

# 小径セラミック玉軸受の性能

谷本 清 池田哲雄

## Evaluation of Extra-Small Ceramic Ball Bearings

K. TANIMOTO T. IKEDA

Koyo started developing ceramic materials from the early stage and succeeded to massproduce ceramic ball bearings first in the world 15 years ago. Ceramic ball bearings have been used for various applications like machine tools, semiconductor manufacturing equipment or vacuum apparatus.

By the way, to apply small ceramic ball bearings to the recent needs such as turbochargers, HDD spindles, we are requested to make the bearings more reliable.

In this paper, we show that the general properties of ceramic materials (physical, mechanical, load rating, fatigue life, etc.) have no problem in practical use and then make clear that the small ceramic ball bearings have sufficient reliability in all uses by showing our test results of fatigue and vibration life on them.

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1. はじめに</li> <li>2. セラミック軸受の特性</li> <li>3. セラミック軸受の定格荷重と寿命             <ul style="list-style-type: none"> <li>3.1 セラミック軸受の転がり<br/>疲れ寿命</li> <li>3.2 セラミック軸受の静定格荷重</li> </ul> </li> <li>4. セラミック軸受の強度</li> <li>5. 小径セラミック玉軸受の転がり<br/>疲れ寿命試験結果             <ul style="list-style-type: none"> <li>5.1 試験方法, 条件</li> <li>5.2 試験結果</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>6. 小径セラミック玉軸受の振動<br/>寿命試験結果             <ul style="list-style-type: none"> <li>6.1 試験方法, 条件</li> <li>6.2 試験結果</li> </ul> </li> <li>7. おわりに</li> </ul> |
|--|--|

### 1. はじめに

窒化けい素は転がり軸受の材料として、軽量、耐熱性、耐摩耗性などの優れた特性を有している。当社が開発した窒化けい素を用いたセラミック軸受はこれらの特性を生かし、工作機械、半導体製造装置をはじめ各産業分野にて使用されている<sup>1)~8)</sup>。

最近のニーズにより、ターボチャージャやHDDスピンドル等への用途の拡大を図っている。この場合、高速回転時の回転性能(低トルク、低振動、低昇温)の向上、振動、騒音の長期信頼性の向上等を目的として小径セラミック玉軸受を使用する<sup>9)10)</sup>ため、小径のセラミック玉軸受に、寿命をはじめ高い信頼性が必要となる。

ここでは、まずセラミック軸受の一般的データ(物性、定格荷重と寿命、および強度)を鋼製軸受と比較して問題ないことを述べ、後半で小径玉を

用いた軸受での寿命試験(転がり疲れ寿命、振動寿命)結果を示す。

### 2. セラミック軸受の特性<sup>2)</sup>

セラミック軸受に使用するセラミックス(窒化けい素・ $\text{Si}_3\text{N}_4$ )と一般軸受に使用する高炭素クロム軸受鋼(SUJ2)の特性比較を表1に示す。

セラミック軸受はセラミックス(窒化けい素)の優れた特性によって、幅広い用途がある。

たとえば、セラミックスの優れた耐熱性は高温下での軸受の使用を可能にし、また低密度な特性は軸受の軽量化と高速回転化での転動体(玉またはころ)の遠心力の低減に効果を発揮する。さらに、セラミックスの結合状態が共有結合であることから、軸受高速回転時の油膜切れによる耐焼付き性の向上が図れる。

表1 セラミックス(窒化けい素)と高炭素クロム軸受鋼の特性比較

Characteristics of ceramics compared with steels

項 目 単 位	セラミックス (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	軸受鋼 (SUJ2)
耐 熱 性,	800	180
密 度, g/cm <sup>3</sup>	3.2	7.8
線 膨 張 係 数, 1/	3.2 × 10 <sup>-6</sup>	12.5 × 10 <sup>-6</sup>
ピッカース硬さ, HV	1 400 ~ 1 700	700 ~ 800
縦 弾 性 係 数, GPa	310	210
ポ ア ソ ン 比	0.29	0.3
耐 食 性	良	不良
磁 性	非磁性体	強磁性体
導 電 性	絶縁体	導電体
素材の結合状態	共有結合	金属結合

