

工作機械主軸用軸受の低昇温化への取り組み

Approaches for Bearings with Low Temperature-rise for Machine Tool Main Spindles

林 祐一郎 Y. HAYASHI 大西 良 R. ONISHI

Low temperature-rise is an important technology in bearings for machine tool main spindles.

Bearings with low temperature-rise enable energy saving by reducing power consumption cooling system for machine tools. This is effective in improving machining accuracy as it reduces thermal extension. It is also effective in improving machining efficiency as it increases the high-speed capability of the spindle.

Although we are creating a lineup of the angular contact ball bearing and cylindrical roller bearing, which had low temperature-rise and were excellent in high velocity rotation performance when used by machine tool main spindles, we would like to incorporate further low temperature rise technology in order to improve product appeal.

Key Words: machine tool, rolling bearing, temperature rising, thermography, fluid simulation

1. はじめに

工作機械の性能向上のためには、構成するユニットおよび各部品の性能向上が必要不可欠である。とりわけ、加工精度や加工効率に直接影響を及ぼす主軸は重要で、市場の要求レベルは近年ますます厳しくなっている。工作機械への要求性能としては、加工における工程と工数の削減、難加工材の加工能率向上などがあり、使用される主軸に対しては、高速性、低昇温などの性能が重要項目として挙げられる。その主軸に使用される軸受に関しては、2000年ごろまでは要求回転性能が dmn 値で最大 300 万程度であったものが、近年では dmn 値 350 万以上を要求されるものも出てきている。また、主軸用軸受にとって低昇温性も重要な技術である。軸受の発熱が少なければ主軸の熱膨張も少なくなり、工作機械として最も重要な加工精度の向上に有効となる。さらには、冷却のための消費電力を低減できるため省エネルギーにも貢献できる。つまり、主軸の高性能化には、用いられる軸受の高性能化が不可欠と言える。

当社では、工作機械主軸用に低昇温で高速性に優れたアンギュラ玉軸受や円筒ころ軸受をシリーズ化しているが、さらなる高性能化のため、低昇温化技術の開発に取り組んでいる。本報では、サーモグラフィを用いた軸受内部温度の測定技術や、オイルエア潤滑下における軸受内部のエア流れシミュレーションについての取り組み事

例を紹介する。

※ dmn 値：軸受の転動体ピッチ円径 (P.C.D.) (mm)
× 回転速度 (min^{-1})

2. 主軸用軸受の低昇温化への取り組み

2.1 軸受内部温度の可視化

工作機械主軸用軸受だけでなく、一般的に軸受にとって、低昇温化は重要な技術であるにも関わらず、回転中の軸受内部温度については、あまり明らかになっていなかった。

軸受の発熱箇所は内輪-転動体間、外輪-転動体間の各転がり接触部と、保持器-外輪間 (外輪案内保持器タイプの場合)、および保持器-転動体間の各すべり接触部の発熱が挙げられるが、その測定は非常に困難である。

軸受のような回転体の温度測定で一般的に使用される測定機器を表 1 に示す。スリップリングを用いる測定法では、ブラシ接触により熱電対の信号を伝達するため、使用できる回転速度には限界がある。また、内輪の温度測定は可能であるが、保持器や転動体などの内部部品の個々の温度の測定はできていなかった。

放射温度計を用いる測定法の場合では、測定ポイントを保持器や転動体といった狭い部位に設定することが難しく、そのため、温度測定が難しかった。

そこで今回、高感度サーモグラフィを利用し、軸受内部温度を測定できるシステムを構築した。このシステムによって、軸受内部の発熱要因と部位を明確化してFEMによる発熱量予測法と組み合わせることにより、軸受内部の発熱低減が可能となった¹⁾。

工作機械主軸には、アンギュラ玉軸受と円筒ころ軸受が一般的に使用されているが、以下にこれらの軸受の内部温度の測定を行い、その結果を基に低昇温化できた事例を示す。

表1 回転体温度の測定方法

Measuring method for rotating body temperature

測定機器	測定部位			問題点
	内輪	転動体	保持器	
熱電対, スリップリング	○	×	×	最高回転速度に制限あり
放射温度計	○	×	△	狭範囲の測定が困難
高感度サーモグラフィ	○	○	○	—

