

特殊環境用軸受 (Koyo EXSEV軸受) について (4)

- セラミック軸受の応用 -

竹林博明

Bearings for Extreme Special Environment (4)

-Application of Ceramic Bearings-

H. TAKEBAYASHI

Outlines of Koyo EXSEV bearing series (bearing for extreme special environments) have been explained in the Koyo Engineering Journal No.156, 157, 158. Herein comparison of characteristics between ceramic material (silicon nitride) and high carbon chrome bearing steel (SUJ2), configurations of ceramic bearings, fundamental performance, and application examples of ceramic bearings are described.

Key Words: ceramic rolling bearing, extreme special environment, application

1. はじめに

転がり軸受(以下軸受と称す)の使用される環境や条件は、年々過酷でかつ多様化してきている。そのため当社では特殊な環境や厳しい条件で使用できる軸受を、特殊環境用軸受「Koyo EXSEV (Extreme Special Environment) 軸受」と名付けて商品化をすすめてきた。

特殊環境用軸受「Koyo EXSEV軸受」について、本誌では過去3回シリーズで紹介してきた。第4回目の今回は、特殊環境用軸受のなかでも中心的な地位を占めているセラミック軸受の応用に関して紹介する。具体的には、セラミックス(窒

化けい素)と軸受鋼の特性比較、セラミック軸受の構成と用途、セラミック軸受の応用に関する基本性能および最近のセラミック軸受の応用事例に関して述べる。

2. セラミック軸受の特性

表1は、セラミック軸受の材料として主に使用している窒化けい素(Si_3N_4)と一般の軸受に使用している軸受鋼の特性を比較したものである¹⁾。軸受鋼と異なった窒化けい素の優れた特性が、セラミック軸受の長所となってくる。

表1 窒化けい素と軸受鋼の特性比較

Comparison between silicon nitride and high carbon chromium bearing steel

No.	項目	単位	セラミックス Si_3N_4	軸受鋼 SUJ2	セラミックスの適用による長所および特性
1	耐熱性		800	180	高温下で高負荷能力維持
2	密度	g/ml	3.2	7.8	転動体(玉,ころ)の遠心力軽減⇒寿命向上,昇温防止
3	線膨張係数	1/	3.2×10^{-6}	12.5×10^{-6}	昇温による内部すきまの変化が小⇒振動防止,予圧変化小
4	ピッカース硬さ	MPa	13 720 ~ 16 660	6 860 ~ 7 840	転がり接触部の変形小 ⇒高剛性化
5	縦弾性係数	MPa	31.36×10^4	20.58	
6	ポアソン比		0.26	0.3	
7	耐食性		良	不良	海水中など特殊環境下で使用可能
8	磁性		非磁性体	強磁性体	強磁界中での着磁による回転変動小
9	導電性		絶縁体	導電体	電食による損傷防止が可能
10	素材の結合形態		共有結合	金属結合	油膜切れによる転がり接触部の凝着(移着)が小

例えば、窒化けい素の優れた耐熱性は高温雰囲気で使用される軸受に適用すると効果を発揮し、窒化けい素の低密度特性は軸受の軽量化と高速化の際の転動体(玉,ころ)の遠心力軽減に効果を発揮する。また、窒化けい素の高剛性特性は軸受の高剛性化に結びつき、優れた耐食性、非磁性および絶縁性は特殊な用途での軸受材料として使用できる。さらに、窒化けい素の結合形態(共有結合)から高速回転時の油膜切れによる耐焼付き性向上も期待できる。

合せセラミック軸受の場合、利用特性に合わせて内外輪に特殊鋼(耐熱鋼,耐食鋼,非磁性鋼等)を用いたり、表面処理(主に耐食目的)を施す場合がある。また保持器材料は、軸受の使用条件に合わせて選定する。なお、高速回転用途の場合は、内輪と転動体を窒化けい素で製作するものがある。これは軸受が高速回転時に、内輪が遠心力で膨張し、軸とのしめしろが不足し不具合が発生するからである。

3. セラミック軸受の構成

表2は、セラミック軸受の主な軸受構成と用途例について示したものである²⁾。セラミック軸受の構成としては、基本的には総セラミック軸受(内外輪,転動体が窒化けい素)と組合せセラミック軸受(転動体が窒化けい素)の2種類がある。組

