

工作機械主軸用高速アンギュラ玉軸受ハイアビリー軸受の開発

Development of High-Speed Angular Contact Ball Bearings for Machine-tool Spindles "High Ability Bearings"

下村利明 T. SHIMOMURA

Recently machine-tool spindles have been radically improved in speed and efficiency for improving productivity and reducing processing costs including such challenges as energy saving and environmental friendliness.

To meet such demands, Koyo has developed a new series of high-speed angular contact ball bearing series called "High Ability Bearings" which has much advantage in high-speed, prompt start/stop and low temperature-rise performance. The maximum rotational speed limit of the bearings showed 1.3 times higher and the temperature rise 20 to 30 % lower in oil-air or grease lubrication compared with conventional Koyo high-speed bearings (ACH).

This paper describes the design outlines of High Ability Bearing series and its excellent performance.

Key Words: angular contact ball bearing, machine-tool spindle, high speed rotation, low temperature rise

1. はじめに

近年、工作機械主軸は、産業界の生産性向上・製品加工コスト低減の要求から、著しく高速化、高能率化が進んできている¹⁾²⁾。高速マシニングセンタの中には、高速回転による実際の切削時間の短縮に加え、すばやく工具交換し立ち上がる俊敏性(非切削時間の短縮)も兼ね備えた主軸を有するものが増加してきている。このような高速・高能率な主軸の開発には、高速回転が可能で、かつ急加減速信頼性にも優れた軸受の採用が必要不可欠である。

一方、今日では他の産業分野と同様、省エネ・地球環境保護への対応も重要なテーマとして位置付けられている。主軸用軸受についていえば、オイルエア潤滑時の消費エア量削減や低騒音化、さらには、より環境負荷の少ないグリース潤滑への切り換えなどが期待されている³⁾。

このような状況に対応するためには、消費動力の比較的少ない潤滑方法で、主軸用軸受の高速・急加減速、低昇温性能を飛躍的に向上させることが重要である。

今回、当社では、工作機械主軸用として高速アンギュラ玉軸受の新シリーズ「ハイアビリー軸受」を開発した。「ハイアビリー」とは、新シリーズの特徴である、高速、急加減速、昇温性のいずれに対しても「High Ability(高性能)」であることから名づけた。本稿では、新シリーズの設計の概要と性能上の特長について紹介する。

2. 軸受設計の概要

アンギュラ玉軸受の高速・急加減速、低温度上昇を達成するために、考慮すべき主要な課題として、

転動体に作用する遠心力による内部荷重の増加(軌道接触部の面圧の増加)

転動体・軌道間に生じる微小すべり(スピンすべり⁴⁾⁵⁾など)や巨視的なすべり(公転すべり)

内輪軌道の遠心膨張や内外輪の温度差などによる内部すきまの減少(予圧増加、すきまづまり)

オイルエア、オイルミスト潤滑の場合には、軸受側面に生じる風圧(以下エアカーテンと称す)による潤滑油の供給不良

などがあげられる。

今回、新シリーズの開発にあたっては、これらの問題に対処するため、軸受の設計面で下記の配慮を行った。

(1)内部諸元の最適化

軸受の性能に大きな影響をおよぼす玉径、曲率、接触角などの軸受内部諸元について、当社の開発した設計解析プログラム⁶⁾⁷⁾をもちい、高速・低昇温のための最適設計をおこなった⁸⁾。

一例として、図1に従来品と試験軸受について、温度上昇に大きく影響する転動体と軌道間の微小すべりによる摩擦損失(PV値)を計算シミュレーションにより比較した結果を示す。同図から、試験軸受は従来品と比較して、摩擦損失(PV値)が小さく、低昇温に有利な設計であることがわかる。

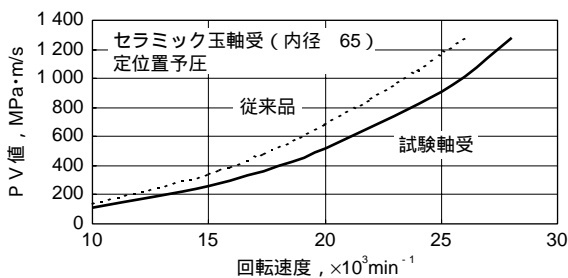


図1 従来品(ACH)と試験軸受のPV値比較例(計算)