### 3. セラミック軸受の定格荷重と寿命<sup>2)</sup>

セラミックス(窒化けい素)は高炭素クロム軸受鋼に比べて高弾性であることから、セラミック軸受の転動体と軌道との接触面での応力は、鋼製軸受の応力よりも高くなる。

Koyoではセラミック軸受の寿命試験、静的荷重を負荷したときのセラミック材料の荷重限界、高炭素クロム軸受鋼の弾性変形量の評価などから、Koyoセラミック軸受の動定格荷重と静定格荷重を表2のように定めている。

### 3.1 セラミック軸受の転がり疲れ寿命

総セラミック軸受と鋼製軸受の寿命試験に関して、試験軸受諸元、条件を表3、4に、試験装置を図1に、寿命試験結果の一例を図2に示す。また寿命に至ったセラミック軸受のセラミック球の表面状態を図3に示す。

セラミック軸受は鋼製軸受と同等以上の寿命があり計算値以上の寿命が確認できた。

また寿命に至ったセラミック軸受を調査したところ図3に示すように、いずれもはく離現象が見られた。これは一般の鋼製軸受にみられる転がり疲れによるはく離と同じ形態である。

これらのことから、セラミック軸受の動定格荷重は同一寸法の鋼製軸受の動定格荷重を採用してもよいことが分かる。

表3 試験軸受諸元

Test bearings

呼び番号	材料(外輪・内輪・玉)	寸法, mm
NC6206	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (セラミックス)	30 × 62 × 16
6206	SUJ2(軸受鋼)	(内径 × 外径 × 幅)

表4 試験条件

Test conditions

項 目	条 件
荷 重	5 800N
回 転 数	8 000min <sup>-1</sup>
潤滑油	エアロシェルタービンオイル 500
温 度	70 ± 2

表2 セラミック軸受の動定格荷重と静定格荷重

Load rating for ceramic bearings

	動定格荷重	静定格荷重	
		静定格荷重	静定格荷重の考え方
総セラミック軸受	鋼製軸受(SUJ2)と同じ	鋼製軸受(SUJ2)と同じ	クラック発生荷重
組合せセラミック軸受 外輪・内輪: SUJ2 転動体: セラミックス	鋼製軸受(SUJ2)と同じ	鋼製軸受(SUJ2)の0.85倍	永久変形量

