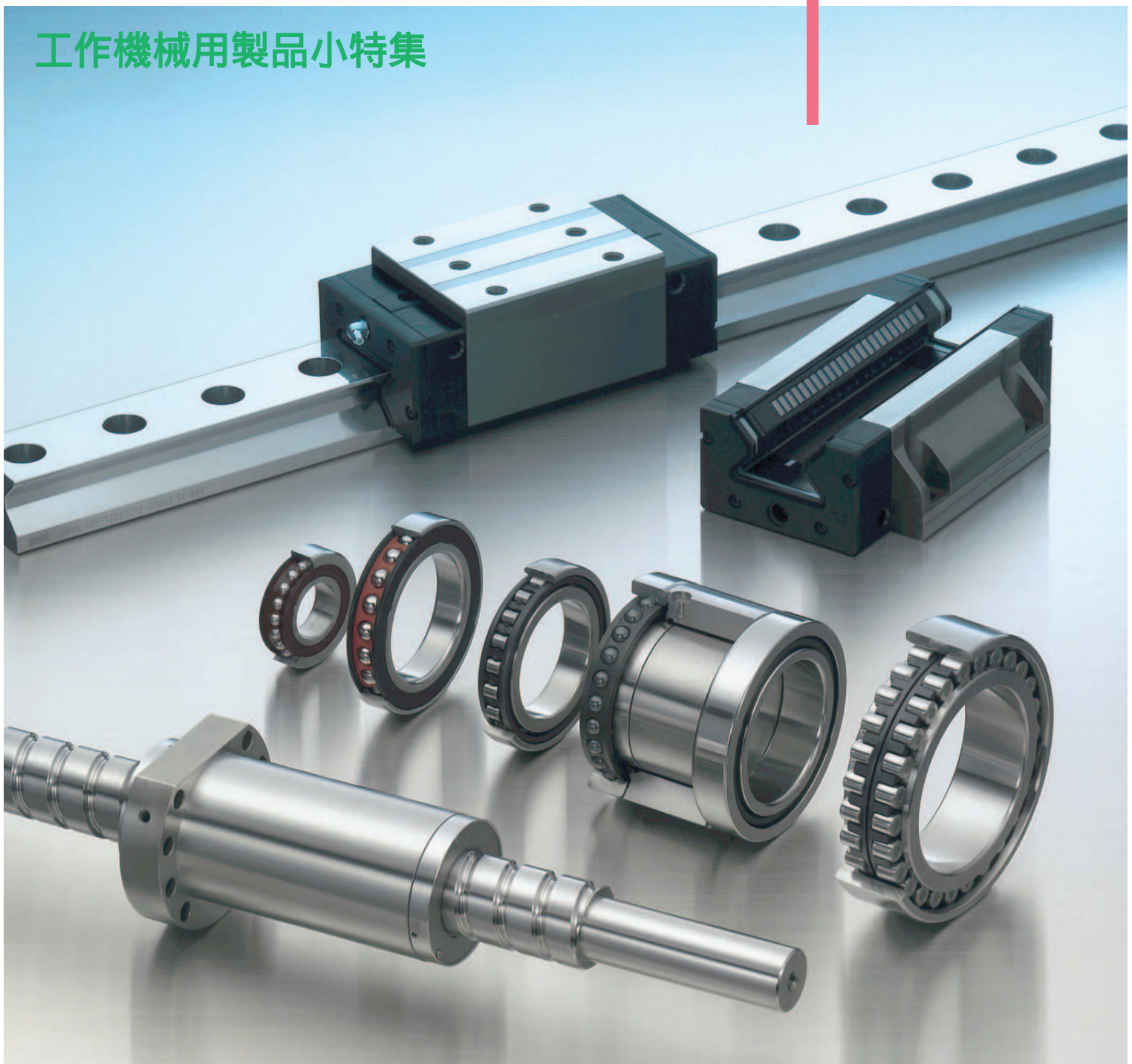


# NSK TECHNICAL JOURNAL

DECEMBER · 2003

No.676

工作機械用製品小特集



# NSK TECHNICAL JOURNAL

DECEMBER・2003 No.676

## 工作機械用製品小特集

### 解説・論文

工作機械用製品小特集に寄せて .....	特別顧問 猪俣 忠雄	1
工作機械の動向と軸受技術 .....	西端 伸司	2
超高速スピンドル .....	杉田 澄雄	11
グリース補給潤滑ビルトインモータスピンドルの開発 .....	青木 満穂, 森田 康司	16
高速静音ボールねじの開発 .....	加藤 将人	26
リニアガイドの特性解析 .....	松本 淳	33

### 商品紹介

超高速アンギュラ玉軸受 - スピンショットII - .....	42
シール付き精密アンギュラ玉軸受 .....	44
シール付きボールねじサポート用スラストアンギュラ玉軸受 .....	46
高機能円筒ころ軸受 - 複列円筒ころ軸受, 超高速単列円筒ころ軸受 - .....	48
NSK ローラガイド「RAシリ-ズ」 .....	52

### 解説・論文

EPS制御技術 .....	遠藤 修司, 小林 秀行	55
---------------	--------------	----

### 商品紹介

ボールねじのクリーン環境用サポートユニット .....	61
大型液晶基板対応ステップ・プロキシミティ露光装置 .....	63



表紙説明 工作機械に求められるニーズとしては、高速、高精度、高剛性がありますが、最近では環境、省エネなども新たなニーズとして顕在化してきています。NSKでは研究開発の総合力を駆使して、これらの要求にこたえるべく新製品をリリースしています。

写真は、NSKが最新技術を取り入れて開発した“超高速アンギュラ玉軸受 - スピンショット - ”、高機能円筒ころ軸受 - 複列円筒ころ軸受、超高速単列円筒ころ軸受 - ”、シール付き精密アンギュラ玉軸受、シール付きボールねじサポート用スラストアンギュラ玉軸受、ローラガイド「RAシリーズ」、高速静音ボールねじ”です。

詳細は本誌“解説・論文”と“商品紹介”をご参照ください。

# NSK TECHNICAL JOURNAL

DECEMBER • 2003 **No.676**

## Special Articles

### Technical Papers

.....	T. Inomata	1
Latest Trend in Machine Tool Spindles and Bearing Technology .....	S. Nishibata	2
Ultra High-speed Spindle for Machine Tools.....	S. Sugita	11
Development of a Motor Spindle for Machine Tools Using Grease Replenishment Lubrication.....	M. Aoki , Y. Morita	16
Development of High-Speed and Low-Noise Ball Screws .....	M. Kato	26
Numerical Analysis Technology on NSK Linear Guides for Machine Tools .....	J. Matsumoto	33

### New Products

High-Speed Precision Angular Contact Ball Bearings - Spinshot™ II - .....		42
Super Precision Sealed Angular Contact Ball Bearings .....		44
Sealed Angular Contact Thrust Ball Bearings for Ball Screw Support .....		46
High Performance Cylindrical Roller Bearings - Double Row Cylindrical Roller Bearings, Ultra High-Speed Single Row Cylindrical Roller Bearings - ...		48
NSK Roller Guide - RA Series .....		52

### Technical Paper

EPS Control Technology .....	S. Endo , H. Kobayashi	55
------------------------------	------------------------	----

### New Products

Clean Support Units for Ball Screws .....		61
Step and Repeat Proximity Aligner for Production of Large-Sized LCD Glass Substrates .....		63

## 工作機械用製品小特集に寄せて

特別顧問 猪俣 忠雄



猪俣 忠雄

日本の工作機械の生産は、過去数十年にわたり世界一の座を守ってきていますが、これを支えてきたのは日本の優れたNC技術であると言われてます。しかし、同時に工作機械を構成する機械要素としてきわめて重要であるスピンドルと精密軸受、ボールねじ、リニアガイドに関しても、日本が質・量とも世界最先端の地位を守っており、NC技術と並んでこれらの機械要素が、日本の工作機械世界一の座を支えてきたといっても過言でないと思います。

NSKは、精密軸受、スピンドル、ボールねじ、リニアガイドを全て手がけている世界で唯一の会社であり、常に工作機械技術の進歩を支えながら、研究開発を続けてまいりました。

今般、工作機械用製品小特集を発刊することになり、それぞれの分野における最先端の研究開発の成果や商品をご紹介します。

最近の工作機械に求められるニーズでは、高速・高精度という面が相変わらず注目されておりますが、同時に環境、省エネなど新しいニーズも顕在化してきています。今般ご紹介する新技術、新製品は全てこれらのニーズに応えるものであり、NSKが研究開発の総合力を駆使して完成した製品で、ユーザの皆様が高い評価を戴いております。

高速化のニーズでは、特に工作機械のスピンドルの高速化が注目されております。本誌でご紹介する超高速スピンドル技術は、昨年のJIMTOFで展示させていただきましたが、そのスピンドルに使用されているスピンショットIIタイプの軸受も含めて、多くのユーザから高い評価を戴きました。また、高精度という面では特に送り系の高精度化を可能にした新しいリニアガイドの特性解析技術を実用化いたしました。それを駆使して新たに開発された高剛性のローラガイドのご紹介もさせていただきます。

環境に対する対策という面では、新たに開発した静音ボールねじは、工作機械の低騒音化を可能にする新製品として注目を集めています。また、省エネというニーズでは、グリース補給潤滑ビルトインスピンドルをご紹介します。従来、オイルエア潤滑で対応していた高速回転の領域までグリース潤滑で対応するという新しい製品です。エア消費の削減という省エネ対策はもちろんのこと、その静粛性なども高い評価を戴きました。

上記でご紹介した例のとおり、NSKは工作機械のニーズという切り口でも、またそれに使用される製品群という切り口でも、あらゆる面でユーザのニーズに応えられる製品開発を進めており、今後とも常にユーザの皆様を使い続けていただけるように努力を続けてゆく所存です。

昨年の工作機械消費のトップには、中国が踊り出てきており、工作機械の市場にも大きな変化の予兆が感じられます。市場環境の変化が起きるときには必ず新たなニーズが顕在化してきます。

NSKは常に市場ニーズの変化を研究開発に反映しながら、最新技術を取り入れた開発を続け、今後とも工作機械産業の発展を支えていきたいと考えておりますので、これからもユーザ各位のご指導、ご協力をよろしくお願い申し上げます。

# 工作機械の動向と軸受技術



西端 伸司\*

西端 伸司

## Latest Trend in Machine Tool Spindles and Bearing Technology

by S. Nishibata

In recent years, function-related requirements of the main spindle in machine tools have included higher operating speeds, greater rigidity, and more accuracy. While meeting such requirements, machine tools are also required to be ecologically sensitive to global warming and must promote preservation of the environment. Machine tools on display at the 21st Japan International Machine Tool Fair (JIMTOF2002) confirmed this growing trend. In order to meet the demand for products that respond to such a wide spectrum of requirements of high functionality and environmental friendliness, NSK has developed the ROBUST series of precision bearings and the High Rigidity series of double row cylindrical roller bearings for machine tools. Both of these series for machine tool applications are supported by significant improvements in analytical technology, new materials, ceramic roller elements, engineered plastic cages, and newly developed lubrication.

- |   |  |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. まえがき</li> <li>2. JIMTOF2002における主軸の動向             <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1 高速主軸の出展推移</li> <li>2.2 潤滑方式と高速化</li> <li>2.3 NSKの出展状況</li> </ol> </li> <li>3. 高速化技術             <ol style="list-style-type: none"> <li>3.1 ロバストシリーズの開発</li> </ol> </li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>3.2 鋼材の開発</li> <li>3.3 セラミック転動体</li> <li>3.4 保持器材の開発</li> <li>3.5 潤滑法の開発</li> <li>4. 高精度化技術</li> <li>5. エコロジー対応</li> <li>6. あとがき</li> </ol> |
|---|--|

### 1. まえがき

日本の工作機械メーカーは差別化をはかるために、工作機械の高機能化を行ってきた。マシニングセンタにおいては、より高速で高精度な加工を、旋盤においてはより高剛性で高精度な加工を可能にする機械の開発が進められている。

また、最近では地球温暖化や地球環境保護への対応として、省エネ、環境汚染対策、騒音を含めた作業環境改善によるエコロジー対応も重要な課題になっている。

---

\* 軸受技術センター 精密軸受技術部

このような環境の中、2002年11月に第21回日本国際工作機械見本市（JIMTOF2002）が開催された。

本報では、JIMTOF2002における出展機の動向とNSKのロバストシリーズを初めとする工作機械用精密軸受商品およびそれらを支える技術について紹介する。

### 2. JIMTOF2002における主軸の動向

JIMTOF2002では、ITを駆使した超高速、超高精度、超複合多軸化の進む最新の工作機械に加え、エコロジー対応機も多数出展された。ここでは、主軸の高速化を主体に、過去のJIMTOFと比較しながら、その動向について紹介する。

## 2.1 高速主軸の出展推移

図1は、出展機の中で主軸回転数 $10\,000\text{min}^{-1}$ 以上の高速機の出展台数推移を、過去のJIMTOFを振り返りながらまとめたものである。2001年から2002年にかけて、工作機械産業の落ち込みにより一部工作機械メーカーの出展見送りがあったが、高速機の出展台数は300台で前回とほぼ同等レベルが保たれていた。

第11回(1982年)に、はじめて $10\,000\text{min}^{-1}$ の主軸が発表されてから、前回までは回を重ねるごとに高速機の台数が増していた。高速化に貢献した技術としてオイルエア潤滑、セラミック玉、低発熱ロバスト軸受などがあげられる。

しかし、今回のJIMTOF2002では前回とほぼ同等の構成となっており、高速化が進んでいないように見える。これは、各工作機械メーカーが開発した新機種が加工速度の向上から高精度機や五面加工などの複合機の開発、機械の統合と標準化、エコロジー・エコノミー機の開発にシフトしたためと考えられる。

## 2.2 潤滑方法と高速化

図2は、JIMTOF2002における各潤滑方法、予圧方式における高速機の出展状況を表したものである。グリース潤滑、定位置予圧方式において、 $d_m n$ 値(回転

体のピッチ円径  $d_m$  (mm) と回転数  $n$  ( $\text{min}^{-1}$ ) の積) 170万の主軸が出展されている。これはグリース補給仕様となっている。また  $d_m n$  値250~300万の超高速主軸は、オイル潤滑の定圧予圧方式が主流になっている。

図3は、過去3回のJIMTOFのグリース潤滑の高速化の推移を示したものである。 $d_m n$  値130万を超える領域ではもともとオイル潤滑であったが、前回のJIMTOF以降この領域においてグリース潤滑仕様の主軸が出展されてきており、環境に配慮したエコロジーへの取組みが伺われる。

## 2.3 NSKの出展状況

NSKは“新しい価値の提案”として転がり軸受では最高速の  $d_m n$  値400万(軸径 65mmで  $45\,000\text{min}^{-1}$ , 定圧予圧方式)の超高速スピンドルと  $d_m n$  値180万(軸径 70mmで  $20\,000\text{min}^{-1}$ , 定位置予圧方式)の高速グリース潤滑スピンドルを出展した。

$d_m n$  値400万の超高速スピンドルは、新潤滑方式スーパーリン潤滑、高精度ロバスト軸受、多面バランス修正技術の採用により、超高速化を達成するとともに、低騒音、高精度を実現している。また、 $d_m n$  値180万の高速グリース潤滑スピンドルは、グリース補給方式を採用して長寿命化をはかり、 $d_m n$  値180万において10,000時間メンテナンスフリーを実現している。

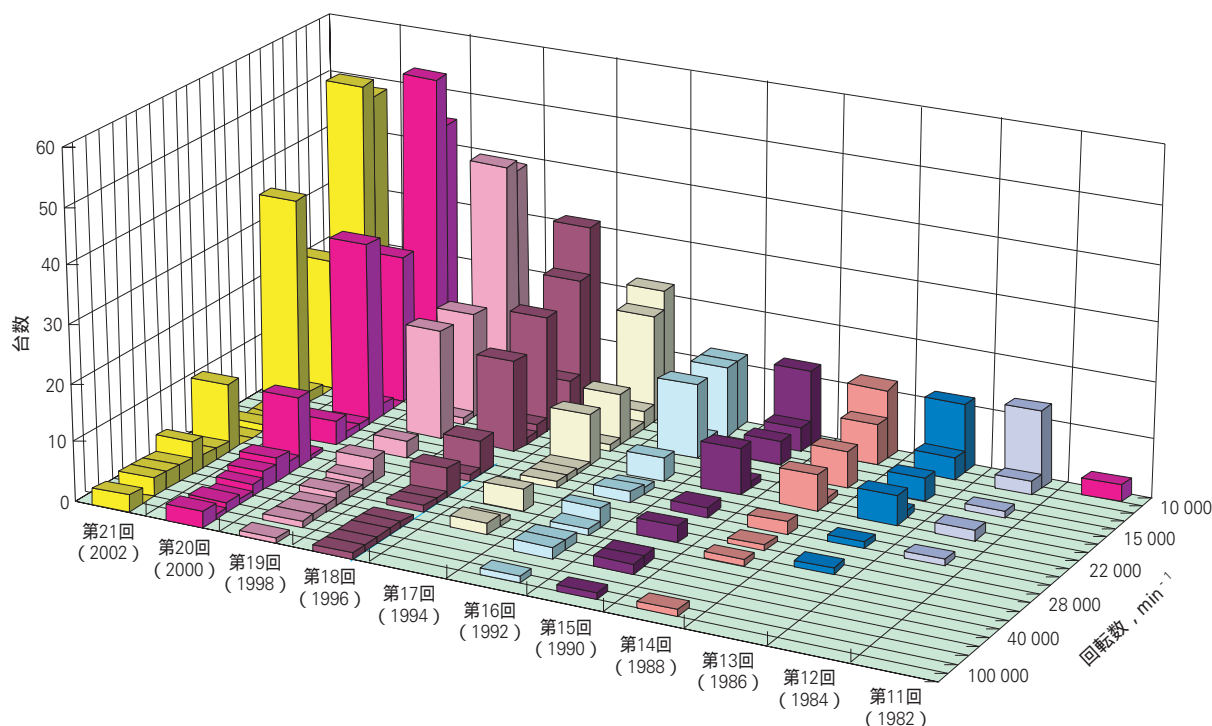


図1 JIMTOF出展機(10,000 $\text{min}^{-1}$ 以上の高速機)の推移

Fig. 1 Number of machines displayed at JIMTOF with operating speeds higher than  $10\,000\text{min}^{-1}$

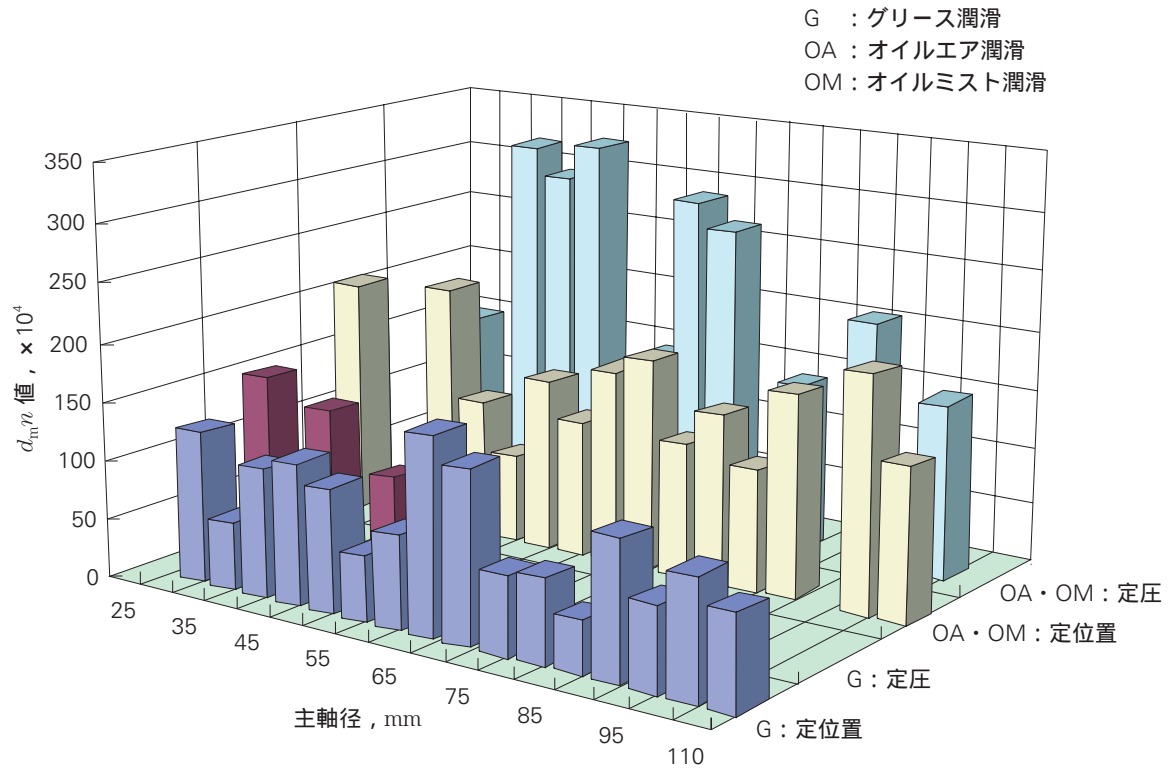


図2 各潤滑および予圧方式における主軸の高速化

Fig. 2 Rotational speed of machine tool spindles for specific lubrication systems and preloading methods

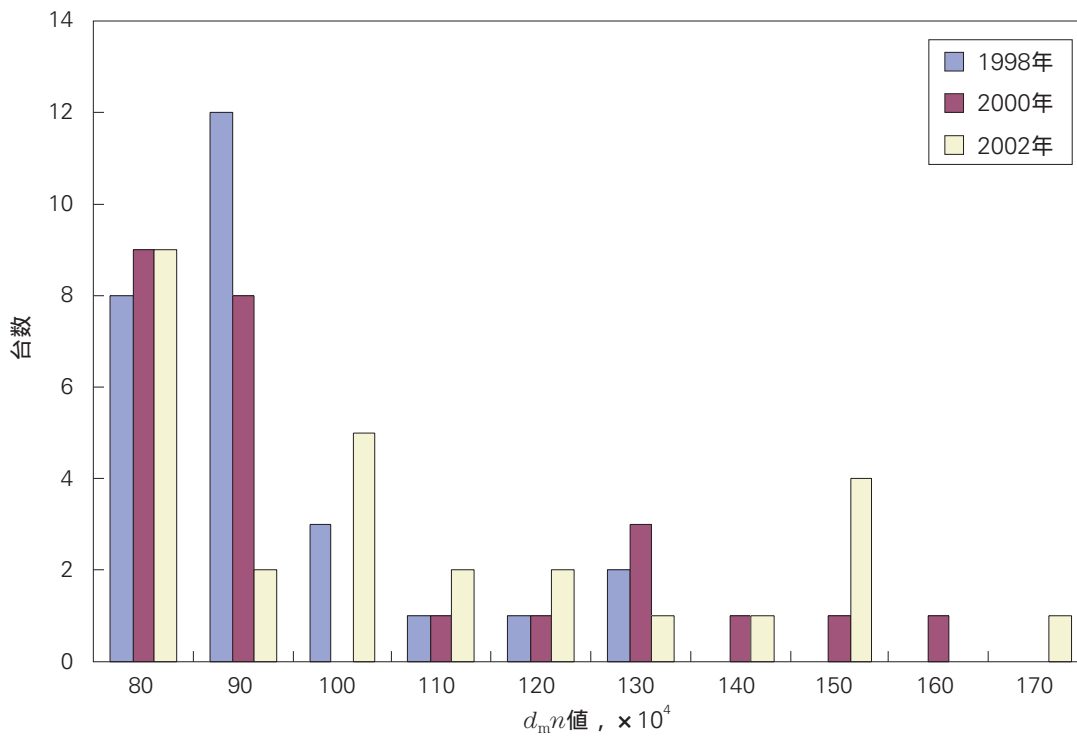


図3 グリース潤滑の高速化の変遷

Fig. 3 Rotational speed of machine tool spindles under grease lubrication and position preload

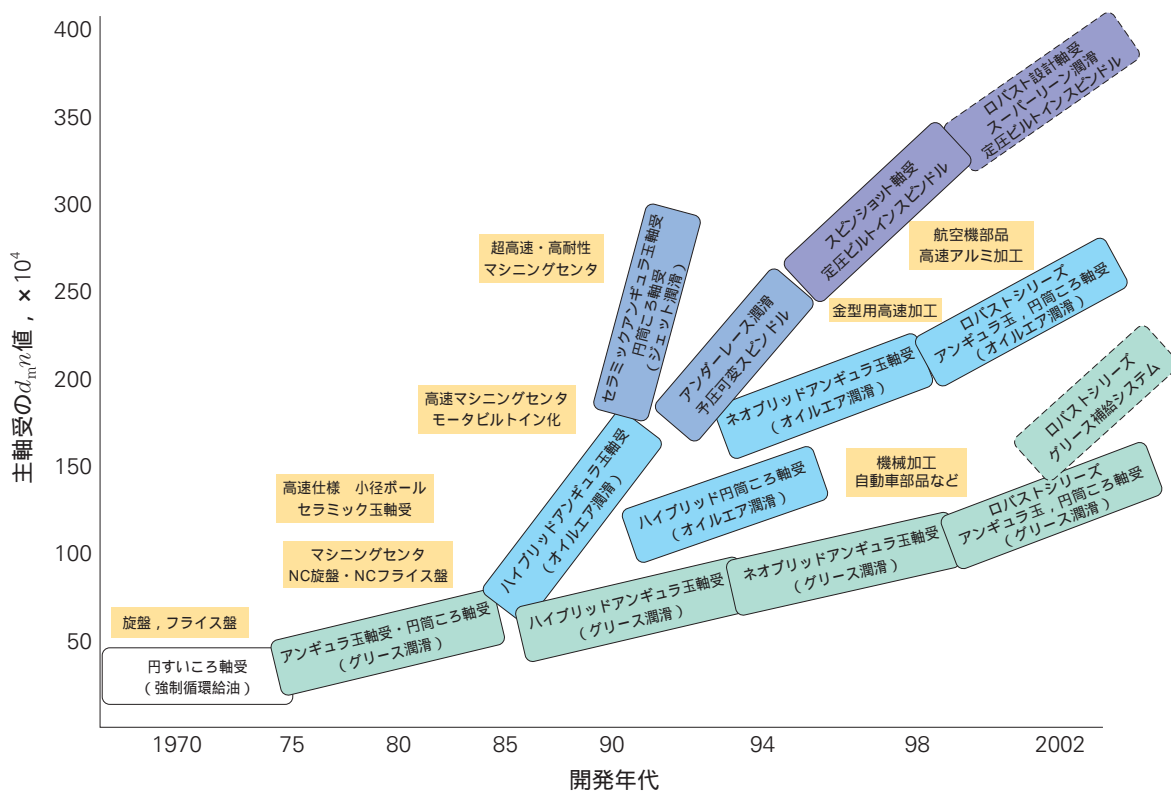


図4 主軸の高速化の変遷  
Fig. 4 Rotational speed of machine tool spindles

以上のように、金型加工における超高速、低振動化、航空機のアルミ、難削材の超高速、重切削化などの高機能化は今後も要求されていくであろう。また、グリース潤滑の高速化などのエコロジー機の需要も増えてきている。

これらの高速化の実現にあたっては、軸受あるいはその周辺技術の高度化が大きく貢献している。高速化技術を概念的に示したのが図4である。横軸の年代に対して、縦軸には、その年代に開発実用化された主な高速主軸用軸受の  $d_m n$  値を示している。

近年NSKはロボストシリーズ（アンギュラ玉軸受、円筒ころ軸受）、スピッシュット軸受、グリース補給システムおよび超高速スピンドル（スーパーリーン潤滑）などを開発してきた。個々の詳細説明については、本文以降の論文、商品紹介にゆずるが、これらの開発品を支えてきた技術について、次章にて紹介する。

### 3. 高速化を支える技術

JIMTOF2002では、 $10\,000\text{min}^{-1}$ 以上の高速機の分野でNSKのロボストシリーズが展覧機の40%に採用されていた。ロボストは、制御関係で良く使われる言葉であるが、強靱という意味を持っている。

高速、高効率化に伴ない、スピンドルはモータビルトインタイプとなっており、モータを内蔵したこ

とで熱源を内部に取り込むこととなり、これを冷却するための外筒冷却などが軸受の温度変化を激しくしている。特に急激な回転変動過渡期においてその傾向が著しく、軸受が影響を受ける外部要因（荷重、温度変化など）に対して信頼性を上げることが必要となった。

このような要求に対して、NSKではロボストシリーズを開発し、現在市場で多く使用していただいている。

#### 3.1 ロバストシリーズの開発

ロボストシリーズは、ビルトインタイプの主軸に対応して、軸受内部設計の最適化をはかり、温度ロバスト性（熱的負荷変動に対して、軸受の発熱変化量が少ない、すなわち熱的外乱に対して、温度的に鈍感な特性を持つ）を向上させ、低発熱化を達成した軸受である。これらの実現にあたり、コンピュータ解析技術と材料技術が必要であった。

コンピュータ解析では、温度変化をパラメータにとり、軸受の発熱を最小限にする仕様が盛り込まれた。その解析例と実際の回転試験結果を図5に示す。これらの解析結果からロボストシリーズアンギュラ玉軸受が開発され、その性能は図6に示すように軸受の内外輪温度差に対して、発熱量、PV値の変化を少なくす



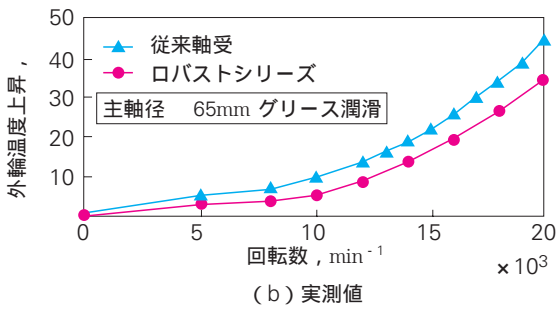
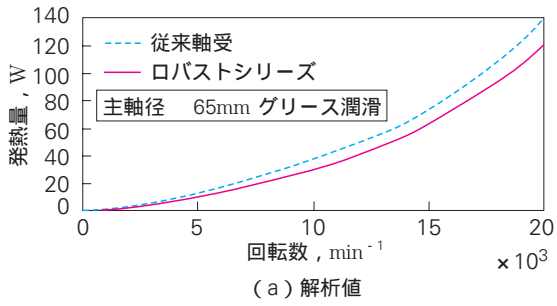


図5 65アンギュラ玉軸受の発熱解析と回転試験結果  
Fig. 5 Analysis and test results of 65 (l. D.) bearings

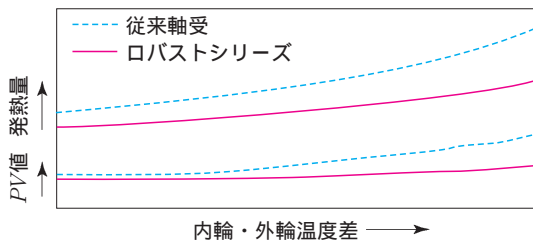


図6 温度ロバスト性の解析結果  
Fig. 6 Analysis results for temperature robustness

る仕様となっている。

このロバスト仕様により、従来の軸受性能（剛性、グリース寿命）を維持しながら、20%の高速化を可能にしている。また、高速用耐熱鋼（SHX材）を使用することにより、定位置予圧で  $d_m n$  値200万が達成でき、オイルエアの給油方法の最適化（スピンショットII）により、定位置予圧で  $d_m n$  値250万をも実現している。その性能を図7に示す。

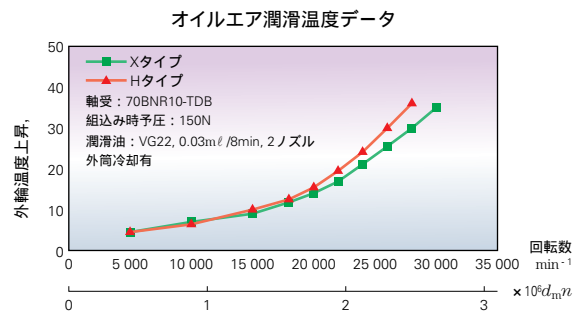
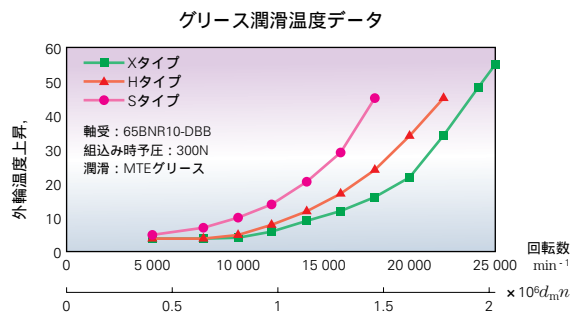


図7 回転試験結果  
Fig. 7 Test results

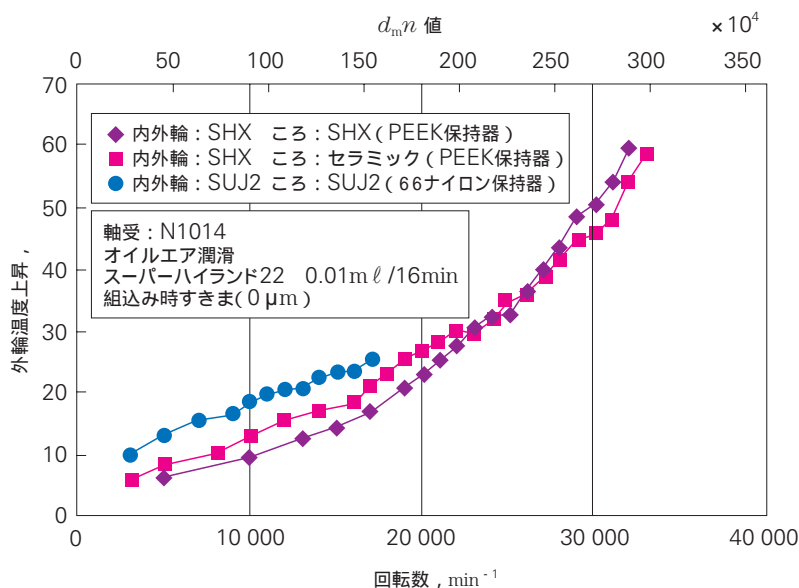


図8 高速円筒ころ軸受 実験結果  
Fig. 8 High-speed cylindrical roller bearing test results

また、このコンピュータ解析技術は最適な軸受仕様を選定する際に、それぞれ異なるスピンドル構造での熱変化状態を推定するのもにも利用されている。

玉軸受ところ軸受では、転動体の接触部分の形態が違いため、ロバストシリーズ円筒ころ軸受については異なった開発となっている。

一般的に、玉軸受は高速に向いており、ころ軸受はころの姿勢を規制するつば部に滑り面を持っていることから高速化は難しいとされていた。しかし、ころとつば部の滑り部分の解析によりPV値を低減させ摩耗を抑制することにより、高速化が実現し  $d_m n$  値で300万が可能となり、商品化されている。その性能を図8に示す。