Calculated PV values of test bearing and conventional product (ACH)

(2)潤滑を考慮した軸受形状

高速回転時に軸受側面に生じるエアカーテンによるオイルエア、オイルミストの供給不良をさけるため、オイルエア、オイルミスト潤滑専用として軌道輪に給油穴をもうけ、軸受内部へダイレクトに給油できる形状の軸受を設計した。これにより、高速回転時の潤滑信頼性を高めるとともに、省エア・低騒音化などの環境負荷低減も狙った。

(3)高性能材料の適用

転動体の材料に、高速回転に実績のあるセラミック玉の採用⁹⁾や、超高速回転時の内輪に生じる遠心応力対策として、浸炭鋼を採用した。

特に、セラミック玉の採用は、軽量・耐熱・低熱膨張などの優れた材料特性⁹⁾により、鋼製玉の軸受と比較して約1.3倍以上の高速化が期待できる¹⁰⁾。

以上を反映させた試験軸受(形式I~IV)の概要を表1に示す。

表1 試験軸受概要
Test bearings

	形式 I	形式 II	形式 III ¹¹⁾	形式 IV
形状				
潤滑	グリース/オイルエア潤滑		オイルエア潤滑専用	
転動体材質	軸受鋼	セラミックス		
軌道輪材質	軸受鋼		内輪 浸炭鋼	外輪 軸受鋼

3. 高速・昇温性能評価試験

3.1 試験方法

試験軸受の基本性能を明らかにするため、形式I~IIIの軸受をもちいて、高速限界と外輪温度上昇(室温との差)を評価した(形式IVについては後述する)。表2に試験条件、図2に試験機の構造を示す。また図3、4に給油方法を示す。

試験軸受は2列背面組み合わせ(DB)、定位置予圧、オイルエア潤滑で評価し、自然放熱冷却とした。

表2 高速・昇温性能評価試験条件

Conditions for high speed tests

試験		形式 I 試験		形式 II 試験		形式 III 試験	
試験軸受 (接触角20°)	形式	従来品 (ACH)	形式 I (内部諸元変更品)	従来品 (3NCACH)	形式 II (内部諸元変更品)	従来給油品	形式 III 給油
	寸法	65 × 100 × 18		65 × 100 × 18		35 × 62 × 14	
	玉材質	軸受鋼		セラミックス		セラミックス	
	軌道輪材質	軸受鋼		軸受鋼		軸受鋼	
予圧, N		150, 定位置		150, 定位置		39, 定位置	
潤滑条件	油粘度	ISO VG32相当		ISO VG32相当		ISO VG32相当	
	油量, ml/8min	0.03		0.03		0.03	
	エア量, NI/min	46		46		27	
	給油方法	図3		図3		図3	図4
冷却条件		自然放熱		自然放熱		自然放熱	

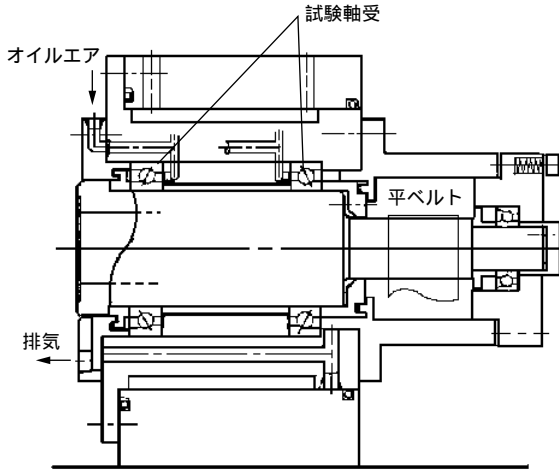


図2 試験機A
Test equipment A

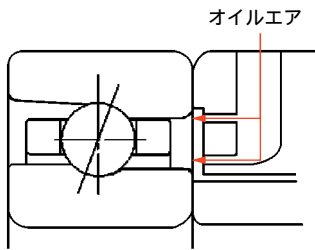


図3 従来品, 形式 I・II の給油方法
Lubrication method for conventional products,
Type I and Type II