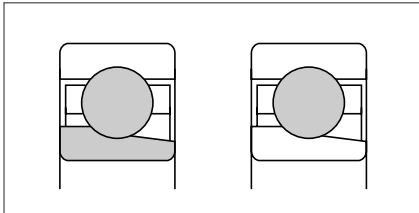
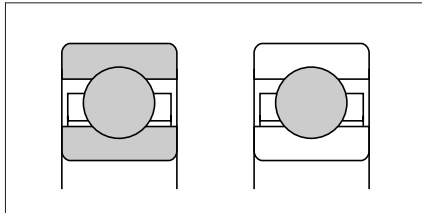
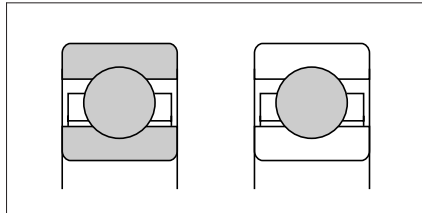
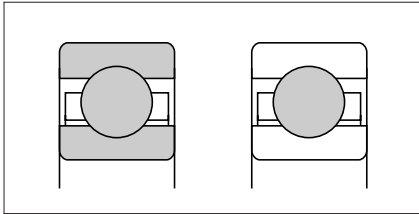
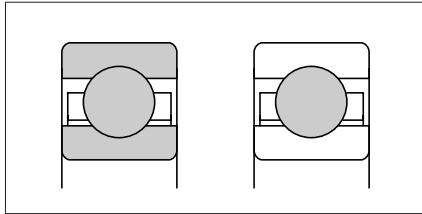
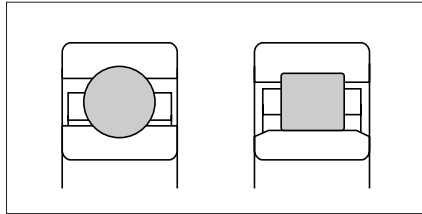
4. セラミック軸受の応用に関する基礎性能

ここでは、セラミック軸受の応用を考える場合の基礎性能に関して述べる。具体的には、セラミック軸受の高速性能、水中での寿命および高温での運転性能について紹介する。

表2 セラミック軸受の構成と用途例

Structure of ceramic bearings and application examples

■ : セラミックス

(1) 高速回転	(2) 真空環境用	(3) 耐食用
<p>軸受鋼の40%の比重。 転動体の遠心力が低減されるので、高速回転に適する</p>  <p>用途例 工作機械主軸,自動車ターボチャージャー,一般産業機械(スピニングなど)</p>	<p>真空度 $1 \sim 10^{-10}$ Pa で使用が可能。用途に合わせて潤滑法を選定</p>  <p>用途例 半導体製造装置,真空機器(ターボ分子ポンプなど)</p>	<p>酸・アルカリ中,海水中および熔融金属中での使用が可能</p>  <p>用途例 化学機械,鉄鋼機械,繊維機械</p>
(4) 高温用	(5) 非磁性	(6) 絶縁
<p>セラミックスの耐熱温度は800。使用温度に合わせて潤滑法を選定</p>  <p>用途例 鉄鋼機械,一般産業機械,自動車ディーゼルエンジン</p>	<p>磁界中での使用が可能</p>  <p>用途例 半導体製造装置,超電導関連装置,原子力発電装置</p>	<p>セラミックスは絶縁体。通電の恐れのある用途で使用が可能</p>  <p>用途例 鉄道車両,モータ</p>

4.1 高速性能³⁾

高速回転用の軸受としては、転動体に窒化けい素を用いたセラミック軸受が適用されている。これは、高速回転する軸受の転動体に密度の小さい窒化けい素を使用すると、転動体に生じる遠心力やジャイロモーメントによるすべりを軽減でき、より高速回転が可能となるからである。

ここでは、高速回転時において組合せセラミック軸受が鋼製軸受に比べて優れた性能を示すことを、軸受部の動力損失を検討することにより明らかにする。

図1に試験機の構造、表3に試験条件、図2、表4に試験軸受の寸法と構成を示す。本試験機では、軸受の回転トルク、潤滑油の温度上昇、モータの消費電力の3種類の方法で試験軸受の動力損失が測定できる。

表4 試験軸受の構成³⁾

Test bearings

	組合せセラミック軸受	鋼製軸受
内・外輪	高温用軸受鋼 (AISI-M50)	高温用軸受鋼 (AISI-M50)
玉	材質	HIP窒化けい素
	直径	1/4"(6.35mm)
	数	9
保持器	ポリイミド樹脂	ポリイミド樹脂

図3は、軸受部の回転トルク、潤滑油の温度上昇および軸受部の消費電力の測定結果から3種類の動力損失を測定し比較したものである。3種類の方法で求めた動力損失の値は、ほぼ近い値を示しており、その傾向も一致している。また、組合せセラミック軸受と鋼製軸受の動力損失を比較すると、回転速度が80 000r/m以上では組合せセラミック軸受の方が動力損失が小さくなっていることがわかる。