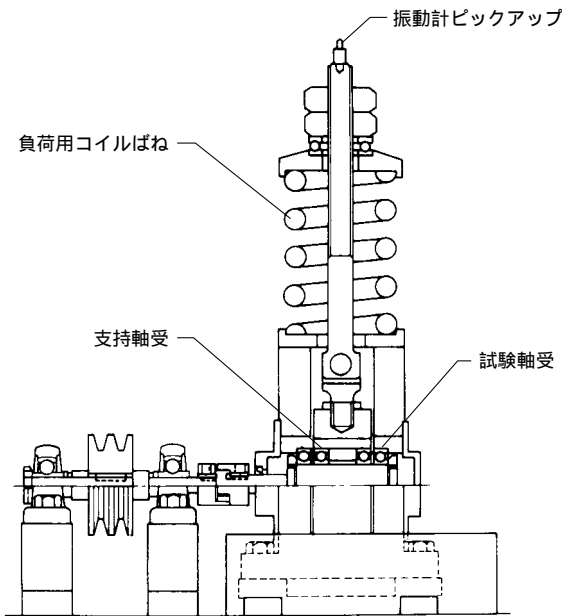


図1 試験装置  
Test equipment

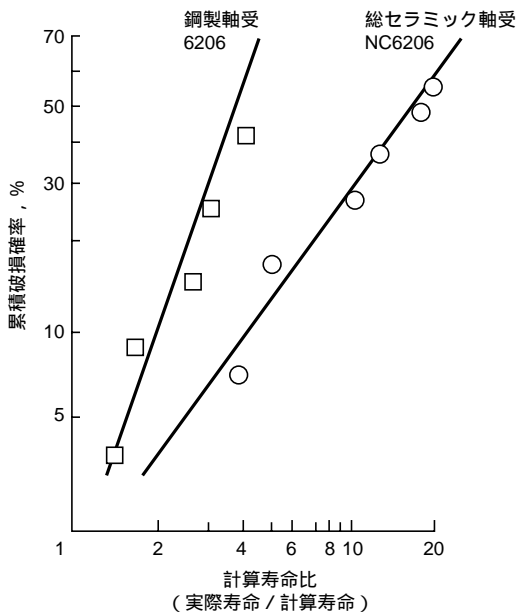


図2 総セラミック軸受と鋼製軸受の  
転がり寿命試験結果  
Rolling fatigue life test results

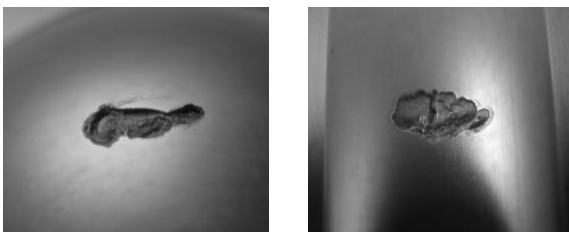


図3 セラミック球(左)とセラミック内輪(右)に  
生じたはく離

Surface appearance (flakings on the ball and inner race)

### 3.2 セラミック軸受の静定格荷重

鋼製軸受の場合、静的に負荷できる許容荷重は基本静定格荷重としてJIS B 1519に定められている。

JISによると『基本静定格荷重とは、最大荷重を受けている転動体と軌道との接触部中央において、次に示す計算接触応力に対応する静荷重をいう。

- 自動調心玉軸受：4 600 MPa
- その他の玉軸受：4 200 MPa
- こ ろ 軸 受：4 000 MPa』

セラミック軸受の場合、セラミックス(窒化けい素)は脆性素材であり、永久変形がほとんど期待できないので、JISの静定格荷重をそのまま採用する事はできない。

#### 3.2.1 総セラミック軸受の静定格荷重

セラミックスは、過大な荷重に対して最終的には破壊するが、破壊の前にクラックが発生する。

外輪・内輪・玉にセラミックスを用いた総セラミック軸受では、セラミックスに発生するクラックに着目して静定格荷重を検討した。

クラック発生荷重の測定方法を図4に、鋼製軸受の静定格荷重(最大接触応力を4 600MPaとして計算)の比較測定結果を図5に示す。

この結果、総セラミック軸受のクラック発生荷重は鋼製軸受の静定格荷重に比べて十分に大きいので、総セラミック軸受の静定格荷重は鋼製軸受の静定格荷重を採用してもよいことがわかる。

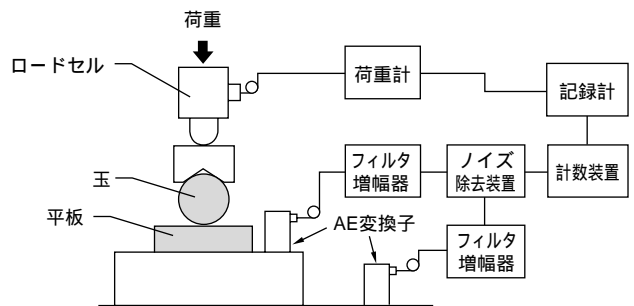
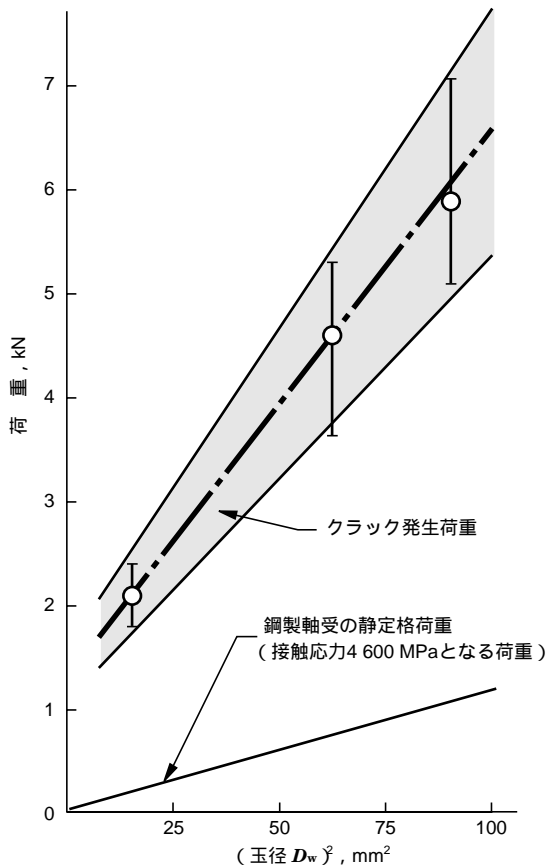