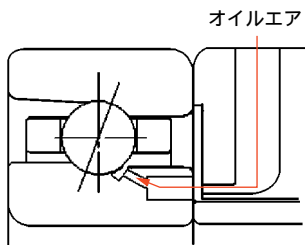


図4 形式 III の給油方法
Lubrication method for Type III

3.2 形式 I の試験結果

軌道輪・転動体がいずれも軸受鋼製で軸受内部諸元のみ変更した形式 I をもちいて、従来高速軸受(当社 ACH シリーズ)と比較試験を実施した。図5に回転速度と温度上昇の関係を示す。

形式 I は、従来品と比較して、限界回転速度が約1.3倍向上し、温度上昇も約20~30%低下し、優れた高速・昇温性能を有することが確認された。これは、前述の軸受内部諸元の変更により、軌道接触部の微小すべりによる摩擦損失が低減された効果が大きいものと考えられる。なお、形式 I の高速限界は、本試験条件では dmn 値* 165万であり、これは従来のセラミック玉軸受と同等の

高速性能である。(次項, 図6参照)

* dmn 値 = 軸受 PCD (mm) × 回転速度 n (min⁻¹)

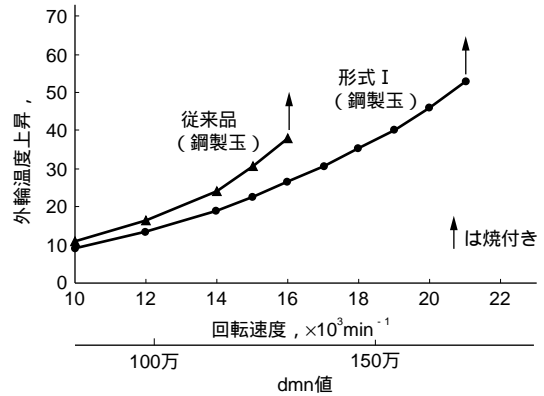


図5 形式 I 試験結果
Test results of Type I

3.3 形式 II の試験結果

軸受内部諸元の最適化に加え、転動体にセラミック玉を採用した形式 II を用いて、従来のセラミック玉軸受(3NCACH)と比較試験を実施した。図6に試験結果を示す。

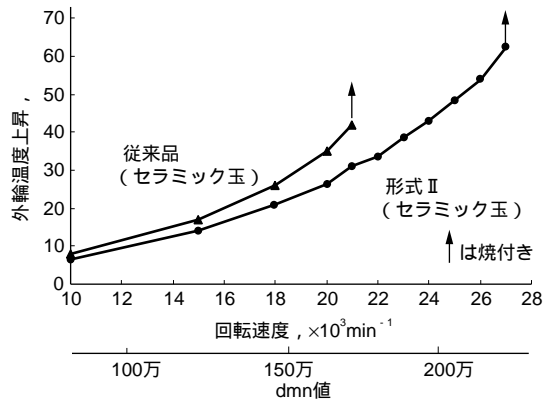


図6 形式 II 試験結果
Test results of Type II

転動体の材質をセラミックスとした場合においても、試験軸受は従来品と比較して、高速限界が1.3倍向上し、温度上昇も約20~30%低下し、軸受内部諸元最適化の効果が大きいことが確認された。また、図5と図6の比較から、セラミック玉採用の形式 II は、軸受鋼製玉の形式 I より、高速限界が1.3倍高く、昇温も約30~60%低く、転動体の材質を軸受鋼からセラミックスに変更する効果が大きいことも確認できた。形式 II の高速限界は、本試験条件では dmn 値 214.5万であった。