○…測定可, △…測定困難, ×…測定不可

2.2 アンギュラ玉軸受の内部発熱低減

セラミックス製の転動体を用いたアンギュラ玉軸受の内部発熱要因を明確化するため、前述の高感度サーモグラフィを利用したシステムを用い、軸受内部温度の測定を行った。測定に使用した装置を、図1に示す。図1の装置はDDSモータ駆動、定圧予圧方式を採用し、工作機械の主軸を模擬した構造としている。また、軸受内部を観察できるよう、軸端側に大きな開口部を設けている。

サーモグラフィは赤外線強度（赤外線放射量）を計測し、温度に換算するため、反射などの外乱があった場合は、正確な温度を測定することが難しい。そのため、軸受に外乱を除去するよういくつか工夫をこらし正確な温度測定を可能にしている。

測定を行った試料と試験条件を表2に示す。この条件は、工作機械の一般的使用条件である。

図2に標準設計軸受での実際の測定結果の例を示す。軸受内部は、転動体の温度がもっとも高いことが分かる。図3の赤丸で示す測温点の温度を外輪、保持器、転動体それぞれの代表値とし、回転速度をパラメータにして軸受内各部の温度を測定した結果を図4に示す。すべての回転速度において、転動体の温度がもっとも高く、また回転速度が速くなるとともにその温度も高くなるという

結果を得た。

標準設計軸受で内部温度を把握できたことから、前述の発熱予測を行い、保持器設計や各部のすきまを改善した最適化設計軸受で測定を行った結果を図5に示す。図2の結果と比較し、暖色の部分が減少し、軸受内部の温度が低くなっていることが分かる。つまり、発熱予測に基づいた最適化設計を行うことで、軸受昇温の低減が確認でき、さらに当社の発熱予測解析手法の妥当性についても実測検証することができた。

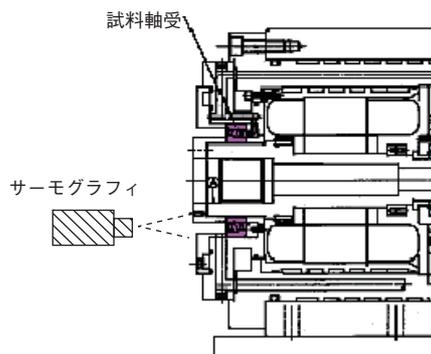


図1 アンギュラ玉軸受の内部温度の測定装置
Test apparatus for angular contact ball bearing

表2 アンギュラ玉軸受 試料・試験条件

Test conditions of angular contact ball bearing

試料条件	品種	アンギュラ玉軸受
	主寸法, mm	$\phi 70 \times \phi 110 \times 20$
	転動体ピッチ円径, mm	90
試験条件	転動体材質	Si_3N_4 (セラミックス)
	予圧方式	定圧予圧
	回転速度, min^{-1}	$\sim 30\,000$
	d_{mn}	$\sim 270 \times 10^4$
	潤滑方式	オイルエア潤滑

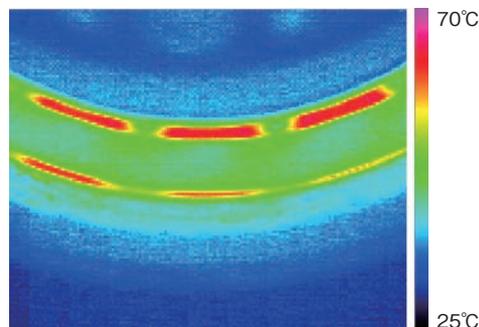


図2 標準設計軸受の内部温度測定結果
(30 000 min^{-1})
Bearing temperature (standard, 30 000 min^{-1})