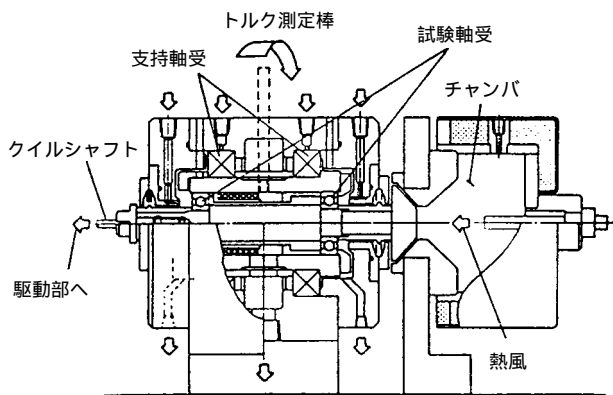


図1 試験機の構造³⁾

Test equipment

表3 試験条件³⁾

Test conditions

項目	条件
アキシャル荷重	200N
回転速度(最大)	100 000r/m
潤滑油	ASTO#500
雰囲気温度	室温

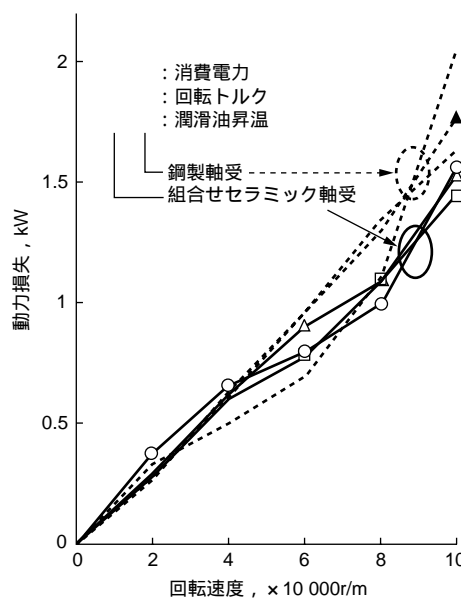


図3 動力損失の比較³⁾

Comparison of power loss between hybrid ceramic bearing and steel bearing

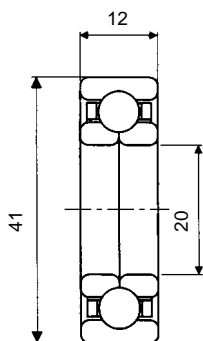


図2 試験軸受の寸法³⁾

Test bearing

図4は、組合せセラミック軸受と鋼製軸受で潤滑油量を減少させていったときの焼付き限界を調査したものである。この結果から、組合せセラミック軸受は鋼製軸受と比較して同じ回転速度であれば少ない潤滑油量、同じ給油量であればより高い回転速度まで運転可能であることがわかる。

表5は、潤滑油量を考慮し組合せセラミック軸受と鋼製軸受の動力損失を比較した結果である。動力損失は消費電力から求めたものであり、それぞれの回転速度で鋼製軸受の動力損失を1としたときの比で示している。それぞれの回転速度で焼

表5 潤滑油量を考慮した動力損失³⁾

Power loss in relation to the amount of oil

	焼付き限界油量, ℓ/min		動力損失(鋼製軸受を1とする)			
	80 000r/m	100 000r/m	潤滑油量: 1.0 ℓ/min		潤滑油量: 焼付き限界油量の2倍	
			80 000r/m	100 000r/m	80 000r/m	100 000r/m
鋼製軸受	0.15	0.25	1	1	1	1
組合せセラミック軸受	0.1	0.15	0.9	0.7	0.7	0.45

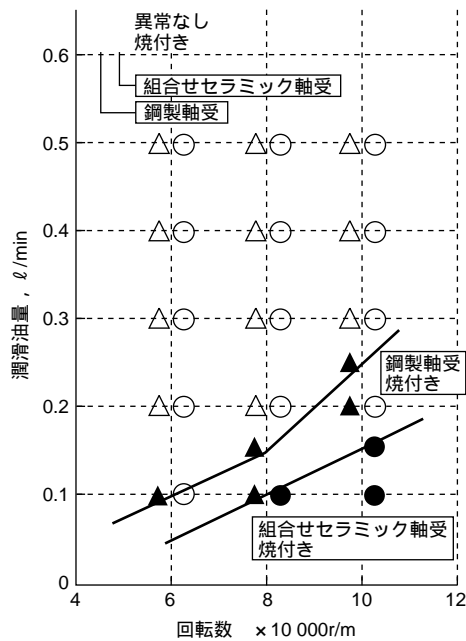


図4 焼付限界の調査³⁾

Maximum speed of anti-seizure rotations

付きを生じる限界の潤滑油量の2倍を最適油量として、この最適油量のもとで動力損失を比較している。その結果、組合せセラミック軸受の動力損失は鋼製軸受と比較して80 000r/mでは約30%、100 000r/mでは約55%を削減できることがわかる。つまり、高速回転用途においては、組合せセラミック軸受を用いて潤滑油量を削減することで軸受部の動力損失を大幅に低減することが可能である。

4.2 水中での寿命⁴⁾

窒化けい素が優れた耐食性を有していることより、セラミック軸受は水、海水および薬液などの水溶液中で使用されることがある。水溶液中で軸受を使用する場合、水溶液そのものを潤滑剤として使用することが多い。そこでセラミック軸受を水溶液中で使用するためには、一般の潤滑油に比べて粘度の低い水溶液を潤滑に用いた場合のセラミック軸受の寿命を把握することが重要となる。

図5に試験装置、図6に試験軸受、表6に試験

軸受の構成を示す。試験装置は、水道水を満たした水槽中に試験軸受1個が全浸するように組み込み、ラジアル荷重のみが負荷できる構造である。また、試験軸受は深溝玉軸受6206相当で、総セラミック軸受(内外輪・玉:窒化けい素) 組合せセラミック軸受I(内外輪:SUS440C,玉:窒化けい素) 組合せセラミック軸受II(内外輪:SUS630,玉:窒化けい素)の3種類である。