3.4 形式Ⅲの試験結果

内輪に給油穴をもうけ、軸受内に潤滑油を直接給油できる形状とした形式Ⅲと従来の給油方式について、高速比較試験を実施した。図7に試験結果を示す。

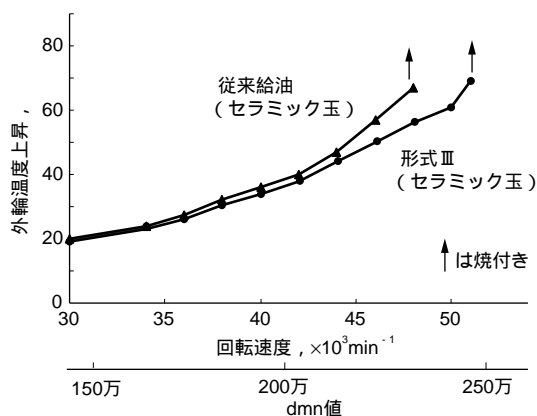


図7 形式Ⅲ 試験結果
Test results of Type III

図7より、形式Ⅲは、従来の給油方式と比較して、高速限界が約1.1倍、昇温は約5～10%低下することが確認された。これは、軸受内に油をダイレクトに供給する構造を採用しているため、高速回転時の潤滑信頼性が向上したものと考えられる。なお、形式Ⅲの高速限界は、本試験条件ではdmn値242.5万であった。

4. 省エネ・環境対応評価試験

高速・高効率化とならび、省エネ・環境対応化が工作機械主軸の重要なテーマとして位置付けられてきている。主軸用軸受にとっても全く同様で、より省エネ・環境対応に有利な軸受の開発が必要である。ここでは、特に、試験軸受の省エネ・環境対応性能を評価するため、グリース潤滑下での高速試験、オイルエア潤滑下でのエア量パラメータ試験・騒音特性試験をおこなった結果を述べる。

4.1 グリース潤滑での高速試験

オイルエア潤滑を採用していた高速領域をグリース潤滑で対応できれば、高圧エアや潤滑装置が不要となり、ミストの発生やエアの風切り音の問題もなくなるため、省エネ・環境対応上効果が大きい。

グリース潤滑でのセラミック玉採用の形式Ⅱと従来品(3NCACH)、および比較としてオイルエア潤滑下の従来鋼製玉軸受の高速比較試験をおこなった。

表3に試験軸受、試験条件を示す。試験機は、前記図2と同じである。

図8に回転速度と温度上昇の関係を示す。

表3 グリース潤滑下での高速試験条件

Conditions for high-speed rotation test with grease lubrication

試験軸受	形式	形式Ⅲ (セラミック玉)	従来品 (セラミック玉)	従来品 (鋼製玉)
	寸法	65 × 100 × 18		
予圧, N	150N 定位置			
潤滑条件	グリース潤滑 イソフレックスNB U15 空間容積の10%封入			オイルエア潤滑 油ISO VG32, 0.03ml/8min エア46Nl/min, ノズル(前記図3)
冷却条件	ジャケット油冷(室温制御)			

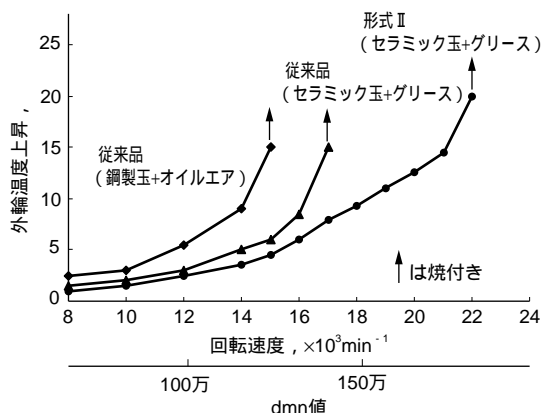


図8 グリース潤滑下での高速試験結果

Results of high-speed rotation test with grease lubrication

形式Ⅱは、グリース潤滑で従来品より約1.3倍高速限界が高く(dmn値173万)、昇温も約20～30%低く高速性能が優れていた。これは、比較用の従来鋼製玉軸受をオイルエア潤滑で回転した結果よりも、高速限界1.5倍、昇温約50～60%低減となり、著しい効果があるため、従来鋼製玉軸受をもちいオイルエア潤滑を採用していた主軸を、形式Ⅱのグリース潤滑により置き換えることが十分可能であると考えられる。