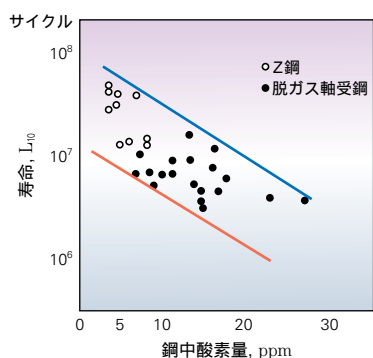


図9 寿命特性  
Fig. 9 Fatigue life

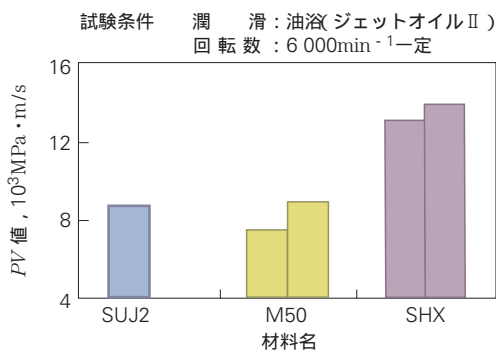
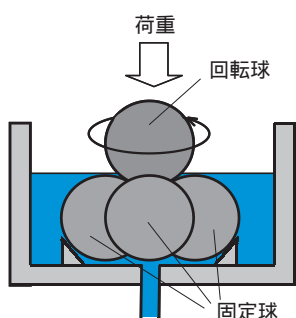


図10 焼付き限界試験結果  
Fig. 10 Seizure resistance test under lubrication

### 3.2 鋼材の開発

軸受の長寿命化では、金属疲労による転がり疲れ寿命を改善するために軸受鋼 (SUJ2) の清浄度を上げる必要がある。非金属介在物の評価技術と製鋼技術の確立により、高浄度鋼のZ鋼, EP鋼を開発した。図9に寿命試験結果を示す。Z鋼は脱ガス鋼と比較して寿命が1.8倍に向上しており、NSK精密軸受の標準材料として使用されている。

また、 $d_m n$  値が150万を超える範囲では、高速用耐熱鋼のSHX材 (NSKが開発した材料) を推奨する。SHX材は、微量潤滑条件下にて、転がり接触部で一時的・局部的に発生しやすいクリティカルな潤滑油不足条件下で、優れた耐焼付き性・耐摩耗性を発揮でき、かつ長寿命といった優れた特性を持つ。図10に四球試験による耐焼付き性試験結果、図11に寿命試験結果を示す。SHX材は脱ガス軸受鋼と比較してクリーン潤滑条件下において、寿命が4倍に向上している。また、セラミックボールを使ったテストでは、軸受鋼に比べて耐圧痕性が30%高い結果が得られている。

### 3.3 セラミック転動体

アンギュラ玉軸受において、セラミックボールはスピンドルの高速化に大きく貢献してきた。工作機械用

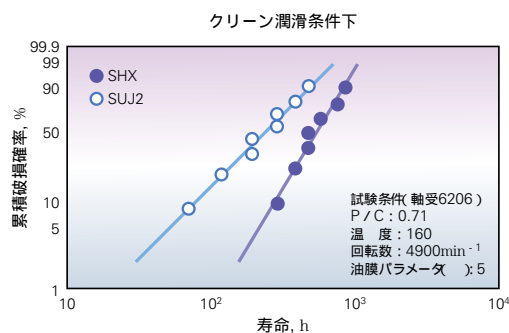


図11 寿命試験結果  
Fig.11 Flaking test results

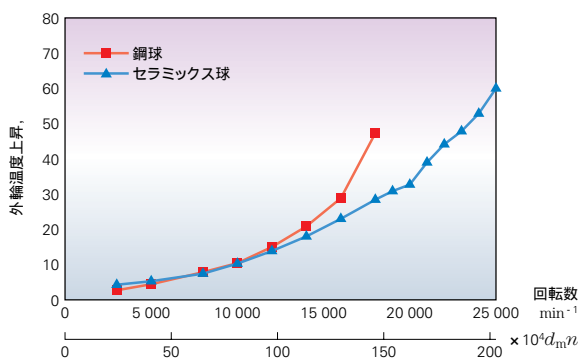


図12 セラミック玉軸受の回転試験結果  
Fig. 12 Ceramic balls test results

のセラミック材料は窒化珪素 ( $Si_3N_4$ ) が使用され、重量が鋼球と比較して40%軽量であるため、転動体に作用する遠心力の影響が小さく、ジャイロモーメントによるすべりも小さい。また、線膨張係数が低いため、高速で軸受温度が上昇した時に、予圧荷重の増加が鋼球の場合と比較して低く低発熱である。さらに、ヤング率が高いため弾性変形量が少く、弾性接触部のすべりも小さくなるなどの効果がある。図12に温度上昇の鋼球仕様との比較結果を示す。

円筒ころ軸受においても、軽量、線膨張係数の違いにより、同様の効果が期待されるが、SHX材のころと比較した試験においては、 $d_m n$ 値が200万までは差がなく200万以上において優位性が確認される。図8を参照願いたい。

3.4 保持器材の開発

軸受の高速化をはかるにあたり、保持器の性能が大きく影響する。軽量で自己潤滑性が良く摩擦係数が小さいエンジニアリングプラスチックが、工作機械用軸受には採用されている。

アンギュラ玉軸受では、 $d_m n$ 値で140万以下の使用領域において、保持器をプラスチック化することにより、性能を向上することができる。玉案内のポリアミド保持器は保持器音対策品として開発された。保持器が玉に案内されていることから軌道輪案内に比べて、滑りによる発熱が小さく、また外輪側に多くのグリースを保持することが可能で、グリースの長寿命化に貢献することがわかっている。この形状を従来の機械加工で製作するとコスト高となるが、射出成型が可能な

プラスチックを用いることにより、低コスト化が可能になった。

従来のフェノール保持器とポリアミド保持器の性能比較結果を図13に示す。従来のポリアミド保持器は  $d_m n$ 値で115万が限界とされていたが、新たに開発されたポリアミド保持器は  $d_m n$ 値で140万まで使用可能である。 $d_m n$ 値が140万を超える領域では、フェノール保持器が優れているが、それ以下の領域では新しいポリアミド保持器の方が、発熱が低い。現状、グリース潤滑の限界も  $d_m n$ 値140万である。

円筒ころ軸受の高速化を実現した重要な要素として、保持器の新材料技術があった。ロバストシリーズ円筒ころ軸受には、耐熱温度が300 を超え、剛性も非常に高いプラスチック (PEEK: ポリエーテルエーテルケトン) を採用している。また、高剛性シリーズ複列円筒ころ軸受では、耐熱性が高く、高剛性のPPS (ポリフェニレンサルファイド) を用いた保持器を開発した。PEEK, PPSとも耐熱性の高いプラスチックではあるが、射出成型も可能であり、コストが高くなるのを抑えることができる。

3.5 潤滑法の開発

潤滑は、転がり軸受の性能を引き出す重要な要素となる。1970年代に旋盤を中心にグリース化が進んだ。1980年代にはいり、マシニングセンタの高速化により、オイルエア・オイルミストなどの微量潤滑が主体となった。高圧で切削水が吹き付けられるスピンドルでは、スピンドル内部に切削水が入る問題に対してオイルエア・オイルミストは有効であり、油の微量潤滑

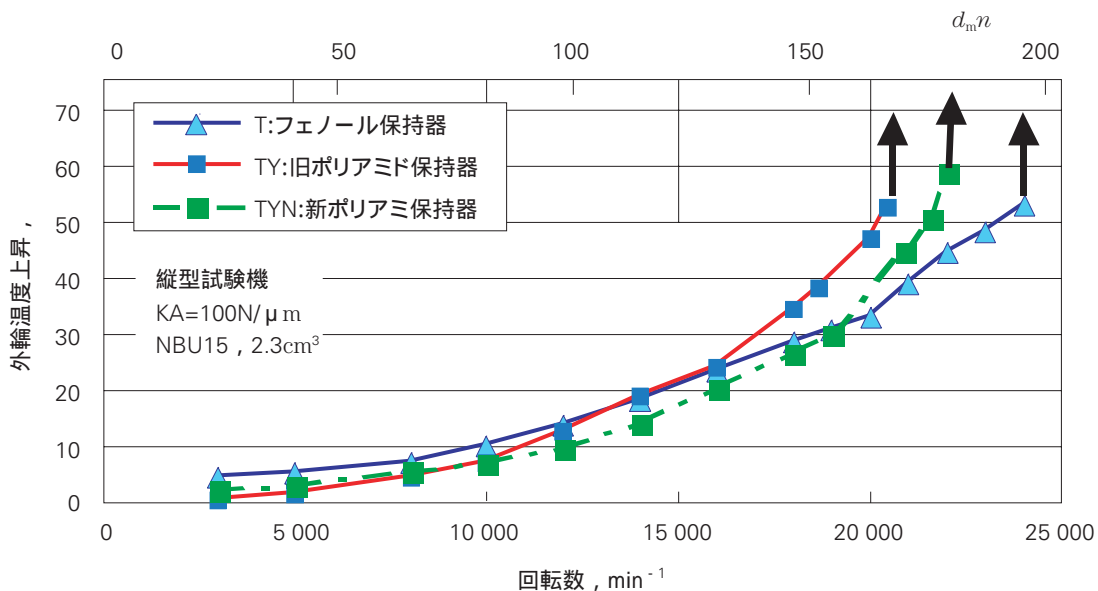


図13 保持器評価試験結果  
Fig. 13 Plastic cage test results

は現在でも主流になっている。しかしながら、メンテナンス、装置の簡素化および耐環境性向上の点から、グリース潤滑へのニーズは強い。

グリース潤滑の寿命は温度による影響が大きい。図14のグリース耐久試験結果においても、低発熱のロバスト軸受のグリース寿命が長くなっている。転動面での発熱を低く抑えることがグリース寿命延長には重要である。

NSKでは、高速回転時の耐圧性を改善し信頼性を高めたMTEグリースおよび高速化に伴う高温化に対してウレア系の増ちょう材を用いたMTSグリースを開発し、販売している。

工作機械では、高速で転動面の温度が高く、剛性も要求されて転動面の荷重も高いため、現状定位置予圧では  $d_m n$  値140万までが使用範囲である。それ以上の高速領域において、グリース潤滑で対応するためにNSKではグリース補給システムの開発を行なっている。

また超高速スピンドルにおいては、現状のオイルエア、オイルミストではエアカーテンの影響で、的確に軸受内部に油を注入することは困難となる。その対策として、NSKでは高速度で油を噴射するスーパーリーン潤滑を開発した。

#### 4. 高精度化技術

工作機械の高機能化の中で、高精度化の要求も厳しくなっている。高精度分野では、HDD部品加工用旋盤の軸受が最も厳しく精度を要求されている。HDD部品加工では、被削物の真円度 $0.2\mu\text{m}$ 以下が要求されている。最近では、 $0.1\mu\text{m}$ 以下の要求も出てきている。被削物が回転する旋盤の場合、軸受の非回転同期振れ(NRRO)が問題になる。NSKでは軸受のNRRO測定機を開発し、高精度軸受の精度管理を行なっている。アンギュラ玉軸受においては、被削物の真円度 $0.2\mu\text{m}$ 以下を達成している。円筒ころ軸受については、高精度ころの採用により高精度化が進んでいる。

一方、マシニングセンタのように工具が回転する場合は、スピンドルの振れ精度が重要になる。高精度マシニングセンタの場合ではテストバーの先端で $15\mu\text{m}$ が出荷基準であるが、さらにその要求精度は厳しくなっている。このため、高精度・高速化に伴ない、工作機械用軸受はJIS2級以上の回転精度が必要となっている。

主軸の振れ精度向上のためには、軸受周辺部品の高精度化、組立て精度の向上および動的振れ精度の向上

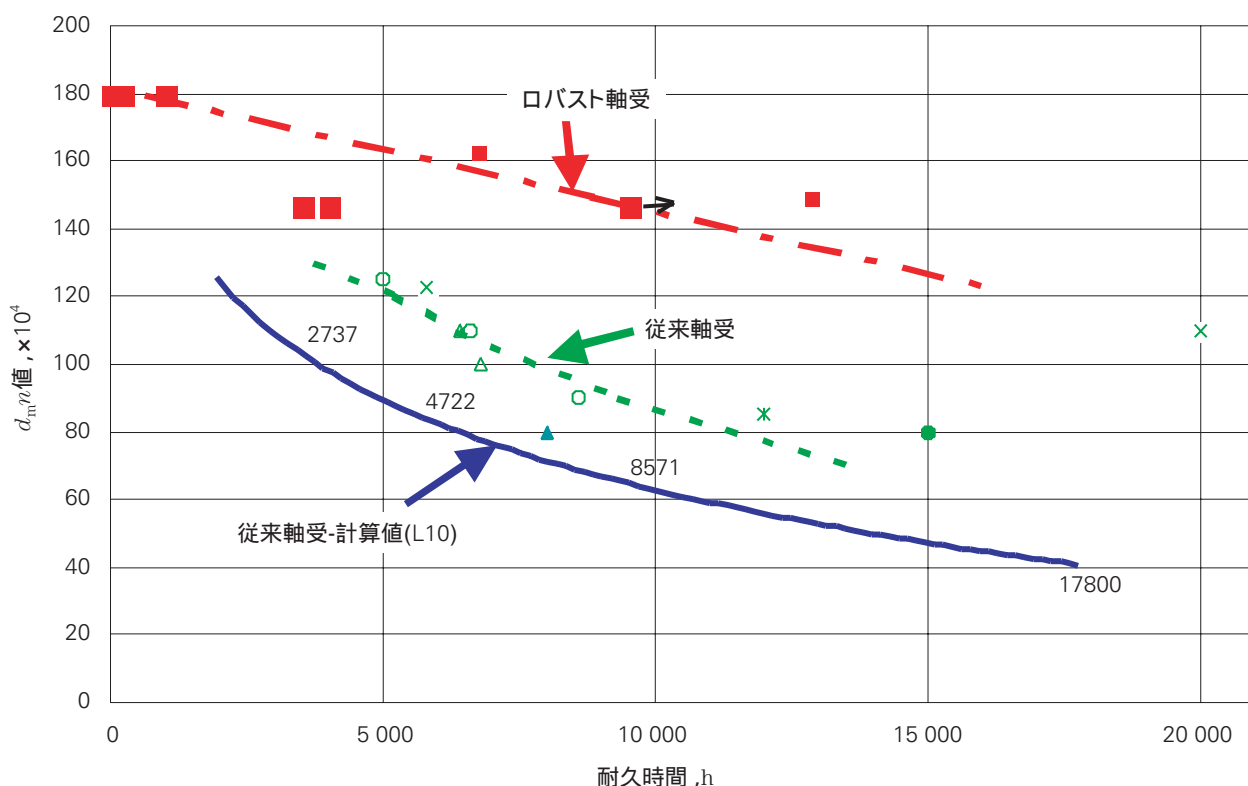


図14 グリース寿命  
Fig. 14 Grease life



図15 NSK 工作機械用精密軸受と周辺技術  
 Fig. 15 Range of NSK super precision bearings products

が必要となるが、組込み軸受の組合せ方法(位相合せ)なども大きく影響することが確認されている。

こういった高精度軸受を開発、評価するために、サブミクロンの回転精度を保証する生産プロセスはもちろんのこと、測定機の開発も必須条件になる。

5. エコロジー対応

最近では、省エネ、環境汚染対策、騒音を含めた作業環境改善に対するエコロジー対応機が要求されている。

高速スピンドルでは、オイルミスト、オイルエア潤滑がその信頼性のために採用されているが、オイルの大気中への飛散、エアの大量消費、風切り音による騒音などが問題となり、別途カバーなどを付けて対策を取っている機械もある。このような問題に対して、NSKのスピッシュットII(エア流量削減、低騒音化)、グリース補給システムの採用が効果的であり、すでに市場での実績がある。

また、作業性向上、環境汚染(グリース漏れ)対策として、シール付きの主軸用アンギュラ玉軸受、ボールねじサポート用のスラストアンギュラ玉軸受を開発し、シリーズ化を行っている。

6. あとがき

JIMTOF2002の出展機にみるように、工作機械に求められる要求は高速高精度化、複合化などの高機能化、省エネ、環境汚染対策などのエコロジー化およびエコノミー化など幅広くなっている。NSKではこのような要求に対して、図15のような工作機械用精密軸受および周辺商品を用意している。詳細については、NSKカタログ精密転がり軸受No.1254を参照いただきたい。工作機械の新たな開発にあたり、貢献できれば幸いである。

今後も工作機械の動向をつかみながら、新たな価値の提案ができる商品を開発し、工作機械の進歩に貢献していきたいと考える。

# 超高速スピンドル

杉田 澄雄\*



杉田 澄雄

## Ultra High-speed Spindle for Machine Tools

by S. Sugita

Compared to the 1990s, the overall demand for faster machine tool spindles is on a decline. One reason for the decline is that achieving higher speeds has become increasingly difficult. However, machine tools for aerospace, and die and mold industries continue to require even greater high-speed processing, in addition to greater precision, multifunctional capability, and environmentally friendliness. One of the latest developments at NSK is an ultra high-speed spindle that uses 40 000  $\text{min}^{-1}$  rolling bearings for machining centers. This spindle achieves a  $d_m n$  value of four million, which is the highest speed in rolling bearing spindles. In this article, we will introduce our ultra high-speed spindle and some of the technologies related to its development.

- 1. はじめに
- 2. 4万超高速回転スピンドル
  - 2.1 概要
  - 2.2 仕様
- 3. 超高速化技術
  - 3.1 スーパーリーン潤滑
  - 3.2 低振動化, バランス
  - 3.3 定圧予圧方式
  - 3.4 高精度ロバスト軸受
- 4. あとがき

### 1. はじめに

工作機械主軸の高速化の流れは1990年代, 大きく進んできたが, ここ数年鈍ったように思われる。これは, 機械の高精度化, 複合機化やエコロジー指向などの回転数UP以外の要求が強くなってきたことがおもな要因と考えられるが, さらなる高速化が技術的に困難になってきたことも要因の一つと考えられる<sup>1)</sup>。しかし, 金型の磨きレス高速加工や, 航空機アルミ部品の高能率加工などの分野においてはさらなる高速化が望まれている。

NSKでは, これら主軸の高速化に対応するため, ころがり主軸の最高速度 ( $d_m n$  400万) に挑戦し, 4万回転超高速スピンドルの開発を行った。ここでは,

本スピンドルの概要と, 超高速を達成するために用いた技術について紹介する。

### 2. 4万回転超高速スピンドル

#### 2.1 概要

今回開発した超高速スピンドルは, マシニングセンタ向けのモータビルトインスピンドルであり, 定圧予圧式の転がり主軸である。新潤滑法であるスーパーリーン潤滑およびロバスト軸受の採用により耐焼付性, 高速性を向上させている。

さらにバランス技術等により, 低振動, 低騒音, 高精度を実現した (騒音レベル85dB以下, 40 000 $\text{min}^{-1}$ )

#### 2.2 仕様

表1に, 主な仕様, 図1に外観図を示す。

\* 総合研究開発センター 新技術開発第一部

表1 超高速スピンドルの主な仕様  
Table 1 Spindle specifications

最高回転数	40 000min <sup>-1</sup> ( $d_m n$ 360万)
主軸径	70mm
ツールホルダ	HSK-F63
潤滑	スーパーリーン潤滑
モータ出力	11-15kW
主な寸法	外径 210mm, 全長455mm

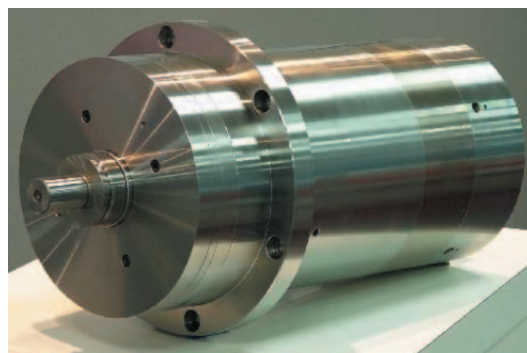


図1 超高速スピンドル  
Fig. 1 Ultra high-speed spindle

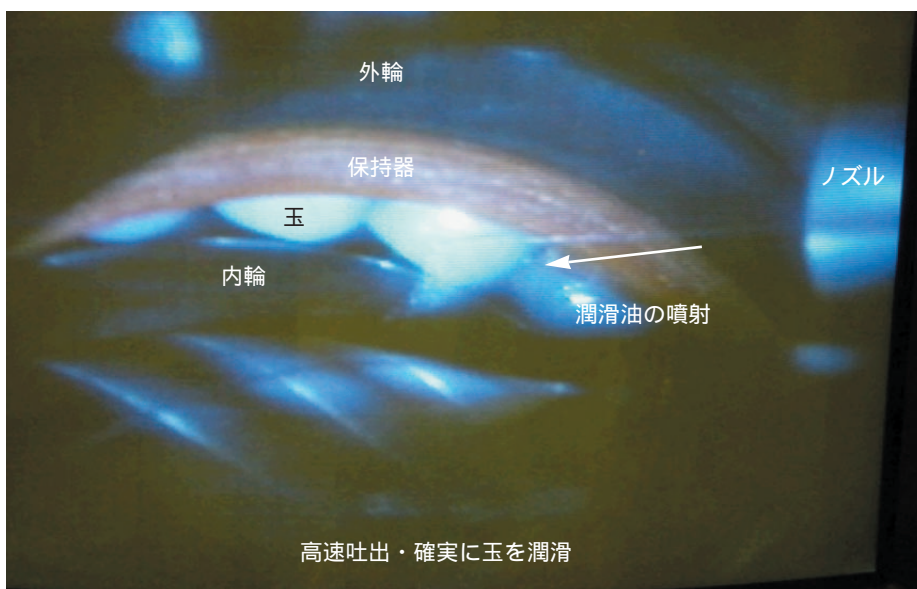


図2 スーパーリーン潤滑  $d_m n$  250万での高速度写真  
Fig. 2 High speed photograph of bearing under Super lean lubrication at  $2.5 \times 10^6 d_m n$

### 3. 超高速化技術

#### 3.1 スーパーリーン潤滑

超高速回転を達成するために、従来のオイルエア潤滑にかわる新潤滑方式を開発した。

オイルエア潤滑は、圧縮エアにより微量の潤滑油を軸受内部に送る方式であるが、回転によるエアカーテンの影響で軸受内部に潤滑油が入りにくい構成となっている。

本スーパーリーン潤滑はいわゆる直噴潤滑で、微量の油を間欠的に高速度で噴射する潤滑である。本潤滑によれば、エアカーテン（内輪周速度200m/s）の影響を受けず、狙った位置の潤滑を確実に行うことができる。図2は、高速回転中（ $d_m n$  250万）の潤滑油ショットの様子を高速度カメラでとらえたものである。噴射した潤滑油がボールに直接到達しており、確実な潤滑が可能である。

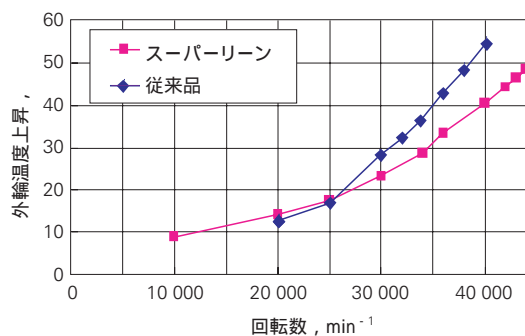


図3 スーパーリーン潤滑 回転試験結果  
Fig. 3 Test results for Super lean lubrication

図3は、スーパーリーン潤滑スピンドルの回転試験結果である。主軸径 70mmのスピンドルにて、最高 45 000min<sup>-1</sup> ( $d_m n$  400万) を達成することができた。

図4に、本潤滑システムの概略構成を示す。専用の微量吐出装置により、1ショットあたり約0.003cm<sup>3</sup>の

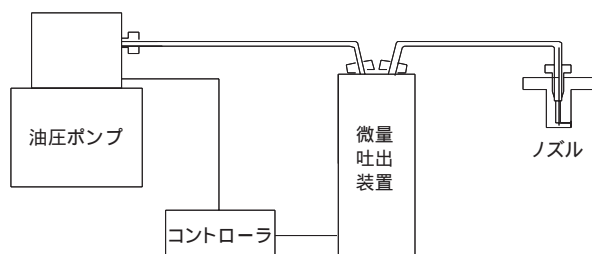


図4 スーパーリーン潤滑装置 概略構成  
Fig. 4 Schematic view for Super lean lubrication unit

潤滑油を高速度で噴射することができる。図5は、実際のショットの様子である。

1ショットの吐出量は、従来オイルエア潤滑の約10分の1である。微量の油を短い間隔で送ることにより、安定した潤滑が可能となっている。

スーパーリーン潤滑では、潤滑油のショット自体にエア消費を必要としないが、潤滑油の排出を助けるために若干のエアが必要である。しかし、オイルエア潤滑のエア消費量にくらべて1/2以下の消費量とすることができる。

また、ボールにエアを吹き付けないため、エアとボールの風切音が発生せず、静音であるという特長も持っている。図6は、従来オイルエア潤滑スピンドルと本潤滑スピンドルの騒音値を比較した結果である。本潤滑により約2dB騒音レベルが下がることが確認された。

### 3.2 低振動化，バランス

超高速では、危険速度の問題が生じる。通常、使用回転速度が危険速度の60%以下程度であれば大きな問題は生じないが、それ以上の回転速度では主軸の曲げ変形の影響で、振動が増大する。図7は、本スピンドルのモード解析（危険速度）結果である。使用回転数が危険速度の約75%となるため、低振動化にあたっては、図7のような曲げ変形の影響を考慮しなければならない。

そこで今回、曲げ変形を抑制するため、図8のような多面バランス修正を採用した。今回採用した修正法は影響係数法と呼ばれる手法で、低速から高速までの各回転数における振動V1, V2を最小にする修正量U1



図5 ノズルからの潤滑油の噴射 (0.003cm<sup>3</sup>)  
Fig. 5 Droplets of oil discharged from nozzle

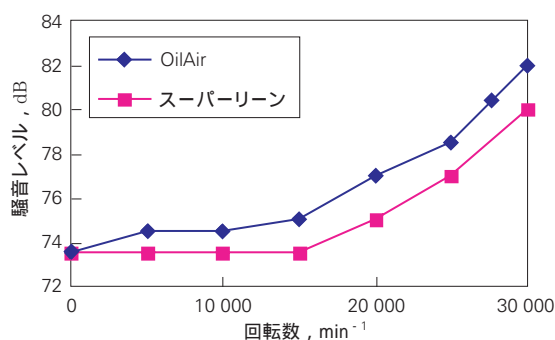


図6 騒音値の比較  
Fig. 6 Comparison of noise level

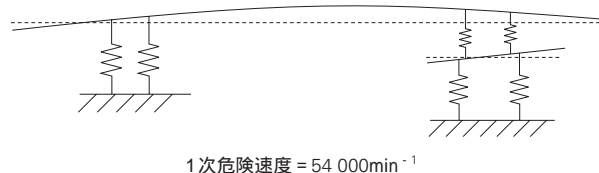


図7 超高速スピンドル モード解析  
Fig. 7 Mode analysis for the spindle

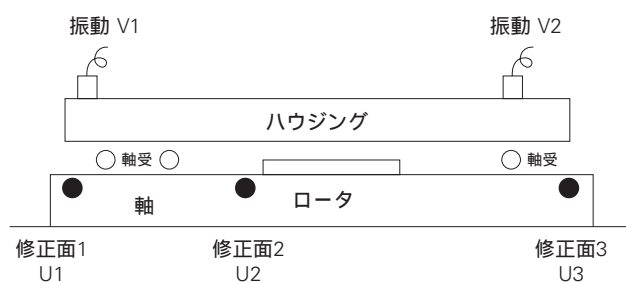


図8 多面修正  
Fig. 8 Multipoint balancing

~ U3を演算により求めている。

従来のバランス修正はU1とU3の2点にて行っていたが、今回新たにU2を加えることにより、低速でバランスが崩れず、かつ高速でつりあうバランス修正を行うことが可能となっている。

図9は、従来の2面修正法と今回採用した多面修正法によるハウジングの振動値を比較した結果である。



3万回転以上の高速回転で、多面修正法の振動が低減されている。図10は主軸先端の回転中の振れ回り精度を測定した結果である。3万回転以上での振れ回り増大がほとんどなくなり、高精度が達成されている。

3.4 定圧予圧方式

本スピンドルは高速性を確保するため、定圧予圧方

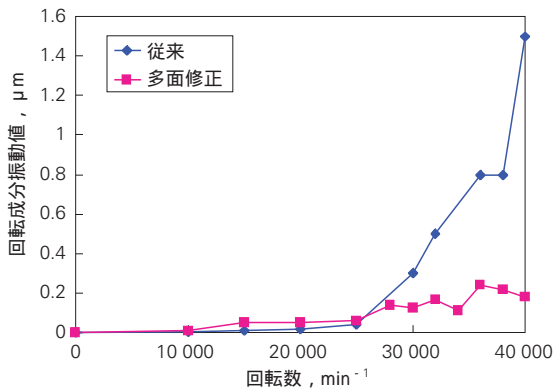


図9 振動値の比較  
Fig. 9 Comparison of vibration

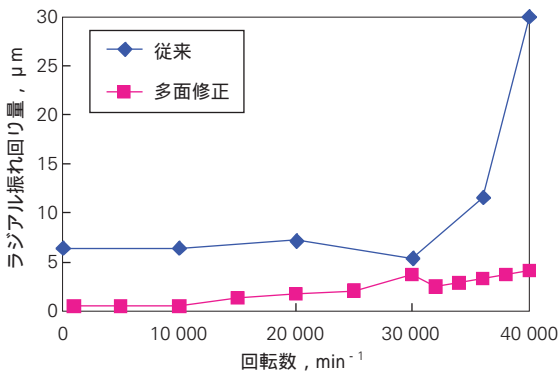


図10 主軸の振れ回り比較  
Fig. 10 Comparison of shaft run-out

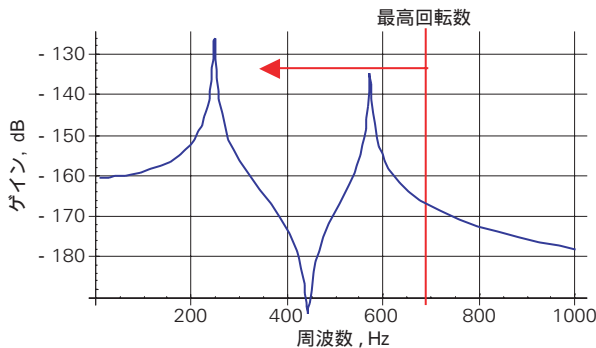


図12 軸のアキシャル方向周波数特性  
Fig. 12 Axial frequency response of spindle

式を採用している。定圧予圧では、軸受に一定の予圧を付与するため、軸方向にスライドする軸受スリーブを用いる。スリーブに求められる特性は、スライド性、減衰性、ラジアル剛性、と大きく3つあり、これら相反する3つの特性を同時に成立させることが重要である。

図11は、スピンドルのアキシャル振動モデルを示したものであるが、軸受スリーブと軸の2つの質量があるため、2つの共振点をもつこととなる。高速主軸では、この2つの共振点を使用回転速度より高く設計することが困難である場合が多く、本主軸においても、図12の解析結果に示すように、共振点を使用回転数以内に存在している。

今回、このアキシャル共振に対応するため、油圧式の減衰器を採用し振動を抑制した。

また、優れたスライド性と、ラジアル方向の剛性、減衰性を確保するため、油静圧方式を採用した。

図13は、軸受スリーブ方式の違いを、騒音値にて比較した結果である。従来のすべり式の軸受スリーブにくらべ、振動が抑えられた結果、騒音値も低減した。

3.3 高精度ロバスト軸受

軸受には、温度外乱に強く、安定した性能を維持できるNSKが開発したサブミクロン振れ精度のロバ

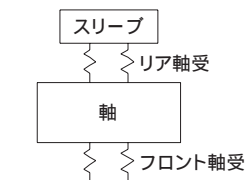


図11 スピンドルのアキシャル振動モデル  
Fig. 11 Model of axial vibration of spindle

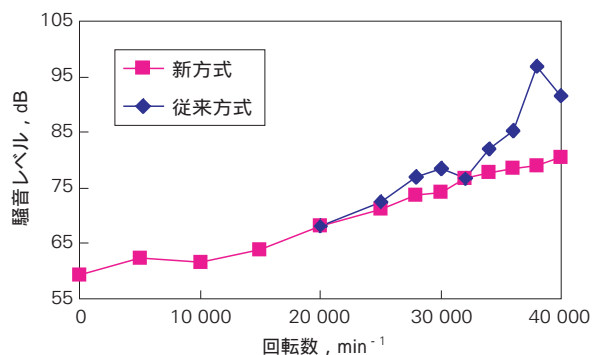


図13 スリーブ方式による騒音値比較  
Fig. 13 Noise levels of sleeve type

ト軸受を採用している。この軸受は高速回転下でのフープ応力による内輪の耐破壊性を考慮して、特殊な材料と熱処理を施しているのも特長である。

## 5. あとがき

本超高速スピンドルは、NSKの高速化技術を結集し、ころがり主軸の限界の  $d_{mn}$  400万に挑戦したスピンドルである。また、超高速回転を単に達成しただけではなく、従来よりも1クラス上の高精度、低振動を実現し、音が静かでエア消費が少ないという環境にも配慮したスピンドルとすることができた。これらNSKのスピンドル技術を通じ、工作機械の高速化に貢献していきたい。

## 参考文献

- 1) 米山博幸: “ 転がり軸受による主軸高速化の課題 ”, 日本機械学会 講習会 「工作機械の鍵を握る新技術」(1998. 11. 27) 1-4.

# グリース補給潤滑 ビルトインモータスピンドルの開発



青木 満穂

青木 満穂\* , 森田 康司\*

## Development of a Motor Spindle for Machine Tools Using Grease Replenishment Lubrication



森田 康司

by M. Aoki , Y. Morita

Since the JIMTOF 2002, competition among makers for faster high-speed machine tool spindles has not intensified. The focus of machine tools seems to have changed to the ecological and environmental issues. NSK has thus developed a new spindle with a built-in motor that adheres to four concepts:

- Increased rotational speed with grease lubrication
- High rigidity and cutting performance at any speed
- User-friendly and maintenance-free
- Trouble-free operations

We developed a grease lubricant replenishing system for our machine tool spindle in order to achieve these concepts. Features of this spindle include:

- Continuous replenishment of grease lubricant
- Six position-preloaded bearings (Bore diameter: 70 mm)
- All-in-one spindle with various support equipment
- High-reliability

NSK machine tool spindles are doing well in the marketplace with unprecedented performance.