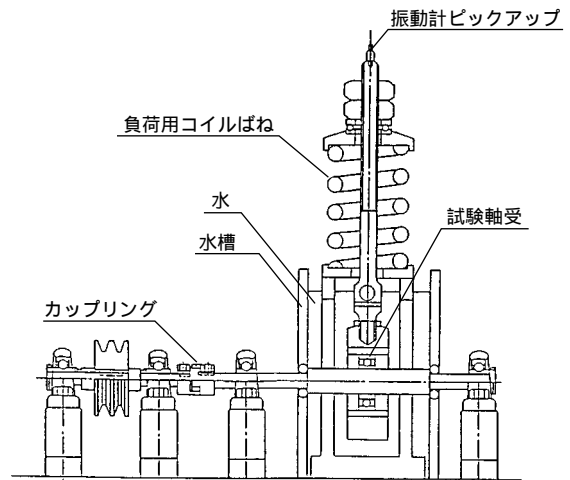


図5 試験装置

Test equipment

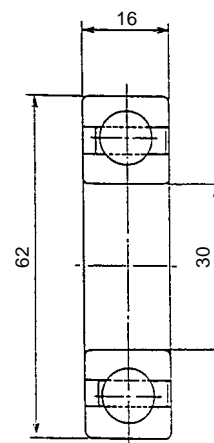


図6 試験軸受

Test bearing

表6 試験軸受の構成
Composition of test bearings

軸受種類		総セラミック軸受	組合せセラミック軸受 I	組合せセラミック軸受 II
部品	型番	NC6206	3NC6206ST4	3NC6206MD4
	外輪	窒化けい素	SUS440C	SUS630
	内輪	窒化けい素	SUS440C	SUS630
	玉 (玉径×玉数)	窒化けい素 (3/8インチ×9個)	窒化けい素 (3/8インチ×9個)	窒化けい素 (3/8インチ×9個)
	保持器	ふっ素樹脂	ふっ素樹脂	ふっ素樹脂

表7 試験条件
Test conditions

軸受種類		総セラミック軸受	組合せセラミック軸受 I	組合せセラミック軸受 II
項目	型番	NC6206	3NC6206ST4	3NC6206MD4
	ラジアル荷重, N	1 470	196	196
	回転数, r/m	1 500		
	潤滑条件	常温水中		

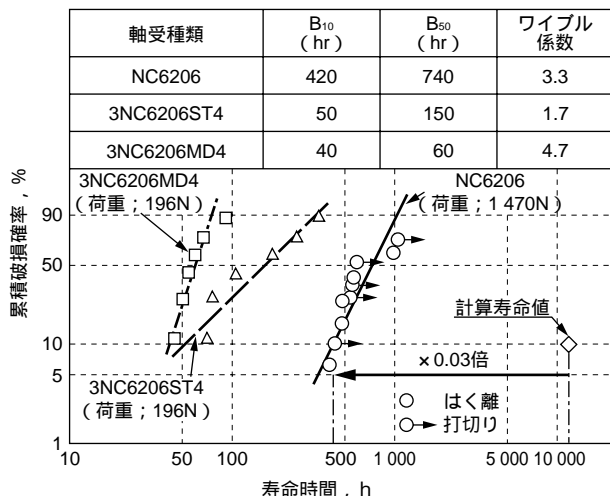


図7 寿命試験結果
Life test results

表7に試験条件，図7に寿命試験結果を示す．総セラミック軸受は荷重：1 470N，組合せセラミック軸受 I，II は荷重：196Nで試験を行い，総セラミック軸受： ，組合せセラミック軸受 I： ，組合せセラミック軸受： の寿命試験結果をワイブル確率紙にまとめたものである．総セラミック軸受の破損形態は，油潤滑下で見られる内外輪・玉のはく離であった．一方，組合せセラミック軸受 I，II の破損形態はともに軌道輪の摩耗 (SUS440Cの方がSUS630より硬度が高いことより長寿命)であり，窒化けい素の玉にははく離や摩耗は発生していない．これらの結果より，水中で総セラミック軸受を使用する場合は，動定格荷重

の 1 / 10以下の荷重で使用すること(動定格荷重の 1 / 10以上の荷重で使用すると極短時間ではく離が発生するため)，またその時の寿命は，計算寿命の 3 / 100程度となることがわかる．次に，組合せセラミック軸受を水中で使用する場合は，動定格荷重の 1 / 100以下の荷重で使用しても内外輪が摩耗していくことがわかる．したがって，組合せセラミック軸受を水中などで使用する場合は，軸受の荷重と摩耗量の関係を十分把握しておくことが重要である．