4.2 オイルエア潤滑でのエア量パラメータ試験

オイルエア潤滑時の消費エア量削減の可能性を確認するため、オイルエアを内輪側から給油する形式Ⅲと従来オイルエア給油方式について、供給エア量をかえて昇温試験をおこなった。表4に試験軸受、試験条件、図9に試験機の構造を示す。

表4 オイルエア潤滑下での省エネ・環境対応試験条件
Conditions for energy-saving test with oil-air lubrication

試験軸受	形式	従来給油品 (ACH)	形式Ⅲ
	寸法	80×140×22	
	玉材質	セラミックス	
	軌道輪材質	SUJ2	
予圧, N	196, 定位置		
潤滑条件	油粘度	ISO VG32相当	
	油量	0.03ml/8min	
	給油方法	図3	図4
冷却条件	自然放熱		

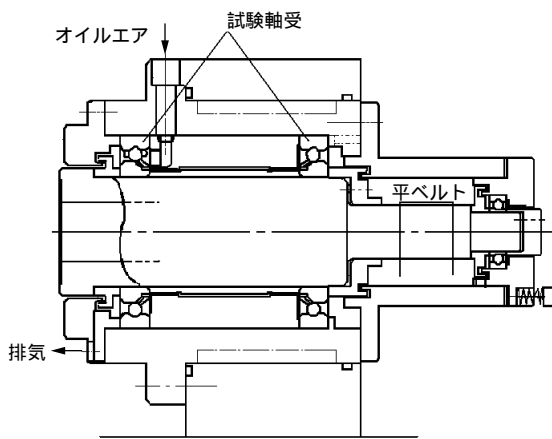


図9 試験機B
Test equipment B

図10に回転速度 $18\,000\text{min}^{-1}$ (dmn値198万)一定で、供給エア量をかえた時の排気温度上昇の変化を示す。図10より形式Ⅲの給油方式は、従来給油方式より温度上昇が低く、同一の昇温で比較した場合、エア量で約10~20%低減できることが確認された。ただし、供給エア量を減らすと軸受温度は上昇する傾向があるため、主軸仕様にあわせ、昇温優先か省エア優先かによりエア量を適宜選定する必要がある。

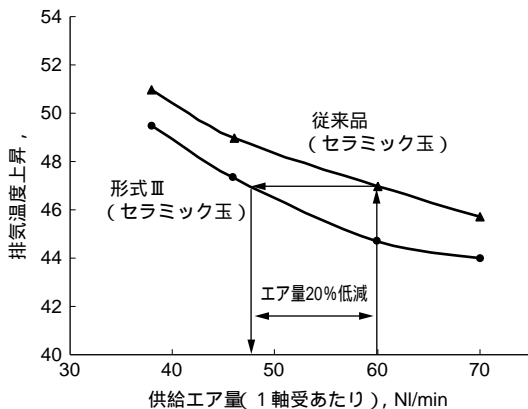


図10 エア量と温度上昇の関係

Relationship between air supply and temperature rise

4.3 オイルエア潤滑での騒音特性試験

環境対応の観点から、オイルエア潤滑時に生じる玉の公転によるオイルエアの風切り音の問題も課題となっている。ここでは、オイルエアを内輪側から入れる形式Ⅲと従来オイルエア給油方式について、騒音比較試験をおこなった結果を述べる。試験軸受と試験機の構造は、それぞれ前記表4、図9と同じ、試験条件はエア量 $46\text{NI}/\text{min}$ に固定したこと以外は同じである。また、騒音は精密騒音計をもちいて、試験機主軸端より150mmの位置にて測定した。図11に回転速度と騒音の関係を示す。