Product specifications are as follows:

- Spindle taper #40 /HSK-A63
- Maximum speed  $20\,000\text{min}^{-1}$  ,
- Bearing bore diameter 70 mm
- Grease lubrication.

We conducted grease drain testing, heavy-cut testing, coolant resistance testing, and bearing endurance tests, to confirm the effectiveness of our spindle design. All tests showed favorable results. We supplied this spindle to several customers, and received positive comments regarding product performance and customer satisfaction.

- |  |   |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. はじめに</li> <li>2. 開発の背景             <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1 スピンドル市場の現状</li> <li>2.2 商品コンセプト</li> </ol> </li> <li>3. 標準高速スピンドルの特長             <ol style="list-style-type: none"> <li>3.1 グリース補給潤滑の採用</li> <li>3.2 70mm定位置予圧 6列軸受</li> </ol> </li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>3.3 オールインワンパッケージ</li> <li>3.4 高信頼性</li> <li>4. 標準高速スピンドルの仕様             <ol style="list-style-type: none"> <li>4.1 仕様</li> <li>4.2 主要寸法</li> </ol> </li> <li>5. 標準高速スピンドルの基本性能</li> <li>6. あとがき</li> </ol> |
|--|---|

\* 技術開発本部 プロジェクトB1チーム

## 1. はじめに

工作機械の開発において、高精度化と並ぶ最重要課題のひとつは高能率化、すなわち生産性の向上であり、加工/非加工にかかわらずその時間短縮が開発者の大きな使命であった。一方では、地球規模の環境問題がクローズアップされ、工作機械もまた環境に配慮することが望まれるようになってきている。さらに、競争のグローバル化により工作機械はさらなる高機能化と短納期化が強く求められている。NSKでは、これらのニーズを満足する、高機能型の「NSK高速ビルトインモータスピンドル」を開発、商品化したので報告する。

## 2. 開発の背景

### 2.1 スピンドル市場の現状

#### 2.1.1 高速化傾向の鈍化

工作機械のミーリングスピンドルは年々高速化の一途をたどり、2000年のJIMTOFでは#40相当で $20,000\text{min}^{-1}$ 以上が実用レベルになってきていたが、2002年のJIMTOFになるとスピンドルの高速化はそれまでのようには進展せず、2000年とほぼ同じような状況であった。これは、これ以上の高速化となると、そのニーズの強さにくらべ、技術的難易度が高いためであると考えられ、同じ回転数でもむしろ低騒音や低

振動、高信頼性など質的な向上が望まれている。

#### 2.1.2 環境対応ニーズの高まり

一方では、企業活動において今後ますます環境への取り組みが重要視される中、工作機械もまた、潤滑油や電力消費量の削減、MQL加工によるクーラントの削減など、環境への配慮がなされるようになってきている。

#### 2.1.3 スピンドルの高機能化

また、粗加工から仕上げまで一台で行なえるワイドレンジスピンドルの需要は古くからあり、現在は予圧切替方式や軸心冷却などの技術を採用したスピンドルが一部のメーカから出されているが、コスト高となり普及するにはいたっていない。

#### 2.1.4 オールインワンユニット

これまでのスピンドルは、ユニットを購入する場合、軸・軸受・ハウジングといった基本構成要素のみで製品としているケースが少なくなかった。このためユーザである工作機械メーカは基本機能以外の機能をすべて設計、調達、組付け、調整などしなければならなかった。スピンドルに付随する基本機能以外の機能には、

- ・モータ
- ・ツールクランプ
- ・ツールアンクランプ

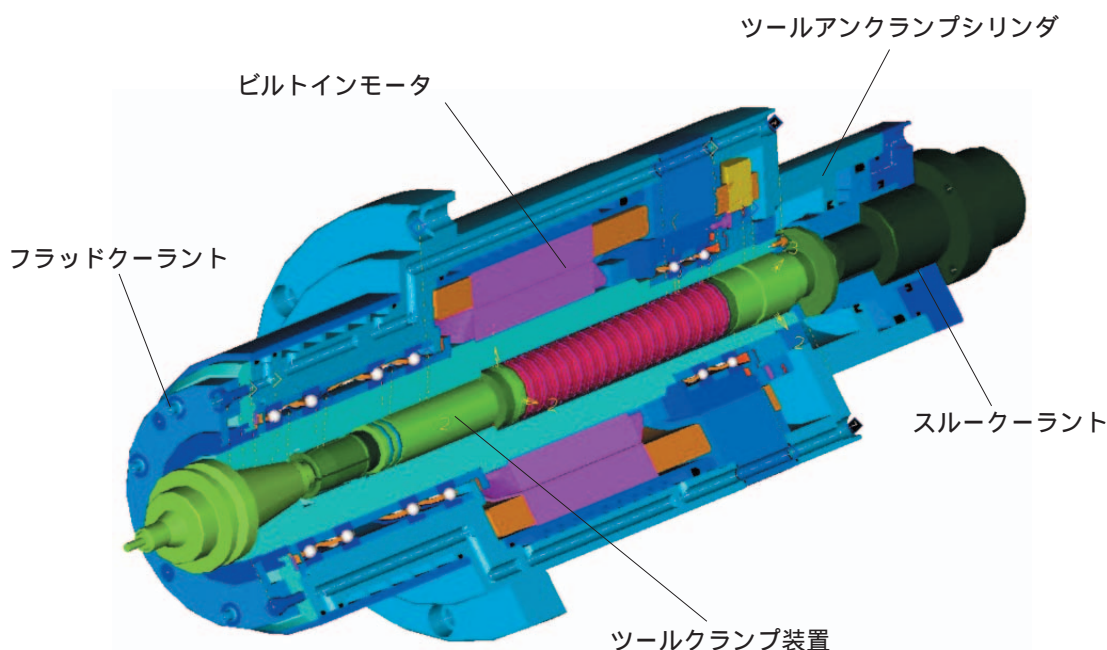


図1 オールインワンパッケージ

Fig. 1 All-in-one spindle

- ・ ツールクランプ / アンクランプの確認
  - ・ スルークーラント
  - ・ フラッドクーラント (主に横形マシニングセンタ)
- などがある。工作機械の短納期化がひとつの課題となっていることから、コンパクトにこれらの機能を凝縮した、ユーザにとって使い勝手のよいオールインワンパッケージ (図1) の高機能スピンドルが望まれている。

2.1.5 ビルトインモータ

スピンドルの駆動系にはさまざまな形態があるが、高速化や振動などの面からビルトインモータが主流になりつつある。

ビルトインモータの場合、モータとの芯出しなどの作業を行なう必要がないため組立作業時間が短く、かつ直結式に比べ30%程度コンパクトな主軸ヘッドにでき、重心をヘッドの中心に近くできるといったメリットも生まれてくる。ビルトインモータが注目されはじめた時に問題となったモータの発熱も、電流制御技術の進歩により大幅に改善されている。

2.2 商品コンセプト

このような市場ニーズから、“21世紀にふさわしい高機能型スピンドル”の商品化を目的とし、プロジェクトチームを発足して開発を行なった。商品コンセプトとしては、

- ・ グリース潤滑の高速化
- ・ 高剛性で低速から高速まで削れる
- ・ 使いやすさと保守性の追求
- ・ 信頼性の高いスピンドルユニット

の4つを掲げ、ユニット化による高機能化の時代の流れに応じた、これからのスピンドルのグローバルスタンダードを目指した。

3. 標準高速スピンドルの特長

上記コンセプトを実現する標準高速スピンドルの大き

- な特長は、
- ・ グリース補給潤滑の採用
  - ・ 70mm定位置予圧6列軸受
  - ・ オールインワンパッケージ
  - ・ 高信頼性

の4つである。以下にその試験結果を交え具体的に紹介する。

3.1 グリース補給潤滑の採用

特長の一番目は、グリース潤滑ながら  $d_{mn}170$ 万という高速性能を有する点であり、これにより#40で  $20,000\text{min}^{-1}$ 、かつ10,000時間メンテナンスフリーという画期的なスペックを実現した。これには、グリース補給潤滑という、NSKが開発した新潤滑方式の採用が不可欠であった。

3.1.1 グリース補給潤滑の特長

もともとグリース潤滑は表1に示すようにオイルエア潤滑に比べ、

- ・ メンテナンスフリー
- ・ オイル消費が少ない (省資源)
- ・ オイルの大気中への拡散がない (作業環境改善)
- ・ エア消費量が少ない (省エネ)
- ・ 低騒音 (作業環境改善)

など、環境という点でアドバンテージが大きい。一方オイルエア潤滑には

- ・ グリース寿命の問題がなく高速向き
  - ・ クーラント浸入の影響を受けにくい
- など、従来のグリース封入潤滑にはないメリットがあるが、これらは外部から常に潤滑油を供給しているために得られる利点であるといえる。

そこで、環境にやさしい高速潤滑として、グリースを外部から軸受に補給するというまったく新しいコンセプトの潤滑方式を考案し、上記のメリットをすべて得ることのできる、新潤滑方式「グリース補給潤滑」を開発し、標準高速スピンドルに採用した。

表1 潤滑方式の比較  
Table 1 Comparative table of lubrication method

	グリース補給	グリース封入	オイルエア
メンテナンス	フリー	フリー	× オイル補充要
オイル消費量	なし	なし	× 多い
オイルの大気中への拡散	なし	なし	× あり
エア消費量	少ない	少ない	× 多い
騒音	小さい	小さい	× 大きい
グリース寿命	なし	× あり	なし
耐クーラント性	強い	× 弱い	強い

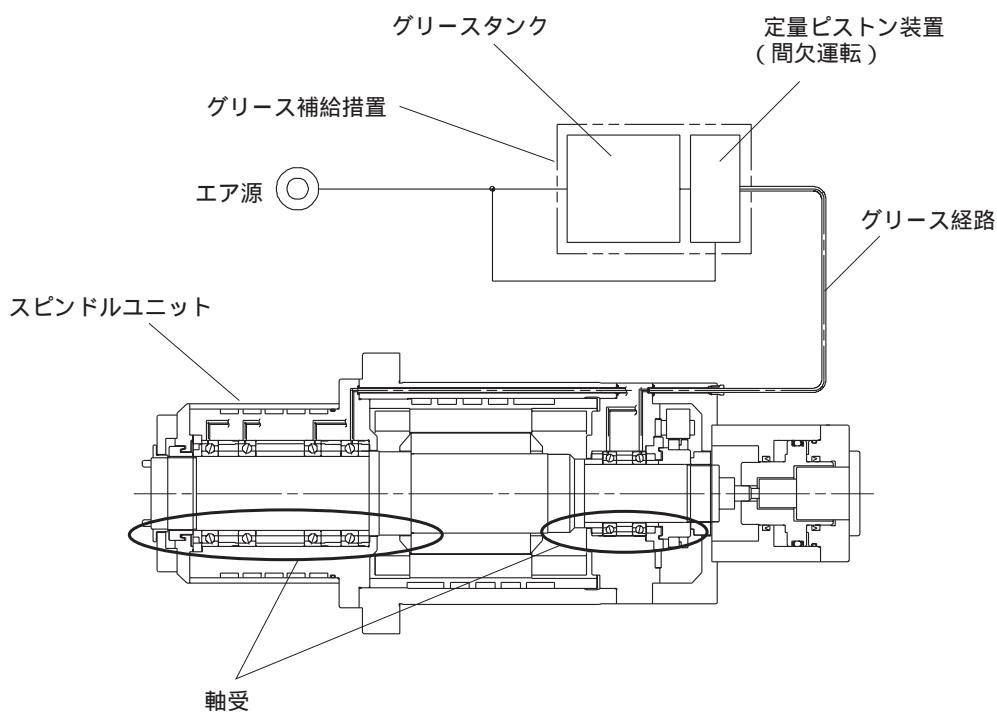


図2 グリース補給潤滑システム概念図

Fig. 2 Grease replenishment lubrication system



図3 グリース補給装置

Fig. 3 Automatic grease replenishing unit

### 3.1.2 グリース補給潤滑のメカニズム

#### (1) グリースの供給

図2はグリース補給潤滑システムの概念図である。スピンドルに接続されたグリース補給装置から微量のグリースが吐出されると、グリースは自身の圧力でチューブ内部を進み、最終的に軸受外輪に設けられた供給穴から軸受内部へと供給される。

グリース補給装置は定量ピストンとグリースタンクからなり、一回の吐出動作で $0.01 \sim 0.03\text{cm}^3$ 程度の微量なグリースを軸受へ間欠補給する。この潤滑方法ではグリース補給量のコントロールが重要となる。20 000 $\text{min}^{-1}$ で多量のグリースを補給すると、当然ながらグリースの攪拌抵抗の増加で軸受は異常発熱をする。また、グリースは回転速度と温度の上昇によりその寿命が短くなり、必要補給量は使用回転数ごとに異

なる．そこで，補給するグリース量を最小限にするため吐出インターバルは一定ではなく速度感応式としている．図3は製品化したグリース補給装置である．

(2) グリースの排出

グリース補給潤滑では，オイルエア潤滑と同様，補給したグリースのスムーズな排出がキーとなる．グリースが軸受内部に多くたまってしまうと，攪拌抵抗が大きくなり発熱や異音の原因となるためである．標準高速スピンドルでは図4に示すようなグリースの排出間座を設け，さらに廃グリースの貯蔵溝をハウジングに設けることにより，10 000時間のメンテナンスフリーを実現した．

考案した排出システムの効果を確認するため，実機を用い10 000時間分のグリースを実際に補給する試験を行なった結果，発熱もなくグリースは貯蔵溝にきれいに蓄積された．

3.2 70mm定位置予圧 6列軸受

特長の二番目は，一見 20 000min<sup>-1</sup>とは思えない

高剛性な軸受設計である．

3.2.1 軸受仕様

表2に標準高速スピンドルの軸受仕様を示す．低速から高速までしっかりとした切削加工のできるワイドレンジな剛性を持たせたとこのコンセプトを実現するため，20 000min<sup>-1</sup>という高速ながら，前側に軸受内径 70mm，定位置予圧のアンギュラDBB組合せ(4列)を採用し，さらにサポート側には 55mmのDB組合せ(2列)を配し，合計6個もの軸受を使用している．

3.2.2 切削試験結果

試作したスピンドルユニットを立形マシニングセンタに搭載し，スチールを切削した結果の一例を表3に示す．正面フライス加工の結果，20 000min<sup>-1</sup>スピンドルとしては十分な500cm<sup>3</sup>/min以上の切削除去量を出すことができ，低速域でも10 000min<sup>-1</sup>クラスのスピンドルに匹敵する重切削が可能であった．

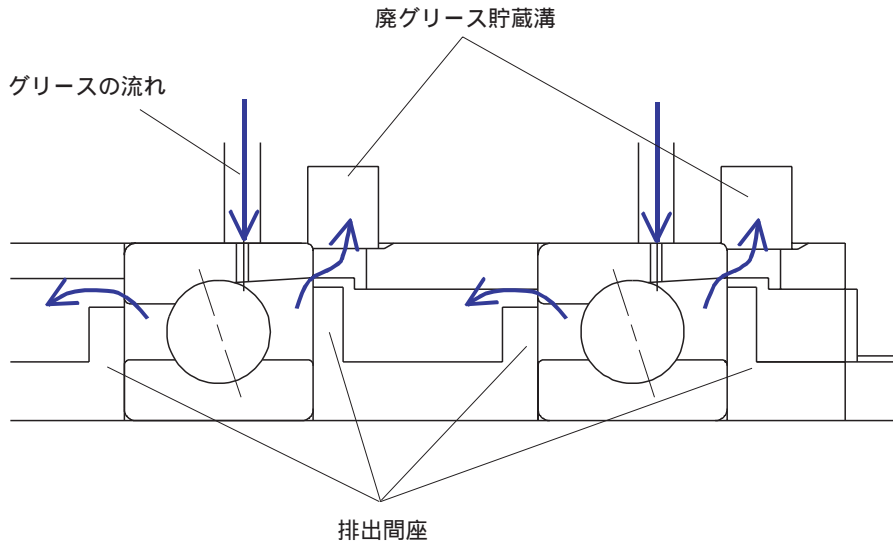


図4 グリース排出機構  
Fig. 4 Grease drain mechanism

表2 軸受仕様  
Table 2 Bearing specifications

	前側	後側
型式	70BNR19シリーズ	55BNR19シリーズ
転動体	セラミックボール	セラミックボール
軸受内径	70mm	55mm
d <sub>mn</sub> 値	170万	135万
組合せ	DBB (4列組合せ)	DB (2列)
潤滑方式	グリース補給潤滑	グリース補給潤滑

表3 切削試験結果  
Table 3 Cutting test results

被削材	S50C
カッター	フェイスミル
主軸回転数 (min <sup>-1</sup> )	1 200
切削幅 (mm)	70
送り速度 (mm/min)	3 600
切削除去量 (cm <sup>3</sup> /min)	504
加工面状態	良好

### 3.3 オールインワンパッケージ

特長の三番目は、使いやすさを追求したオールインワンパッケージ（図1）の採用である。ここではその具体的なメリットについて述べる。

#### 3.3.1 ツールクランプ機構

標準高速スピンドルはツールクランプ機構を標準で備えており、その状態でフィールドバランス修正を施している。したがって工作機械メーカーではスピンドルとドロバを別々に調達するよりもはるかに手間がかからず、組立工数の削減や生産工期の短縮が可能である。また、ツールの有無をドロバの動きで確認するスイッチが備えられている。ドロバの耐久性については次章で述べる。

#### 3.3.2 ツールアンクランプシリンダ

ツールアンクランプシリンダもスピンドルに標準装備しており、工作機械メーカーでは油圧さえあればツールアンクランプが可能である。近年では油圧ユニットレス化がエコロジーの観点から増えてきているが、その場合はエアハイドロブースタなどでもアンクランプ可能である。アンクランプシリンダには、制御用の上下限確認スイッチが付属されている。

#### 3.3.3 クーラント機能

マシニングセンタにおける代表的なクーラントは、

- ・フラッドクーラント
- ・スピンドルスルークーラント
- ・天井ジェット（シャワー）クーラント

・フロージェット（切粉流し）クーラント

などがあり、スピンドルに備えられるのは主に加工点の冷却および切り屑除去を目的としたスピンドルスルークーラントとフラッドクーラントである。標準高速スピンドルではこれらをオプションで選択できるようになっている。

スルークーラントはロータリーユニオン（図5）に供給される最大7.0MPaの高圧クーラントを刃先より吐出するもので、ドリルの深穴加工などで威力を発揮する。また、近年ではクーラント削減の一環としてMQL加工などのセミドライも増えているが、これも同じロータリーユニオンで対応可能である。

フラッドクーラントはノーズ端面6ヶ所から吐出されるタイプで、主に横形マシニングセンタで要求がある。立形マシニングセンタは一般に外配管が多い。またフラッドクーラントを除くすべての配管はスピンドル後側に配置し、組み立てやすさに工夫をしている。

### 3.4 高信頼性

特長の四番目は耐水性能や軸受耐久性など信頼性の高さである。スピンドルは性能がよくても信頼性が低いものは市場に受け入れられない。特に最近では、冒頭でも述べたように性能アップよりもむしろこの信頼性に重点がおかれるようになってきている。ここでは、各部の信頼性を検証するさまざまな試験を行なった結果について述べる。

#### 3.4.1 クーラント浸入対策

工作機械のスピンドルは、常にクーラントにさらされる過酷な環境で使用され、しかも接触シールが使え

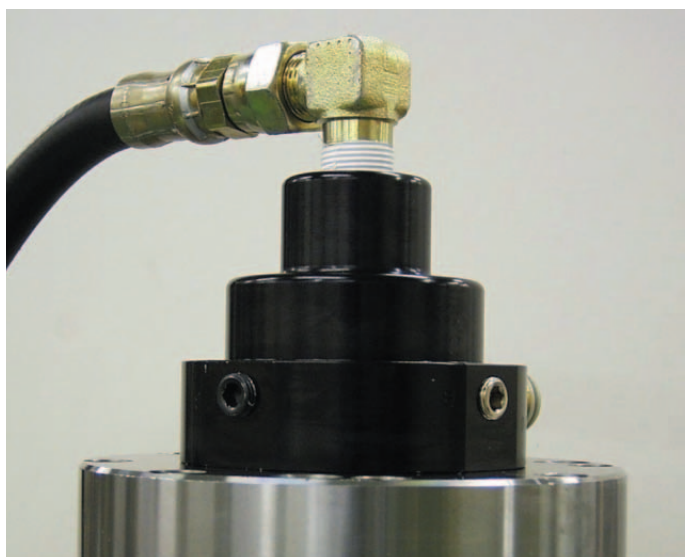


図5 ロータリーユニオン  
Fig. 5 Rotary union



ないことから、スピンドル内部にクーラントが浸入する問題を常にかかえており、これが信頼性低下の大きな要因のひとつである。特にグリース封入潤滑のスピンドルでは、一度クーラントが浸入すると潤滑油が供給されないのではそのまま潤滑不良をきたし焼き付きにいたるケースが見られた。標準高速スピンドルでは、4段シール+グリース補給という方法でこの問題を解決している。

(1) シール構造

図6に4段シールの構造を示す。1段目はクーラントや切り屑を軸の回転で振り切るスリンガであり、大部分のクーラントはこのスリンガで防ぐことができる。2段目はスリンガの外周から吹き出されるエアシールで、これもクーラントの浸入防止策としてごく一般的に用いられる効果的な手法である。3段目はラビリンスシールで、回転数が高く接触シールが使えない場合

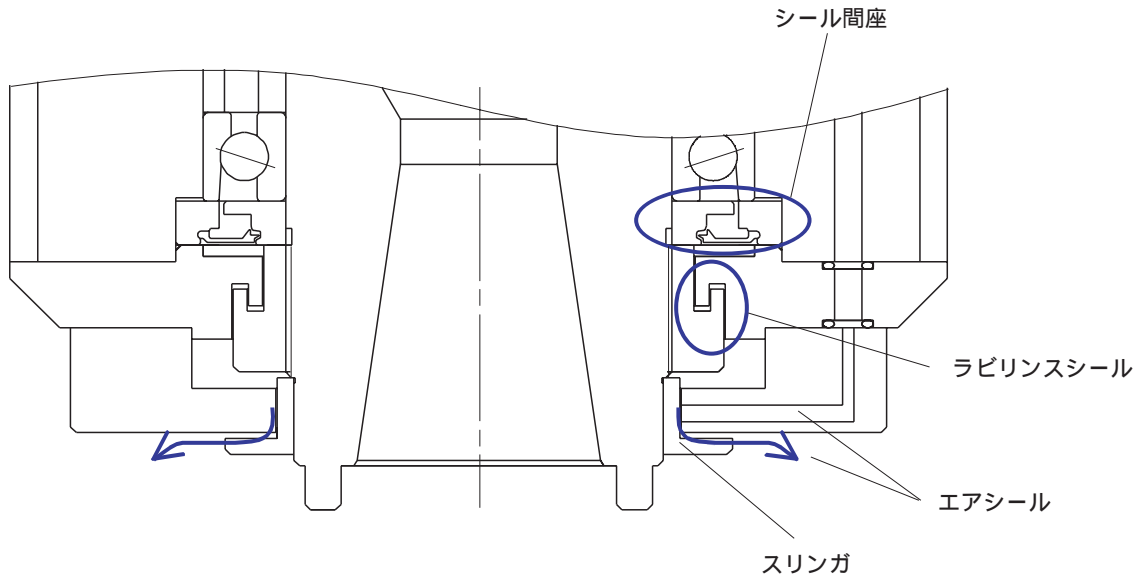


図6 4段シール  
Fig. 6 Quadruple seal

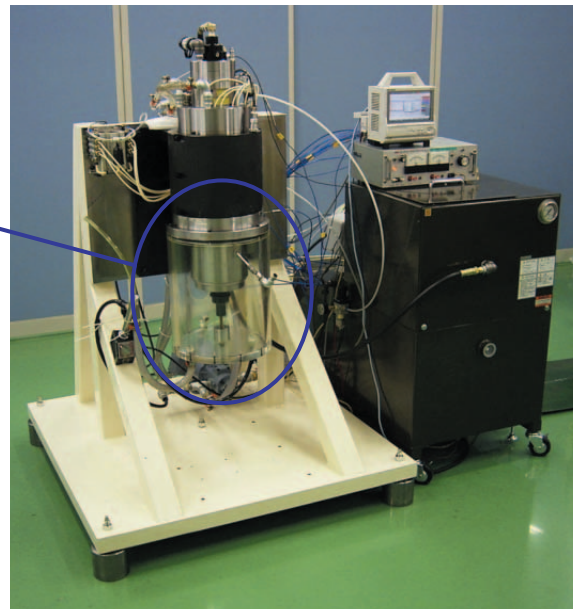
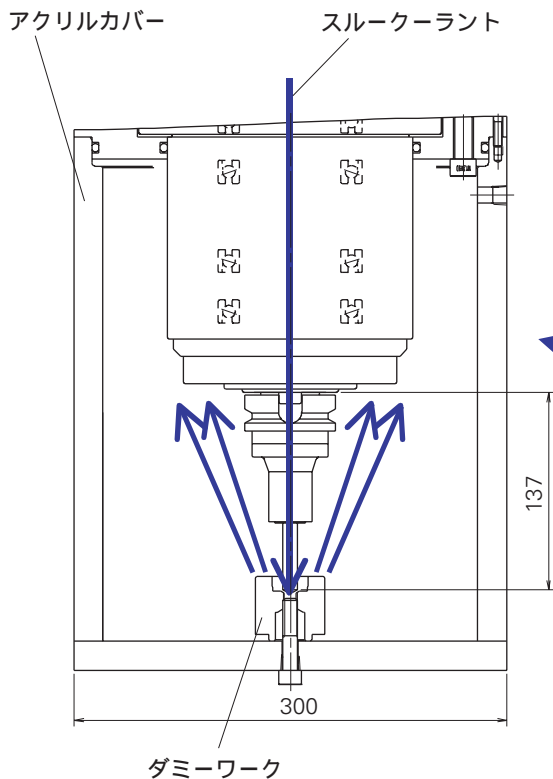


図7 耐水性試験概念図と試験装置  
Fig. 7 Coolant test equipment

は、最も一般的に用いられる。さらに、標準高速スピンドルでは4段目のシールとしてシール間座を設けた。これは、軸受間座に、もともとシール付軸受に使用されるゴム製のシールをはめ込んだもので、軸方向のスペースをあまり必要としないコンパクトな非接触シールである。

さらに、標準高速スピンドルでは、グリース補給潤滑を採用しているため、万一の浸入時にもグリースが洗い流されることがなく、オイルエア潤滑に匹敵する信頼性を持っている。

## (2) 耐水性試験

前述したクーラント対策の効果を確かめるため、7MPaの高圧クーラントを刃先から吐出させ、そのね返りをノーズ先端にかける試験を行なった。図7はその概念図と耐水性試験装置の写真である。

結果、クーラントの浸入は見られず、実機での使用に十分耐えうるシール構造であることが実証できた。

## 3.4.2 軸受耐久性

工作機械のスピンドルにおいて軸受の信頼性は最も重要なファクターのひとつである。ここでは、耐久試験として行なった急加減速試験、ラジアル負荷試験の2つについて報告する。

### (1) 急加減速試験

図8に示す急加減速サイクルでビルトインモータを発熱させ、軸受の熱負荷に対する耐性を試験した。トータルで3 000時間以上の連続運転後も異音発生や焼付きは起こらず、安定して回転している。

### (2) ラジアル負荷試験

スピンドル先端（ゲージラインより115mm突き出した位置）に500～2 000Nのラジアル負荷をかけ、最高回転数の20 000min<sup>-1</sup>で連続運転をする荷重試験を

行なった。2 000Nは、20 000min<sup>-1</sup>時の最大トルク11N・mが20mmのエンドミル外周に接線力としてかかるラジアル荷重1 100Nの約2倍に相当する。結果は図9のようになり、若干の温度上昇が認められたものの、安定して回転することが確認できた。

## 3.4.3 ドローバ耐久試験

ツールクランプ機構としては、皿バネを用いたドローバが一般的であるが、皿バネは寿命が比較的短く、またアンバランスの原因となりやすいため高速スピンドルには不向きである。標準高速スピンドルではこれらの欠点を克服した螺旋皿バネを採用した。

実機にてドローバのクランプアンクランプ繰り返し試験を実施し、目標の200万回をクリアしている。

## 4. 標準高速スピンドルの仕様

### 4.1 仕様

表4に標準高速スピンドルの仕様一覧を示す。メニュー構成としては、モータ出力が2種類（Lタイプ/Sタイプ）、最高回転数が2種類（15 000min<sup>-1</sup>/20 000min<sup>-1</sup>）の計4種類をそろえた。これらすべてのメニューにおいて、#40かHSK-A63のどちらかを選択できるようになっている。

### 4.2 主要寸法

図10は標準高速スピンドルの主要寸法である。外筒径はLタイプが230mm、Sタイプが210mmでこのクラスとしては使いやすい寸法にしており、いずれも立形/横形どちらでも使用可能である。さらに、ノーズ径はLタイプ、Sタイプともに170mmと細めにし、立ち壁の底加工時の干渉や、横形マシニングセンタにおけるテーブルとの干渉がおきにくいよう工夫している。

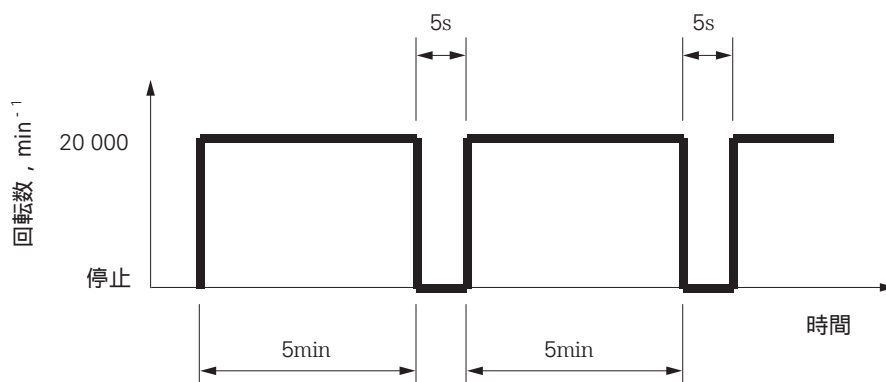


図8 急加減速サイクル

Fig. 8 Rapid acceleration/deceleration cycle

表4 仕様一覧  
Table 4 Specifications

スピンドルモデル	S/15000	S/20000	L/15000	L/20000
主な仕様				
使用機械	マシニングセンタ		マシニングセンタ	
取付位置	垂直、水平		垂直、水平	
最高回転数	15 000min <sup>-1</sup>	20 000min <sup>-1</sup>	15 000min <sup>-1</sup>	20 000min <sup>-1</sup>
回転方向	両回転		両回転	
主要寸法				
外筒外径	210mm		230mm	
質量	120kg		170kg	
取付ボルトサイズ	M12×6本		M12×6本	
取付ボルトPCD	240mm等配		260mm等配	
ビルトインモータ形式				
モータ型式	112S/20000IB		112L/20000IB	
最大出力	11/18.5kW (連続/10min)		18.5/22kW (連続/25%)	
最大トルク	60N・m (15%)		118N・m (25%)	
使用軸受				
フロント	NSK 70BNRシリーズ		NSK 70BNRシリーズ	
リア	NSK 55BNRシリーズ		NSK 55BNRシリーズ	
潤滑仕様				
潤滑方法	グリース封入	グリース補給	グリース封入	グリース補給
グリース形式	NSK MTE		NSK MTE	
回転精度				
テストバーの振れ口元	3μm以下		3μm以下	
テストバーの振れ300先	10μm以下		10μm以下	
振動等級	V3		V3	
ツールシャンク+ブルスタッド				
JIS	ツールシャンク：40T	ブルスタッド：40P	ツールシャンク：40T	ブルスタッド：40P
(または) DIN	ツールシャンク：#40	ブルスタッド：#40	ツールシャンク：#40	ブルスタッド：#40

表5 基本性能試験結果  
Table 5 Spindle efficiency

項 目		Sタイプ	Lタイプ
テストバーの振れ	口元	2μm	3μm
	先端	7μm	8μm
アキシャル剛性		90N/μm	90N/μm
振動(前/後)	20 000min <sup>-1</sup> 時	0.8/1.2μmP-P	0.9/1.8μmP-P
騒音レベル		74dB	76dB
加減速時間	起動(0 20 000min <sup>-1</sup> )	3.9s	3.2s
	停止(20 000min <sup>-1</sup> 0)	4.1s	2.5s
温度上昇(室温ライズ)	フロント	平均15	平均13
	リア	平均17	平均18
熱変位(Z方向伸び)	15 000min <sup>-1</sup> 時	33μm	28μm
	20 000min <sup>-1</sup> 時	59μm	60μm
空気消費量		50L/min (Normal)	50L/min (Normal)

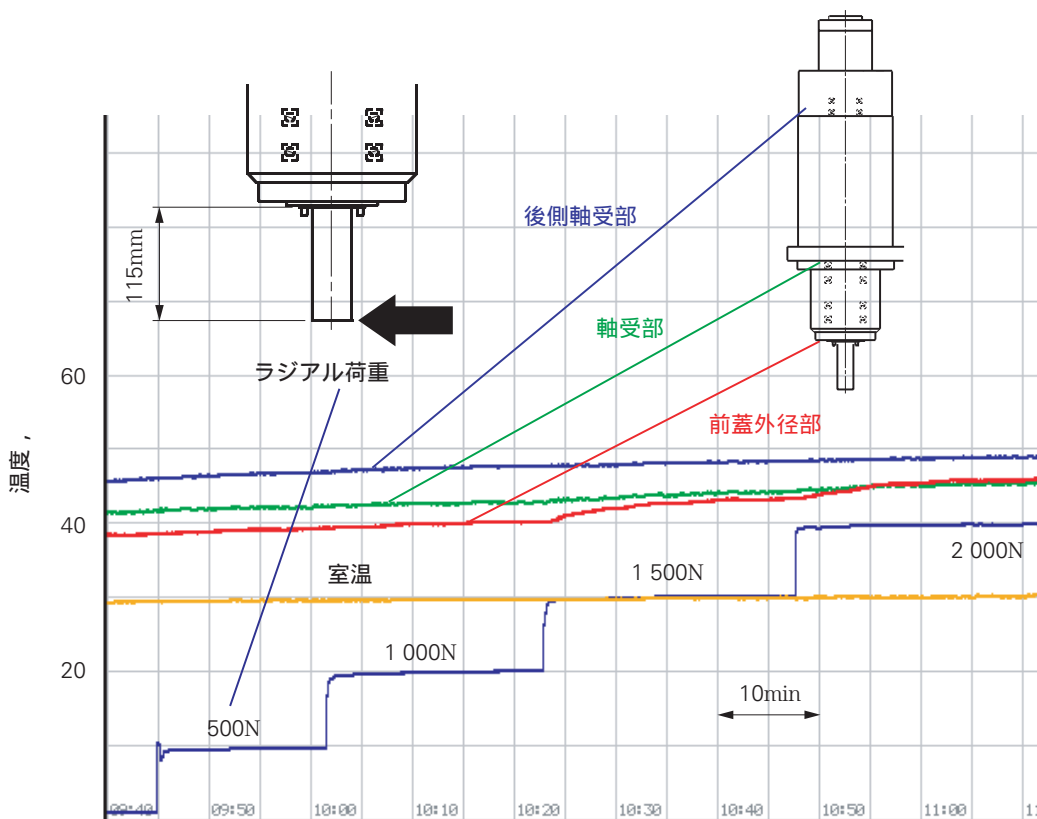


図9 ラジアル負荷試験結果  
Fig. 9 Radial load test results

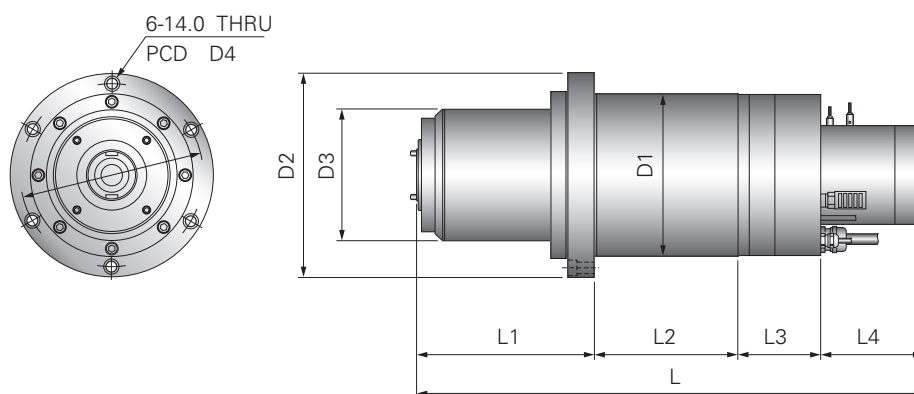


図10 主要寸法 (mm)  
Fig. 10 Boundary dimensions

### 5. 標準高速スピンドルの基本性能

最後に標準高速スピンドルの基本性能試験結果を表5に示す。表4のように定められた規格値をいずれも満足し、最新のスピンドルとして十分な性能を有している。また、低発熱モータの採用により熱変位も少なく抑えられており、工作機械メーカーで実施される熱変位補正を容易にしている。

### 6. あとがき

標準高速スピンドルはこれまでにアジアを中心としたメーカーで実機に採用され、各ユーザーで高い評価を受けている。また、このスピンドルの採用による共通化のメリットも生まれている。

これからも基本性能のアップやさらなる信頼性の向上を目指し、スピンドルユニットとしてグローバルスタンダードとなるよう、努力していきたい。

本稿が工作機械メーカーの方にとり少しでも得るものがあれば幸いである。

# 高速静音ボールねじの開発



加藤 将人\*

加藤 将人

## Development of High-Speed and Low-Noise Ball Screws

by M. Kato

NSK has developed and marketed the HMC-B02 series of high-speed and low-noise ball screws for machine tools. In addition to the features of less noise emission, lower vibration, and better tone quality, new ideas in designing the ball recirculation mechanism and other components have contributed to development of an innovative product that ensures 1.33 times higher speed than conventional ball screws for machine tools.