4.3 高温での運転性能⁵⁾

窒化けい素は軸受鋼に比べて高温でも硬度および強度が低下しないことより，高温における軸受材料として有望である．しかし，使用される雰囲気が高熱ということより潤滑に油やグリースが使用できないので，固体潤滑剤を用いることが必要である．固体潤滑剤としては，二硫化モリブデン，二硫化タングステンおよびグラファイトなどが知られており，これらの材質で保持器を製作したり保持器や転走面に被膜形成することで用いている．

ここでは，グラファイト材料を総セラミック軸受の固体潤滑保持器として応用する場合の，保持器の案内形式と分割方法について検討した結果を紹介する．

試験軸受はアンギュラ玉軸受7204相当で，内外輪・玉は窒化けい素で保持器にグラファイト材料を適用している．図8に，保持器の案内形式が異

なった試験軸受を示す。保持器はいずれもグラフアイト材料で製作したもみ抜き保持器で、その幅 b : 13mm, 肉厚 t : 3.0mm, 案内すきま e : 0.3mmとした。図9に、保持器の分割方法を示す。保持器は、外輪案内形式として製作されたもので、これをポケット部または柱部で4つに切断している。切断しるはいずれも1箇所につき0.7mmであった。

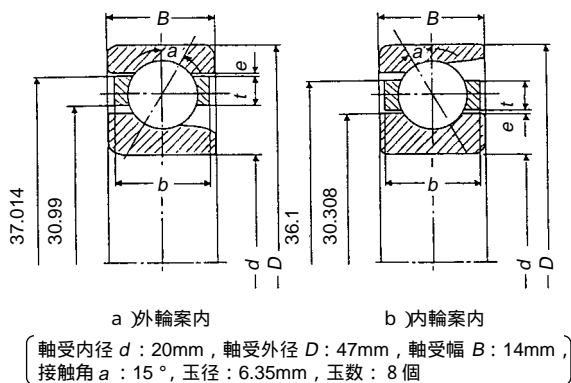


図8 試験軸受
Test bearings

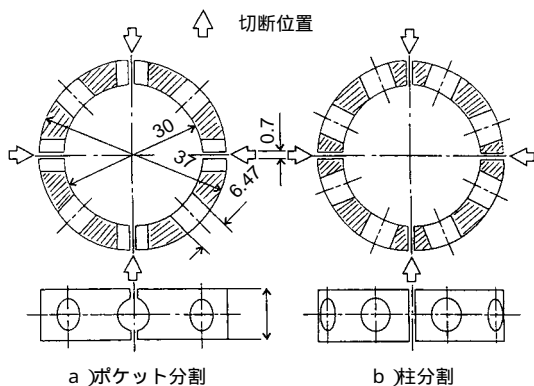


図9 保持器の分割方法及寸法
Retainer designs

試験は、温度 : 500 , 荷重 : 392N, 回転速度 : 1 000 ~ 1 5000r/mで実施した。図10, 図11は案内形式の異なる保持器を用いた軸受の摩擦トルクと振動を比較したもので、図12, 図13は分割方法の異なる保持器を用いた軸受の摩擦トルクと振動を比較したものである。保持器の案内形式の比較では、外輪案内保持器を組み込んだ軸受は内輪案内保持器を組み込んだ軸受に比べて、摩擦トルクおよび摩擦トルクの変動が小さい。次に分割した保持器を組み込んだ軸受では、柱部で分割したものがポケット部で分割したものより優れた運転性能を示すことがわかる。また一体型保持器と分割保持器を比較すると、外輪案内保持器を組み込んだ軸受と柱部で分割した保持器を組み込んだ

