

## 工作機械主軸用低昇温高速軸受の開発

### Development of Bearings with Low Temperature-rise and High-speed Performance for Machine Tool Main Spindles

鈴木数也 K. SUZUKI 松榮慎二 S. MATSUE 市川和之 K. ICHIKAWA

We have developed an angular contact ball bearing and a cylindrical roller bearing which are superior in low temperature-rise and high-speed performance for machine tool main spindles.

By optimizing the internal design, temperature rise of both bearings has been reduced to approximately half compared with normal types.

These bearings can reduce power consumption for cooling machine tools, which is effective for energy saving. And also, the developed bearings are expected to improve machining accuracy by reducing thermal extension and improve machining efficiency by increasing high-speed performance of spindles.

**Key Words:** machine tool, rolling bearing, temperature rise, high-speed capability

#### 1. はじめに

日本国際工作機械見本市 (JIMTOF) を代表とする昨今の見本市においては、高精度、高速性、高剛性、高信頼性に加えて、省エネルギーや対環境性、および誰でも間違いなく使えるフレンドリー性をアピールポイントとしている工作機械が多く見受けられる。また、工作機械の可動部としては、主軸、テーブル、送り機構などがあるが、これら可動部の性能は、転がり軸受の性能によるところが大きい。

工作機械の可動部のうち、主軸は最も重要な要素部品の一つである。この主軸には、アンギュラ玉軸受や円筒ころ軸受がよく使用され、潤滑方法としては、高速仕様にはオイルエア潤滑が、低速仕様にはグリース潤滑が使用される。

当社では、工作機械主軸用軸受として、ハイアビリーシリーズを商品化しており、また、各々の機械の要求性能に対応するため、種々のタイプをシリーズ化している。

当社では、これらの商品群に加え、今回、省エネルギーの観点から、アンギュラ玉軸受と円筒ころ軸受の低昇温化（高速低昇温化）に取り組んだので、開発結果を紹介する。

#### 2. 開発の狙い

工作機械主軸の昇温は、転がり軸受とモータが主な発熱要因である。主軸は温度が上がると軸方向に熱膨張し、加工物の精度に影響する。このため、一般的にジャケット冷却を行い、主軸の温度を制御している。

マシニングセンタの消費電力について、各要因の割合について調べた例を図1に示す。

マシニングセンタでは、クーラント装置による電力消費が最も大きな割合を占めているが、主軸等の冷却のための消費電力も約16%で大きな要因の一つとなっていることがわかる。

このため、軸受を低昇温化することにより、この冷却のための消費電力を低減でき、省エネルギーに貢献できる。

開発軸受の特性と機械特性との関係を図2に示す。

開発の狙いとしては、転がり軸受の低昇温化と高速性の向上による工作機械の性能向上である。具体的には、前述の省エネルギーに加えて、主軸の熱膨張の低減により加工精度を向上させることと、主軸の高速回転による加工時間の短縮が挙げられる。

本開発では、オイルエア潤滑で高速回転する転がり軸受の昇温を標準軸受と比べ半減させることを目標として取り組んだ。

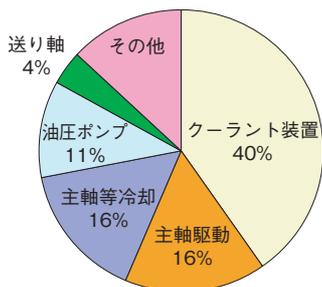


図1 マシニングセンタ消費電力の要因別割合  
Example of typical power consumption in machining center by factors



図2 開発軸受の特性と機械特性

Features of developed bearings and machine tools

### 3. アンギュラ玉軸受

#### 3.1 開発品の特長

当社の工作機械主軸用アンギュラ玉軸受ハイアビリーシリーズを表1に示す。

ハイアビリーシリーズには、高剛性のRタイプ、高負荷容量のCタイプ、高速性に優れたDタイプとFタイプがある。このうち、Fタイプは、軸方向と外輪穴の2方向からのオイルエア供給と、高速用に最適化した転がり接触部設計という二つの特長により高速性で優位である。今回開発した新タイプのアンギュラ玉軸受は、このFタイプをベースとして開発した。

アンギュラ玉軸受開発品の外観と発熱要因を図3に示す。アンギュラ玉軸受の発熱要因を大別すると、内輪-玉間、外輪-玉間の各転がり接触部での発熱と、保持器-外輪間、保持器-玉間の各すべり接触部の発熱が挙げられる。開発に際して、それぞれの要因について検討を行った。