The HMC-B02 series is the best solution for extremely high-speed applications for which linear motors have been dominant.

- |               |            |
|---------------|------------|
| 1. まえがき       | 2.4 省スペース  |
| 2. 特長         | 2.5 高防塵性能  |
| 2.1 高速回転能力の向上 | 2.6 その他の特長 |
| 2.2 騒音・振動の低減  | 3. 耐久試験    |
| 2.3 作動性の向上    | 4. あとがき    |

### 1. まえがき

当社が工作機械向けに初めてボールねじを納入したのは、今から40年以上も前の1961年のことである。その後、工作機械はNCの進化とともに発展を続け、その送り機構の主要な要素であるボールねじも、これと競うように性能アップを繰り返してきた。

工作機械における各種性能向上のなかで、高速化についても目を見張る進展があり、主軸スピンドルの高速回転化や、早送り、切削送りの高速化などによって、生産性の高能率化がめざましく進んできている。

図1に、近年の日本国際工作機械見本市（JIMTOF）に出展された工作機械の早送り速度の調査結果を示す。図からも分かるように、昨今はマシニングセンタなどの早送り速度は50～60m/minも珍しくなくなり、最高レベルでは100m/min以上にも達している。

NSKは、このJIMTOFにおける動向を一步リードす

るかたちでボールねじの高速化をすすめてきたが、今後の更なる高速化に対応するためには、また、リニアモータにも負けない、総合面で使用しやすいボールねじを市場に提供するためには、さらに一歩踏み込んだ開発が必要となってきた。

ところで、単に送り速度を向上させただけでは真の高速化を実現したとは言えず、同時に、高速化とともに大きくなる騒音や振動を低減させることも重要である。ボールねじの低振動、低騒音化は従来から要求されてきた課題であるが、近年では環境問題の面からもその要求は一層強まってきた。

このような要求を背景として、NSKでは「高速静音ボールねじ」を開発、商品化した。本稿で紹介する「HMC-B02シリーズ」は、工作機械向けの「高速静音ボールねじ」（写真1）である。「HMC-B02シリーズ」などの「高速静音ボールねじ」は、これまでの常識をくつがえす「従来以上に高速でありながら、従来以上に低騒音、低振動」をコンセプトとして開発し、これを実現した画期的なボールねじである。

\*NSK プレジジョン（株）直動製品技術部

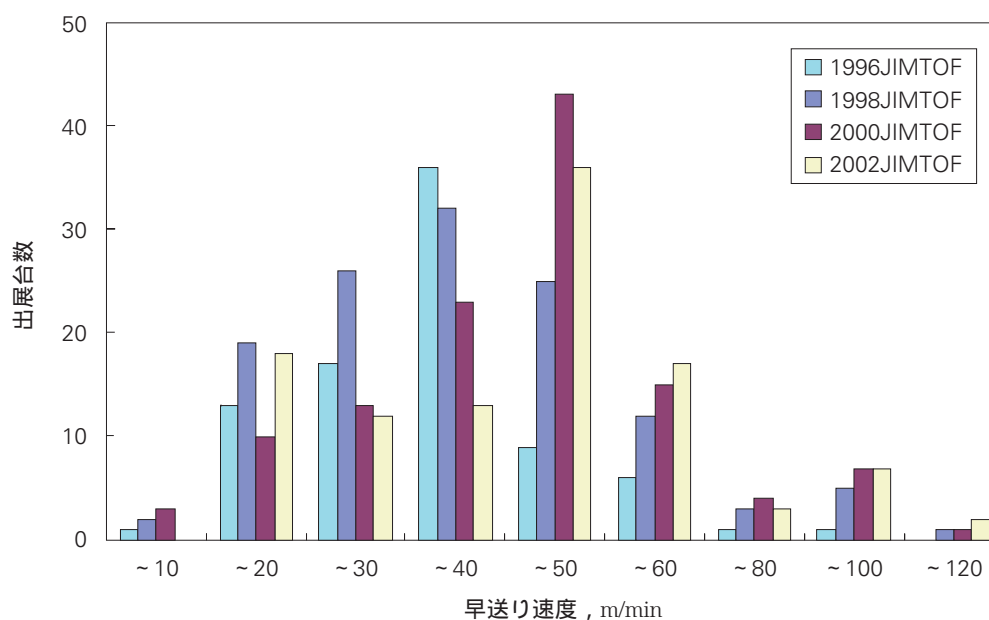


図1 マシニングセンタの早送り速度

Fig. 1 Rapid traverse speed for machining centers



写真1 HMC-B02シリーズ

Photo 1 HMC-B02 series

## 2. 特 長

高速静音ボールねじHMC-B02シリーズは、従来の高速工作機械向けボールねじHMCシリーズをベースとして、数々の改良を加えた新商品である。

HMC-B02シリーズが従来のシリーズと大きく異なる点として、ボールの循環構造が挙げられる。ボールねじは、理論上無限のストローク運動を行なうことができるように、ボールを循環させる機構を有している。

そのために、ボールが負荷を受ける転動溝と、無負荷となる循環路とのつなぎ目において、ボールの運動が不規則にならざるを得ず、このことがボールねじの機能を大なり小なり損なう要因になっている。

本シリーズでは、従来のチューブ循環方式に代わる、エンドデフレクタ方式と呼ぶ新しい循環方式を開発、採用して、転動溝と循環路とのつなぎ目におけるボールの運動をできるだけ滑らかにすることなどによって、以下に述べる数多くの特長を実現した。

2.1 高速回転能力の向上

ボールねじの高速化を実現するためには幾つかの課題があるが、その第一として高速回転能力の向上が挙げられる。

ボールねじによる送りを高速化するためには、リードを大きくする方法と回転速度を高くする方法とがあり、最近では工作機械においても比較的リードの大きいボールねじが使用されることが多くなってきている。本シリーズでは、リードと回転速度をバランスよく組み合わせた高速化を実現するために、高速回転能力の向上に重点をおいて開発を進めてきた。

従来のチューブ循環式ボールねじでは、高速回転能力の限界がチューブの疲労強度に依存していた。これは、ボールをすくい上げる際に、ボールがチューブの先端部に繰り返し衝突することによって、チューブが疲労損傷するためである。そのため従来は、応力が集中しにくいチューブの設計や、チューブの厚肉化などによる強度向上によって高速化を推進してきた。

本シリーズでは、この循環方式を一新して、エンドデフレクタ方式と呼ぶ新しい循環構造を採用した。この方式は、循環部品がボールをその進行方向に沿って滑らかにすくい上げることを第一の狙いとしたものであり、それによって、循環部品がボールから受ける力を大幅に低減させ、飛躍的な高速化が可能となった。

ボールねじの高速性を表すパラメータの一つとして、ねじ軸径 $d$  (mm)と回転数 $n$  ( $\text{min}^{-1}$ )の積で与えられる $d \cdot n$ 値がある。従来のHMCシリーズでは $d \cdot n$ 値の上限を13.5万としていたが、HMC-B02シリーズはこれを大幅に上回る $d \cdot n$ 値18万を実現したボー

ルねじである。具体例を挙げると、ねじ軸径40mmのボールねじは、従来はおよそ $3\,400\text{min}^{-1}$ が回転速度の上限であったが、本シリーズはこれを $4\,500\text{min}^{-1}$ にまで引き上げたものである。

なお、本シリーズの高速回転能力をさらに見極めるとともに、次なるステップの高速化も視野に入れて、実験室では $d \cdot n$ 値20万を越える各種の条件での高速試験を実施している。

2.2 騒音・振動の低減

高速化がすすむにつれて増大する騒音・振動を低減することも、真の高速化を実現するために避けては通れない重要な課題である。

ボールねじから発生する騒音の主な要因としては、負荷を受ける転動溝でのボール走行音と、循環路出入り口でのボール循環音の二つが挙げられる。工作機械などに用いられる中・大型のボールねじでは、ボール循環音が支配的であることが多いので、これを低減させることが低騒音化に対して有効である。

このボール循環音は、ボールが循環路出入り口で他の部品と衝突する際の衝撃力によってボールねじが励振され、それが音になるものである。本シリーズは新しい循環構造の採用などによって、衝突の際に発生する振動のエネルギーを極力低減させた結果として、大幅な低騒音、低振動化を実現した。

本シリーズと従来のHMCシリーズボールねじについて、騒音・振動を比較測定した結果について以下に述べる。その測定方法の概略図を図2に示す。振動は、ナットの軸方向端面に取り付けた加速度ピックアップによって、また騒音は、ねじ軸心から400mmの距離

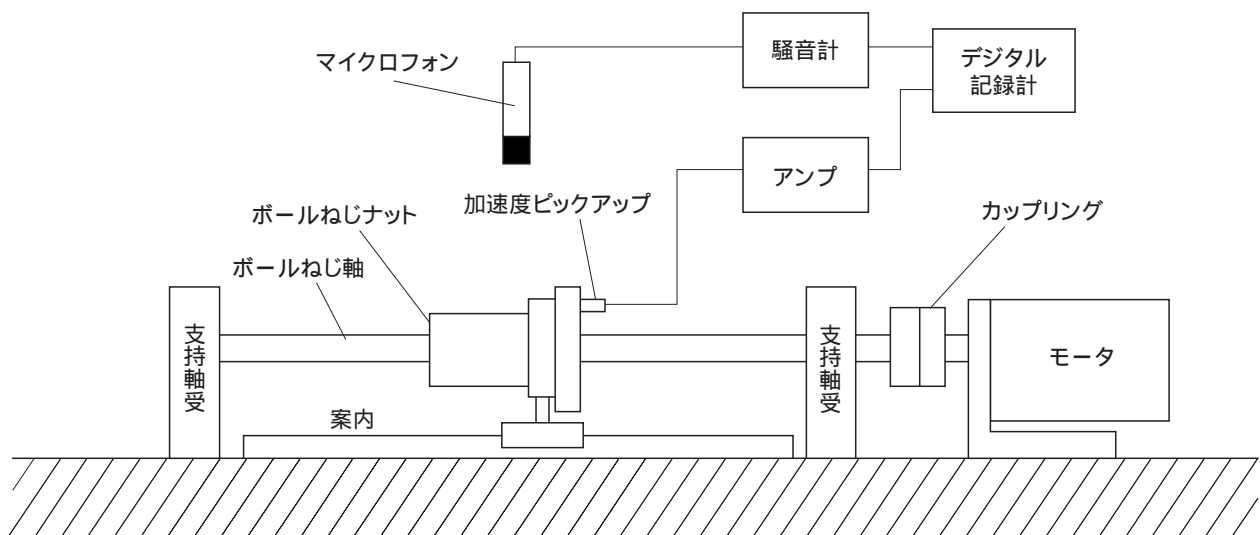


図2 騒音・振動測定装置の構成  
Fig. 2 Configuration of noise and vibration measuring equipment

に配置したマイクロフォンを用いて測定する。試料としては、ねじ軸径40mm，リード20mmのボールねじをシールの装着がない状態で使用し，潤滑油としてはISO VG #68を用いた。

騒音レベルの比較測定結果を図3に示す。図中に示した「NSK 精密ボールねじ 平均値」とは，当社が長年にわたるデータの蓄積とその分析から騒音レベルの実験式を導き，評価の「ものさし」としている線図である。従来シリーズの騒音レベルは，この平均値とほぼ同等であるのに対して，本シリーズの騒音レベルはこれらに比べて5～7dB低減されていることがわかる。

これを，図の横軸にとった回転数との関係で考察すると，本シリーズのボールねじを2 500min<sup>-1</sup>で駆動したときの騒音レベルは，従来シリーズの1 500min<sup>-1</sup>

のときの騒音レベルに相当している。このことから，本シリーズにおける低騒音化は，高速化に伴う騒音の増大を補って余りあるものであると言っても過言ではない。また，別の角度からこれを見ると，仮にボールねじの数を2倍に増やすと3dB，4倍に増やすと6dB騒音レベルが理論上大きくなるので，本シリーズのボールねじを4本同時に動かしたときの騒音レベルが，従来シリーズのボールねじ1本分に相当することになる。

図3に示したデータのうち，回転数2 500min<sup>-1</sup>の騒音について周波数分析した結果を図4に示す。図からも分かるように，本シリーズは従来シリーズに比べて，騒音レベルが特に高周波領域において低減している。このことは，本シリーズが騒音レベルを大幅に低下さ

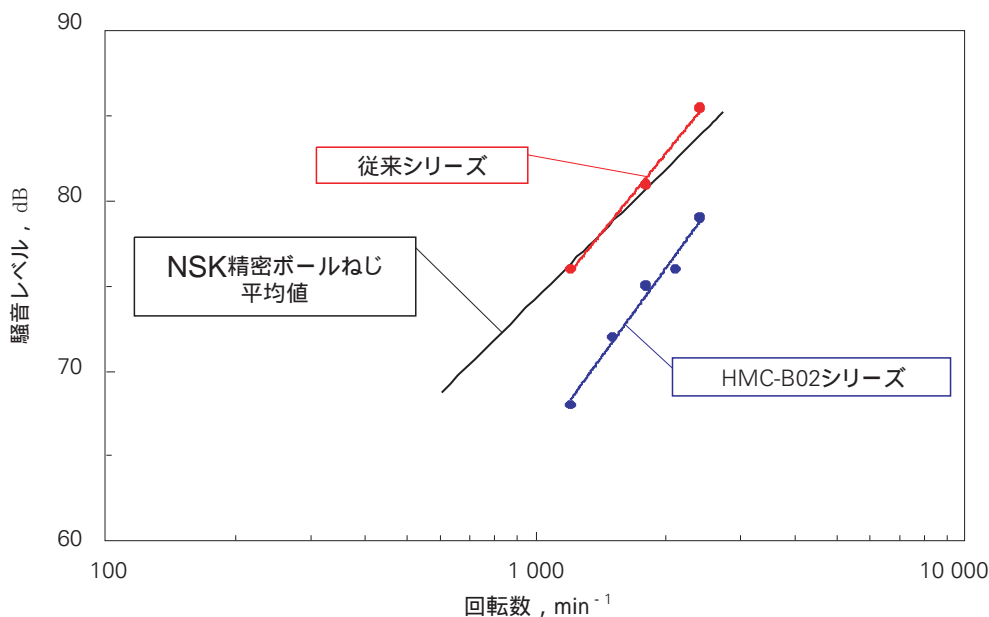


図3 騒音レベル  
Fig. 3 Noise level

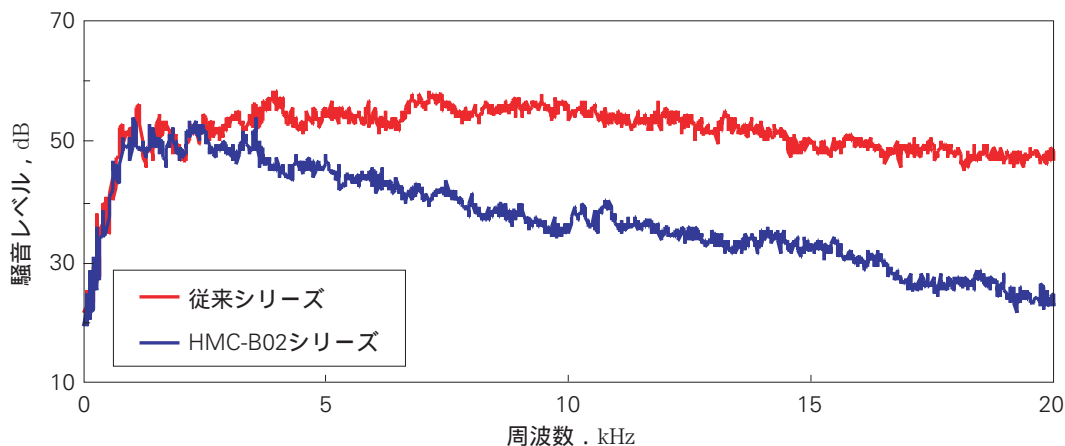


図4 騒音の周波数分析  
Fig. 4 Analysis of noise frequency



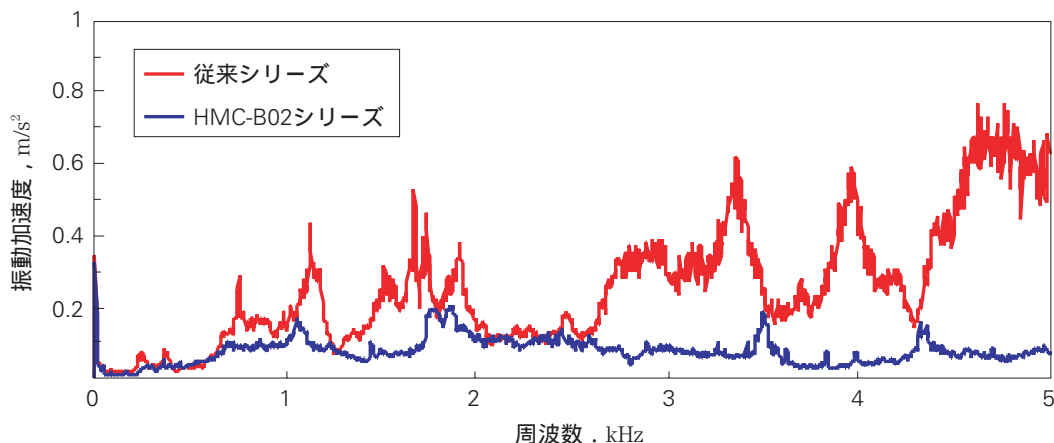


図5 振動の周波数分析  
Fig. 5 Analysis of vibration frequency

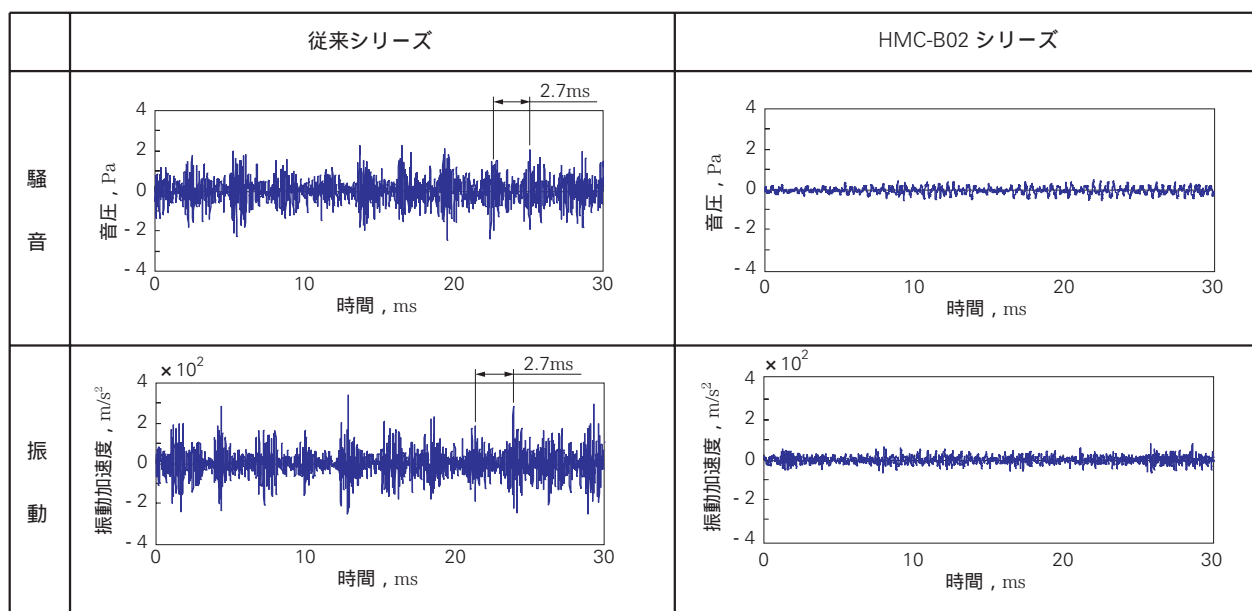


図6 騒音と振動の時間波形  
Fig. 6 Waveform of noise and vibration

せるだけでなく、同時に好音色化をも実現していることを示している。

ところで、ボールねじの騒音は遮断することによって一見小さくすることができるが、ボールねじ単体で騒音を遮断してもその発生振動力が低下していなければ、結局その振動によって機械系を励振して、機械の固有値成分の特徴をもった音、振動が現われることが多い。図5に、振動の周波数分析を行なった結果を示す。振動も騒音と同様に、従来シリーズに比べて大幅に低減していることが分かる。

次に、騒音と振動の時間波形を図6に示す。図の横軸は時間の経過を示しており、従来シリーズではボールの通過周期に相当する約2.7msの間隔で振動・騒音が大きくなっているのに対して、本シリーズではそれが判別できないレベルにまで低下している。このこと

からも、ボール循環部で発生する振動の低減が、本シリーズの低振動、低騒音、さらには好音色化の主な要因となっていることが分かる。

### 2.3 作動性の向上

高精度化の観点から、摩擦トルクの安定性もボールねじの重要な特性の一つである。一般にボールねじを駆動したときの摩擦トルクの安定性、つまりトルク変動の大小を作動性と称している。

摩擦トルクの測定結果の例を図7に示す。試料としては、ねじ軸径40mm、リード20mmのボールねじを、潤滑油としてはISO VG #68を使用した。図7(a)の回転速度100min<sup>-1</sup>は、摩擦トルクを評価する際の標準条件であり、図7(b)の10min<sup>-1</sup>は、一般に摩擦トルクが変動しやすい低速の代表として設定した条件であ

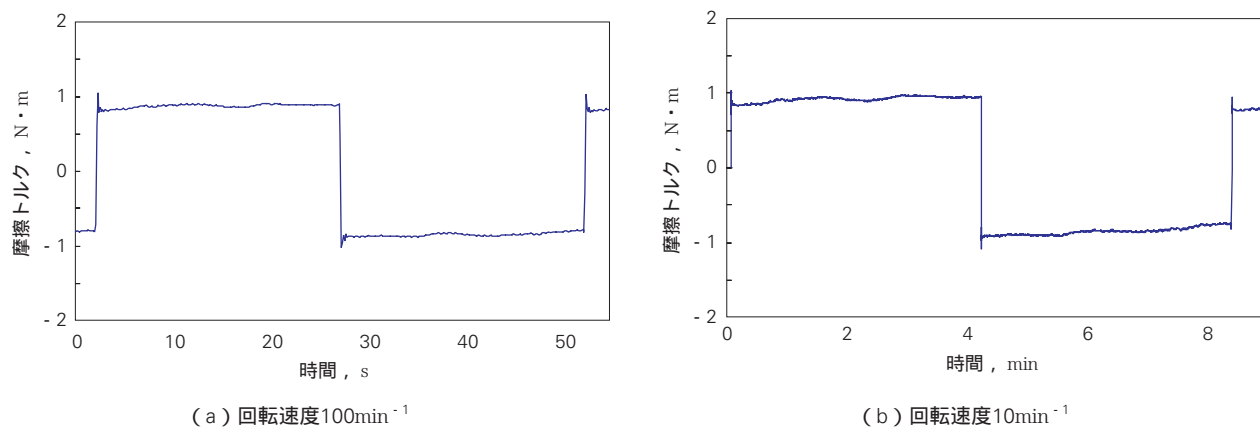


図7 摩擦トルク  
Fig. 7 Friction torque

る。図から、本シリーズにおいて、転動溝と循環部とのつなぎ目でのボールの運動を滑らかにしたことによる効果が、作動性の面でもよく現われており、 $100\text{min}^{-1}$ は当然のこととして、 $10\text{min}^{-1}$ においても摩擦トルクの変動が極めて小さく、良好な作動性を示している。

また、精密加工機などにおいては、小ストロークの往復運動が繰り返されるようなことも多く、このような2~3回転程度以下の小ストロークの繰り返し運動を揺動と呼んでいる。ボールねじがこの揺動を数往復から数十往復繰り返すと、摩擦トルクの絶対値や変動が徐々に増大しやすい傾向があり、摩擦トルクが数十パーセントのオーダーで大きくなることもある。

図7と同じボールねじについて、回転速度 $10\text{min}^{-1}$ 、ストローク15mm（ねじ軸0.75回転）の揺動を100往復させたときの摩擦トルクデータの代表例を図8に示す。図のように、100往復を終了するまで摩擦トルクの増加は全く認められず、極めて良好な結果を示している。

## 2.4 省スペース

本シリーズは内部循環方式、すなわち循環機構をナットの内部に納めたコンパクトな設計（写真1参照）とすることによって、従来シリーズに比べて70~80%とナット外径を大幅に小さくしている。逆の見方をすると、同じスペースの中でねじ軸径を大きくすることによって、より高い負荷容量や剛性を得ることも可能である。

## 2.5 高防塵性能

ナット内部への異物の侵入や、ナット内部からの潤滑グリースの流出を抑制するために、シール性能もボールねじの重要な特性の一つである。

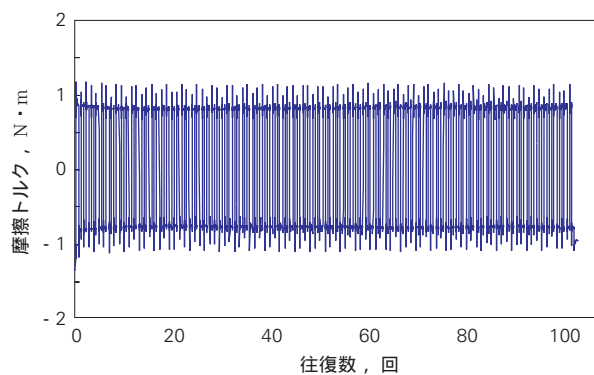


図8 揺動トルク  
Fig. 8 Oscillation torque

本シリーズは、従来のラビリンスシールに代わって、新しく開発したねじ軸接触型のシールを標準装備することによって防塵性を向上させており、従来シールと比較して、異物の通過量がおよそ1/15にも低減する実験結果が得られている。

一般に、接触型のシールはねじ軸としゅう動するために、高い防塵性が得られる反面摩擦トルクが大きくなりやすいが、本シールは薄型プレート形状とすることによって、ねじ軸との摩擦を極めて小さく抑えている。また、シール側面にスクレーパを取り付けてシールのめくれを防ぐ構造になっているので、高い耐久性を有している。

## 2.6 その他の特長

その他として、従来のHMCシリーズから継承するものではあるが、工作機械用途からの要求が高い二つの特長について簡単に説明する。

その一つは温度上昇、熱変位の抑制である。高速化が進むと、ボールねじからの発熱も大きくなり、発熱による熱変位の問題が高精度化に伴ってますます重

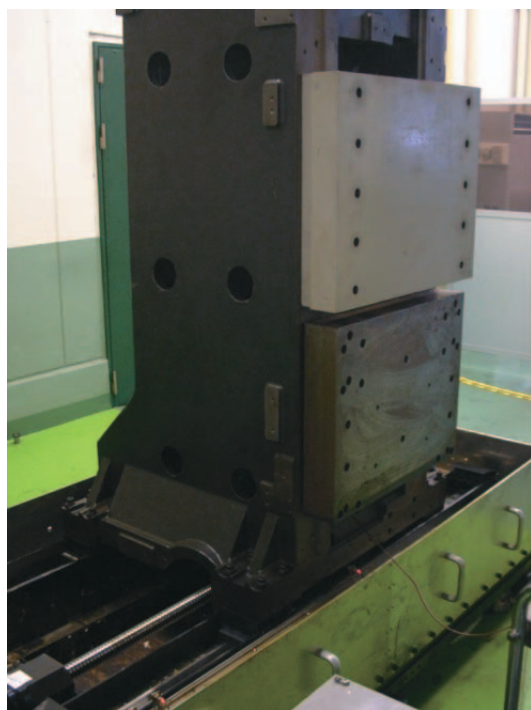


写真2 耐久試験  
Photo 2 Durability test equipment

要になる。本シリーズも従来シリーズと同様に、オプションとして中空軸による強制冷却が可能な仕様としている。

強制冷却を施すことによって温度上昇、熱変位を大幅に抑制するとともに、温度安定状態までの時間を短縮することができる。また、熱変位が抑制されることによって、ボールねじの軸端に取り付ける支持軸受を両端ともに固定構造とすることができる。これによって、支持軸受を含めたボールねじ軸系の剛性が高くなり、精密な位置決めや加工が可能になる。

もう一つの特長は、外部循環方式を用いている従来シリーズと同様に、ねじ軸の転動溝が両方の軸端部に到達する手前で切り上がる仕様にも容易に対応することができる点である。なお一般に、内部循環方式のボールねじでは組立てを容易にすることなどのために、転動溝が少なくとも片方の軸端部まで切り通されている。この両端部切り上がりの特長によって、カラーなどを必要とせずに支持軸受のサイズを大きくすることや、支持構造を剛にすることも容易なので、支持軸受の負荷容量や、ボールねじ軸系のトータルとしての剛性を大きくすることができる。

### 3. 耐久試験

真の高速化を実現するためには、最高速度とともに加減速度の高速化が不可欠である。マシニングセンタなどのように質量が大きいものを高加減速で駆動する

場合には、ボールねじへの負荷も大きくなり、また、高速化とともに単位時間あたりの運動量も増えることになる。さらには異物環境などの使用条件の過酷化や、精度劣化に対する許容レベルの厳格化などもあって、高い定格荷重、耐久性能への要求がますます高まっている。

本シリーズは、従来のHMCシリーズと比較しても同等あるいはそれ以上の定格荷重を有しているが、同時に、本シリーズにおける数々の機能の向上が、定格荷重には顕われないかたちで高い耐久性能につながることも十分に期待される。

そこで、定格荷重から計算される定格寿命に対する評価をベースとして、環境などの使用条件も考慮した、様々な条件での耐久試験を実施している。ここでは、それらの中から代表例として、工作機械の実機を想定した耐久試験について以下に紹介する。

耐久試験装置の外観を写真2に示す。試料として用いたボールねじはねじ軸径40mm、リード20mmである。試験条件としては、ナットに取り付けたテーブルの上に質量1.6tonのコラムを搭載して、回転速度 $3\,000\text{min}^{-1}$ 、加速度 $9.8\text{m/s}^2$ 、ナットストローク230mm×3ステップとした耐久試験を実施している。

ここで、ナットストロークを3ステップに分割したのは、加減速の頻度を高くすることによって、より厳しい条件での評価を行なうためである。

定格寿命の1.8倍を試験走行した時点において、ボールねじの分解調査を実施した。ねじ軸、ナットのボール転動溝には通常の走行跡が見られる程度であり、摩耗や損傷などは検出されていない。また、予圧荷重も十分に維持されており、各部品ともに何ら異常は認められなかった。その後試験を再開して、現在は定格寿命の2.5倍を越えてなお外観上異常なく走行を継続している。

### 4. あとがき

このたび商品化した工作機械向け「高速静音ボールねじHMC-B02シリーズ」について解説した。新しい循環方式の採用などによって、数々の性能の大幅な向上を実現することができた。これまで、リニアモータが多く用いられていた高速の分野にも十分に対応することができ、市場の要求に応えられるものであると確信している。

なお、工作機械向けHMC-B02シリーズに導入した新しい循環構造などのコンセプトは、その他のボールねじへも応用、展開を進めており、それらの総称として「BSSシリーズ」と命名した。HMC-B02以外の「BSSシリーズ」については、また別の機会に紹介したいと考える。

# リニアガイドの特性解析

松本 淳\*



松本 淳

## Numerical Analysis Technology on NSK Linear Guides for Machine Tools

by J. Matsumoto

This paper introduces the application of numerical analysis technology for NSK Linear Guides focusing on rigidity and running accuracy, which are vital factors for machine tools. This paper contains the followings:

- (1) We have developed a computer analysis program of roller guides, which takes into account of the roller race way contact characteristics and structural deflection of the slider and the rail. The calculation results are well agreed with experimental ones.
- (2) The level of vibration caused by passage of rolling elements can be estimated quantitatively by our numerical analysis technology, has contributed to our new product, NSK Linear Guide HA Series. The experimental results show that the level of ball passage vibration of the HA Series is approximately one-third that of conventional products.