だ軸受はほぼ同程度の運転性能を示すことがわかる。したがってここでの試験結果を参考にして、軸受の使用される条件に合わせて保持器の形状を検討することが必要となる。

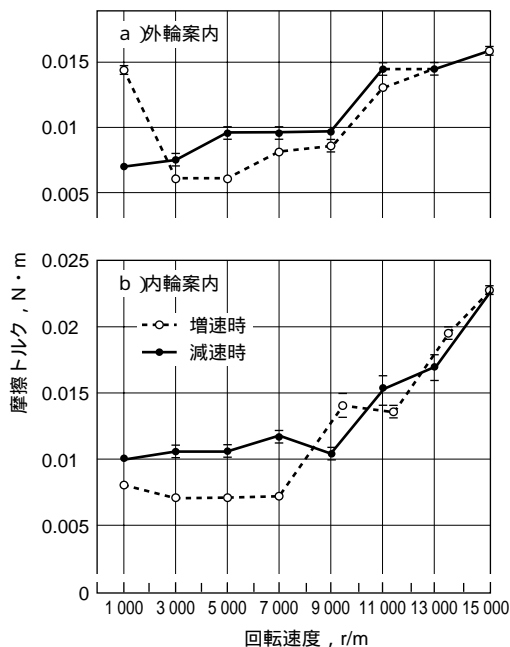


図10 軸受の摩擦トルク測定結果
Friction torque data

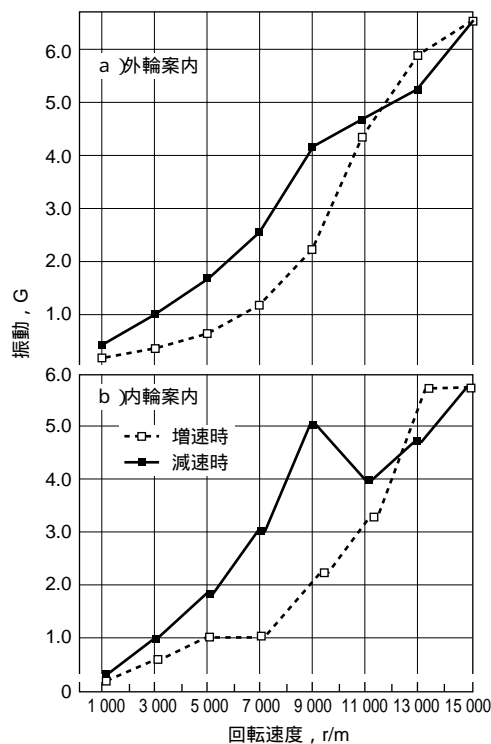


図11 振動の測定結果
Vibration data

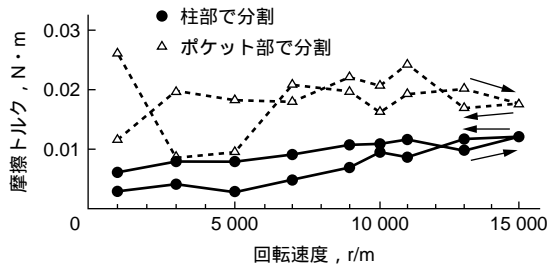


図12 軸受の摩擦トルク測定結果
Friction torque data

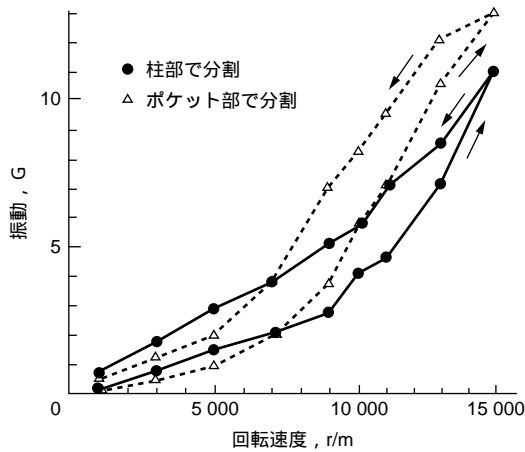


図13 振動の測定結果
Vibration data

5. セラミック軸受の応用事例

ここでは、最近のセラミック軸受の応用事例に関して紹介する。具体的には、ターボチャージャ用軸受、HDDスピンドル用軸受、工作機械主軸用軸受、半導体製造装置用軸受および燃料噴射システム用セラミック部品について述べる。

5.1 ターボチャージャ用軸受⁶⁾

自動車用ターボチャージャの軸受には、加速応答性の向上と高速回転時の低トルク化などが要求されている。したがって、従来から使用されているすべり軸受(フルフロート軸受)に代わって転がり軸受の適用が検討されていた。当社ではそれに加えて、玉にセラミックスを用いた組合せセラミック軸受が鋼製軸受よりも劣化油中や異物油中で長寿命を示すことより、ターボチャージャ用軸受として組合せセラミック軸受の商品化を進めてきた。図14は劣化油中と異物油中で組合せセラミック軸受と鋼製軸受の寿命比較を行ったもので、組合せセラミック軸受の方が長寿命を示すことがわかる。その結果当社は、1998年に世界で初めて自動車用ターボチャージャに組合せセラミック軸受の実用化を実現した。

<試験条件>
軸受: 798(8×19×6) 異物: 0.027mm高速鋼
回転速度: 100 000r/m 荷重: 0.590N(繰り返し荷重)
油種: 10W-30CD 油温: 80
劣化油: 2万km使用

		負荷サイクル	状況
		0 2 4 // 10×10 ⁴	
劣化油中	鋼製玉軸受	×	振動大
	セラミック玉軸受	○	打ち切り
異物油中	鋼製玉軸受	×	玉はく離
	セラミック玉軸受	○	打ち切り

図14 耐久試験結果
Durability test results

5.2 HDD(ハードディスクドライブ)スピンドル用軸受⁷⁾

HDDスピンドル用軸受には、高速化、低トルク化、耐焼付き性の向上(低潤滑下)、高剛性化等が要求されている。したがって、HDDスピンドル用軸受として玉にセラミックスを用いた組合せセラミック軸受の適用が検討されてきた。図15は、微量オイル潤滑下で組合せセラミック軸受と鋼製軸受の寿命比較を行ったものである。微量オイル潤滑条件下で組合せセラミック軸受は、鋼製軸受の3倍以上の寿命を有していることがわかる。その結果、高速化、高容量化が必要となっているHDDの一部機種には組合せセラミック軸受が実用化されている。