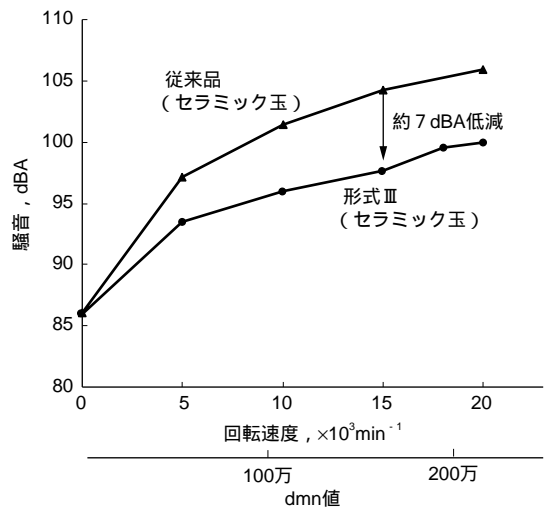


図11 騒音特性試験結果

Results of noise characteristics test

図11から形式Ⅲは、従来のオイルエア給油方式と比較して各回転速度で騒音が低く、特に $10\,000\text{min}^{-1}$ 以上の高速回転域においては約5~7 dBAの騒音低減効果が確認された。これは、形式Ⅲが内輪と玉の接触部に向けた給油方式のため、玉の通過によるエアの風切り音が低減されたことが原因であると考えられる。

5. 超高速回転試験

特に超高速主軸への対応を考え、形式Ⅳの外輪ノズル穴付き軸受をもちい、オイルエア潤滑下での超高速回転試験をおこなった。表5に、試験軸受、試験条件を示す。試験機は、図12に示すようなビルトインタイプ(モータ内蔵型)の試験機をもちい定圧予圧方式にて試験をおこなった。図14に、回転速度と温度上昇の関係を示す。

この結果形式Ⅳは数年前までは、ジェット潤滑やアンダーレース潤滑の様な多量油潤滑でしか対応できなかったdmn値330万(内径 50×

54 000min⁻¹の超高速回転を、微少油潤滑のオイルエア潤滑で実現できる優れた高速性能を有することが確認できた。

また、試験後の軸受には全く異常は認められず、引き続き運転可能な良好な状態であった。

表5 超高速回転試験条件

Conditions for ultra-high speed rotation test

試験軸受	形式	形式Ⅳ
	寸法	50 × 72 × 12
	玉材質	セラミックス
	軌道輪材質	外輪軸受鋼，内輪浸炭鋼
予圧, N	500, 定圧	
潤滑条件	油粘度	ISO VG10相当
	油量	0.03ml/2min × 2
	エア量	86Nl/min
	給油方法	図13
冷却条件	ジャケット油冷室温制御	