図4 クラック発生荷重の測定方法  
Measuring system of the cracking load



クラック発生荷重と鋼製軸受の静定格荷重の比較

図5 総セラミック軸受のクラック発生荷重測定結果  
Results of cracking load test

### 3.2.2 組合せセラミック軸受の静定格荷重

組合せセラミック軸受(外輪・内輪：高炭素クロム軸受鋼，転動体：セラミックス)の静定格荷重は，鋼製の外輪と内輪が永久変形するので，鋼製軸受の静定格荷重の考え方を採用することができる。

高炭素クロム軸受鋼の玉とセラミック球を図6に示す方法で，それぞれ高炭素クロム軸受鋼の平板に押し付けたときの永久変形量(圧痕深さ)の測定結果を表5に示す。

この結果，セラミック球には永久変形がみられないこと，またセラミック球を使用したときの鋼製の平板に発生する永久変形量は，鋼球を使用したときに玉および平板に発生する永久変形量の総和の約1.2倍になることが分かった。

したがって，組合せセラミック軸受の静定格荷重は，鋼製軌道輪の変形に制限される。

よって，Koyoでは組合せセラミック軸受の静定格荷重は，鋼製軸受の静定格荷重の0.85倍としている。

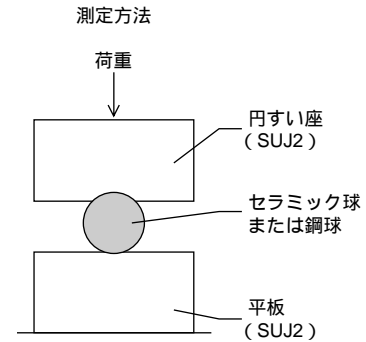


図6 圧痕付加試験方法  
Test method of brinells

表5 セラミック球と平板との永久変形量(圧痕深さ)の測定結果  
Amounts of brinells on ceramics and steels

荷重 kN	永久変形量(平均), mm		永久変形量 (総和平均), mm
	平板(軸受鋼)	玉	
セラミック球	0.65	0.5	0.5
	1.3	1.9	1.9
	2.6	5.2	5.2
	3.9	9.3	9.3
鋼球	0.65	0.4	0.4
	1.3	1.3	1.41
	2.6	4.0	4.41
	3.9	6.8	7.98