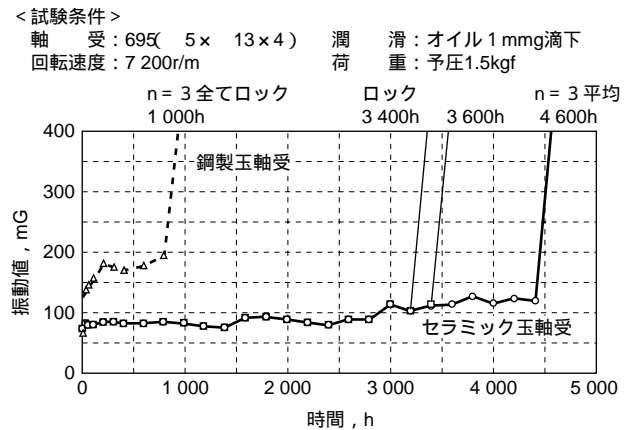


図15 オイル潤滑耐久試験結果(微量油量)
Test results (few oil lubrication)

5.3 工作機械主軸用軸受⁸⁾

工作機械主軸用軸受には、低昇温、高剛性、耐焼付き性の向上などが要求されている。そのため、玉にセラミックスを用いた組合せセラミック軸受と玉と内輪にセラミックスを用いたセラミック軸受が実用化されている。図16は組合せセラミック軸受と鋼製軸受の昇温を比較したもので、図17

は玉と内輪がセラミックスのセラミック軸受(6NCタイプ)と玉がセラミックスの組合せセラミック軸受(3NCタイプ)の昇温を比較したものである。これらを見ると、鋼製軸受、3NCタイプ、6NCタイプの順で高速運転時の昇温が低くなることわかる。

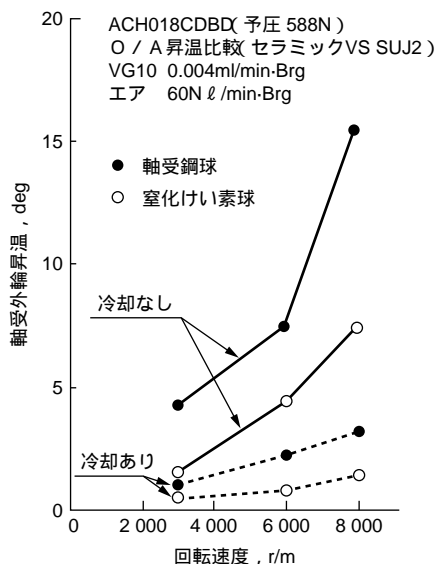


図16 昇温特性(鋼製軸受, 組合せセラミック軸受)

Temperature rise for steel bearing and hybrid ceramic bearing

- ・軸受 / 基本呼び番号: 6NCACH020CPA
3NCACH020CPA
- ・オイルエア潤滑 /
オイル: ISO VG10相当 0.05ml / 2min
エア: 60N ℓ/min
- ・連続運転 / 17 000r/m (dn値 170×10^4) × 60h
- ・冷却 / ジャケット油冷 (10 ℓ/min, 室温制御)

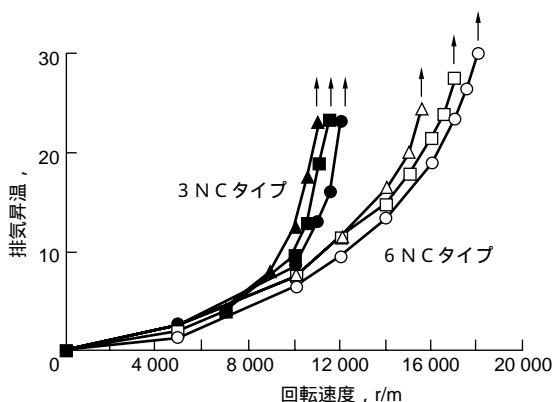
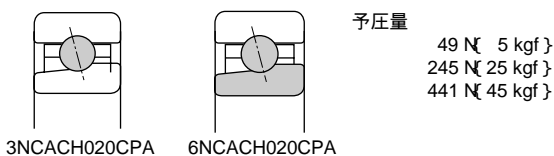


図17 昇温特性(3NCタイプ, 6NCタイプ)

Temperature rise for 3NC, 6NC type bearings

5.4 半導体製造装置用軸受⁹⁾

半導体製造装置用軸受には、低発塵、高剛性、耐焼付き性の向上などが要求される。図18は、ステンレス軸受、組合せセラミック軸受、総セラミック軸受の発塵特性を大気中と真空中で比較したものである。大気中および真空中共に、ステンレス軸受、組合せセラミック軸受、総セラミック軸受の順で発塵特性が優れていることがわかる。したがって、半導体製造装置にセラミック軸受の実用化が拡大していている。

- <試験条件>
 軸受: 608相当
 回転速度: 200r/m
 温度: 室温
 雰囲気圧力: 大気中および真空中 (10^{-4} Pa)
 アキシャル荷重: 20N
 測定粒子径: (大気中) 0.3μm以上,
 (真空中) 0.38μm以上