転がり接触部の最適設計のためには、発熱の低減と高速性の考慮が必要である。発熱を低減する設計に関しては、アンギュラ玉軸受が高速回転するとき、内輪と玉との接触部にスピンすべりが発生することから、その接触部の面圧Pとすべり速度Vとの積P・V値が転がり接触部の発熱量と関係が大きいと考え、P・V値を小さくすることを指針とした。一方、高速性を向上する設計に関しては、主軸の危険速度を高くするためには支持軸受の剛性を高くする必要がある。また、内輪の遠心膨張に

よる軸受内部すきまの詰まりを回避する必要がある。アンギュラ玉軸受開発品においては、これらを考慮して転がり接触部の最適設計を行った。

また、もう一方の発熱要因である保持器すべり部に関しては、軸受部品のうち保持器を弾性体化した構成要素の構造と機構の連成解析を利用し、各すべり部の発熱量の予測により、保持器設計を最適化している。機構解析では定常回転状態での各軸受部品同士の接触力とすべり速度を求め、保持器-外輪間、保持器-玉間の各すべり接触部の仕事率が発熱量に等しいとして、発熱予測を行った。

保持器すべり部の発熱量について予測計算した例を図4に示す。横軸は、回転速度に軸受ピッチ円直径(P.C.D.)を乗じたdmn値で示した。また、図には保持器-外輪間のすべりによる発熱量と保持器-玉間のすべりによる発熱量(各玉部の発熱量の総量)を示した。図4は特定の荷重条件での計算結果であるが、保持器-外輪間の発熱量は、保持器-玉間の発熱量に比べて大きく、また回転速度の増加に伴い顕著に増大する傾向が確認された。

開発品は、保持器の設計値をパラメータとして、以上のような発熱量の予測を行い、保持器すべり部の発熱量を低減するための保持器設計を行った。

また、開発品は、保持器の材質についても再検討した。アンギュラ玉軸受の高速回転時の損傷モードの一つとして、保持器の焼付きがある。このため、高速回転条件下における、保持器に必要な特性としては、高剛性、耐熱性、低線膨張係数が挙げられ、そのような特性を持つ樹脂として、PEEK(Polyetheretherketone: ポリエーテルエーテルケトン)を選定した。

表1 工作機械主軸用アンギュラ玉軸受  
ハイアビリーシリーズ

"High Ability Bearing Series" angular contact ball bearings for main spindles of machine tools

タイプ	Rタイプ	Cタイプ	Dタイプ	Fタイプ
形状				
適用	高剛性	高負荷容量	超高速	
潤滑方法	グリース/オイルエア			オイルエア

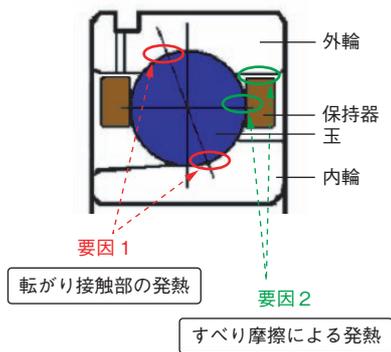


図3 開発アンギュラ玉軸受の外観と発熱要因  
Appearance and heat generation factors of developed angular contact ball bearing

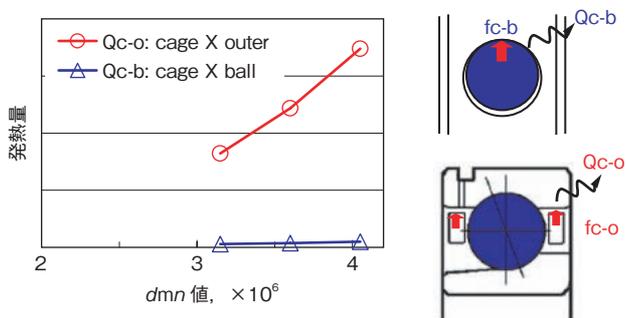


図4 すべり部の発熱量計算例  
Example of estimated results of heat generation in the sliding area

### 3.2 開発品の性能

開発したアンギュラ玉軸受の性能評価方法と結果を以下に示す。

試験機の外観を図5に示す。試験機は、実機の主軸に近い条件となるように、実機を模擬した構造とし、高速ビルトインモータで駆動させ、ジャケット冷却部を有している。試料軸受は、1個使いで、サポート軸受には試料軸受より寸法径の小さい軸受を用い、定圧予圧で組み込んでいる。

試験条件を表2に示す。潤滑方法としてはオイルエア潤滑を用いた。また、開発品は、ハイアビリーFタイプと同様にオイルエアを軸方向からと外輪外径側から供給する構造としている。