## 4. セラミック軸受の強度<sup>5)</sup>

衝撃荷重に対するセラミック軸受の強度について，ここでは，セラミック球を用いて図7，8に示す静的な圧砕試験と衝撃荷重による圧砕試験を実施した。

セラミック球を静的に圧砕試験した結果と，2個のセラミック球を治具で保持した上から重錘を落下させる方法での衝撃荷重による圧砕試験の結果を図9に示す。

この結果，セラミック軸受は衝撃荷重に対しても十分な強度を持ち，その強度は静的な荷重に対する強度とほとんど同一であることがわかった。

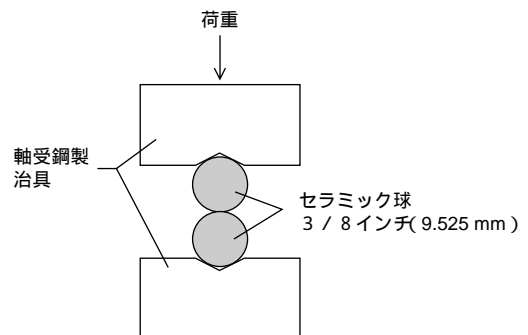


図7 静的圧砕試験方法  
Test method of static ball crushing

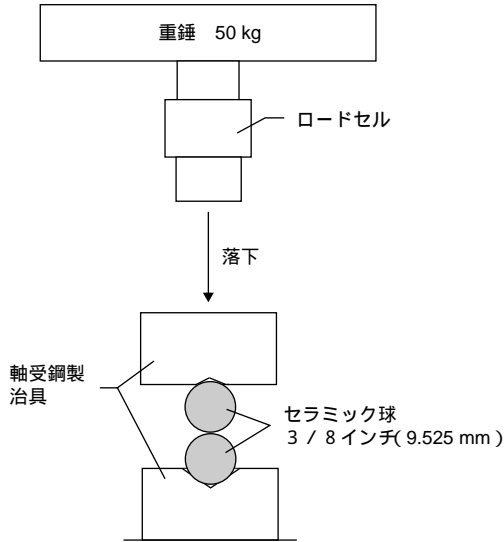


図8 衝撃圧砕試験方法  
Test method dynamic ball crashing

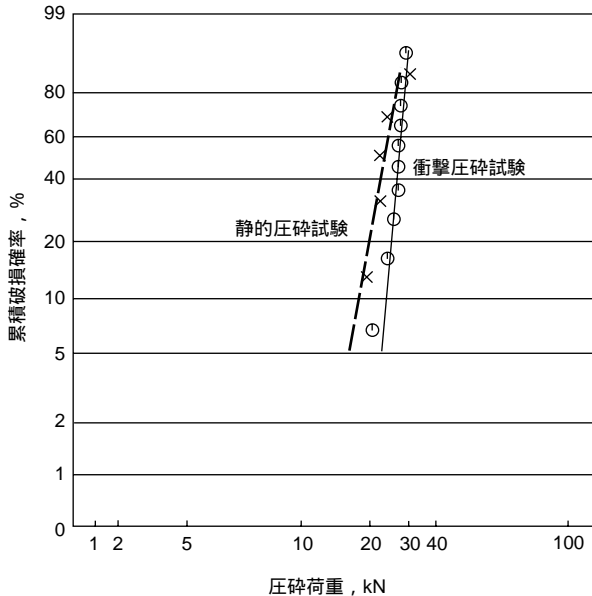


図9 セラミック球の静的圧砕荷重と衝撃圧砕荷重の比較  
Results of ball crushing load test

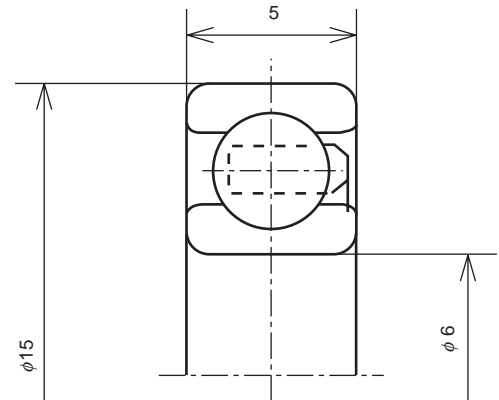
### 5. 小径セラミック玉軸受の転がり疲れ寿命試験結果

次に玉径 7 / 64 ( 2.778mm ) のセラミック球を組み込んだ小径セラミック玉軸受696を用いた転がり疲れ寿命試験結果を示す。

#### 5.1 試験方法, 条件

試験軸受を図10に示す。内外輪が高炭素クロム軸受鋼(SUJ2), 保持器が樹脂, 玉がセラミックス(窒化けい素 $Si_3N_4$ )のセラミック玉軸受である。セラミック球は玉径7 / 64( 2.778mm ), 玉数7個を組み込んでいる。