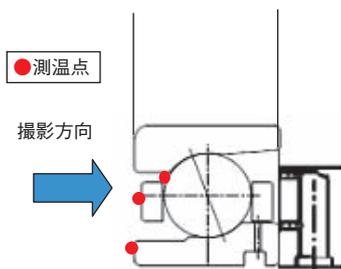


図3 撮影方向と測温点

Photography direction and the point of measurement

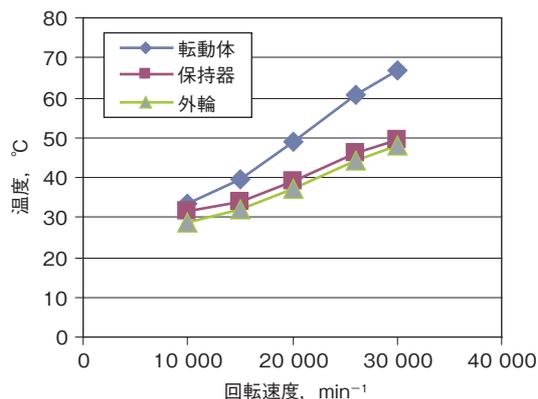


図4 標準設計軸受の内部温度測定結果
Bearing temperature (standard)

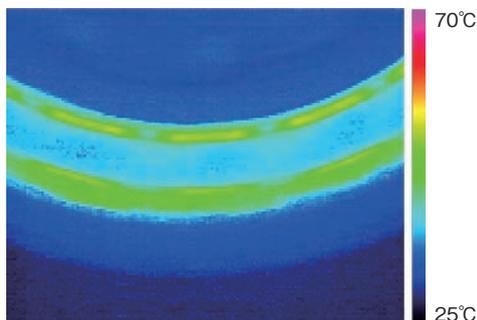


図5 最適化設計軸受の内部温度測定結果
(30 000min⁻¹)

Bearing temperature (Optimal design, 30 000min⁻¹)

2.3 複列円筒ころ軸受の内部発熱低減

複列円筒ころ軸受を高速回転させると、特定の回転速度から急激に軸受昇温が高くなる現象が知られている。この現象について、本システムを用いて検証を行った。

検証については、図6に示す軸受単体試験装置を用いて行い、前述の図1の試験機と同様に軸受内部の温度を測定できるように軸端部に開口部を設けた構造としている。

用いた軸受は、表3に示す内径φ100の黄銅保持器付複列円筒ころ軸受である。

図7の左図は、異常な昇温が発生した時の軸受内部温度の測定結果である。異常な昇温が発生していない図7右図の結果と比較すると、保持器の昇温が顕著であり、その発熱が軸受全体に影響していると考えられるため、高速回転時に昇温が高くなる現象は、この保持器の発熱に起因していると推測できる。

そのため、保持器の設計因子をパラメータとして、表3に示すつめ長さの異なる保持器サンプルで検証を行った。

各試料について、回転速度ごとの保持器つめ部分の温度をプロットした結果を図8の下図に示す。保持器温度を縦軸に回転速度を横軸にとると、保持器のつめ長さの違いによって、ある回転速度から保持器温度が急激に高くなる傾向が確認できる。つまり、複列円筒ころ軸受の高速回転時の急激な温度上昇の現象は、この保持器のつめ部分の発熱が原因であると考えられる。

つめ部分の急激な温度上昇は、つめ部分の体積と回転速度に関係していると考えられる。これは、つめ部分に作用される遠心力による影響と推測される。そのつめ部分の遠心力による変形について、FEM解析を実施した。その変形量解析結果を図8の上図、変形のイメージを図9に示す。

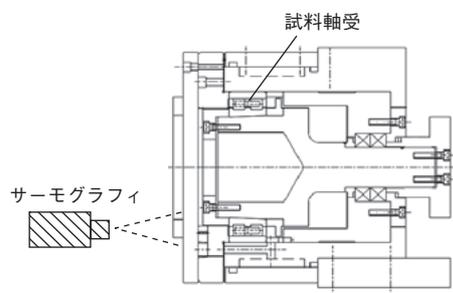


図6 複列円筒ころ軸受の内部温度測定装置
Test apparatus for cylindrical roller bearing

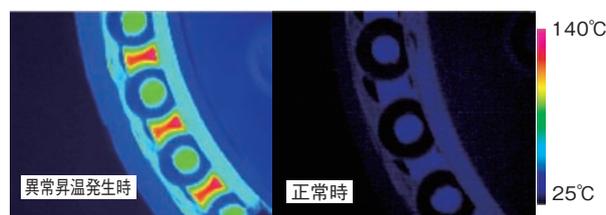
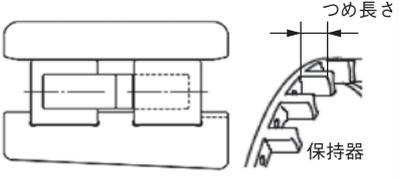