試験手順は、回転速度を1～2時間ごとにステップアップしていき、各回転速度での軸受外輪の飽和温度を計測した。

開発品と標準品（Fタイプ）の昇温を各回転速度条件で測定した結果を図6に示す。

図6より、開発品の外輪昇温は、各回転速度条件下で、

標準品と比較して約45%低く、改善効果が認められた。

また、標準品の限界回転速度が  $dmn330$  万で、これ以上の高速回転では焼付きが発生したのに対し、開発品は  $dmn400$  万の高速回転が可能であり、高速性の向上が確認された。

次に、予圧による外輪昇温への影響について評価した結果を図7に示す。

予圧が高い  $0.83kN$  時の外輪昇温は、予圧が低い  $0.42kN$  時に比べ、 $3 \sim 8^{\circ}C$  高くなっており、予圧による昇温への影響が確認されたが、予圧が高い  $0.83kN$  の条件でも、 $dmn400$  万まで異常なく回転可能であった。

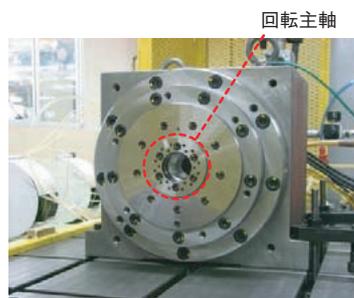


図5 アンギュラ玉軸受評価試験機  
Test apparatus for angular contact ball bearing

表2 アンギュラ玉軸受試験条件

Test conditions for angular contact ball bearing

項目	条件	
試料主寸法	$\phi 70 \times \phi 110 \times 20$	
運転条件	回転速度	最大 $45\ 000\text{min}^{-1}$
	荷重	定圧予圧 $420N$
潤滑条件	オイルエア潤滑 VG32 相当	
冷却条件	ジャケット冷却有	

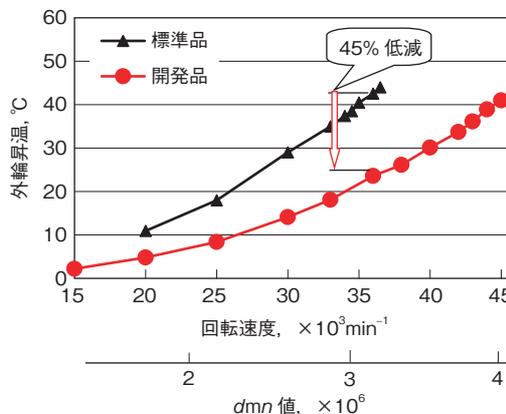


図6 アンギュラ玉軸受昇温比較結果  
Comparison results of temperature rise between developed angular contact ball bearing and a normal bearing

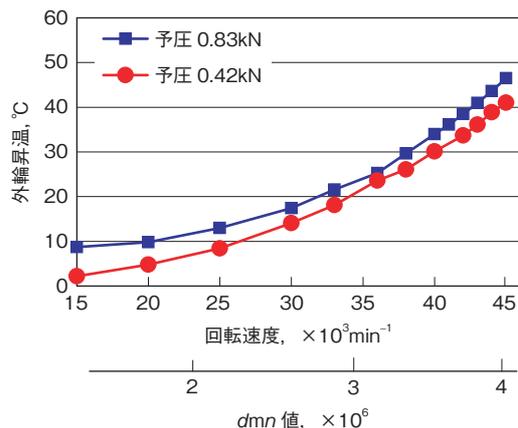


図7 アンギュラ玉軸受各予圧での昇温評価結果  
Temperature rise of developed angular contact ball bearing under two preload conditions

## 4. 円筒ころ軸受

### 4.1 開発品の特長

工作機械の主軸用として、円筒ころ軸受の使用法には、2種類ある。

一つは、主軸のリア側に使われ、熱膨張による軸の伸びを許容する目的で選定される。この場合には、ラジアル荷重は主軸自重だけで小さいため、内輪側につばがあるNタイプ単列円筒ころ軸受が使用される。ただし、高速性を要求されることがある。

もう一つは、高切削荷重に対応する主軸用として、フロント側に円筒ころ軸受が使用される。この場合の多くは、高速性は要求されないが、負荷容量や剛性が要求されるため、NNタイプと呼ぶ複列の円筒ころ軸受が使用される。

今回の開発品は、前者の使用法であるマシニングセンタ主軸のリア用をターゲットとした。

開発した円筒ころ軸受の外観と発熱要因を図8に示す。

この円筒ころ軸受の発熱要因を大別すると、①内輪-ころ間および外輪-ころ間の転がり接触部での発熱、②内輪つばところとのすべりによる発熱、③保持器すべり部の発熱の三つの要因が挙げられる。