試験装置を図11に示す。基本構造は先に示した図1と同様であるが, 試験軸受の小径化に対し, コンパクト設計とした。試験軸受は4つを1軸に組み込み, カップリングを介して回転を与え, 荷重は負荷用コイルばねによって中央の2つの軸受のハウジングを持ち上げることで, ラジアル荷重を与えた。



内外輪: 軸受鋼  
保持器: 樹脂  
玉: セラミックス  
(玉径7 / 64 ( 2.778mm ), 玉数7個)

図10 試験軸受(696)  
Test bearing (696)

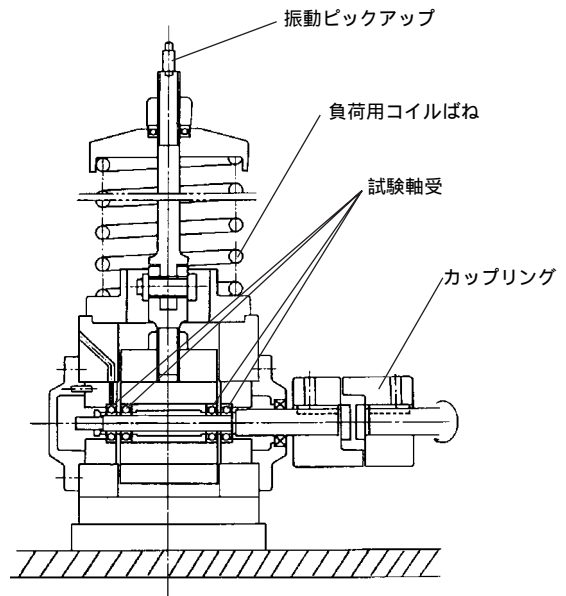


図11 寿命試験装置  
Test equipment

試験条件を表6に示す。軸受1個当たりのラジアル荷重0.9kN( 鋼製の玉軸受の基本動定格荷重の50%強 ) の高荷重下( 最大接触面圧5.6GPa ) で, 寿命試験を実施した。試験方法は, サドンデス $n=4$ , 400時間の定時間打ち切りとした。寿命の判定は, 初期の振動値の5倍以上で寿命と判断した。



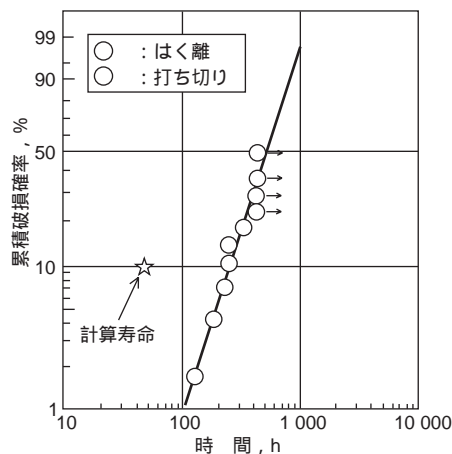
表6 試験条件  
Test conditions

項目	条件	
潤滑	方法	強制循環給油
	油種	スピンドル油 (JISマシン7相当)
	温度	常温
	動粘度	$6.1 \sim 7.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (40 )
ラジアル荷重	0.9 kN / 軸受 1 個	
最大接触面圧	5.6 GPa	
回転速度	$1200 \text{ min}^{-1}$	
計算寿命	47h (接触面圧考慮)	
試験方法	サドンデス $n=4$	
時間	400 h 定時間打ち切り	
損傷判定方法	振動値 > 初期値の 5 倍	

5.2 試験結果

寿命試験結果を図12に、寿命試験完了品の内輪、セラミック球の表面状態を各々代表して図13、14に示す。試験結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 計10回の試験で、4回は400時間以上の定時間打ち切りになった。
- 2) 残りの6回は、定時間打ち切り前に、振動により損傷判定された。軸受の損傷は、すべて内輪のはく離(図13)で、セラミック球の損傷はなかった(図14)。
- 3) 耐久時間は、すべて計算寿命の47時間を上回り、短いものでも2.5倍以上であった。
- 4) ワイブルスロープは2.7、 $L_{10}$ 寿命は249時間、 $L_{50}$ 寿命は496時間になった。
- 5)  $L_{10}$ 寿命は、計算寿命の5倍以上になった。