1. まえがき
2. ローラガイドの特性解析
  - 2.1 ローラガイドの特性解析システム
  - 2.2 解析システムの適用事例
3. リニアガイドの運動精度解析
  - 3.1 転動体通過振動の解析
  - 3.2 運動精度解析の製品開発への利用
4. あとがき

### 1. まえがき

近年，製品開発に要求されるスピードは，ますます高まるばかりである．市場のニーズにマッチした製品を，タイムリーに，しかも低コストで開発することが必要とされている．

このような背景の下，NSKでは，効率的な製品開発を目指して，コンピュータによる製品の特性解析に積極的に取り組んでいる．特性解析技術の活用によって，従来の試作，実験，設計変更を繰り返す一連のプロセスを，大幅に短縮することが可能となった．

本報では，工作機械用リニアガイドを例にとって，NSKが所有する解析技術の一端を紹介する．工作機械用リニアガイドにとって重要な特性は数多く挙げら

れるが，今回は，主に剛性と運動精度について，解析技術の適用事例を示す．

### 2. ローラガイドの特性解析

#### 2.1 ローラガイドの特性解析システム

工作機械に用いられるリニアガイドには，特に高い剛性と負荷容量とが求められる．NSKでは，このような要求に対応するため，転動体ころを用いた NSK ローラガイド「RAシリーズ」を開発した（図1）．

ローラガイドの特性解析を行う場合には，次の点に留意する必要がある．

- (1) ころの接触部の剛性が非常に大きい．したがって，ローラガイドの剛性（荷重 - 変位特性）を正確に計算するためには，各構成部材（ベアリングやレール）の変形を考慮することが不可欠である．

\* 総合研究開発センター 新技術開発第三部

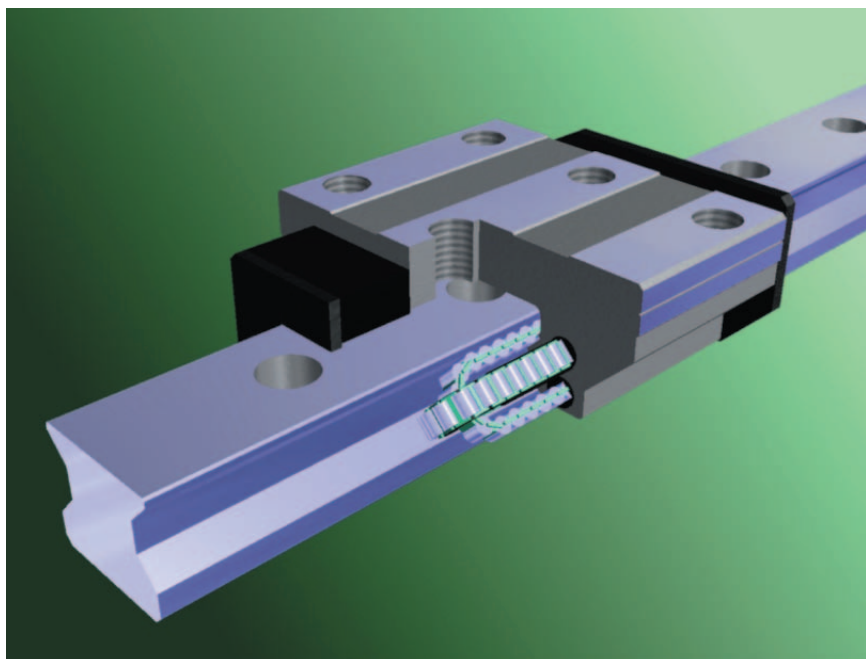


図1 NSKローラガイド「RAシリーズ」の構造  
Fig. 1 NSK Roller Guide - RA Series

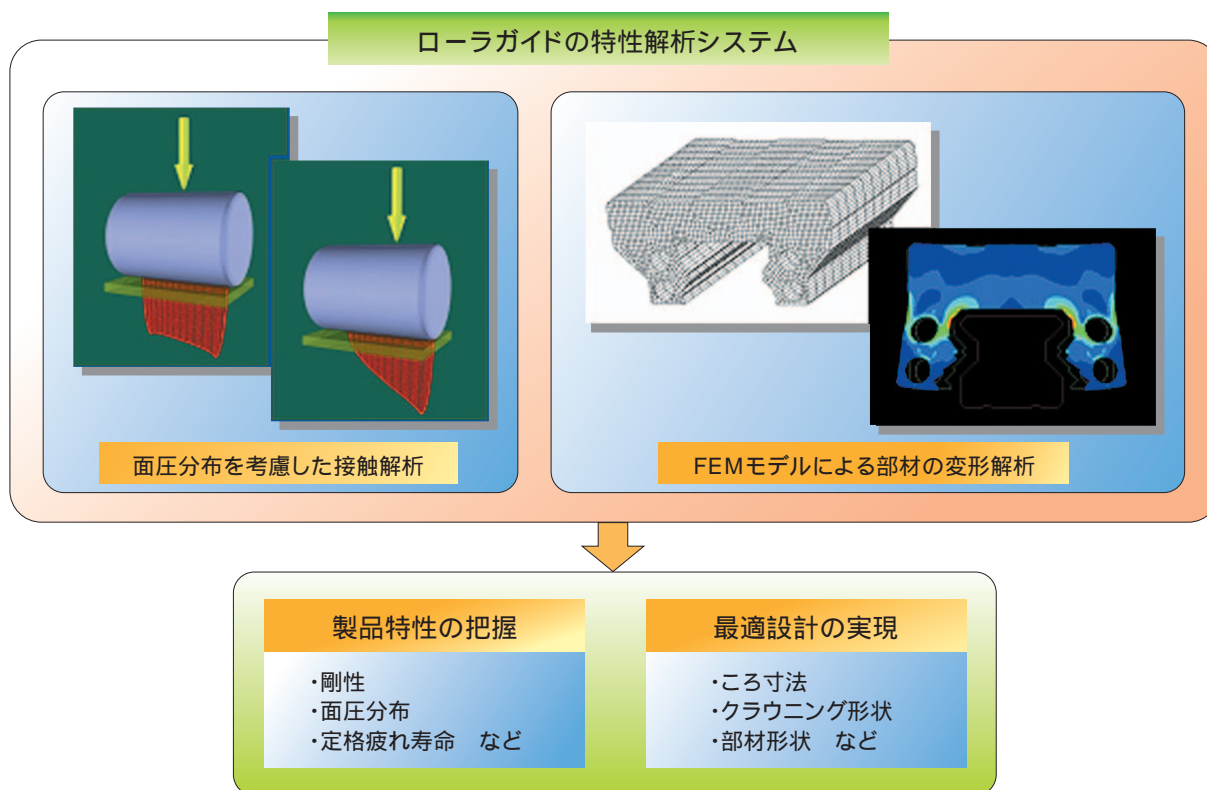


図2 ローラガイドの特性解析システム  
Fig. 2 Calculation method and application of computer analysis program for roller guides

(2) ころの接触部の面圧分布は、一般に、均一にはならない。設計仕様や使用条件によっては、面圧分布に極端なかたよりが生じて、転がり疲れ寿命の低下に結びつく可能性がある。このため、面圧分布の正確な把握が必要である。

上述した2項目は、ローラガイドの特性解析のために重要かつ不可欠であるにもかかわらず、従来、計算の複雑さのために、部材変形を考慮した剛性計算や、面圧分布の詳細な解析はほとんど行われていなかった。

NSKでは、最適設計の実現のために、ローラガイドの特性を詳細に把握できる解析システムを開発した(図2)。本解析システムでは、この接触部の弾性変形および面圧分布解析と、ベアリングやレールの部材変形解析とを同時に扱うことで、より正確な特性解析を可能としている。

本解析システムにおいて、この弾性変形は、よく知られた Palmgrenの式<sup>1)</sup>に基づいて計算している。また、部材変形は、FEMモデルを用いて計算している。さらに、高速で詳細な面圧解析手法<sup>2)</sup>を利用することによって、局所的な応力集中も含めた正確な接触面圧分布の解析を可能にしている。

以降では、本解析システムによる、ローラガイドの特性解析の事例を示す。

## 2.2 解析システムの適用事例

### 2.2.1 剛性の解析例

図3は、ローラガイドにおいて、外部荷重と変位の関係を、実験と計算とで比較した結果である。計算結果は、本解析システムによる計算値と、構成部材を剛体とした計算値の両方を示した。

構成部材を剛体とした計算では、荷重に対する変位が実験に比べて非常に小さく、剛性をかなり過大に見

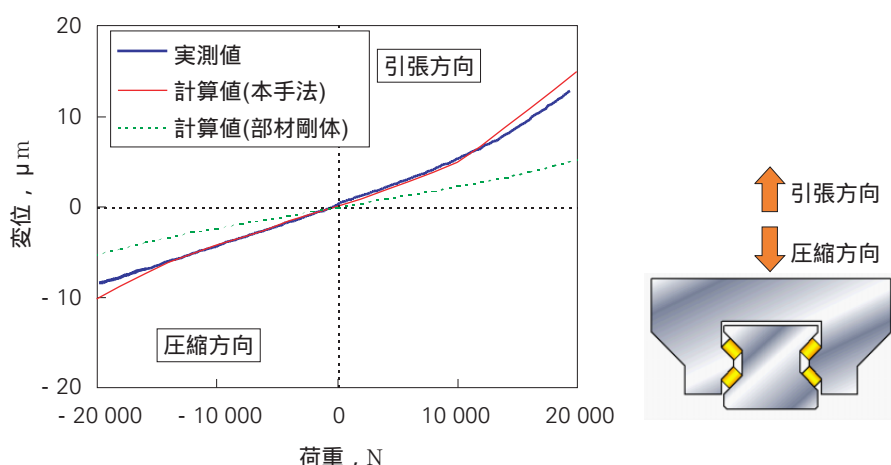


図3 荷重 - 変位特性の計算値と実験値の比較例 (サイズ#35, 予圧品)  
 Fig. 3 Deformation of roller guide (comparison of calculated and actual results, size #35, preloaded)

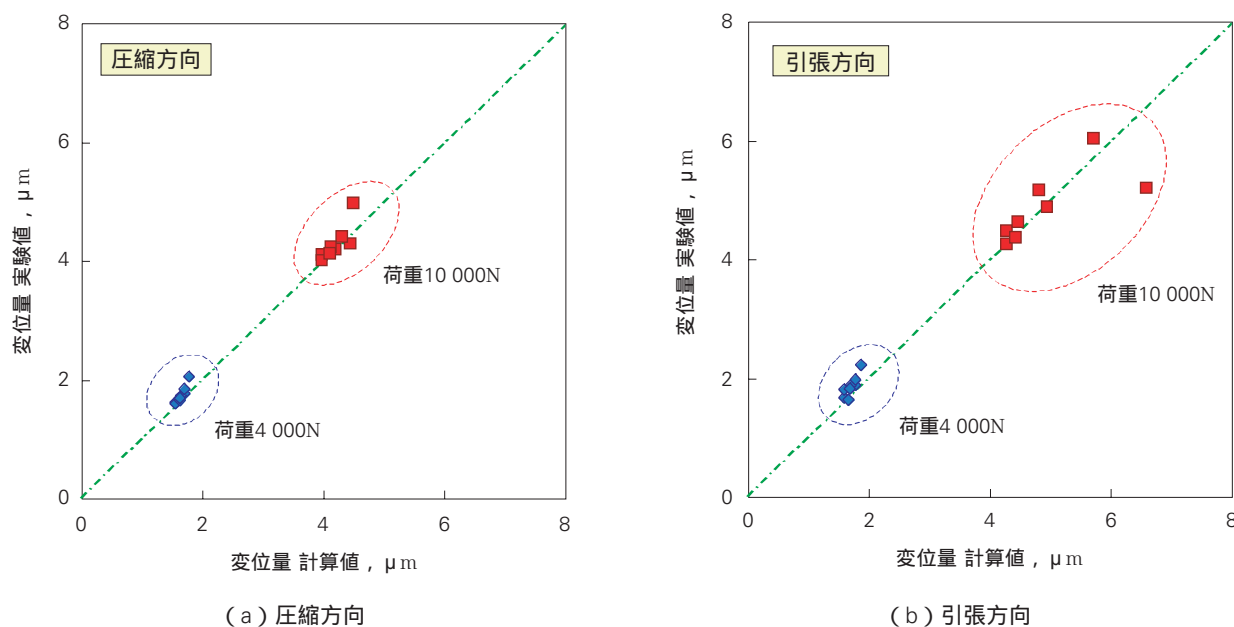


図4 外部荷重に対する変位量の実験値と計算値の比較 (サイズ#35, 中予圧~重予圧)  
 Fig. 4 Comparison of actual and calculated rigidity of roller guides (size #35, medium to heavy preload)

積もっている．この結果から、やはり、ローラガイドの剛性を正確に見積もるためには、部材変形の考慮が必須であることを確認できる．

一方、部材変形を考慮した本解析システムによる計算値は、実験値とよく一致している．特に、圧縮方向と引張方向での剛性の違いについても、よくシミュレートできていることに注目されたい．

次に、図4は、予圧荷重が異なる複数のローラガイドについて、4 000N および 10 000N の外部荷重を加えた時の変位量を、実験と計算とで比較した結果である．圧縮方向、引張方向ともに、計算値と実験値には、よい一致が認められる．

以上のように、本解析システムを用いることによって、従来ほとんど行われていなかったローラガイドの剛性の正確な計算が可能となった．

2.2.2 接触面圧分布の解析例

ローラガイドにおいて、重要な設計項目のひとつが、ころのクラウニング形状である．クラウニングとは、応力集中を防ぐためにころの端部付近に設けられた、緩やかな傾斜部のことである．

図5は、いくつかのクラウニング形状について、ころと軌道面との接触面圧分布を計算した結果である．この計算結果において、面圧分布は左右非対称になっているがこれはベアリング部材の変形によって、ころと軌道面の間で多少の傾きが生じているためである．

クラウニングのない仕様 (a) では、ころ端部の応力集中によって、接触面圧の突出部 (エッジロードと

呼ぶ) が現れている．このようなエッジロードの発生は、リニアガイドの寿命を低下させる要因となりうるので、望ましくない．

クラウニングを設けた仕様 (b) および仕様 (c) では、エッジロードの発生を防ぐことができる．しかしながら、(c) のようにクラウニング部を必要以上に長く設けてしまうと、ころと軌道面の接触長が短くなって、ローラガイドの剛性を低下させてしまう．そこで NSK では、解析による十分な検討を行い、最適なクラウニング形状を決定している．

図6は、ローラガイドにおいて、各ころが受ける面圧分布を計算した結果である．計算結果は、(a) 予圧荷重のみが作用した場合と、(b) 予圧荷重に加えて 15 000N の圧縮荷重がベアリングに作用した場合、について示した．この解析結果に見られるように、本解析システムを用いれば、ころ1個1個の接触面圧を、詳細に把握することが可能である．このような接触面圧分布の詳細な計算は、実用上のさまざまな荷重条件において、寿命を正確に把握するために必要不可欠なものである．

2.2.3 解析システムを利用した最適設計

NSKローラガイドには、本解析システムが積極的に活用されており、各部の寸法形状について、十分な検討と最適化が行われている．

例えば、剛性を最大化するようなベアリングの部材形状の検討にも、本解析システムが使用されている．図7は、NSKローラガイドと、既存の他社製ローラガイドについて、実測した剛性を比較した例である．特

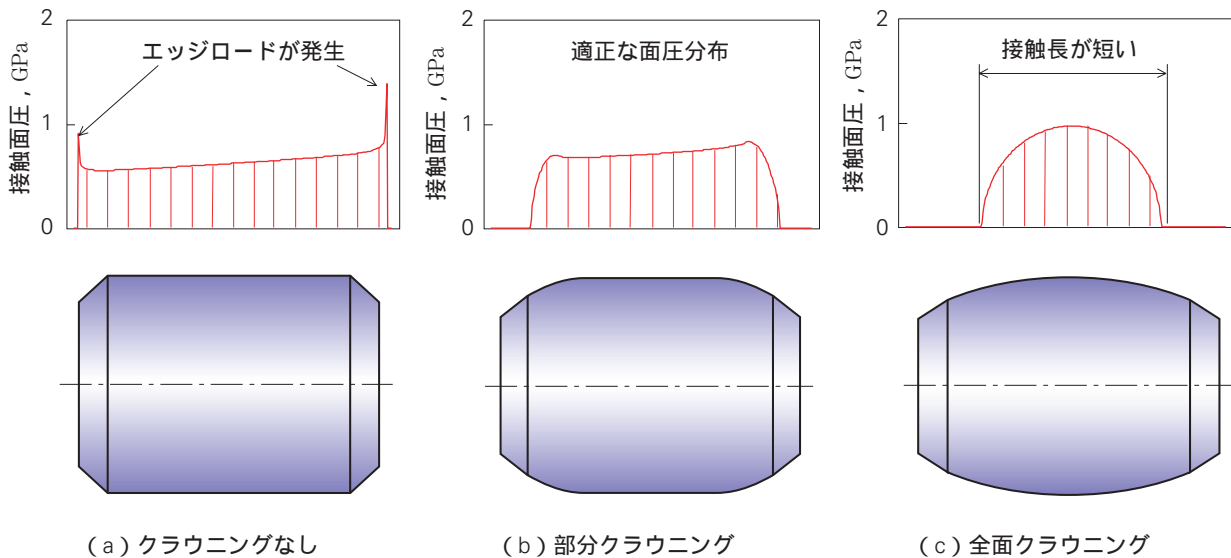


図5 ころと軌道面の接触面圧分布 (サイズ#45, 予圧品)  
 Fig. 5 Contact pressure distribution of rollers with various crowning profiles (size #45, preloaded)

性解析に基づく最適化によって、NSKローラガイドは、既存の製品よりも高い剛性を実現していることが分かる。

このように、ローラガイドの特性解析システムは、高機能な製品の開発に、有効に利用されている。

### 3. リニアガイドの運動精度解析

#### 3.1 転動体通過振動の解析

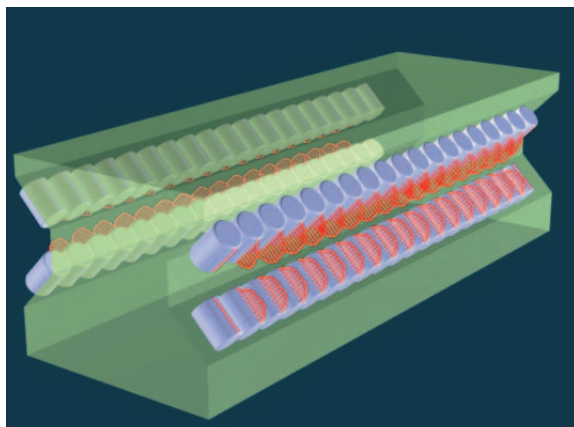
工作機械において、加工精度の向上や加工面の品位の向上などを実現するためには、リニアガイドの運動精度が重要である。NSKでは、高い運動精度を実現できるリニアガイドを開発するために、運動精度の数値解析にも取り組んできた<sup>3)</sup>。

リニアガイド装置の運動精度を悪化させる要因の代表的なものとして、転動体通過振動が知られている。

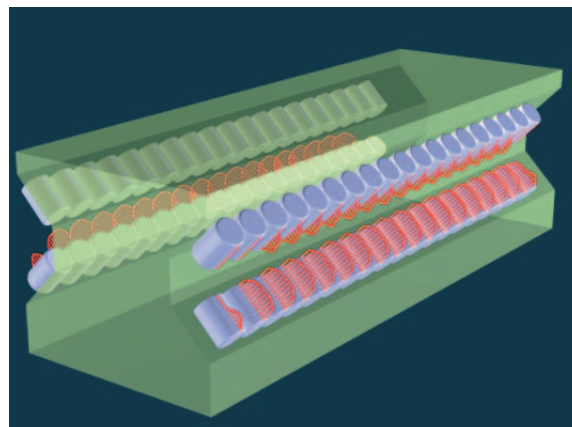
図8は、リニアガイド単品について、ベアリングを一定速度で移動させた時の姿勢変化（ピッチング方向の角度変化）を、オートコリメータで測定した結果である。得られた測定結果には、転動体直径  $D_w$  の約2倍の波長で、周期的な振動が現れている。この振動は、リニアガイド内部の転動体の移動に関係するもので、転動体通過振動と呼ばれている。ここでは角度変化のみを示したが、実際には並進方向の振動も生じる。

実際の機械装置で現れる転動体通過振動は、 $1\mu\text{m}$ 以下と小さいものであるが、周期的なうねりを生じさせるため、加工面の品位を低下させる原因となる。したがって、転動体通過振動の低減は、工作機械用リニアガイドにとって、きわめて重要な課題である。

NSKでは、すでに転動体通過振動の発生メカニズムを明らかにしており、定量的な解析手法を確立している。図9の線図は、転動体通過振動の計算例である。



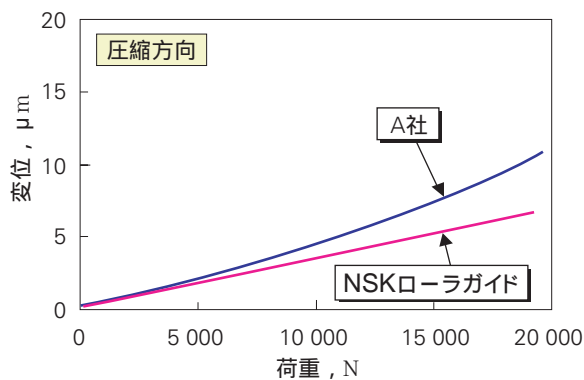
(a) 予圧荷重のみ作用時



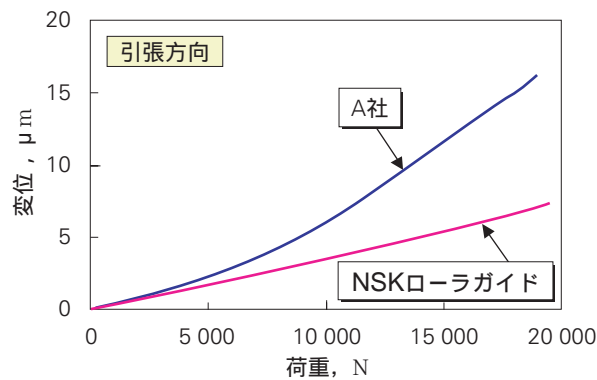
(b) 予圧荷重と圧縮荷重 15 000N が作用時

図6 このの接触面圧分布（サイズ#45，予圧品）

Fig. 6 Contact pressure distribution of rollers (size #45, preloaded)



(a) 圧縮方向



(b) 引張方向

図7 剛性の実測値の比較例（サイズ#45，NSK ローラガイドと他社相当品）

Fig. 7 Comparison of actual rigidity (size #45)



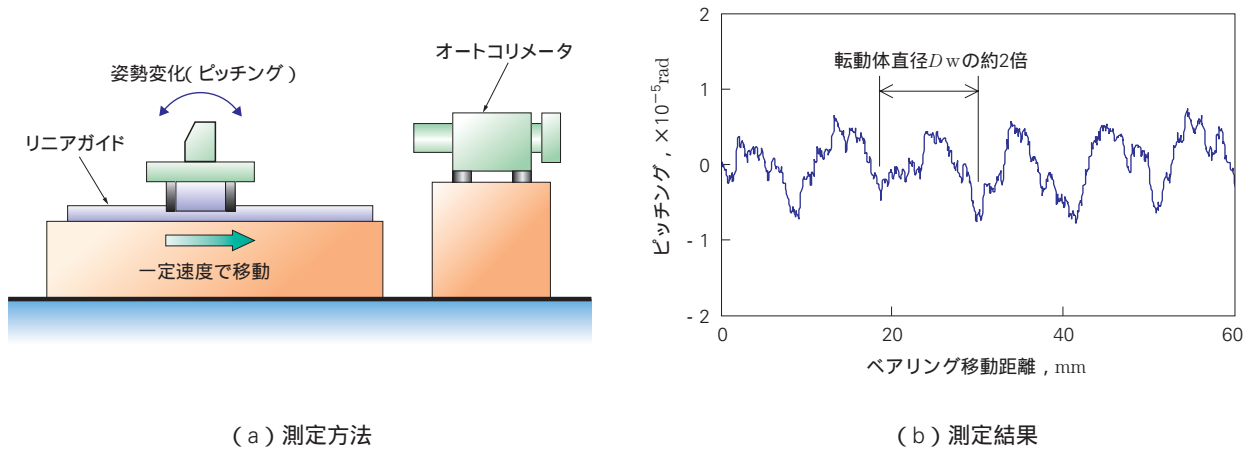


図8 リニアガイドの転動体通過振動（サイズ#30，ボール直径 $D_w=4.76\text{mm}$ ，中予圧）  
 Fig. 8 Vibration caused by passage of rolling elements (size #30, ball diameter  $D_w=4.76\text{mm}$ , medium preload)

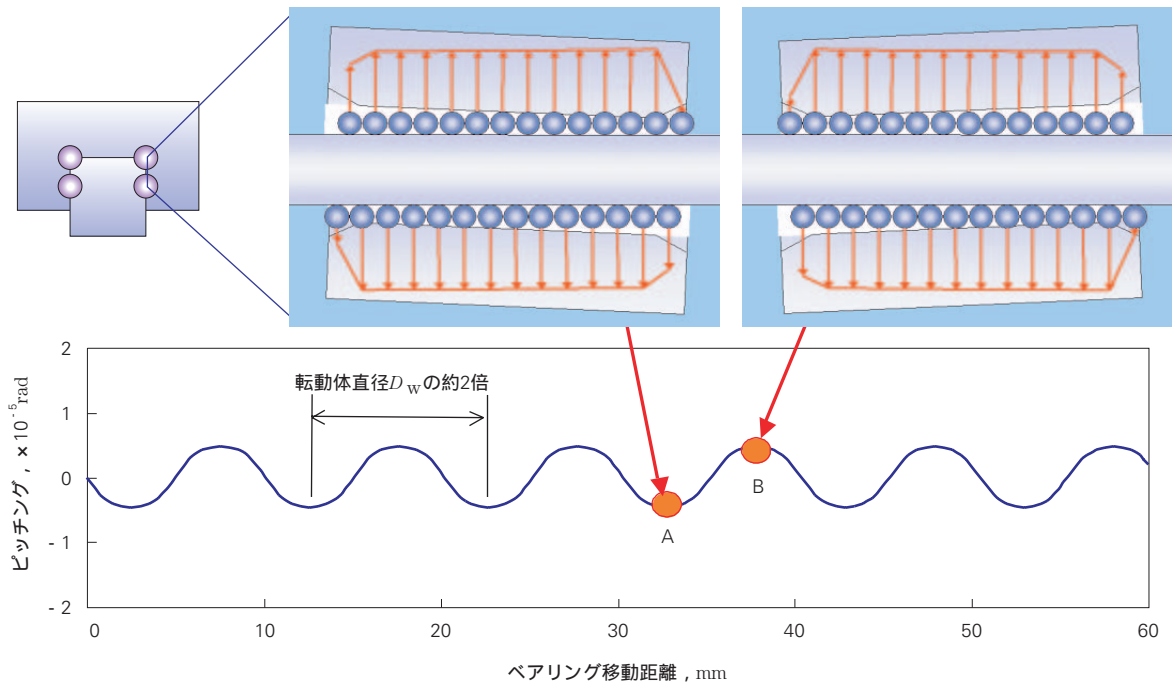


図9 転動体通過振動の発生メカニズム（サイズ#30，ボール直径 $D_w=4.76\text{mm}$ ，中予圧）  
 Fig. 9 Mechanism of vibration caused by passages of rolling elements (size #30, ball diameter  $D_w=4.76\text{mm}$ , medium preload)

この計算結果を用いて、転動体通過振動のメカニズムを簡単に説明する。

ベアリング内部の転動体配置は、ベアリングの移動に伴って変化する。通常、転動体には予圧が与えられているので、転動体の移動によって、転動体の受ける荷重分布が変化する。この荷重分布の変化によって、ベアリングに姿勢変化が生じる。これが転動体通過振動の発生する原因である。

図9には、線図中のA、B、それぞれの位置における、ベアリング内部の転動体の配置と、転動体の受ける荷重分布を示した。ベアリングがAの位置にある場合に

は、内部荷重の釣り合いがとれるように、ベアリングは、左図のように、時計回り方向に傾く。一方、ベアリングがBの位置にある場合には、右図のように、ベアリングが反時計回りに傾いた状態で、内部荷重が釣り合う。このように、ベアリングの軸方向の移動に伴って、ベアリングは常に姿勢変化する。なお、ここではピッチング方向の変位について述べたが、ベアリングの変位は、上下方向、左右方向、ローリング方向、ヨーイング方向のあらゆる方向に生じる。

転動体通過振動は、リニアガイドに作用する外部荷重および内部荷重を考慮して、全ての転動体およびベ

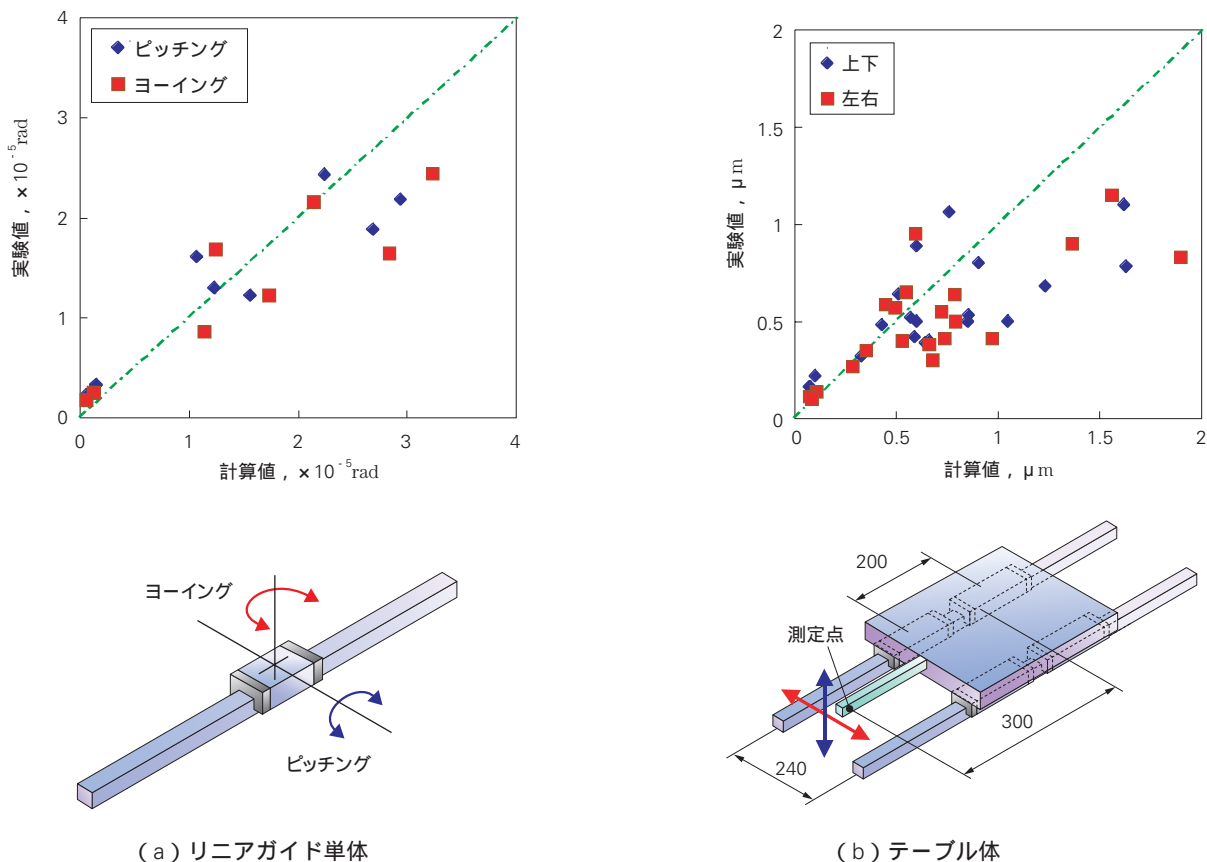


図10 転動体通過振動の計算値と実験値の比較 (サイズ#25~#45, ボール直径 $D_w=3.97\sim 7.94\text{mm}$ )  
 Fig. 10 Comparison of actual and calculated ball passage vibration (size #25 to #45, ball diameter  $D_w=3.97$  to  $7.94\text{mm}$ )

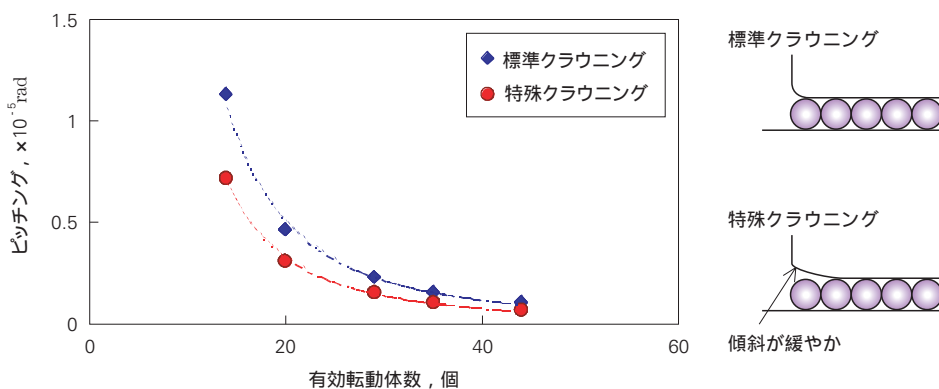


図11 有効転動体数による転動体通過振動 (計算値) の変化 (ボール直径 $D_w=4.76\text{mm}$ , 中予圧)  
 Fig. 11 Relationship between effective number of balls and calculated ball passage vibration (ball diameter  $D_w=4.76\text{mm}$ , medium preload)

アリングについて運動方程式を解くことによって、計算が可能である。図10(a)は、さまざまなサイズのリニアガイドについて、転動体通過振動の計算値を実験値と比較した結果である。計算値と実験値とは、よく一致しており、解析の有効性が確認された。

また、同様の計算手法を用いて、リニアガイドを複

数個組み合わせせたテーブル体についても、転動体通過振動を計算することができる。図10(b)は、さまざまなサイズのリニアガイドを用いた2レール4ペアリングで構成されるテーブル体において、転動体通過振動の計算値と実験値とを比較した結果である。やはり計算値と実験値とは、よく一致している。