図7 保持器温度の測定結果 (8 000min⁻¹)
Cage temperature (8 000min⁻¹)

表3 複列円筒ころ軸受 試料・試験条件
Test conditions of cylindrical roller bearing

品種	複列円筒ころ軸受		
主寸法, mm	φ100 × φ150 × 37		
保持器材質	黄銅		
サンプル #	#1	#2	#3
概略形状			
つめ長さ	長	中	短
回転速度, min ⁻¹	3 000 ~ 12 000		

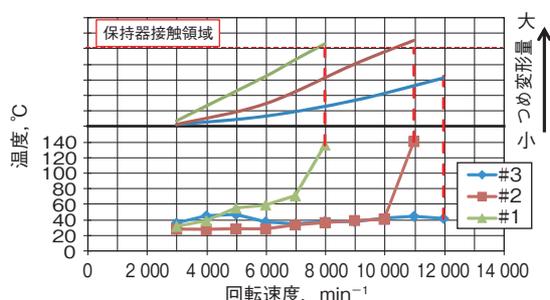


図8 保持器温度の測定結果および保持器変形量のFEM解析結果 (#1 ~ 3は表3に対応)
Cage temperature and a cage deformation FEM analysis results (#1 ~ 3 correspond to Table 3)

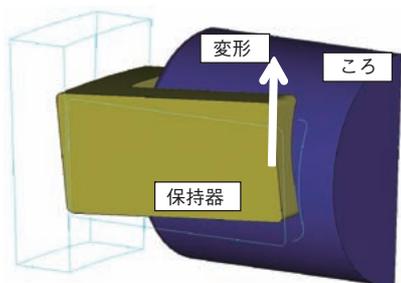


図9 保持器の遠心力による変形解析 (FEM)
Deformation of the cage by centrifugal force (FEM)

図8の上図に示すように、つめ長さが長い（体積が大きい）ほど、回転速度の上昇に伴って遠心力により外輪側へ変形する傾向がある。また、つめ長さが長いほど、低速回転から変形が始まるという傾向が見られた。

図8の上下の図を比較すると、上図でつめの変形量が保持器接触領域を上回る回転速度と、下図で保持器の急激な温度上昇が発生する回転速度は良く一致している。

以上より、回転中の保持器温度を測定することによってFEM解析結果を実測にて検証できたといえる。

FEM解析を活用し、つめの変形を抑えつつ他の性能への影響も考慮した最適化設計を行うことで、複列円筒ころ軸受のさらなる低昇温化の実現が可能になる。

3. 高精度流体シミュレーション技術の取組み

工作機械の主軸用軸受には、主にオイルエア潤滑とグリース潤滑が採用されており、とりわけ高速回転主軸においては、そのほとんどがオイルエア潤滑である。オイルエア潤滑とは、一定量に管理された微量のオイルを間欠的に送り出し、圧縮エアとともに各軸受に供給する潤滑方法である。オイルエア潤滑はグリース潤滑に比べ、かくはん抵抗が少なく、圧縮エアによる空冷効果もあるため高速回転に適している。図10にオイルエア潤滑システムの概略を示す。

しかしながら、オイルエア潤滑は圧縮エアで外部よりオイルを軸受内部に供給するという特性上、供給されたオイルエアがすべて軸受内部に到達する潤滑ではない。それは、高速回転になるとオイルエアの吐出口と軸受の間には図11に示すようなエアカーテン（空気の壁）が発生し、オイルエアの一部を跳ね返し、内部への供給効率が下がるためと推測している。別の確認試験では、エアカーテンの影響を受けないように直接軸受内部にオイルのみを供給する方式で行ったが、オイルエアで供給するオイル量の1/1 000 足らずで同等の回転性能が得られたことから裏付けられる。この点が潤滑剤が初めから軸受内部に存在するグリース潤滑方式と異なる。