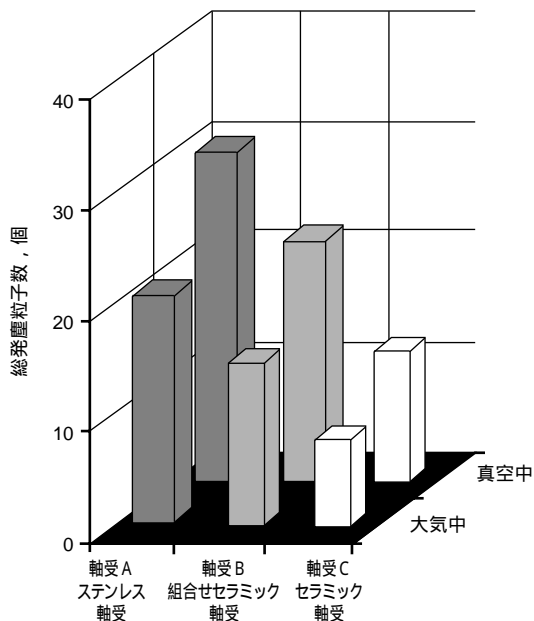


図18 発塵特性

Dust generation characteristics

5.5 燃料噴射システム用セラミック部品¹⁰⁾

セラミック材料の高硬度、高強度および優れた耐摩耗性に着目して、ディーゼルエンジンの燃料噴射システムに玉やころ等のセラミック部品が使用されている。図19および図20は、燃料噴射インジェクタ作動機構図と制御バルブ構成図を示している。この制御バルブに平坦加工を施した2mmのセラミック玉(軸受用)が使用されている。最近のディーゼルエンジン燃料噴射システムは高圧化が進んでおり、セラミックスの高強度と耐摩耗性が必要とされた結果である。

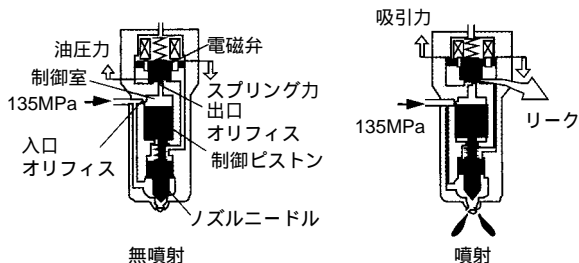


図19 インジェクタ作動機構¹⁰⁾
Operation system of injector

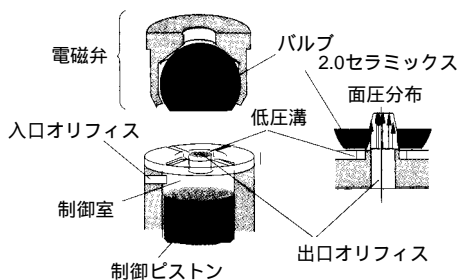


図20 制御バルブ構成¹⁰⁾
Structure of control valve

6. おわりに

ここでは、セラミック軸受の特性、セラミック軸受の構成と用途、セラミック軸受の応用に関する基本性能およびセラミック軸受の応用事例に関して述べてきた。

セラミック軸受の幅広い応用を考える場合、セラミック軸受は従来の鋼製軸受に比較して種々の過酷な条件で使用されることから、それぞれの使用条件に適した軸受構成と潤滑方法を検討することが必要となる。つまり、雰囲気温度、荷重、回転速度、腐食雰囲気の種類および潤滑剤の有無などに合わせて、保持器材料や潤滑方法さらに組合せセラミック軸受の場合は内外輪の材料についても研究開発を進めていくことが大切である。

転がり軸受の高性能化に対する要求は、今後ますます厳しくなっていくものと考えられる。したがって、セラミック軸受の需要はますます拡大していくものと期待している。

参考文献

- 1) 六角和夫, 竹林博明, 西田勝利: Koyo Engineering Journal, no. 133(1988)3.
- 2) 光洋精工(株): 特殊環境用軸受シリーズ セラミック軸受・EXSEV軸受, CAT. No. 208, 11.
- 3) 竹林博明, 谷本 清, 服部智哉: 日本ガスタービン学会誌, vol. 26, no. 10(1998)61.

- 4) 竹林博明: 窒化けい素転がり軸受の基礎と応用の研究, 博士論文(1998)3.
- 5) 竹林博明, 唯根 勉: トライボロジスト, vol. 38, no. 12(1993)1077.
- 6) 谷本 清, 梶原一寿, 柳井邦夫: Koyo Engineering Journal, no. 157(2000)2.
- 7) 向笠正弘: 月刊トライボロジ, no. 136(1998)25.
- 8) 光洋精工(株): 特殊環境用軸受シリーズ セラミック軸受・EXSEV軸受, CAT. No. 208, 42.
- 9) 豊田 泰: Koyo Engineering Journal, no. 150(1996)53.
- 10) 合羽輝彦, 藤村俊夫, 鈴木久信他: TOYOTA Technical Review, vol. 49, no. 2, 12(1999)76.

筆 者



竹林博明*
H. TAKEBAYASHI

* 軸受事業本部 軸受技術センター
航空・精密・EXSEV技術部 工学博士