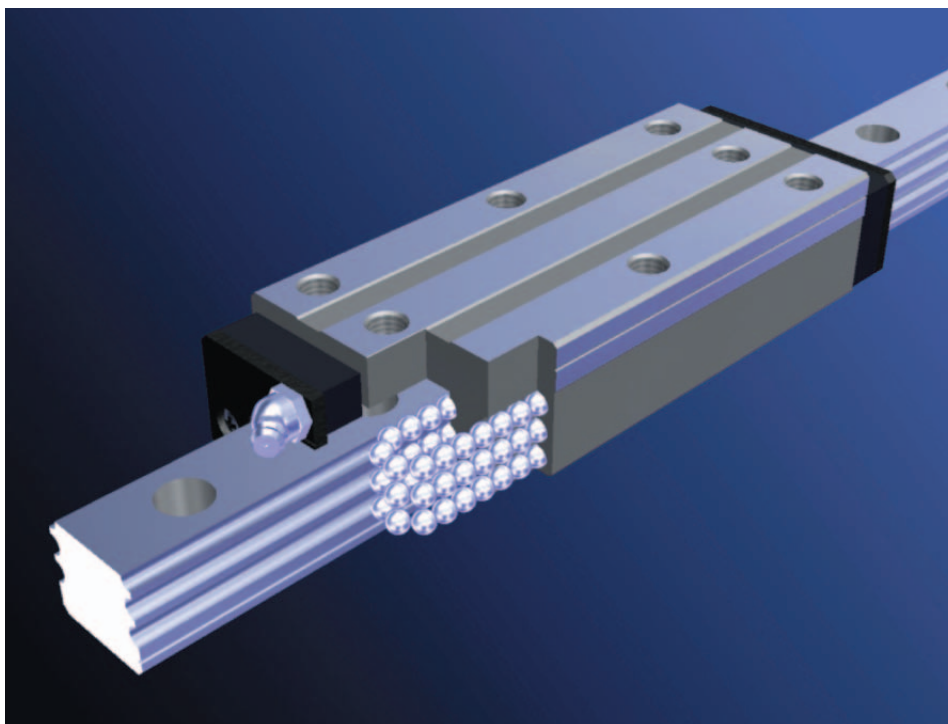


図12 NSKリニアガイド「HAシリーズ」の構造  
Fig. 12 NSK Linear Guide - HA Series

以上のように、NSKでは、転動体通過振動の定量的な解析を実現した。

### 3.2 運動精度解析の製品開発への利用

上述の解析手法を用いることによって、転動体通過振動を低減するための設計指針を見出すことが可能である。

図11は、予圧による転動体の弾性変形量を一定として、1溝あたりの負荷を受ける転動体数（有効転動体数）を変更した場合の、転動体通過振動の計算結果である。有効転動体数が増えるほど、転動体通過振動を低減できるが、ある程度以上に増えると、低減の効果は小さくなる。有効転動体数を増やすと、ベアリングが長くなって、装置のコンパクト化の妨げになるから、本例では有効転動体数は30個程度が適当と言える。

また、ベアリングの軌道面の両端部には、クラウニングと呼ばれる緩やかな傾斜部を設けている。このクラウニング形状も、転動体通過振動の大きさを左右する重要な設計項目のひとつである。

図11には、クラウニング形状が、従来の標準的な形状である場合と、転動体通過振動を低減するための特殊形状とした場合との2通りについて、転動体通過振動の計算結果を示している。この結果から、特殊形状のクラウニングによって、転動体通過振動を低減で

きる事が分かる。

以上の知見に基づいて開発されたのが、NSKリニアガイドHAシリーズである（図12）。HAシリーズは、工作機械用として実績のあるLAシリーズをベースとしており、負荷ボール列を6列持つ構造である。運動精度の向上のために、前述した転動体通過振動の低減のための施策のほか、レール取り付けボルトの締め付けによるレール軌道面の変形を最小化するためのボルト取り付け穴形状などのさまざまな設計仕様が盛り込まれている。

図13は、リニアガイドを複数組み合わせた実際のテーブル体において、HAシリーズとLAシリーズに対して、転動体通過振動の比較測定を行った結果である。

この比較測定では、テーブル体としての剛性を同一にするために、LAシリーズでは8個のベアリングを、HAシリーズでは4個のベアリングを用いている。テーブルの外形寸法は、まったく同一である。なお、ここに示す測定結果は、転動体通過振動のみを取り出すため、ベースの形状精度などに起因する変位成分を取り除いたものである。

測定結果によると、HAシリーズを使用することによって、従来に比べて、転動体通過振動を約1/3に低減することができた。すなわち、テーブルの寸法および剛性を保ったまま、より高い運動精度を達成するこ

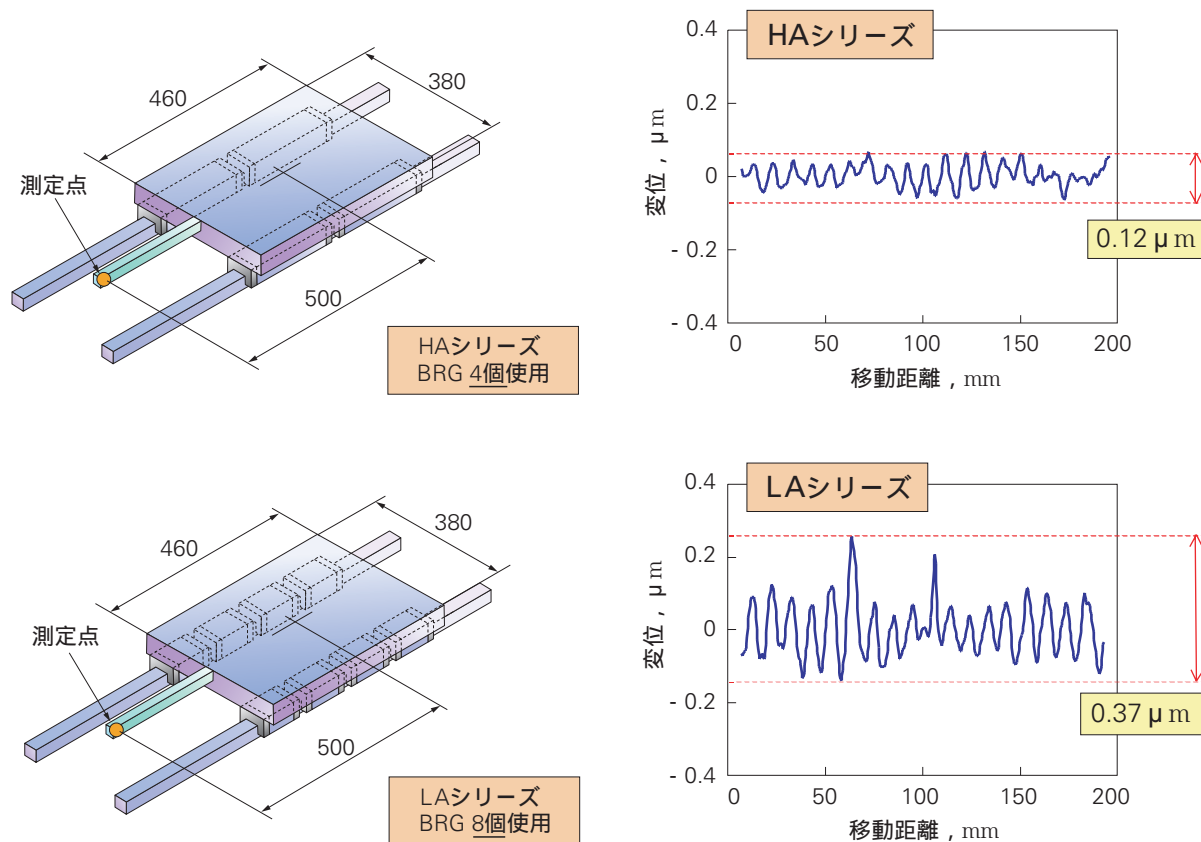


図13 HAシリーズとLAシリーズの転動体通過振動の比較 (サイズ#30, 中予圧)

Fig. 13 Comparison of ball passage vibration of HA Series and LA Series (size #30, medium preload)

とが可能になった。

現在HAシリーズは、加工精度や加工面の品位が重要となる高精度加工機や、従来エアスライドを用いていた精密テーブルなどの用途に使用されており、市場で好評を得ている。

以上のように、運動精度の解析から得られた知見を利用することで、最適な設計を効率的に行うことができるようになった。

#### 4. あとがき

本報では、工作機械用リニアガイドに焦点をあてて、解析技術の概要を紹介した。NSKでは、今回述べた以外にも、あらゆる製品について特性解析を行って

り、製品開発に役立てている。

今後も解析技術のさらなる高度化を進めて、市場の要求を先取りした、高機能な製品を提供していきたい。

#### 参考文献

- 1) 綿林英一, “転がり軸受マニュアル”, (1999) 151 - 155, 日本規格協会。
- 2) 栗田伸一, “転がり軸受関連の接触問題に対するMLMIの応用”, NSK Technical Journal, No.668, (1999) 29 - 37。
- 3) 加藤総一郎, 松本淳, “NSK リニアガイドの高精度化技術開発”, NSK Technical Journal, No.669, (2000) 42 - 49。

商 品

紹 介 超高速アンギュラ玉軸受 - スピンショットII -

High-Speed Precision Angular Contact Ball Bearings - Spinshot™II -

高速用軸受の代表的な例としては、ジェットエンジン用軸受又は工作機械主軸用軸受がある。特に工作機械主軸用軸受は、高剛性で高速回転かつ低発熱性を要求され、さらにビルトインモータ化に対応すべく温度外乱に強い軸受が市場から強く望まれ、NSKは超高速アンギュラ玉軸受“ロバストシリーズ”を開発し、商品化を行った。

従来、超高速回転を追及すると、潤滑法としてジェット潤滑やジェットアンダーレース潤滑を採用するしかなかった。しかし、ジェット潤滑方式は大きな潤滑装置や、大量の潤滑油を供給するため、潤滑油の攪拌抵抗によって消費動力が非常に大きくなってしまい、高出力のモータを必要とする欠点があった。

そこで、オイルエア潤滑でより高速回転を実現し、さらに静音化、エア消費量削減をコンセプトに、ロバ

スト軸受を特殊構造にしたスピンショットII 軸受を開発し商品化したので、以下にその概要を紹介する。

1. 軸受構造

図1の従来オイルエア潤滑方式では、高速回転に伴い発生するエアカーテンにより給油が阻害されるため、軸受内部に確実に潤滑油が供給されず潤滑不足による焼付きの問題があり、高速性に限界があった。

図1に示すスピンショットII は、内輪幅を外輪幅よりも延長させ内輪の外径面をテーパ形状としたことにより、エアにアシストされた潤滑油が外輪間座から、この内輪外径面に吹き付けられ、図2に示すように潤滑油が表面張力により回転とともに軸受内部へ導かれ、転動体に確実に潤滑油が供給される。

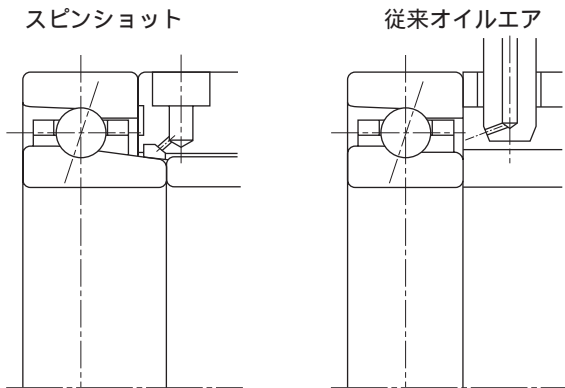


図1 スピンショットII 構造図と従来オイルエア方式  
Fig. 1 Spinshot™II and conventional oil & air lubrication

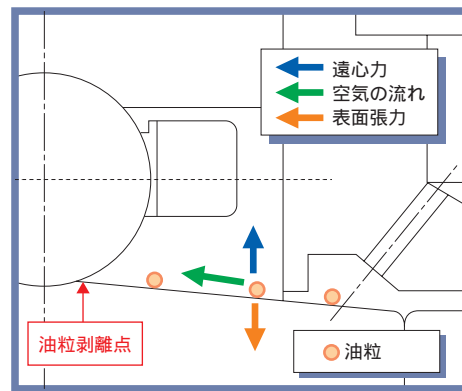


図2 スピンショットII 潤滑原理  
Fig. 2 Principle of Spinshot™II lubrication system

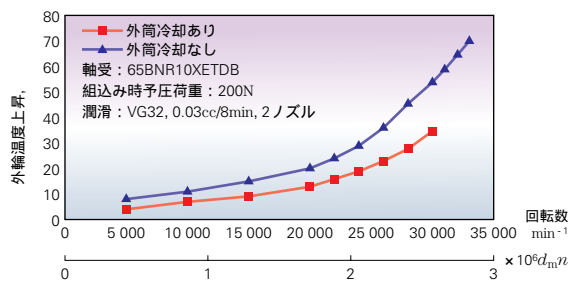


図3 スピンショットII 温度データ  
Fig. 3 Temperature data of Spinshot™II

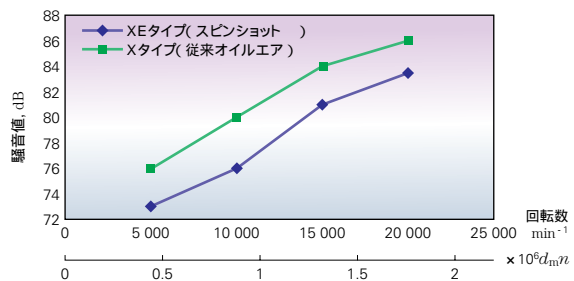


図4 騒音比較  
Fig. 4 Noise comparison

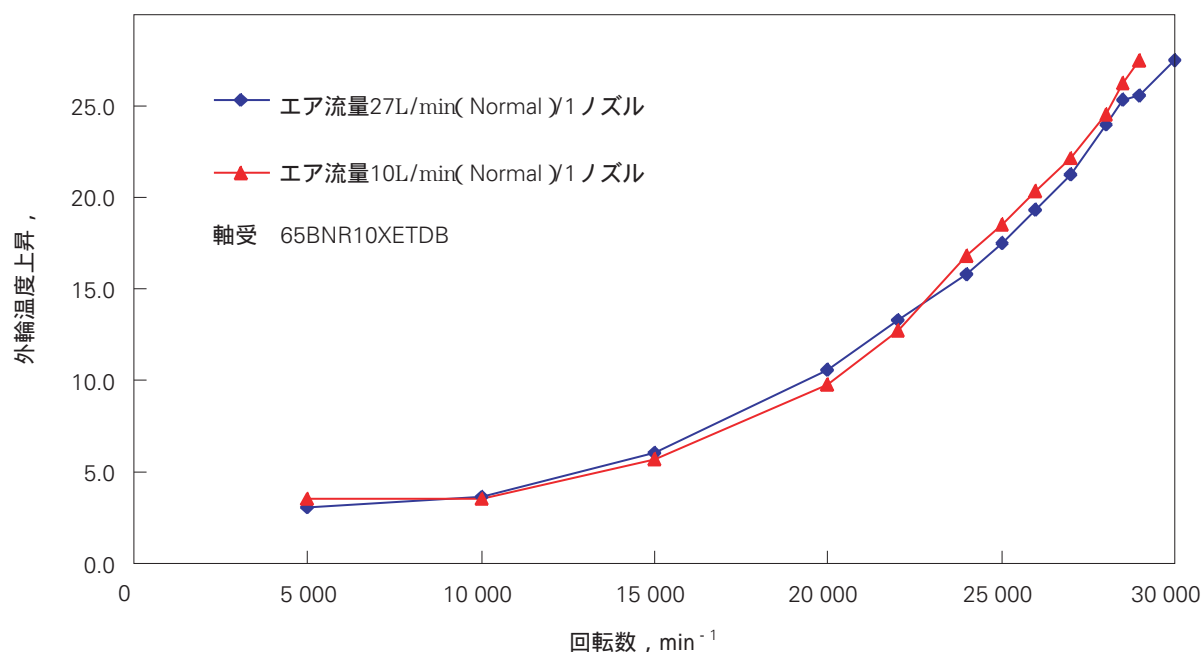


図5 エア消費流量と温度上昇の関係

Fig. 5 Temperature rise related to air consumption

## 2. 特 長

### 2.1 高速性

図3にスピッシュII 温度データを示す。特殊な軸受構造により、高速回転時でも確実に玉への潤滑が供給可能となり、さらに軸受仕様はロバスト設計で、玉はセラミックスを用い、内外輪の材質には NSK 開発鋼である SHX 材と組合せることにより、高速回転における信頼性を向上させ定位置予圧、外筒冷却条件下で  $d_m n 250$  万を達成している。

### 2.2 低騒音化

図4に騒音比較データを示す。軸受内部へ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可能となり、低騒音化を達成している。

### 2.3 エア消費流量削減（省エネ化）

図5にエア消費流量による高速性確認試験データを示す。従来のオイルエア潤滑では、高速回転に伴い発生するエアカーテンにより給油が阻害されるため、流速を保つためにエア圧をある程度高める必要があっ

た。このため、エアの消費量を削減することが困難であったが、スピッシュII は内輪に潤滑油を付着させれば確実に軸受内部へ油が供給されるため、エア圧を下げるのが可能となりノズル1本あたり10L/min (Normal) が達成された。従来オイルエアと比較して約60%のエアの消費量削減が可能で、高速回転時における昇温に差はなく、安定した性能を得ることができる。

## 3. 用 途

高速マシニングセンタや複合加工機のミーリング軸などの高速主軸に適しており、リア側に超高速円筒ころ軸受ロバストシリーズと合わせて使用することにより、従来不可能であった超高速領域を高剛性でかつシンプルな主軸構造で達成することが可能となる。

## 4. ま と め

従来では達成できなかった超高速回転が可能となり、さらには低発熱、低騒音、省エネ化が可能となり優れた高速性能から高速マシニングセンタを中心に、数多く実用されている。

今後、高速化のみでなく省エネ化を望まれる工作機械用主軸には必要不可欠な商品になると考えられる。

商 品

紹 介

シール付き精密アンギュラ玉軸受

Super Precision Sealed Angular Contact Ball Bearings

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の注目度は高く、グリースが封入されシールにより密封されている軸受のニーズが高まっている。

NSKでは、この市場に対応するために新たなシリーズである「シール付き精密アンギュラ玉軸受」(写真1)を商品化した(標準シリーズ, 超高速ロバストシリーズ)。以下にその概要を紹介する。

1. 特 長

(1) 作業性向上

グリース封入済であるため、主軸組立て時に軸受

へグリース封入作業を省略化。

(2) 環境性向上

シールにより軸受外部へのグリース飛散を防止。

(図1)

(3) 取扱性向上

万能組合せが標準在庫のため、軸受の組合せが容易である。

(4) 高速化実現

非接触シール採用により高速化を実現。

回転試験結果を図2に示す。

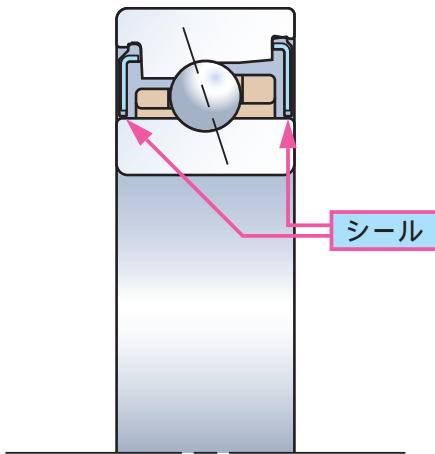


図1 軸受内部構造 (シール配置)  
Fig. 1 Bearing construction



写真1 シール付き精密アンギュラ玉軸受外観  
Photo 1 Super precision sealed angular contact ball bearing

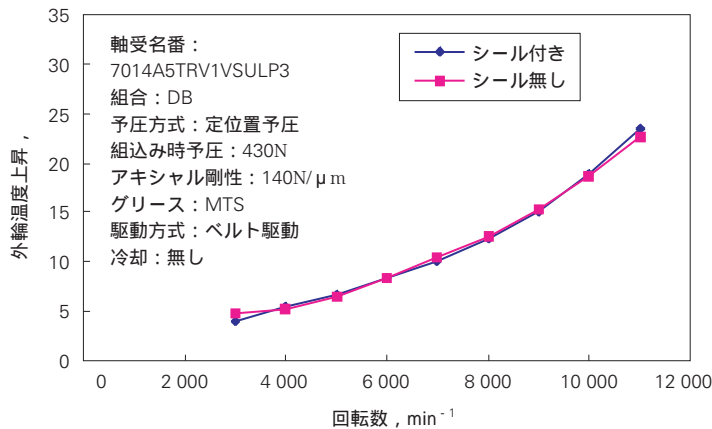


図2 回転試験結果  
Fig. 2 Test result

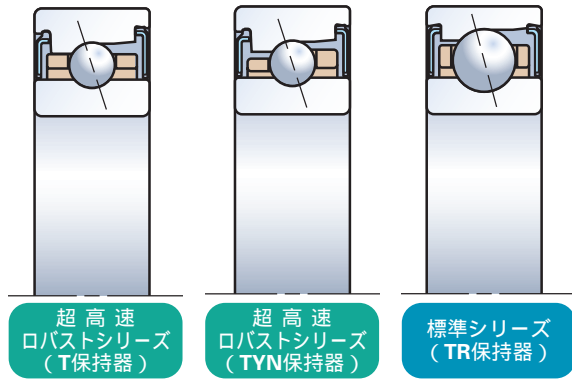


図3 軸受内部構造  
Fig. 3 Bearing construction

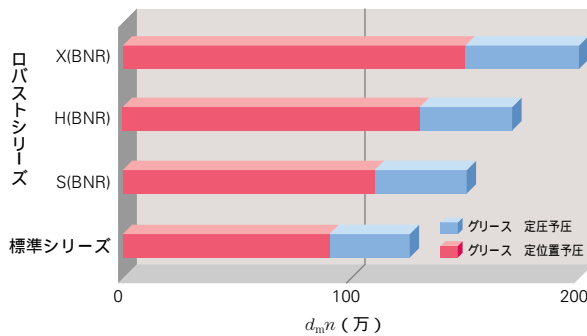


図4 許容回転数  
Fig. 4 Limiting Speed

また、シールには耐油性，耐摩耗性，機械特性に優れているニトリルゴムを採用。

## 2. 仕様

### (1) 用途に応じた最適保持器

軸受内部構造図を図3に示す。

- 外輪案内保持器：高速安定性に優れた外輪案内フェノール保持器（T，TR保持器）。  
T保持器はロバストシリーズに，TR保持器は標準シリーズに採用。
- 玉案内保持器：NSK独自設計玉案内ポリアミド保持器（TYN保持器）で保持器音の低減，低回転時の軸受摩耗を低減，グリースの寿命向上。  
ロバストシリーズH，Sタイプに採用。

表1 寸法表

Table 1 Boundary dimensions

シリーズ	寸法系列	接触角(°)	軸受内径
ロバストシリーズ	BNR10, BNR19	18	30 ~ 100 (注)
	BER10, BER19	25	
標準シリーズ	70 x x C, 79 x x C	15	
	70 x x A5, 79 x x A5	25	

(注) その他のサイズはNSKにご相談ください。

### タイプ記号

ロバストシリーズ	タイプ	材 料	
		内外輪	転動体
ロバストシリーズ	X	高速用耐熱鋼(SHX)	セラミック (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )
	H	軸受鋼 (SUJ2)	セラミック (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )
	S	軸受鋼 (SUJ2)	軸受鋼 (SUJ2)
標準シリーズ		軸受鋼 (SUJ2)	軸受鋼 (SUJ2)

### (2) 対応寸法

寸法表を表1に示す。

### (3) 許容回転数

各シリーズの許容回転数を図5に示す。

## 3. 用途

工作機械の主軸用に最適な軸受であり，主にマシンングセンタや旋盤などに使用される。

## 4. まとめ

工作機械主軸用軸受のニーズに答えるため，本シリーズを開発し商品化した。今後も新たな市場ニーズに応えるための商品開発を積極的に行いたい。



商 品

紹 介

シール付きボールねじサポート用スラストアンギュラ玉軸受

Sealed Angular Contact Thrust Ball Bearings for Ball Screw Support

ボールねじサポート用スラストアンギュラ玉軸受は、ボールねじの軸端を支持する軸受であり、特に工作機械用のものは高い精度と剛性が不可欠なものである。

工作機械の内部で使用されるボールねじサポート用スラストアンギュラ玉軸受は通常、切削油や切粉などの侵入を防ぐため、オイルシールを備えたサポートユニットに組み込まれて使用される。しかし近年は、工作機械の小型化、ユニット化が進み、ボールねじサポートユニットの小型化の要求が多く寄せられるようになってきた。

NSKではこれらの要求に応えるため、軸受端面にシールを装着したシール付きボールねじサポート用スラストアンギュラ玉軸受（シール付きTACシリーズ）の開発を行った（図1）。

1. 特 長

(1) 接触シールを両端面に装着

実績のあるシール形式の中から、シールは高速性を考慮した軽接触の低トルクタイプとし、シール性能を向上させるため、シールリップと内輪シール溝との間にラビリンスシールを効果的に配置した“DDGシール”を採用している（表1参照）。DDGシールは電装

用軸受にて高い実績を有している。軸受両端面に接触シールを装着することで、外部からの異物侵入を防止し、また軸受内部からのグリース飛散も抑制可能で、周辺環境性を向上させている。シールは正面・背面でその配色を変えている。これにより軸受の方向を明確にし、実機における組み込みミスを防止する効果もある。

(2) WPHグリースの採用

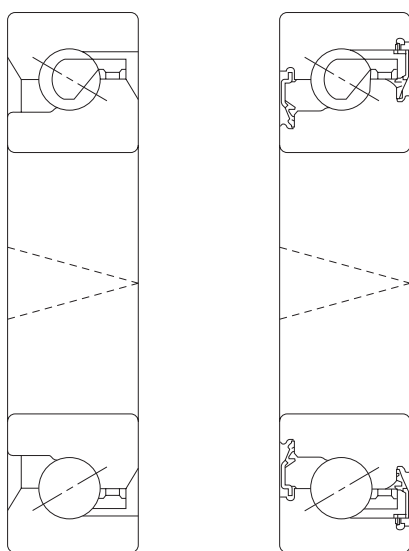
封入グリースには、自動車用ウォーターポンプ軸受用で高い実績のあるWPHグリースを採用した。

WPHグリースは、基油に酸化安定性、熱安定性が優れたポリオレフィンを増ちょう剤に耐熱性、耐水性が優れたウレア化合物を用いて、更に高品質の添加剤を配合している。その特徴は以下のとおりである。

- 1) クーラントが軸受中に侵入しても軟化流出しにくく、良好な潤滑性能を長時間維持することができ、軸受にフレーキング（はくり）を発生させにくい。
- 2) 高温耐久性にも優れており、軸受温度が上昇しても劣化、焼付きを生じにくい。
- 3) 優れた防せい（錆）性能があり、水やクーラントが軸受中に侵入してもさびを発生させにくい。

(3) 現在のTACシリーズと完全互換

現在シリーズ化しているボールねじサポート用スラストアンギュラ玉軸受 TACシリーズと内径・外径・幅が同一寸法である。定格荷重も変化しない。そのため、現在使用している軸及びハウジングユニットサイズを変化させることなく、置き換えが可能となる。



従来TACシリーズ シール付きTACシリーズ

図1 軸受断面の比較

Fig. 1 Cross-sections of conventional and new sealed bearings

表1 シール形式と性能

Table 1 Seal type and performance

シール形式	従来タイプ		開発品
	DDU	DDW	DDG
シール構造			
トルク			
防水性			
グリース密封性			

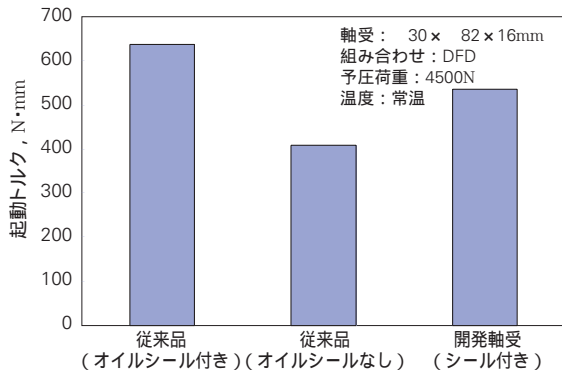


図2 起動トルクの比較  
**Fig. 2** Starting torque of conventional unit and new sealed bearing unit

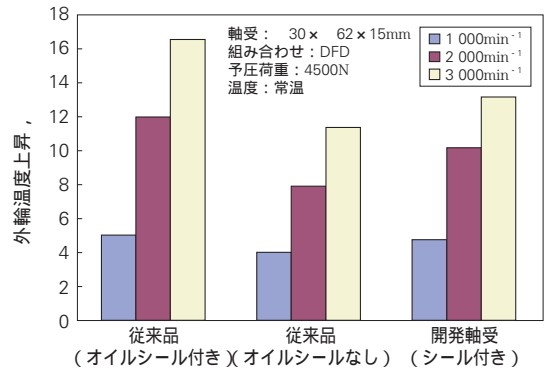


図3 昇温の比較  
**Fig. 3** Temperature rise of conventional unit and new sealed bearing unit

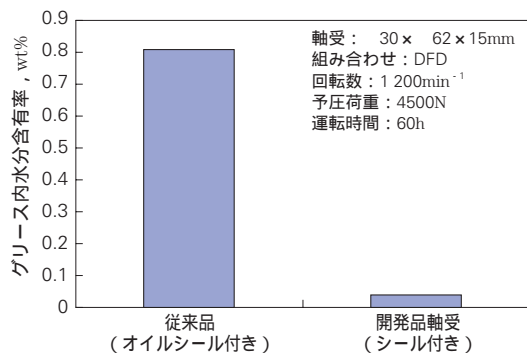


図4 防水性の比較  
**Fig. 4** Waterproof of conventional unit and new sealed bearing unit

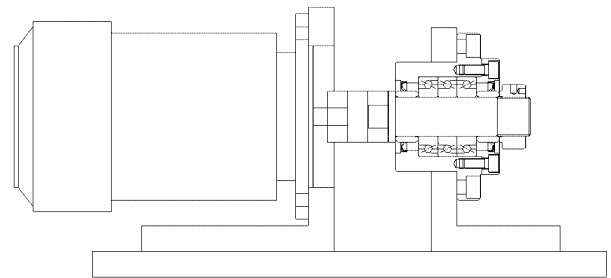


図5 試験装置  
**Fig. 5** Test rig

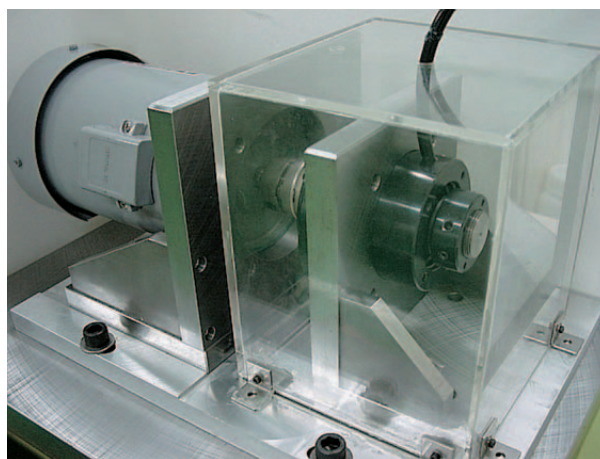


図6 試験装置  
**Fig. 6** Test rig

組み合わせは万能組み合わせ (SU) を標準としているため、内径・外径寸法許容差も小さく組み合わせやすい仕様となっている。

## 2. 性能

図2と図3, 図4にシール付きボールねじサポート用スラストアンギュラ玉軸受の起動トルクと昇温性能, 防水性について示す。性能評価に用いた試験装置は図5, 図6に示す。

いずれも現行のオイルシールを採用したユニットの性能を上回っている。

## 3. 用途

シール付きボールねじサポート用スラストアンギュラ玉軸受は、切削水や異物環境下での使用が多い工作機械用のボールねじ支持用として最適である。

## 4. まとめ

シール付きボールねじサポート用スラストアンギュラ玉軸受を使用することで、現在の軸受性能を維持したままユニットの小型化が可能となる。

商 品  
紹 介

高機能円筒ころ軸受

- 複列円筒ころ軸受，超高速単列円筒ころ軸受 -

High Performance Cylindrical Roller Bearings

- Double Row Cylindrical Roller Bearings, Ultra High-Speed Single Row Cylindrical Roller Bearings -

高機能円筒ころ軸受として，工作機械用主軸の高剛性と高速化を狙い，“高剛性シリーズ 複列円筒ころ軸受”と“ロバストシリーズ 超高速単列円筒ころ軸受”を開発し，商品化したので，その概要を紹介する．

1. “高剛性シリーズ 複列円筒ころ軸受”

1.1 背 景

最近では旋盤にマシニング機能を加えた複合加工機が

増え，旋盤主軸の最高回転数はグリース潤滑で $d_m n$  80万にまで上昇している．旋盤主軸の高速化は，軸受やモータの発熱を増大させることになるので，軸の熱変位が大きくなり，加工精度の低下という課題も発生させる．

今回開発した“高剛性シリーズ 複列円筒ころ軸受”は，NSK独自の新技术を取り入れることで，長寿命化，低騒音化，高速化，低発熱化，および高精度化について大幅な性能向上を実現し，シリーズ化したものである．