開発品は、主に要因③の保持器すべり部の発熱に着目した改善を行っており、特に、保持器の案内方式、保持器材質、および潤滑剤の供給性を考慮した設計を行った。

当社の円筒ころ軸受標準品の保持器案内形式は、ころ案内方式であるが、この方式はポケット部のつめ部がころとくさび状に接触するため、超高速回転条件下で発熱が大きくなると予測された。そのため、保持器案内方式を外輪案内とした。

保持器の各部設計の詳細については、タグチメソッドを用い、5つの制御因子をパラメータとした評価試料を製作し、オイル量を変動因子として外輪昇温を評価特性値とした実験を行い、最適水準を決定した。

これにより、ロバスト性向上に役立っていると考える。

また、保持器の材質は、アンギュラ玉軸受開発品の場合と同等の理由で、PEEKを選定した。

次に、高速時の低昇温化には、潤滑剤の供給性も重要要因の一つである。このため、オイルエアの噴出状態を高速カメラで観察するなどの可視化を行った。

高速カメラを用いたオイルエア噴出状況の例を図9に示す。フレームレートを早めることにより、その噴出インターバルや噴出場所などが克明に観察された。今回の開発では、オイルエアの供給性を良くするために、可視化により得た知見を、軸受内部設計の検討に役立てた。

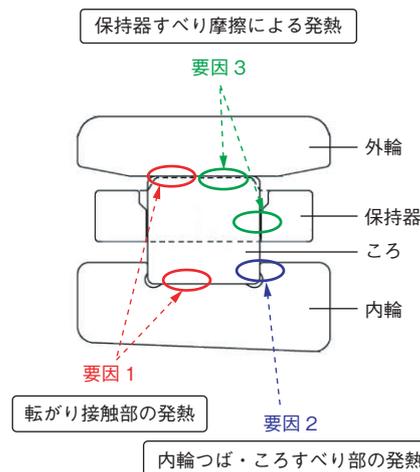


図8 開発円筒ころ軸受の外観と発熱要因

Appearance and heat generation factors of developed cylindrical roller bearing

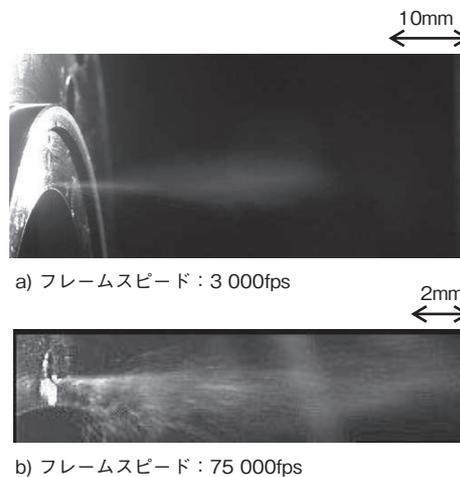


図9 オイルエア噴出状況の観察

Observation of oil air supplying conditions

4.2 開発品の性能

円筒ころ軸受の性能評価に用いた試験装置の外観を図10に、試験条件を表3に示す。

試験装置は、試料軸受と試料軸受より寸法径の小さい玉軸受をサポート軸受として組み込み、ベルトで外部駆動する構造となっている。主軸リア用軸受を開発ターゲットとしたので、試料軸受に対して外部負荷のない試験機構造としている。また、潤滑方法は、高速回転条件で使用されているオイルエア潤滑で試験を行っている。

軸受が高速で回転すると、内輪が遠心膨張し、ラジアルすきまが減少する。このため、組み込み時のラジアルすきまによる昇温性能への影響が大きいと考えた。そこで、各試料の試験は、組み込み時のラジアルすきま条件を統一して行った。

試験手順としては、3.2節と同様、回転速度をステップアップし、各回転速度で1～2時間回転させ、飽和温度を計測した。

開発品と標準品（ポリアミド製ころ案内保持器付）の昇温を各回転速度で測定した結果を図11に示す。

図11より、開発品の外輪昇温は、各回転条件下で、標準品と比較して約46%低く、改善効果が認められた。

また、標準品の限界回転速度が $dmn150$ 万で、これ以上の高速回転時に焼付きが発生したのに対し、開発品は、 $dmn300$ 万の高速回転が可能であり、高速性の向上が確認された。