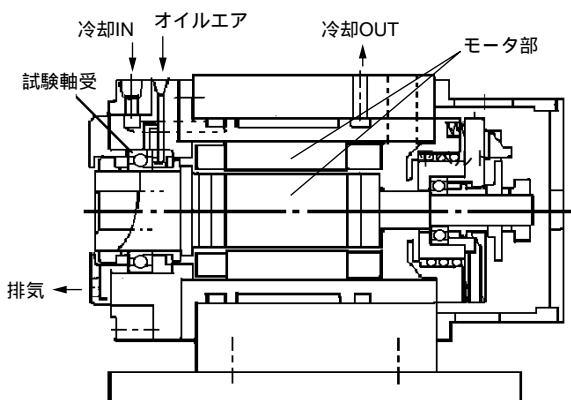


図12 試験機C
Test equipment C

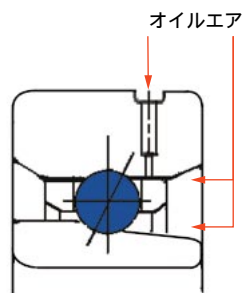


図13 形式Ⅳ給油方法
Lubrication method for Type IV

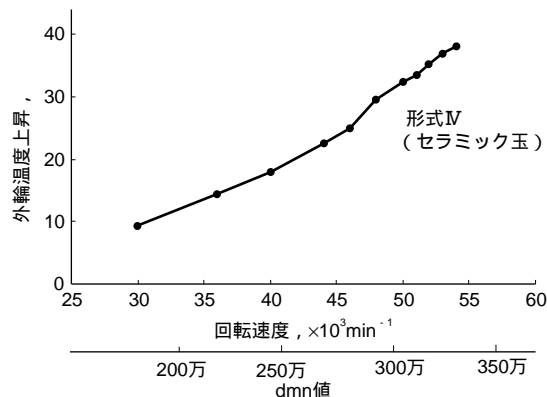


図14 超高速回転試験結果

Results of ultra-high speed rotation test

6. 急加減速繰り返し試験

瞬時に起動・停止する軸をもつ高速・高能率主軸には、急加減速性能の優れた軸受を採用することが重要である。急加減速運転は回転速度一定の定常運転以上に、転動体の慣性による内輪とのすべり、内外輪温度差の増加、保持器と外輪案内面とのふれまわり接触などを引き起こすため、軸受にとって、特に過酷な運転条件であるといえる。ここでは、形式Ⅳ外輪ノズル穴付き軸受をもちい、オイルエア潤滑下でdmn値280万/3s × 10⁵回の急加減速繰り返し試験をおこなった結果を述べる。

表6に試験軸受および試験条件を示す。試験機は、前記図12と同様の試験機である。図15に1サイクルの運転パターンを示す。

表6 急加減速繰り返し試験条件

Conditions for prompt start/stop repeating test

試験軸受	形式	形式Ⅳ
	寸法	50 × 80 × 16
	玉材質	セラミックス
	軌道輪材質	外輪軸受鋼，内輪浸炭鋼
予圧, N	245, 定圧	
潤滑条件	油粘度	ISO VG10相当
	油量	0.03ml/3min × 2
	エア量	72Nl/min
	給油方法	図13
冷却条件	ジャケット油冷室温制御	

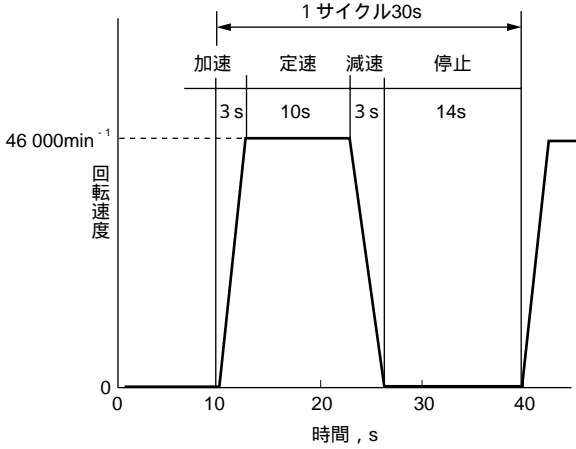


図15 運転パターン
Operation pattern

急加減速繰り返し運転中の軸受外輪・オイルエア排気・主軸のピーク昇温の経時変化を図16、温度測定記録を図17に示す。軸受外輪・オイルエア排気温度は1サイクル中、急加減速運転にともない激しく変動するが、ピーク昇温は、長期的に安定し、 10^5 回の繰り返し運転を異常なくクリアした。

また、 10^5 回繰り返し運転後、軸受の内部調査を実施したが、転走部、保持器案内面などに特に異常は認められず、引き続き運転可能な良好な状態にあり、優れた急加減速性能が確認された。