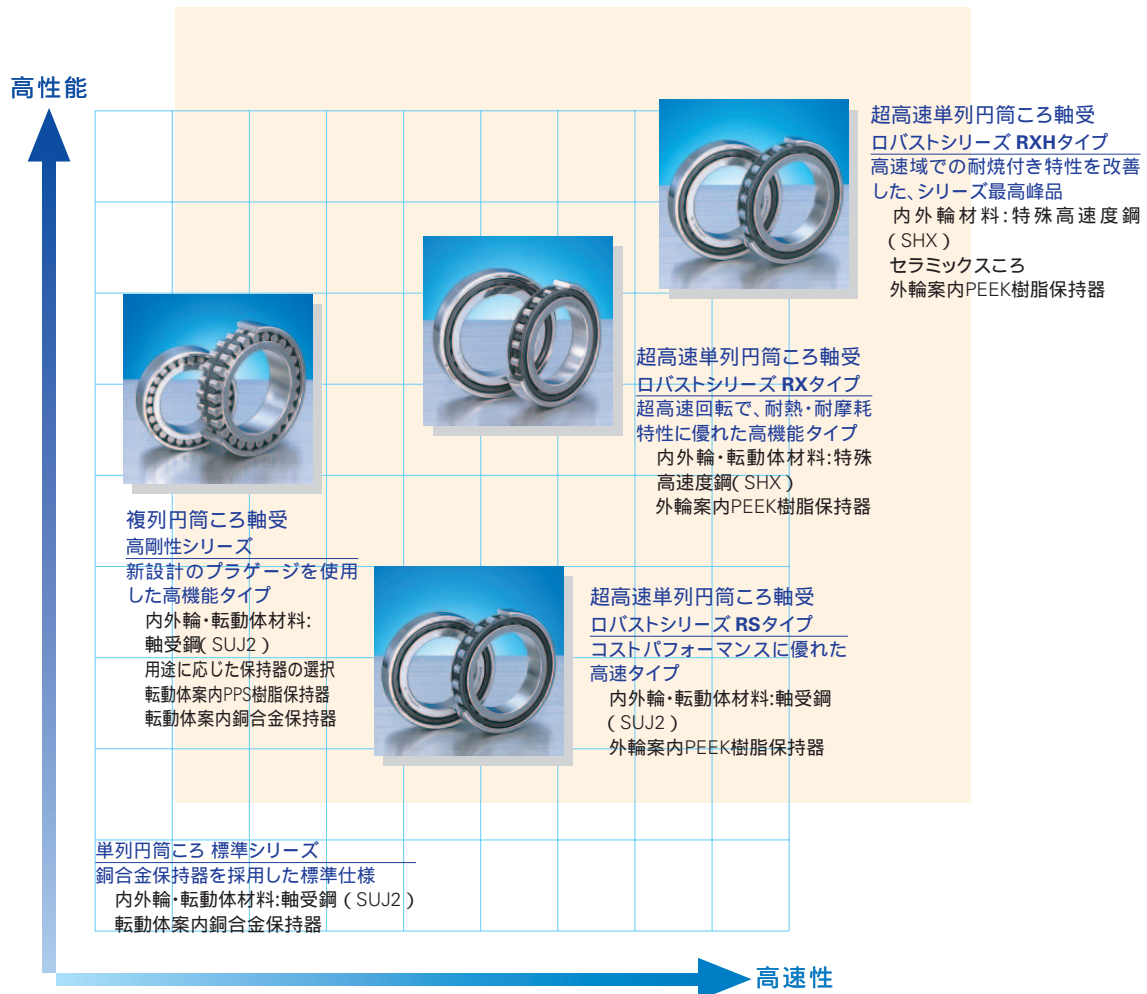


図1 高機能円筒ころ軸受  
Fig. 1 High performance cylindrical roller bearings

1.2 特 長

1.2.1 長寿命化

保持器材として耐熱性に優れ、高剛性な“PPS樹脂”を採用することにより、運転初期の保持器摩耗粉量を低減させ、グリース寿命が向上した。

1.2.2 低騒音化

新型樹脂保持器(TB)により、潤滑不足時に発生する転動体と保持器の接触音が銅合金保持器(MBタイプ)に比べて低減した。

1.2.3 高速化と低発熱化

保持器をシンプルな形状としかつ高精度に成形したことにより、遠心力による変形量が銅合金保持器よりも小さく抑えられ、安定した回転を保ち、グリース潤滑において従来の樹脂保持器では達成できなかった $d_m n$ 100万以上の高速化と低発熱化を実現した。



図2 高剛性シリーズ 複列円筒ころ軸受  
Fig. 2 High rigidity series double row cylindrical roller bearings

1.2.4 高精度化

真円度と径相互差を高度に管理した高精度円筒ころを組合せることによって、一般的に使われるJIS4級では達成できない高精度な軸心の振れを実現した。

1.3 構成および仕様

TB保持器はNN3006～NN3024(内径 30～120)に適用している。図5にカタログ許容回転数を示す。

1.4 用 途

複列円筒ころ軸受は、高剛性が要求される主に旋盤などの主軸用に適している。

1.5 ま と め

長寿命化、低騒音化、高速化、低発熱化、および高精度化を実現したTB保持器を用いた高機能複列円筒ころ軸受を使用することにより、旋盤主軸の高機能化が実現できるものとする。

高強度保持器 ころ案内PPS樹脂 (TB)  
エンジニアリングプラスチック

使用限界温度が220 という優れた耐熱性です。  
熱濃硫酸を除くほとんどの酸、アルカリ、有機溶剤に侵されません。  
従来の円筒ポリアミド保持器に対して、強度、弾性率、クリープ特性、疲労特性などに優れています。

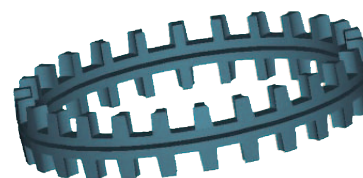


図3 複列円筒ころ軸受用TB保持器  
Fig. 3 TB Cage for double row cylindrical roller bearings

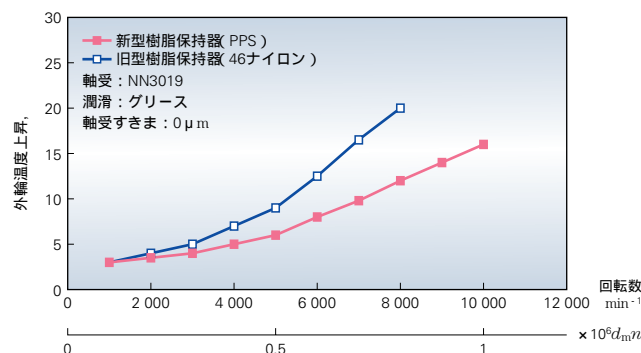


図4 グリース潤滑での昇温  
Fig. 4 Temperature rise with grease lubrication

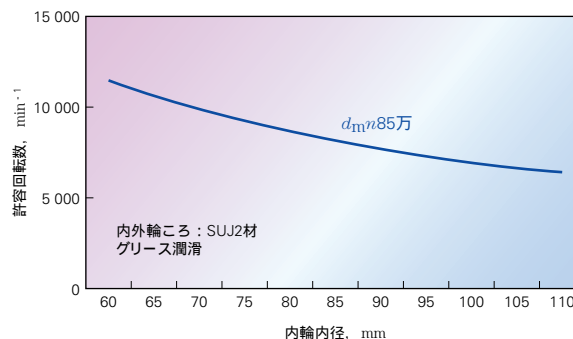


図5 許容回転数  
Fig. 5 Limiting speed

2. “ロバストシリーズ 超高速単列円筒ころ軸受”

2.1 背景

近年、マシニングセンタはモータビルトイン化によって主軸の高速化が進み、 $15\,000\text{min}^{-1}$ 以上の最高回転数を有する主軸が主流になりつつある。その主軸軸受の潤滑にはグリースやオイルエアの微量油潤滑が多く利用されるため、円筒ころ軸受が適用できずにアンギュラ玉軸受の配列となることが多かった。

円筒ころ軸受は、軸の熱膨張が容易に吸収できる特長を持つので、高速回転が可能であれば、主軸構造は定位置予圧を使ったアンギュラ玉軸受との組合せによってシンプルにすることができる。

今回開発した“ロバストシリーズ 超高速単列円筒ころ軸受”は、NSK独自の新技术を取り入れることで、超高速化、低発熱化、および耐焼付き性について大幅な性能向上を実現し、シリーズ化したものである。



図6 ロバストシリーズ 超高速単列円筒ころ軸受  
Fig. 6 Robust series ultra high speed single row cylindrical roller bearings

表1 超高速単列円筒ころ軸受の種類  
Table 1 Types of ultra high-speed single row cylindrical roller bearings

タイプ	材 料	
	内外輪	転動体
RS	軸受鋼 (SUJ2)	軸受鋼 (SUJ2)
RX	高速用耐熱鋼 (SHX)	高速用耐熱鋼 (SHX)
RXH	高速用耐熱鋼 (SHX)	セラミック ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )

2.2 特 長

2.2.1 超高速化と低発熱化

保持器材として熱可塑性の耐熱性樹脂“PEEK”を採用し、軸受内部形状と保持器形状に、温度ロバスト性を考慮した設計を施すことにより、低発熱化を実現し、オイルエア潤滑で  $d_m n 300$  万の超高速回転を実現した。

超耐熱性保持器 外輪案内PEEK樹脂 (TP)  
エンジニアリングプラスチック

使用限界温度240 と優れた耐熱性です。  
微量潤滑に最適な耐摩耗性を発揮します。  
強度、弾性率、クリープ特性、疲労特性などに優れています。  
高速回転時の保持器変形を抑制し、安定した回転を保ちます。

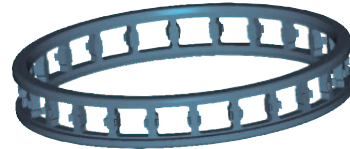


図7 超高速単列円筒ころ軸受用TP保持器  
Fig. 7 TP Cage for ultra high-speed single row cylindrical roller bearings

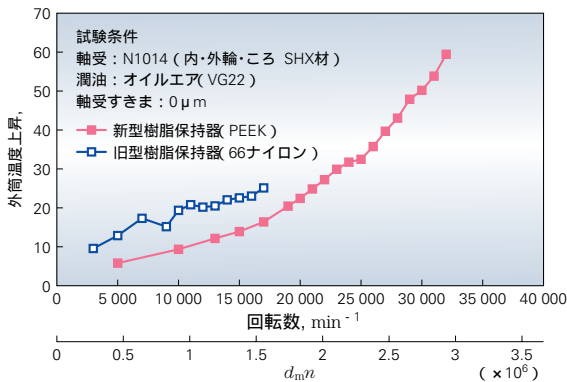


図8 オイルエア潤滑での昇温  
Fig. 8 Temperature rise with oil-air lubrication

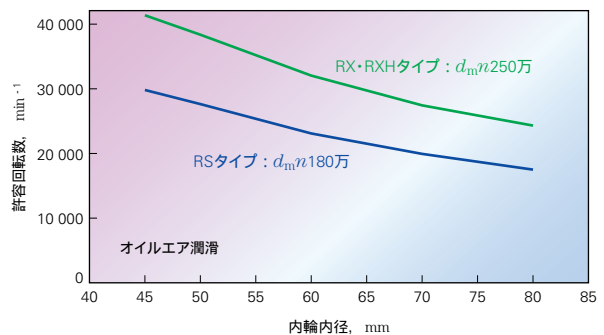


図9 許容回転数  
Fig. 9 Limiting speed

### 2.2.2 耐焼付き性向上

NSK独自開発のSHX材を使用することにより、耐焼付き性が向上し、RXタイプはRXHタイプ（セラミックころ）と比べてコストパフォーマンスも優れている。

### 2.2.3 構成および仕様

TP保持器はN1009～N1017（内径 45～85）に適用している。軸受のタイプは内外輪ころの材質によって表1の3種類に分類される。最高速仕様としてRXHタイプ（セラミックころ仕様）も用意している。図9

にカタログ許容回転数を示す。

### 2.3 用途

超高速単列円筒ころ軸受は高速性が要求されるような主にマシニングセンタなどの主軸用に適している。

### 2.4 まとめ

フロント側にロバスタアンギュラ玉軸受（定位置予圧）、リヤ側に超高速単列円筒ころ軸受を使用することにより、信頼性の高い高速主軸が実現でき、今後の主流になるものと考えられる。

商 品

紹 介

## NSK ローラガイド「RAシリーズ」

## NSK Roller Guide - RA Series

NSKは1980年代前半に、工作機械をその主な用途とした精密リニアガイドLYシリーズを商品化し、その後1997年には、新工作機械用リニアガイドとしてLAシリーズを開発した。LAシリーズは、マシニングセンタに代表される工作機械の高速化・高精度化に対応して、転動溝列数の増加等で負荷容量・剛性・摩擦力をバランス良く組み合わせ、LYシリーズをベースに更なる高性能化を実現した商品である。

近年、工作機械の送り機構に使用される案内に対して、高剛性・高負荷容量への要求が一段と強くなり、また、案内に転動体としてころを使用することによる高級感とその搭載機をイメージアップすることによって、滑り案内が主流であった旋盤や、吸引力が課題となるリニアモータ搭載機などを中心に、工作機械へのローラガイドの採用が進んできている。そのような工作機械向けの案内に要求される機能としては、高負荷容量・高剛性が重要であるが、同時に、高運動精度・高作動性や、苛酷な使用環境に対する高防塵機能もまた重要である。

NSKでは、既存のローラガイドに優る負荷容量、

剛性を有する工作機械向けの新型リニアガイドとして、転動体をころとしたローラガイドRAシリーズを商品化したので、その概要を紹介する。

## 1. 特 長

ローラガイドRAシリーズの外観を写真1に示す。RAシリーズは、LAシリーズや既存のローラガイドと取付寸法が互換であり、下記の特長を有している。

## (1) 高負荷容量

ころ径・ころ長さを最大限大きくするとともに、ころ両端に設ける面取りを必要最小限の大きさとしたことにより、LAシリーズや既存のローラガイドに優る負荷容量を実現している。

## (2) 高剛性

ベアリング本体の循環穴位置の最適化、DF交点ではなくDB交点(図1参照)としたころ配置構造の採用、及びベアリング本体の開き変形を定量的に加味した内部詳細寸法の決定などによって断面形状の最適化を行

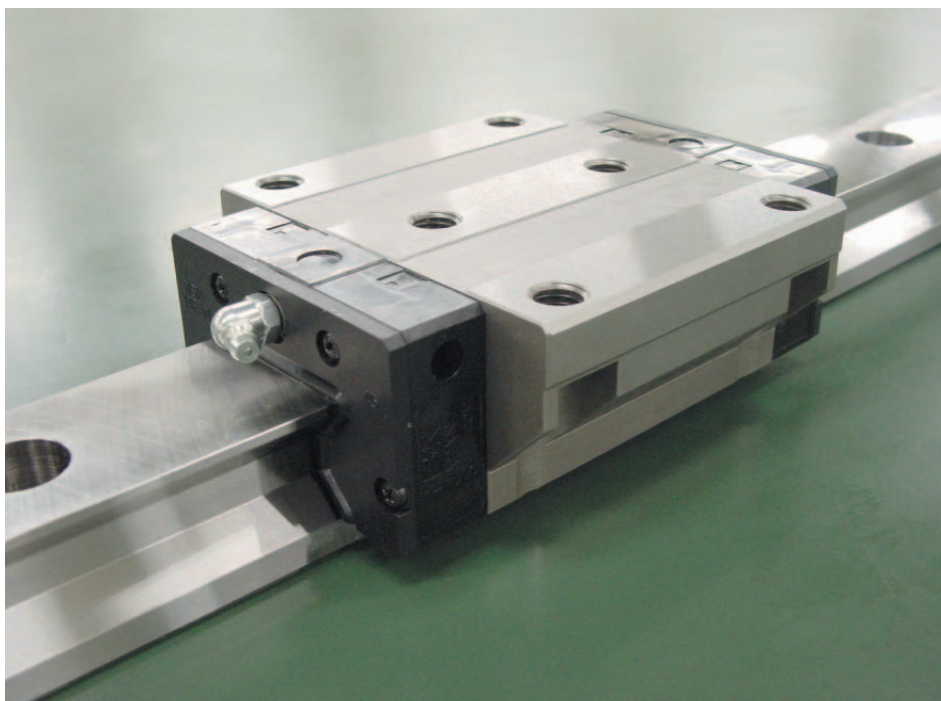


写真1 「RAシリーズ」の外観

Photo 1 NSK Roller Guide - RA series

い，LAシリーズや既存のローラガイドに対して同等以上の高剛性を実現している。

RAシリーズの開発にあたって行なったFEM解析の一例として，荷重によるベアリングの変形の解析結果を図2に示す．これらの解析結果を基に，ベアリング断面形状の最適化や転動面の仕様を定めている．

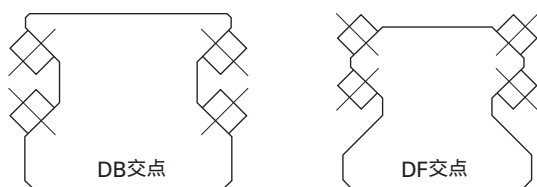


図1 ここの配置構造  
Fig. 1 Roller placement

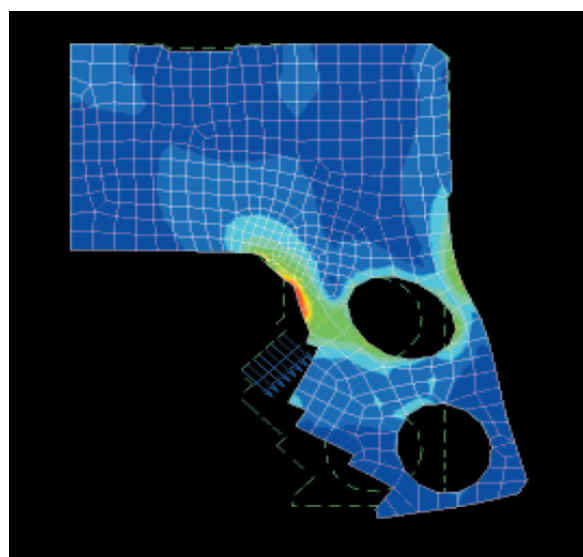


図2 ベアリング変形の解析例  
Fig. 2 Example of bearing rigidity analysis

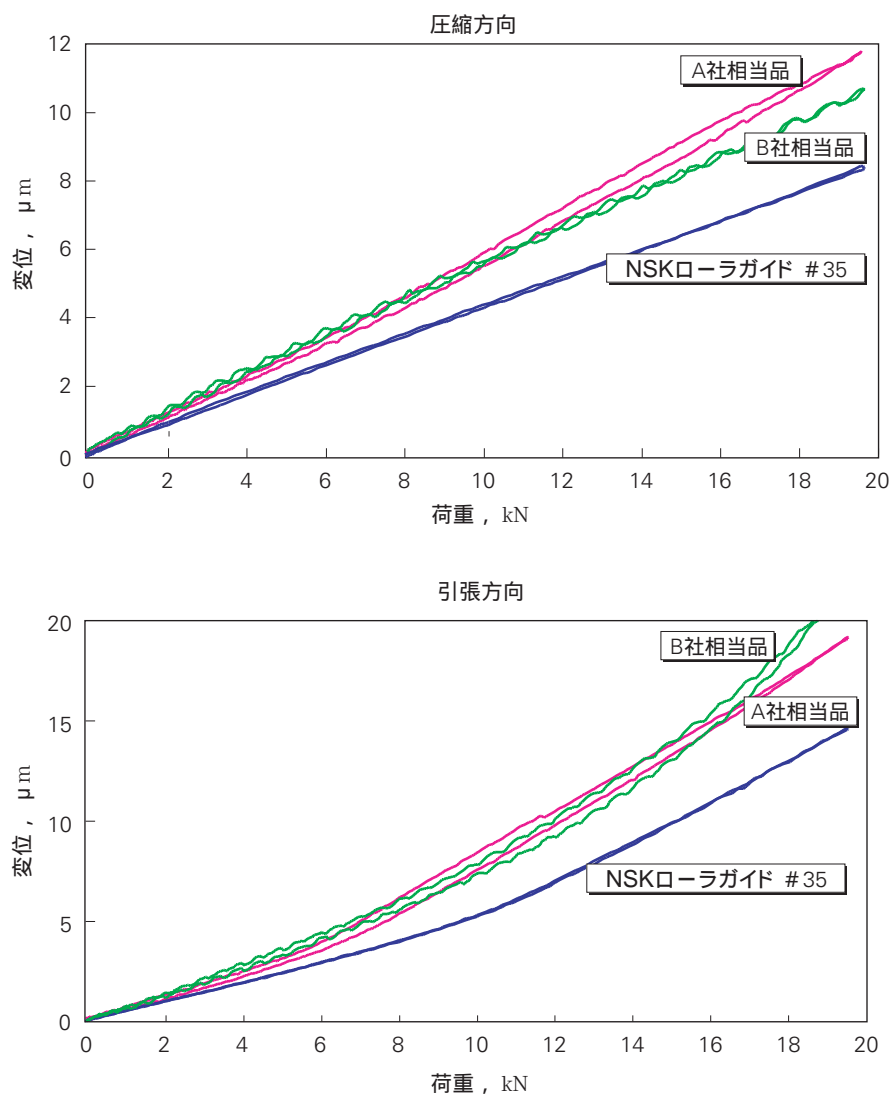


図3 剛性の実測結果  
Fig. 3 Comparison of stiffness



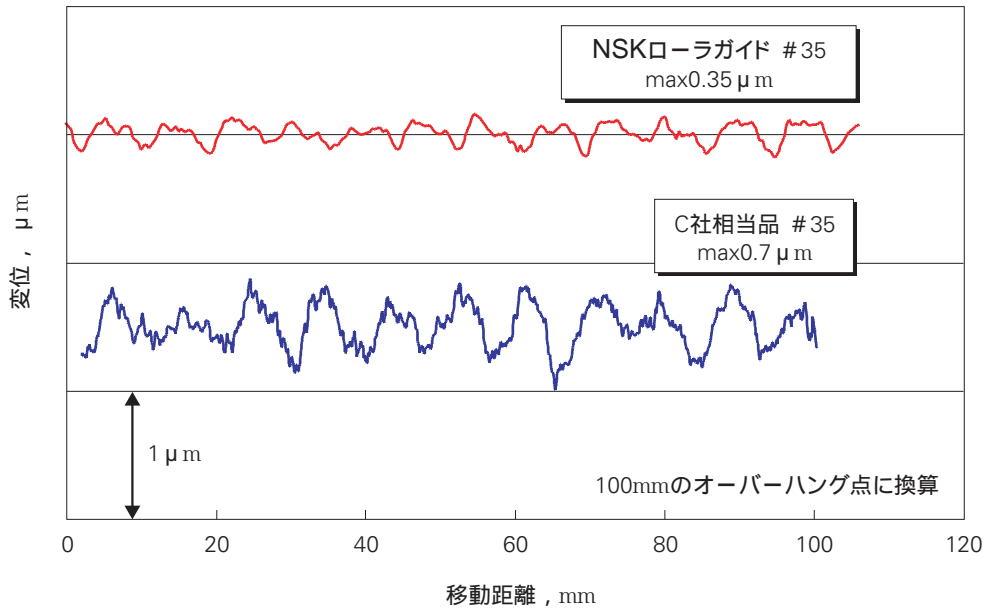


図4 転動体通過振動の実測結果  
Fig. 4 Comparison of vibration caused by roller passage

NSK ローラガイドRA35及び既存の他社製ローラガイドの剛性実測結果を図3に示す。NSK ローラガイドはその設計仕様から予測された通り、他社製ローラガイドよりも圧縮方向（ベアリングをレールに押し付ける方向）・引張り方向（ベアリングをレールから引き離す方向）ともに高剛性となっている。

### (3) 高運動精度

ベアリングの転動面両端部に最適なクラウニング形状を設けることによって、ころ通過振動を抑制し、高運動精度を実現した。

NSK ローラガイドRA35及び既存の他社製ローラガイドのベアリング単体での運動精度の測定結果を図4に示す。本結果は、ベアリングの転動体通過振動を100mmオーバーハングしたポイントでの変位に拡大したものであるが、NSK ローラガイドは他社製ローラガイドに対して、ころ通過振動が1/2と大幅に低減されている。

### (4) 高作動性

ころところの間に保持ピースを装着してころ特有のスキューを抑制することにより、高作動性を実現した。また、保持ピースを介してころを保持する仕様となっていることから、既存のローラガイドに比べてころの保持性が向上した。さらにこのことから、ころ端面の面取りを大きくすることが不要となり、負荷容量・剛性・コストの面でも有利な仕様となっている。

### (5) 高防塵

ベアリングの転動面周辺に高防塵シールを装着することによって、異物環境下での高防塵性能を実現している。更に高度な防塵仕様として、レール上面カバーも準備している。

## 2. 製品仕様

本シリーズは現在、断面寸法の小さいものからRA35, RA45, RA55の3サイズを、またベアリングの形式は角形・フランジ形のそれぞれについて、高負荷容量タイプ（標準長ベアリング）と超高負荷容量タイプ（長形ベアリング）を準備しており、外回り寸法や取付寸法はLAシリーズリニアガイド（LA35, LA45, LA55）や既存のローラガイドと寸法互換になっている。

RAシリーズの精度はLAシリーズに準じた仕様とし、予圧については十分に高剛性であることと予圧量の差による剛性の差が小さいことから1種類の設定（高予圧）とした。

## 3. むすび

NSKは、工作機械の案内に対する一層の高負荷容量・高剛性の要求に対応してローラガイドRAシリーズを商品化した。次のステップとしては、RA25, RA30, RA65の商品化を行なって本シリーズの拡充を進めるとともに、各種評価試験結果の充実を図り、ユーザー各位のご期待に応えていきたいと考えている。

# EPS制御技術



遠藤 修司

遠藤 修司\* , 小林 秀行\*

## EPS Control Technology



小林 秀行

by S. Endo , H. Kobayashi

In this paper, we will discuss NSK's approach to electrical power steering (EPS) design by utilizing information related to road surface conditions. Information regarding varying road surface conditions includes both pertinent information and ineffective information of which can be separated according to frequency. These frequencies can effectively utilized in designing an EPS system, more so than with a conventional hydraulic power steering system. NSK has achieved a means of combining EPS design with information based on road surface conditions to create a robust EPS system. Furthermore, this approach works quite effectively when nonlinear mechanical characteristics are minimized. For this purpose, mechanical element designs such as a reduction gear, rack and pinion, and torque sensor are also described. The feasibility of our approach to design is also confirmed by experiments.

1. はじめに
2. 望ましいロードインフォメーションとは
3. ロードインフォメーション感度設計
4. ロードインフォメーション感度設計のための電動パワーステアリング要素技術
- 4.1 EPS減速ギアラバーダンパ
- 4.2 ローラサポート型ラックアンドピニオン
- 4.3 非接触式トルクセンサ
5. 実験結果
6. 結 論

### 1. はじめに

近年、電動パワーステアリングはより高出力なパワーアシストが可能になり、その適応車種をCプラットフォームまで拡大している。一方、適応車種の拡大に伴いより高度な操舵性能に対する要求も強くなってきた。

NSKステアリングシステムズでは、上記市場背景に対し電動パワーステアリングをマン-マシンインターフェースと位置付け開発を行っている。ここで、マン-マシンインターフェースが象徴するところは、パワーステアリングの基本機能を単なるパワーアシスト機能のみならず車両運動の状態を運転者に対し伝える

手段と捉えるところにある。

現在までに、このコンセプトに基づきロードインフォメーション感度設計方法を開発<sup>1)</sup>し、欧州向け電動パワーステアリングに展開、一体感のあるステアリングとして好評を得た。本稿では、欧州向け電動パワーステアリングで行っているロードインフォメーション感度設計方法について紹介する。なお、電動パワーステアリングの一般的な技術については文献<sup>2)</sup>を参照していただきたい。

### 2. 望ましいロードインフォメーションとは

走行状況に応じてタイヤが発生する力、すなわちロードインフォメーションはステアリング機構を通じて運転者に伝えられる。ロードインフォメーションは、安心感のある走行、車両の運動状態に関連した危険予知あるいは一体感のあるステアリングを目指した場

\*NSK ステアリング システムズ(株)  
EPS事業部 EPS技術部

合、必要なインフォメーションのみを適切に伝えるべきである。例えば、十分なロードインフォメーションを伝えながらも車輪のアンバランスで生じるフラッタ振動やサスペンションの共振に同期したステアリング振動は少ない方がよいからである。

この課題に対し、従来の油圧式アシスト機構ではステアリングダンパ等による対策がなされている。一方、電動パワーステアリングでは周波数領域での設計方法が導入でき、積極的に伝えるべきロードインフォメーションと外乱として抑圧すべきロードインフォメーションとを周波数領域上で区別することが可能である。表1に各ロードインフォメーションの周波数特性を示す。操舵に最も必要な車両運動に関連した反力は、約10Hz以下にある。一方、操舵上適度なレベルに抑えたいフラッタ振動、サスペンションの共振に同期したステアリング振動あるいは路面からの強いキックバックトルクは、主に10Hz以上に分布する。

表1 ロードインフォメーションとその周波数帯域  
Table 1 Road information and frequency range

ロードインフォメーション	周波数帯域
EPS機械系の共振	10 ~ 13Hz
サスペンションの共振	13 ~ 17Hz
シミー振動	15 ~ 25Hz
車両運動の反力	主に0 ~ 10Hz

従って、約10Hzを境に積極的に伝えるべきロードインフォメーションと外乱として抑圧すべきロードインフォメーションとを区別しロードインフォメーションの感度設計を行っている。次章では、ロードインフォメーション感度設計の設計方法について紹介する。

3. ロードインフォメーション感度設計

図1に簡略化した電動パワーステアリングシステムの構成を示す。ロードインフォメーションは、タイヤから電動パワーステアリング機構を通じてステアリングホイールそして運転者へと伝えられる。従って、タイヤが発生する力からステアリングホイールまでの伝達特性により、ロードインフォメーション感度設計を論じることができるはずである。図中アシスト力を発生するモータがロードインフォメーションの伝達経路の中間に位置している。従って、トルクセンサで検出した操舵トルクをモータトルクで操作することによりロードインフォメーション感度を調整できる機構となっている。

次にこの機構を使った制御器の設計方法について紹介する。議論を簡略化するためにここでは図1のステアリングシステムを図2に示す線形化したブロック図に置き換える。そして図2に示す線形化したブロック図に対し、一般的な外乱感度設計方法を用いてロードインフォメーション感度設計を行っている。実際の設計では、摩擦等の非線形要素の影響を考慮する必要がありその扱いについては後述する。

図2において議論するロードインフォメーションの伝達特性は、 $d(s)$  から  $t(s)$  への伝達特性である。

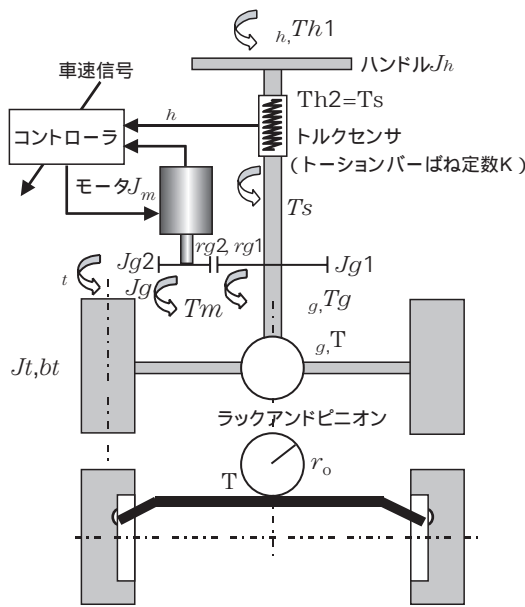


図1 電動パワーステアリングシステムの構成  
Fig. 1 EPS system configuration

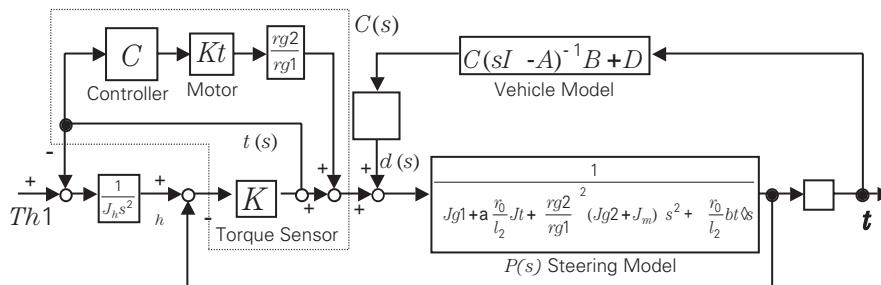


図2 線形化した電動パワーステアリングシステムのブロック図  
Fig. 2 Block diagram of linearized EPS system

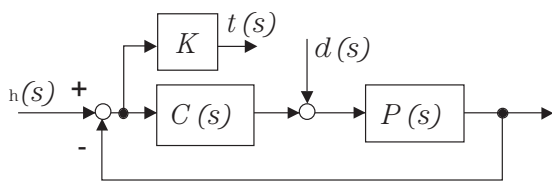


図3 簡略化したブロック図  
Fig. 3 Simplified block diagram

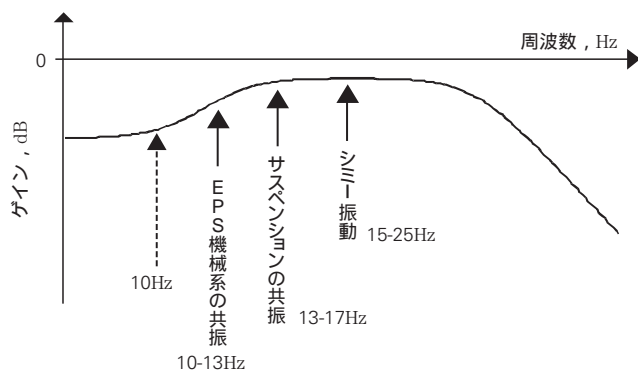


図4 望ましい相補感度関数  
Fig. 4 The desired complementary sensitivity function

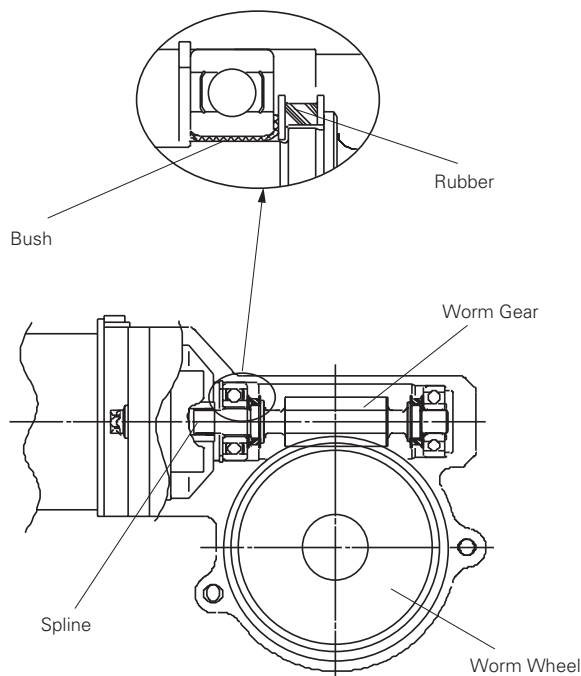


図5 電動パワーステアリングの減速機構  
Fig. 5 EPS reduction gear

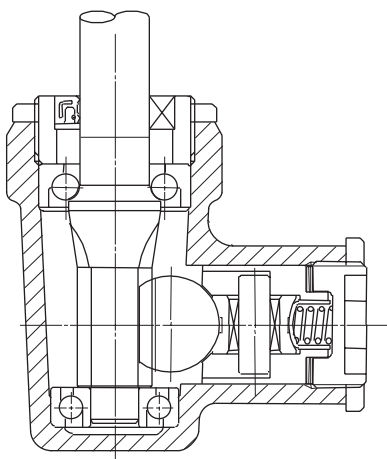


図6 ローラサポート型ラックアンドピニオン  
Fig. 6 The rolling support type rack and pinion

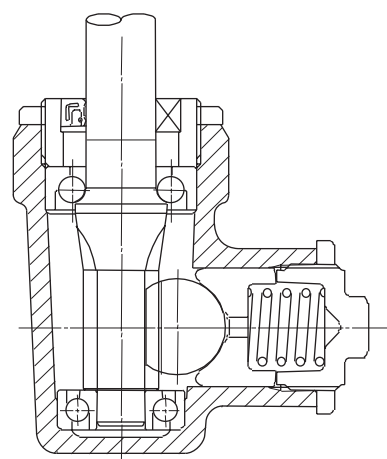


図7 従来型ラックアンドピニオン  
Fig. 7 The conventional type rack and pinion

また、図2はトーシヨンバの上下で発生する角度誤差を補正する角度制御系とみなすことができ、図3のように更に簡略化できる。ここでは図2のブロック図で点線部分を制御器  $C(s)$  と置き、トーシヨンバより外側のステアリングの機械系をプラント  $P(s)$  とし、ロードインフォメーションを外乱  $d(s)$  と定義している。図3よりロードインフォメーションの伝達特性は

$$\frac{t(s)}{d(s)} = K \frac{C(s)P(s)}{1+d(s)t(s)}$$

であり、トーシヨンバ剛性  $K$  を除すると図3に示す系の相補感度関数

$$T(s) = \frac{C(s)P(s)}{1+C(s)P(s)}$$

に一致する。従って、 $T(s)$  を用いれば制御系のロバスト安定性及びロードインフォメーション感度設計の両方を考慮した設計が可能になることがわかる。

ロードインフォメーション感度設計の観点から望ま

しい相補感度関数の一例を図4に示す．相補感度関数ではその定義よりゲインが1に近づくほど外乱が抑圧され，ゲインが1より小さくなるほど外乱が抑圧されずに通過する．従って，表1から図4のような特性にすることが望ましい．以上より，図3の系を安定化しかつ図4に示す相補感度特性に近づくような $C(s)$ を求めることが制御系の設計課題となる．