次に、ころ材質の違いによる昇温低減への効果を確認した。

それぞれのころ材質品について、外輪昇温を比較した結果を図12に示す。

セラミックころタイプは、特定の高速回転条件で、軸受鋼ころと比べ昇温が低く、高速低昇温化の効果が認められた。

これは、ころ材質を軸受鋼SUJ2からセラミック $Si_3N_4$ にすると、セラミックの線膨張係数が小さいことにより、発熱による軸受転動体荷重の増大を抑制する効果や、また、比重が小さいため、遠心力による転動体荷重の増大を抑制する効果が考えられた。

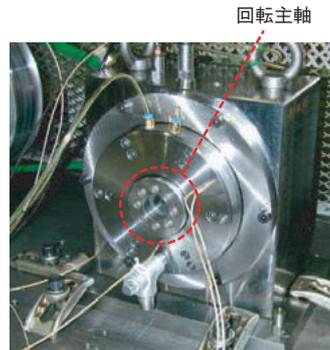


図10 円筒ころ軸受試験装置  
Test apparatus for cylindrical roller bearing

表3 円筒ころ軸受試験条件  
Test conditions for cylindrical roller bearing

項目	条件	
試料寸法	$\phi 60 \times \phi 95 \times 18$	
運転条件	回転速度	最大 $39\,000\text{min}^{-1}$
	荷重	無負荷
潤滑条件	オイルエア潤滑 VG32 相当	

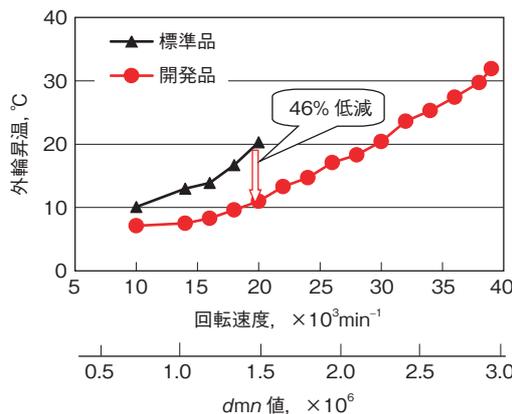


図11 円筒ころ軸受昇温比較結果  
Comparison results of temperature rise between developed cylindrical roller bearing and a normal bearing

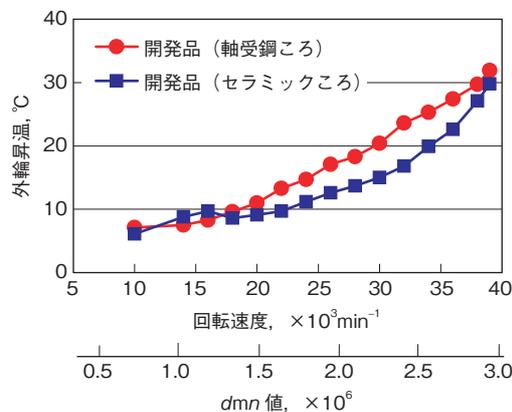


図12 ころ材質による昇温比較結果  
Comparison results of temperature rise depending on roller materials

## 5. おわりに

当社で新たに開発した工作機械主軸用アンギュラ玉軸受、円筒ころ軸受は、オイルエア潤滑条件下で、標準軸受と比べ、昇温を約半減することができた。また、高速性も向上し、アンギュラ玉軸受では  $d_{mn}400$  万（軸径  $\phi 70$  主軸で  $45\,000\text{min}^{-1}$ ）、円筒ころ軸受は  $d_{mn}300$  万（軸径  $\phi 60$  主軸で  $39\,000\text{min}^{-1}$ ）で回転可能であることを検証した。

このような転がり軸受の低昇温化により、工作機械主軸の冷却のための消費電力を削減し、省エネルギー効果があると考えられる。また、それ以外の効果として、主軸の熱膨張を抑えることにより加工精度の向上や高速性向上による加工効率向上も期待できる。

今後も、工作機械のニーズに対応した転がり軸受の性能向上に努めていきたい。

\* 1 ハイアビリーは株式会社ジェイテクトの登録商標です。

## 参考文献

- 1) 林 祐一郎: JTEKT ENGINEERING JOURNAL, no. 1005(2008)57.
- 2) 東本 修: JTEKT ENGINEERING JOURNAL, no. 1001(2006)97.

## 筆者



鈴木数也\*  
K. SUZUKI



松榮慎二\*  
S. MATSUE



市川和之\*\*  
K. ICHIKAWA

\* 産機・軸受事業本部 実験解析部

\*\* 自動車部品事業本部 第1 駆動技術部 博士(工学)