以上の結果を基に、軸受内部のエア流れ／エアカーテンの挙動、および潤滑を効率的に軸受内部へ供給するための間座ノズルの形状や配置を明らかにするため、株式会社豊田中央研究所殿が提案する高精度流体シミュレーション技術²⁾を用いた、軸受内部のエア流れ／エアカーテンの挙動解析システムの構築を当社と共同で行っている。図12に、軸受内部流速分布のシミュレーション結果の例を示す。図12はノズルを考慮していない流速分布図だが、高速で回転する軸受内部において、それぞれのノズルから出たオイルエアがどのような方向に流れ、どれくらいの流量かが解明できつつある。

このシステムによって得られた最適かつ冷却効果の高いオイルエアの供給方法を、近い将来提案し、さらなる低昇温軸受としていきたいと考える。

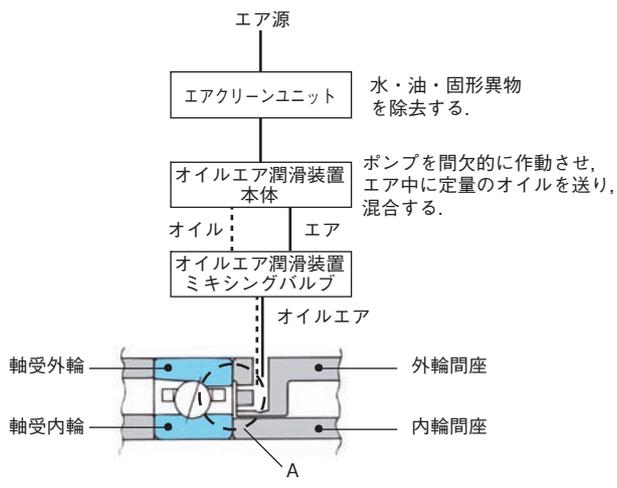


図10 オイルエア潤滑システムの概略
Oil/air lubrication system

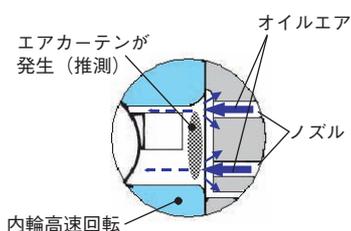


図11 軸受側面部のエアカーテン (A部拡大)
The air curtain of bearing side (A section)

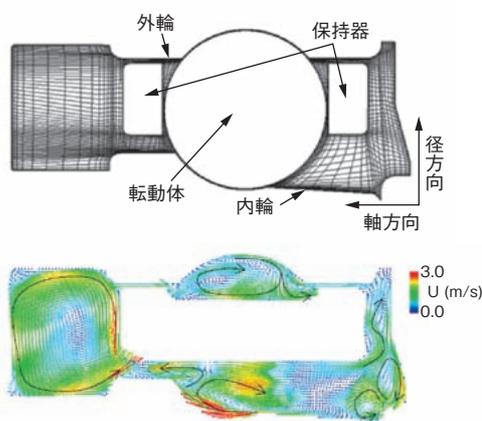


図12 軸受内部の流速分布
Flow velocity distribution inside bearing

4. おわりに

今回、高感度サーモグラフィを適用することにより、従来測定できていなかった軸受内部の温度（転動体、保持器）を正確に測定する技術を確認した。この測定技術とFEMによる発熱予測を組み合わせることで、軸受の発熱低減や、焼付きメカニズムの解明に大きく前進し、工作機械主軸用軸受の設計、さらには、全分野の軸受の発熱低減に役立てることができると考える。

また、高精度流体シミュレーション技術を確立することで、さらなる低昇温化を図り、商品力向上を推進していく。

軸受の低昇温化により、工作機械主軸の加工精度と高速性の向上による加工効率、および品質と精度の向上に貢献できると考える。また、主軸冷却のための消費電力を削減し、省エネルギー効果にも期待できる。

今後も、お客様に安心して使用いただけ、さらに、省エネルギーにも貢献できる軸受の開発を推進していきたい。

参考文献

- 1) 鈴木数也, 松榮慎二, 市川和之: JTEKT ENGINEERING JOURNAL, no. 1010(2012).
- 2) M. Inagaki: R&D Review of Toyota CRDL, vol. 39, no. 1, pp. 29-35(2004).

筆者



林 祐一郎*
Y. HAYASHI



大西 良**
R. ONISHI

* 軸受事業本部 産業機器技術部
** 軸受事業本部 実験解析部