上記設計課題に対し例えばH無限大制御等のロバスト制御系の設計手法を用いて十分条件ではあるが $C(s)$ を求める．ここで求めた $C(s)$ をベースに操舵性能改善要求に従い， $C(s)$ を細かくチューニングしていく手法を用いている．

以上の設計方法を実現するためには，図4のプラントはできるだけ摩擦等の非線形要素を持たないほうが

よい．次に本設計方法を有効に生かすための要素設計技術を紹介する．

#### 4. ロードインフォメーション感度設計のための電動パワーステアリング要素技術

##### 4.1 EPS減速ギアラバーダンパ

モータの減速機構に図5に示すウォームギア機構を用いている．ラバーダンパがウォームギアの両端支持部に挿入されており，ラバーダンパがウォーム軸方向に大きく弾性変形する領域すなわちモータトルクが小さい領域では，モータ軸とコラム軸は独立して動くことができる．このため，特にアシスト量の小さい直進走行状態ではラバーダンパがクラッチ機構のような役

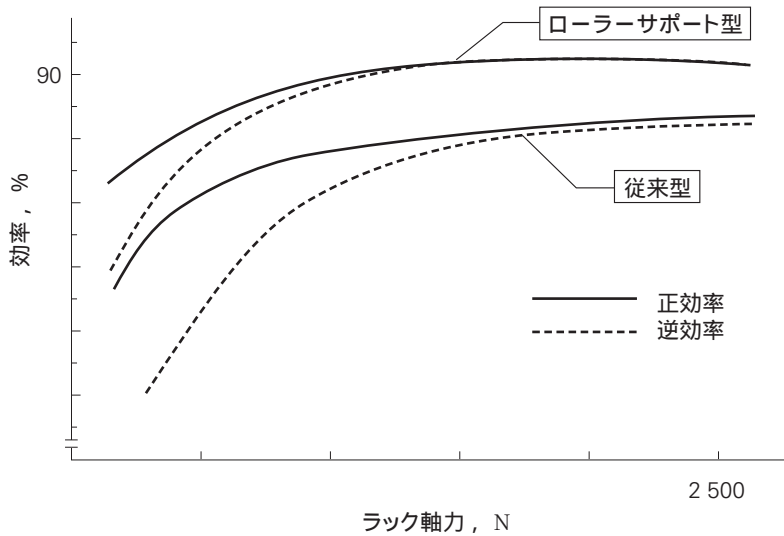


図8 ローラサポート型ラックアンドピニオンと従来型の伝達効率  
Fig. 8 Efficiency of rolling support type and conventional type rack and pinions

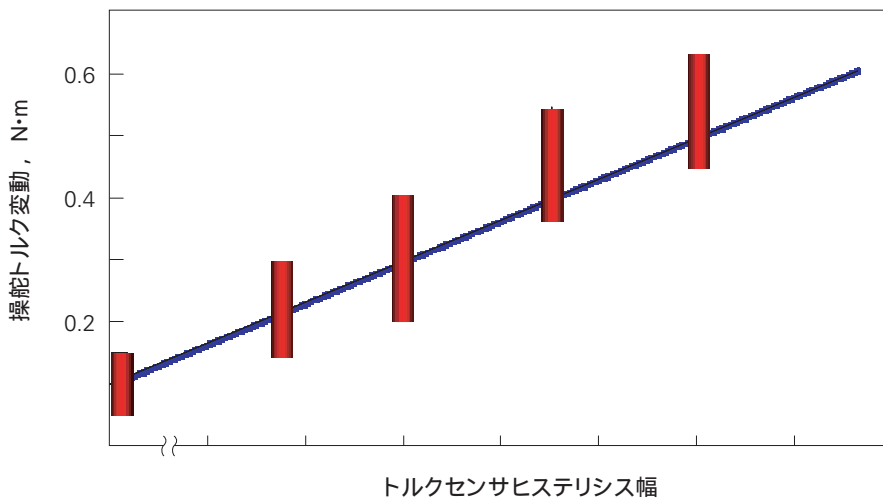


図9 トルクセンサヒステリシス幅と操舵トルク変動  
Fig. 9 Torque sensor hysteresis and steering torque ripple

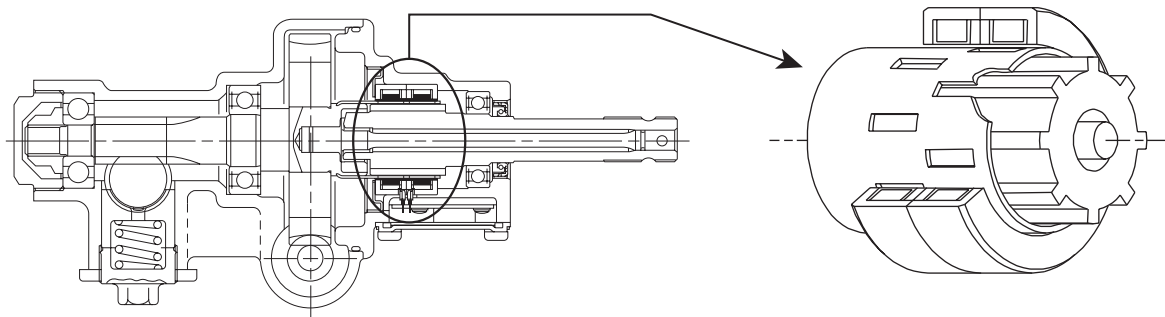


図10 非接触式トルクセンサ  
Fig. 10 Non-contact type torque sensor

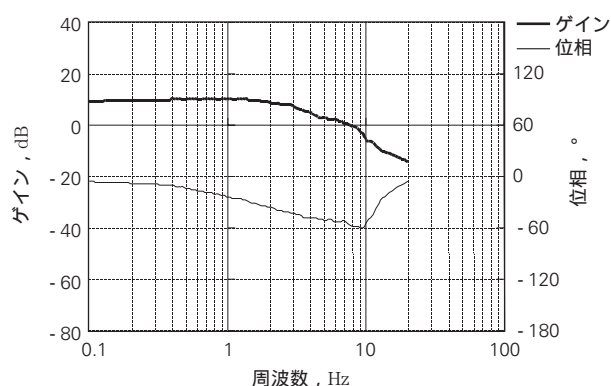


図11 ラック軸力から操舵トルクまでの周波数特性測定結果  
Fig. 11 Frequency response from rack load to steering torque

割を果たし、モータの摩擦や慣性の影響がコラム軸に現れにくい。このため、ロードインフォメーション感度設計方法が有効に働きオンセンタ感が向上できる。

#### 4.2 ローラサポート型ラックアンドピニオン

本設計を生かす上でローラサポート型ラックアンドピニオンの採用を推奨している。図6にローラサポート型ラックアンドピニオンを、図7に従来のプレッシャパッドによるラックアンドピニオンを示す。図8に示すように従来のラックアンドピニオンに対しローラサポート型ラックアンドピニオンは、特にラック軸力が低いときの伝達効率が優れている。これにより、ロードインフォメーションの伝達ロスが少なくなり、ロードインフォメーション感度設計方法を生かすことができる。

#### 4.3 非接触式トルクセンサ

トルクセンサの設計では、特に検出のヒステリシス幅に配慮している。図9にトルクセンサ幅と補正できる操舵トルク変動の関係を示す。運転者が十分に滑らかと感じるトルク変動幅以下に抑える必要がある。

図10に非接触式トルクセンサを示す。非接触構造でトーションパのねじれ角度を計測することにより、 $0.2\text{N}\cdot\text{m}$ 以下のヒステリシス特性を実現している。

### 5. 実験結果

ここでは、上記ロードインフォメーション感度設計方法の効果検証結果を示す。最初に、本設計方法の作用を確認する上でタイヤの発生するトルクとほぼ等価であるラック軸力から操舵トルクまでの伝達特性測定結果を示す。測定は、ハンドルをフリーにした状態でスイープサイン波状の推力をラック軸から入力し、トーションパで発生するトルクを出力として計測した。結果を図11に示す。図より伝達特性がローパスフィルタのような特性を示し、10Hz以上のラック軸力を減衰させるよう作用していることがわかる。

図12及び図13では、サスペンションの共振に同期したステアリングホイールの振動に対する効果を確認した。ここでは、ベルジアン路を走行したときの操舵トルクを計測し、そのパワースペクトルを油圧パワーステアリングと電動パワーステアリングで比較した。油圧パワーステアリングの場合、サスペンションの共振周波数である17Hzのピークが顕著に現れているが、電動パワーステアリングの場合はその約1/4になっており、しかも10Hz以下の特性は油圧パワーステアリングと大きな差がない。

図14及び図15では、フラッタ振動に対する効果を確認した。前輪にアンバランスを持たせ120km/hで走行したときの操舵角度-操舵トルク特性中の操舵トルク変動幅で評価を行った。この結果から油圧パワーステアリングではフラッタ振動が見られ操舵感が損なわれているが、EPSでは、フラッタ振動はほとんど見られない。更にフラッタ振動を除いた2つのリサージュ波形はよく似ていることから、車両運動の反力は、油圧パワーステアリング同様に電動パワーステアリングも十分に伝えていることがわかる。

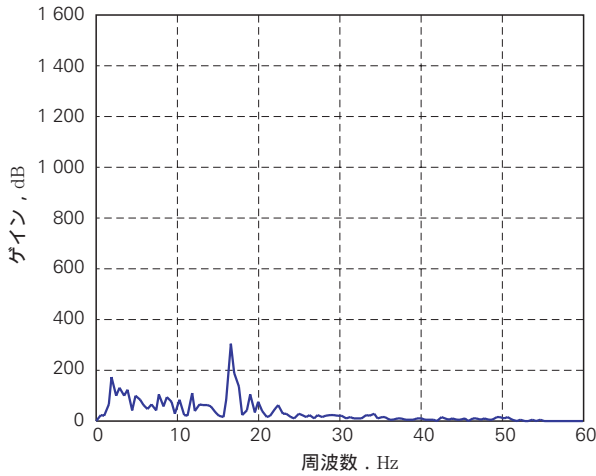


図12 操舵トルクのパワースペクトル (電動パワーステアリング)  
 Fig. 12 The power spectrum of steering torque (EPS)

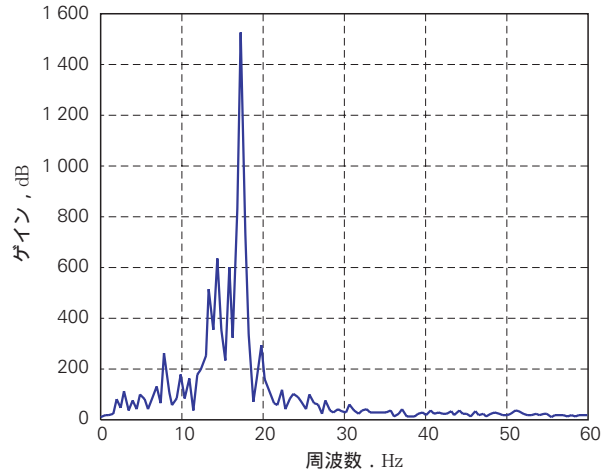


図13 操舵トルクのパワースペクトル (油圧パワーステアリング)  
 Fig. 13 The power spectrum of steering torque (HPS)

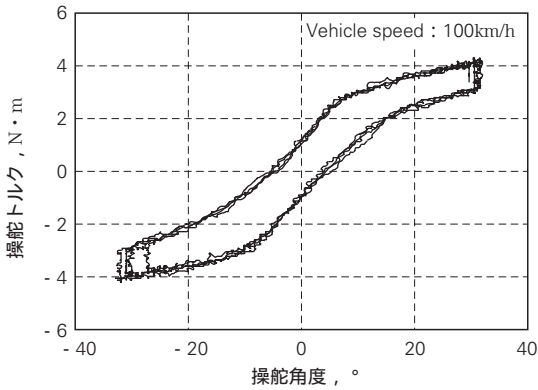


図14 操舵角度 対 操舵トルク特性 (電動パワーステアリング)  
 Fig. 14 The steering angle vs. steering torque characteristic (EPS)

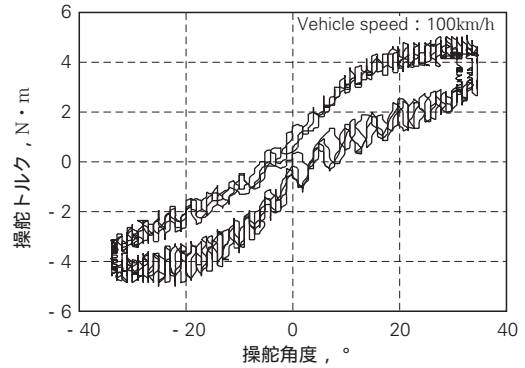


図15 操舵角度 対 操舵トルク特性 (油圧パワーステアリング)  
 Fig. 15 The steering angle vs. steering torque characteristic (HPS)

6. 結 論

電動パワーステアリングの特徴を生かした機能としてロードインフォメーションの感度設計方法を紹介するとともに実験的にその効果を従来の油圧パワーステアリングと比較し確認した。

参考文献

1)遠藤 修司, “電動パワーステアリングの制御技術”, 自動車のセンサ・アクチュエータ技術 (日本機械学会講習会資料), No.00-33 (2000) 25-29  
 2)光崎 雄二, 広瀬 五郎, 関谷 昌三, 宮浦 康彦, “電動パワーステアリング (EPS)”, NSK Technical Journal, 667 (1999) 14-22

商 品

紹 介

ボールねじのクリーン環境用サポートユニット

Clean Support Units for Ball Screws

サポートユニットは、ボールねじの支持軸受をユニット化した商品として、NSKの軸受技術を活かして、およそ20年前に開発したものである。このたび、近年の半導体製造装置等の市場における低発塵化への要求に対応するため、新開発の非接触シール付き専用ア

ンギュラ玉軸受を使用した、軽荷重・小型機器向けのクリーン環境用サポートユニット（写真1）をシリーズ化したので以下に紹介する。

1. 仕様と特性値

クリーン用サポートユニットと一般用サポートユニットの仕様比較を表1に、クリーン用サポートユニットの特性値を表2に示す。

なお、取付け寸法等は従来の軽荷重・小形機器用サポートユニットと同じである。

2. 特 長

(1) 低発塵

潤滑剤として、クリーン環境用に多くの実績をもつ「NSKクリーングリスLG2」を採用し、発塵量を一般用サポートユニットに比べて約10分の1に低減した。

図1にWBK10の発塵特性データを示す。



写真1 クリーン環境用サポートユニット  
Photo 1 Clean support units

表1 サポートユニットの仕様比較  
Table 1 Comparison of support units

	クリーン用サポートユニット	一般用サポートユニット
名番	WBK** - **C	WBK** - **A
固定側軸受	新仕様の専用アンギュラ玉軸受，非接触シール付き	標準のアンギュラ玉軸受，シールなし
グリス	LG2	PS2
ハウジング・蓋・ロックナット	炭素鋼，低温クロムめっき	炭素鋼，四三酸化鉄皮膜
スペーサー	炭素鋼，低温クロムめっき	炭素鋼，表面処理なし
ねじ，止輪	ステンレス材	炭素鋼
シール	ニトリルゴム	ニトリルゴム

表2 クリーン用サポートユニットの特性値  
Table 2 Performance details

呼び番号	固定側サポートユニット					支持側サポートユニット		
	軸受内径 (mm)	アキシャル方向			最大起動トルク (N・cm)	軸受内径 (mm)	軸受呼び番号	ラジアル方向
		基本動定格荷重 (N)	限界荷重 (N)	剛性 (N/μm)				基本動定格荷重 (N)
WBK08	8	3 100	1 100	35	0.5	6	606VV	2 250
WBK10	10	4 250	1 350	50	1.1	8	608VV	3 300
WBK12	12	4 700	2 450	55	1.2	10	6000VV	4 550
WBK15	15	5 100	2 750	65	1.3	15	6002VV	5 600



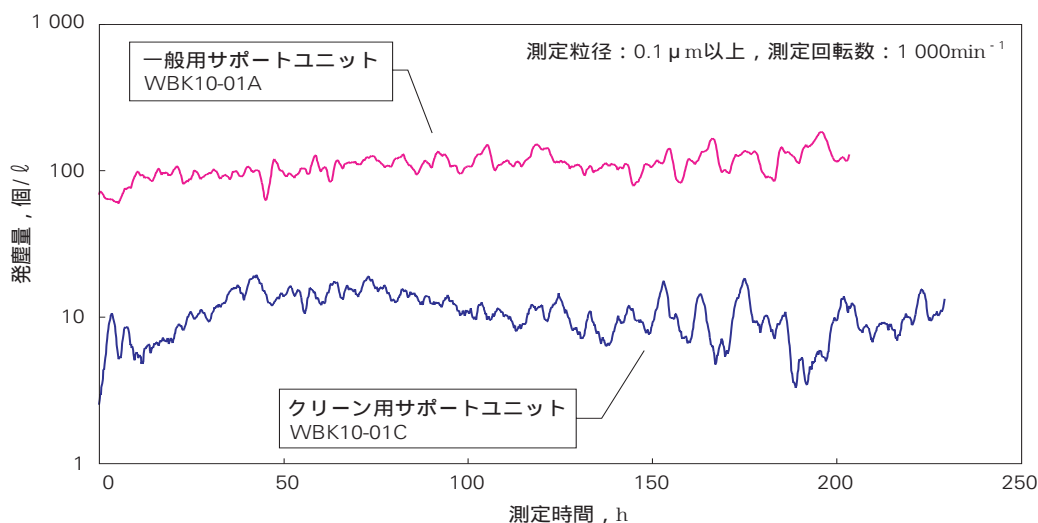


図1 発塵特性  
Fig. 1 Dust generation

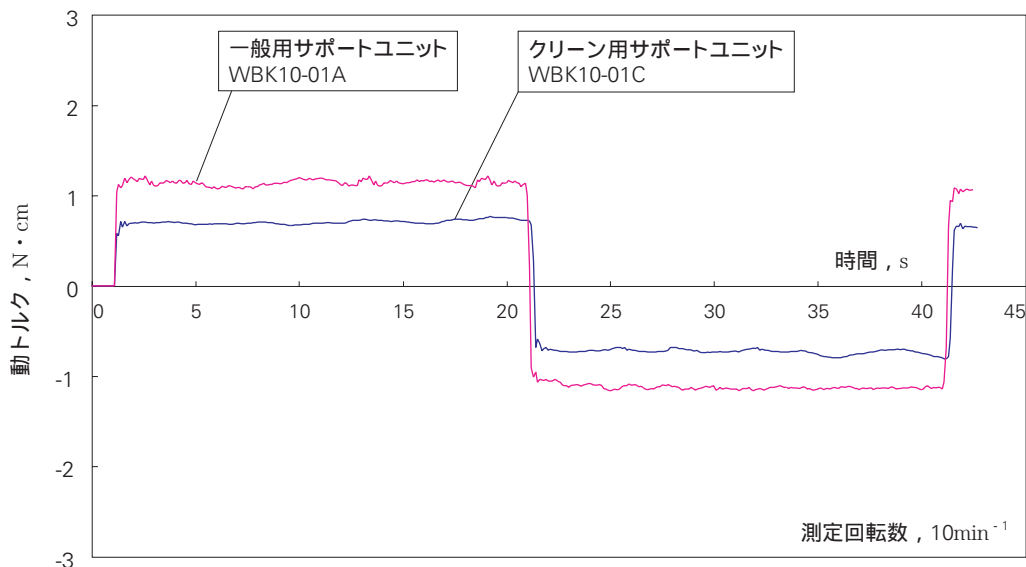


図2 トルク特性  
Fig. 2 Dynamic torque

(2) 低トルク

軽荷重用用途向けとして、負荷容量よりもトルク特性を優先させ、固定側支持軸受に新開発の専用アンギュラ玉軸受を採用した。これによって、一般用サポートユニットに比べて動トルクをほぼ半減させ、低トルク特性を実現した。

図2にWBK10のトルク特性データを示す。

(3) 高防錆

各部品にはステンレス材や低温クロムめっきを採用し、防錆効果を向上させた。

(4) 短納期

一般用サポートユニットと同様に、固定側（角形、丸形）、支持側（角形）ともに標準在庫販売としているため、短納期である。

3. 用途

半導体製造装置、医療機械、クリーンルーム内の装置、測定器などの軽荷重用用途に最適である。また、クリーン仕様のボールねじ、リニアガイドを使用する環境下では、クリーン環境用サポートユニットを合せてご使用いただきたいと考える。

商 品

紹 介

## 大型液晶基板対応ステップ・プロキシミティ露光装置

## Step and Repeat Proximity Aligner for Production of Large-Sized LCD Glass Substrates

NSKでは、従来から液晶カラーフィルタ（CF）基板製造用として、ステップ方式によるプロキシミティ（近接）露光装置を製造販売しており、第4世代（ガラス基板サイズ：730mm×920mm）までは、1軸ステップ方式による露光装置でCF基板のブラックマトリクス：BM，着色層：RGBのプロセスに対応してきた。CF基板はTFT基板と張り合わされ液晶パネルを形成するため、2枚の基板の露光位置精度（トータルピッチ）を確保することが必須であるが、ガラス基板が大きくなるほどトータルピッチの確保が困難となってきた。特にBMはCF基板のトータルピッチの基準となるため、RGBより高精度な露光技術が必要とされていた。

そのため、第5世代以降（ガラス基板サイズ：1300mm×1300mm以上）では、主にTFT工程で用いられるようなミラーやレンズを用いたスキャン方式の高精度な露光装置が採用されることが多くなってきていた。しかし、通常スキャン方式の露光装置はステップ方式によるプロキシミティ露光装置より高額なため、設備投資の高騰を招いていた。また、従来の1軸ステップ方式ではマスクの保持機構がワークと干渉してしまうために、基板サイズの1辺（短辺）より大きなマスク（図1）が必要となっていた。そのために、ランニングコストの高騰を招いていた。

NSKではこれらのコスト低減のため、マスクの保持機構の改良を行い、更にアライメント機構を変更す

ることで、1軸ステップ方式に比較し、より安価な小さなマスクを使用し、より大きなワークサイズに対応可能で、焼き付けパターンレイアウトも自由度も上がり、なおかつ高精度な露光を可能とした第5世代基板対応のXY（2軸）ステップ方式（図1）プロキシミティ露光装置の開発に成功した。

## 1. 概 要

外観を写真1に示す。マスクに対しガラス基板をレベリングさせることにより常に一定ギャップ量に維持しながら、超高圧水銀灯による光源がマスクを照射し、プロキシミティ方式で基板上に露光を行う。

露光ステップ毎にガラス基板上のアライメントマークとマスクのアライメントマークをカメラで観測する、各色対応の自動アライメント機能を備えている。（RGB露光）また、あらかじめ基準点とアライメントしたマスクを基準に、レーザ干渉計制御によりステージのステップ量とヨーイング成分を除きアライメント無しで露光を行う機能も備えている（BM露光）。これによりステップ移動しながらも、基板上のトータルピッチ精度が向上する。

さらに、ステップ毎にマスクの露光範囲を限定するためのマスキングアパーチャ機構、マスクの自動交換を行うマスクチェンジャユニット、ガラス基板ローダユニット、ガラス基板プリアライメントユニットが付属する。



写真1 外観

Photo 1 RZ-800HX - Step and repeat proximity aligner

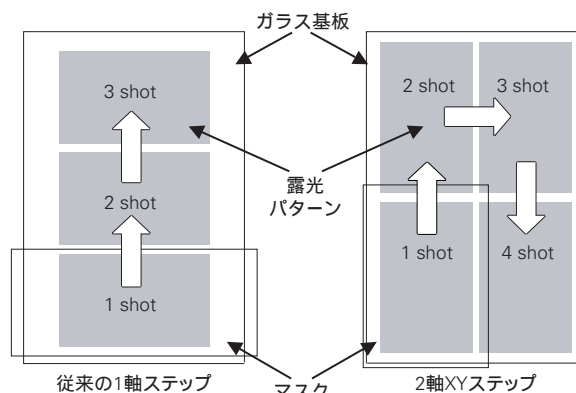


図1 ステップ方式

Fig. 1 Step method

表1 仕様  
Table 1 Specifications

最大ワークサイズ	1 300mm × 1 300mm t=0.7mm, 1.1mm
トータルピッチ精度	±3 μm
アライメント精度	±0.5 μm
露光タクト	
1層目 (6shot)	81.9 s
2層目 (4shot)	59.3 s
(露光量150mJ/cm <sup>2</sup> , 12面取り露光時)	
ギャップ設定 (センサ下面)	±5 μm
本体質量	14 000kg
フットプリント	6 000mm × 7 000mm
マスクサイズ	920mm × 800mm t=10mm
サーマルチャンバ標準装備	設定温度 ±0.1 クラス10対応 (0.1 μm以上)
光源	10kW 2灯式
有効露光面積	830mm × 730mm
均一性	±4%
最小露光量	30mJ/cm <sup>2</sup>

## 2. 主な仕様

第5世代液晶ガラス基板対応ステップ・プロキシミティ露光装置RZ - 800HXの主な仕様を表1に示す。

## 3. むすび

液晶パネルは、大型化に向けてさらにガラス基板の大型化が検討、実用化されつつある。これは、壁掛けテレビへの展開を目指したものである。NSKもさらなる大型基板に対応可能な装置開発を続けていく。

本社	TEL.03-3495-8200(代)	FAX.03-3495-8240	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8575
精機販売本部	TEL.03-3779-7290(代)	FAX.03-3779-7435	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8575
名古屋駐在	TEL.052-249-5710(代)	FAX.052-249-5711	愛知県名古屋市中区新栄2-1-9(雲竜フレックスビル西館2F) 〒460-0007
大阪駐在	TEL.06-6945-8150(代)	FAX.06-6945-8177	大阪府大阪市中央区北浜東1-26(大阪日精ビル6F) 〒540-0031
アフターマーケット事業本部	TEL.03-3495-8221(代)	FAX.03-3495-8241	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8575
第一営業部	TEL.03-3779-7251(代)	FAX.03-3495-8241	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8575
第二営業部	TEL.06-6945-8150(代)	FAX.06-6945-8176	大阪府大阪市中央区北浜東1-26(大阪日精ビル6F) 〒540-0031
札幌営業所	TEL.011-231-1400(代)	FAX.011-251-2917	北海道札幌市中央区北二条東11-23 〒060-0032
東北支社	TEL.022-261-3735(代)	FAX.022-261-3768	宮城県仙台市青葉区一番町1-2-25(仙台NSビル) 〒980-0811
日立支社	TEL.0294-28-1501(代)	FAX.0294-28-1503	茨城県日立市大みか町4-13-23(ナフコビル3F) 〒319-1221
北関東支社	TEL.027-321-2700(代)	FAX.027-321-2666	群馬県高崎市栄町16-11(高崎イーストタワー3F) 〒370-0841
長岡営業所	TEL.0258-36-6360(代)	FAX.0258-36-6390	新潟県長岡市東坂之上町2-1-1(三井生命長岡ビル7F) 〒940-0066
東京第一支社	TEL.03-3779-7324(代)	FAX.03-3779-7437	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8575
東京第二支社	TEL.03-3779-7312(代)	FAX.03-3779-7437	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8575
東京第三支社	TEL.03-3779-7280(代)	FAX.03-3779-7435	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8575
宇都宮営業所	TEL.028-624-5664(代)	FAX.028-624-5674	栃木県宇都宮市今泉3-9-4(NA宇都宮ビル1F) 〒321-0966
西東京支社	TEL.0426-45-7021(代)	FAX.0426-45-7022	東京都八王子市明神町4-7-14(八王子ONビル8F) 〒192-0046
甲府営業所	TEL.055-222-0711(代)	FAX.055-224-5229	山梨県甲府市住吉2-3-23(中沢ビル) 〒400-0851
西関東支社	TEL.046-223-9911(代)	FAX.046-223-9910	神奈川県厚木市中町2-6-10(東武太朋ビル5F) 〒243-0018
長野支社	TEL.0266-58-8800(代)	FAX.0266-58-7817	長野県諏訪市中洲5336-2(諏訪貿易流通会館轟ビル4F) 〒392-0015
上田営業所	TEL.0268-26-6811(代)	FAX.0268-26-6813	長野県上田市常盤城4-4-23(YJMビル) 〒386-0027
静岡支社	TEL.054-253-7310(代)	FAX.054-275-6030	静岡県静岡市伝馬町9-1(河村ビル4F) 〒420-0858
名古屋第一支社	TEL.052-249-5730(代)	FAX.052-249-5731	愛知県名古屋市中区新栄2-1-9(雲竜フレックスビル西館2F) 〒460-0007
名古屋第二支社	TEL.052-249-5740(代)	FAX.052-249-5741	愛知県名古屋市中区新栄2-1-9(雲竜フレックスビル西館2F) 〒460-0007
名古屋第三支社	TEL.052-249-5750(代)	FAX.052-249-5751	愛知県名古屋市中区新栄2-1-9(雲竜フレックスビル西館2F) 〒460-0007
北陸支社	TEL.076-242-5261(代)	FAX.076-242-5264	石川県金沢市八日市1-770 〒921-8064
京滋支社	TEL.077-564-7551(代)	FAX.077-564-7623	滋賀県草津市大路1-8-1(南洋軒ビル5F) 〒525-0032
大阪第一支社	TEL.06-6945-8154(代)	FAX.06-6945-8173	大阪府大阪市中央区北浜東1-26(大阪日精ビル7F) 〒540-0031
大阪第二支社	TEL.06-6945-8164(代)	FAX.06-6945-8176	大阪府大阪市中央区北浜東1-26(大阪日精ビル6F) 〒540-0031
松山営業所	TEL.089-941-2445(代)	FAX.089-941-2538	愛媛県松山市千舟町4-6-1(フコク生命ビル6F) 〒790-0011
高松駐在	TEL.087-866-4141(代)	FAX.087-867-4660	香川県高松市松縄町843-2 〒760-0079
兵庫支社	TEL.0792-89-1521(代)	FAX.0792-89-1675	兵庫県姫路市南駅前町100番(パルシオ第2ビル8F) 〒670-0962
中国支社	TEL.082-285-7760(代)	FAX.082-283-9491	広島県広島市南区大州3-7-19 〒732-0802
福山営業所	TEL.084-954-6501(代)	FAX.084-954-6502	広島県福山市曙町5-29-10 〒721-0952
九州支社	TEL.092-451-5671(代)	FAX.092-474-5060	福岡県福岡市博多区博多駅東2-10-35(JT博多ビル8F) 〒812-0013
熊本営業所	TEL.096-337-2771(代)	FAX.096-348-0672	熊本県熊本市武蔵ヶ丘1-6-93(ブラッサHIKARI) 〒862-8001

## NSKプレジジョン株式会社

本社	TEL.03-3779-7225(代)	FAX.03-3779-7644	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8560
----	---------------------	------------------	-------------------------------

## 日本精工株式会社

本社	TEL.03-3779-7111(代)	FAX.03-3779-7431	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8560
海外CS部	TEL.03-3779-7120(代)	FAX.03-3779-7433	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8560
アジア事業本部	TEL.03-3779-7121(代)	FAX.03-3779-7433	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8560
東日本自動車第二部(大崎)	TEL.03-3779-7361(代)	FAX.03-3779-7439	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8560
東日本自動車第二部(名古屋)	TEL.052-566-4633(代)	FAX.052-566-4640	愛知県名古屋市中村区名駅2-45-7(松岡ビル2F) 〒450-0002
東日本自動車第一部(厚木)	TEL.046-223-8881(代)	FAX.046-223-8880	神奈川県厚木市中町2-6-10(東武太朋ビル5F) 〒243-0018
東日本自動車第一部(富士)	TEL.0545-57-1311(代)	FAX.0545-57-1310	静岡県富士市永田町1-124-2(安田生命ビル2F) 〒417-0055
東日本自動車第三部(宇都宮)	TEL.028-624-4270(代)	FAX.028-624-4271	栃木県宇都宮市今泉3-9-4(NA宇都宮ビル3F) 〒321-0966
東日本自動車第三部(太田)	TEL.0276-46-6410(代)	FAX.0276-46-6444	群馬県太田市飯田町1053(OKビル3F) 〒373-0851
中部日本自動車部(豊田)	TEL.0565-31-1920(代)	FAX.0565-31-3929	愛知県豊田市下市場町5-10 〒471-0875
中部日本自動車部(浜松)	TEL.053-456-1161(代)	FAX.053-453-6150	静岡県浜松市田町330-5(遠鉄田町ビル4F) 〒430-0944
西日本自動車部(広島)	TEL.082-284-6501(代)	FAX.082-284-6533	広島県広島市南区大州3-7-19 〒732-0802
西日本自動車部(大阪)	TEL.06-6945-8160(代)	FAX.06-6945-8179	大阪府大阪市中央区北浜東1-26(大阪日精ビル5F) 〒540-0031

お問合せは ☎ 0120-502260 コールセンターまたは、もよりの支社・営業所にお申し付けください。

NSK販売店

# NSK TECHNICAL JOURNAL

DECEMBER 2003 No.676

印刷 平成15年12月10日  
 発行 平成15年12月15日  
 編集人 正田 義雄  
 発行人 斎藤 誠造  
 印刷所 久下印刷株式会社  
 発行所 日本精工株式会社  
 広報部 TEL 03-3779-7054  
 東京都品川区大崎1-6-3日精ビル

非売品

無断転載を禁ずる

このジャーナルの内容については、技術的進歩及び改良に対応するため製品の外観、仕様などは予告なしに変更することがあります。なお、ジャーナルの制作には正確を期するため細心の注意を払いましたが、誤記脱漏による損害については責任を負いかねます。



日本精工株式会社