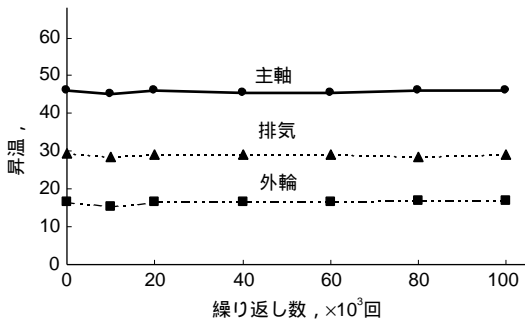


図16 各部温度上昇ピークの経時変化
Change of temperature rise peak

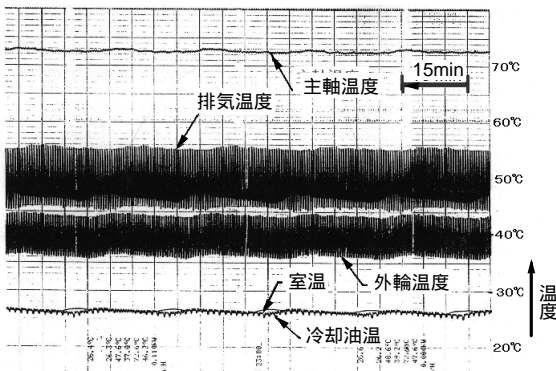


図17 温度測定記録
Chart of temperature measurement

7. おわりに

工作機械主軸の高速・高能率化、省エネ・環境対応化に適用できる高速アンギュラ玉軸受を開発し、各種評価試験をおこなった結果を以下に要約する。

- 軸受内部諸元に高速・低昇温最適設計をおこなった結果、従来の当社高速軸受ACHタイプと比較して、1.3倍以上の高速限界向上、約20~30%の低昇温化が実現できた。具体的には、
 - ・オイルエア潤滑で、鋼製玉軸受でdmn165万(定位置予圧)
 - ・オイルエア潤滑で、セラミック玉軸受でdmn214.5万(定位置予圧)の高速回転が達成できた。
- さらに、オイルエア・オイルミスト潤滑専用として、内輪に給油穴をもつけた軸受を採用することで、約1.1倍の高速限界向上させることができた。
 - ・オイルエア潤滑の給油方式の改善で、dmn値242.5万(定位置予圧)達成
- 省エネ・環境対応に重点をおき、グリース潤滑下での高速試験をおこなった結果、従来セラミック玉軸受と比較して1.3倍以上の高速限界向上、約20~30%の低昇温化が実現できた。これは、オイルエア潤滑下の従来鋼製玉軸受と比較した場合、1.5倍の高速限界向上、約50~60%の低昇温化にあたる。従来鋼製玉軸受をもちいオイルエア潤滑を採用していた主軸を、セラミック玉軸受のグリース潤滑で置き換えることが十分可能と考えられる。
 - ・グリース潤滑下、セラミック玉軸受でdmn値173万(定位置予圧)達成
- また、オイルエア潤滑においても、内輪に給油穴を設けた軸受を採用することで、消費エア量削減、(約10~20%削減)、低騒音化(約5~7 dBA低減)ができ、省エネ・環境対応が可能と考えられた。
- 特に超高速・高能率主軸に対応できる軸受として、超高速回転、急加減速性能に優れる、外輪に給油穴をもつけた軸受を開発した。その実力として、オイルエア潤滑下
 - ・dmn値330万の超高速回転
 - ・dmn値280万 / 3秒の急加減速耐久性を確認した。

以上の試験結果をもとに、高速・急加減速、低温度上昇に優れ、省エネ・環境対応にも優れる高速アンギュラ玉軸受の新シリーズ「ハイアビリー軸受」を開発した。

今後、この軸受により工作機械主軸の更なる高性能化に寄与していきたい。

参考文献

- 1) 近森 章, 浦野寛幸: KOYO Engineering Journal, no. 156 (1999) 44 .
- 2) 清水伸二: 月刊トライボロジ, no. 2 (2001) 12 .
- 3) 藤井健二: 第31回2001工作機械関連技術者会議資料(2001.7)B 2 - 1 - 1 .
- 4) P. エッシュマン他: ころがり軸受実用ハンドブック, 工業調査会(1996)94 .
- 5) 転がり軸受工学編集委員会: 転がり軸受工学, 養賢堂(1975)117 .
- 6) 大嶋昭男: KOYO Engineering Journal, no. 143 (1993) 5 .
- 7) Tedric A. Harris: ROLLING BEARING ANALYSIS, 3rd ed., Wiley Interscience (1991).
- 8) John T. Mayer, Thomes C. Litzler: AN APPROXIMATE DETERMINATION OF THE EFFECTS OF GEOMETRY ON BALL-BEARING TORQUE AND FATIGUE LIFE., NASA TN D-2792 (1965).
- 9) 竹林博明: KOYO Engineering Journal, no. 160 (2001) 70 .
- 10) 市川康雄, 田端伸介: KOYO Engineering Journal, no. 135 (1989) 62 .
- 11) 特開平11 - 182560 .

筆 者



下村利明*
T. SHIMOMURA

* 軸受事業本部 軸受技術センター
航空・精密技術部