ワイブルスロープ	2.7
$L_{10}$ 寿命	249h
$L_{50}$ 寿命	496h

図12 寿命試験結果  
Rolling fatigue life test results

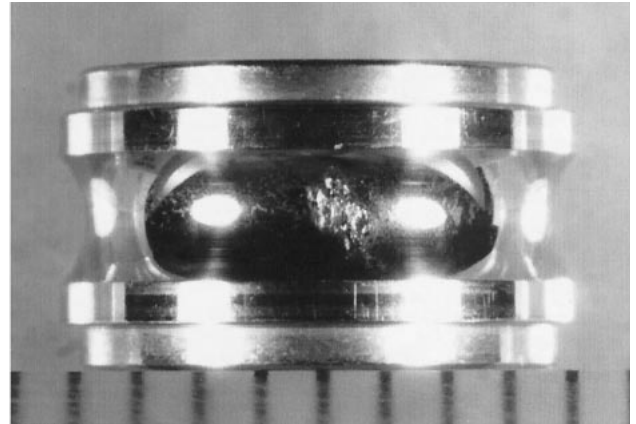


図13 内輪  
Appearance of inner raceway (flaking)

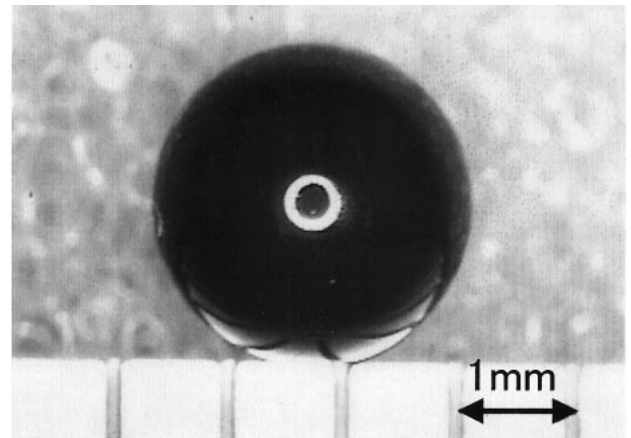


図14 セラミック玉  
Appearance of ceramic ball

6. 小径セラミック玉軸受の振動寿命試験結果<sup>10)</sup>

次に、玉径 2 mm のセラミック球を組み込んだ小径セラミック玉軸受695を用いたオイルおよびグリース潤滑下での振動寿命試験結果を示す。

6.1 試験方法、条件

試験軸受と、軸受諸元を図15に、試験条件を表7に示す。

測定項目として、軸受2個組合せ状態での振動を測定した。(  $7200 \text{ min}^{-1}$  , 常温 )

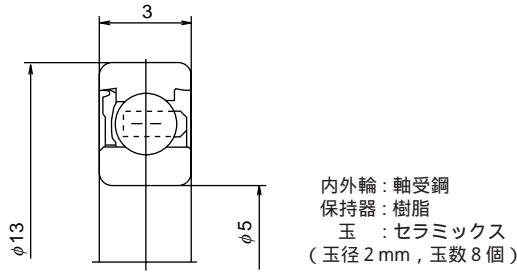


図15 試験軸受  
Test bearings

表7 試験条件  
Test conditions

潤滑条件	オイル	1 mg滴下
	グリース	15~20mg
回転数	外輪	7 200min <sup>-1</sup>
温度	70 (雰囲気温度)	
予圧	15N (2個組合せ)	

6.2 試験結果

オイル潤滑下での試験結果を図16に、グリース潤滑下での試験結果を図17に示す。また、オイル潤滑条件での試験完了品の玉表面の状態を各々代表して図18, 19に示す。

1) オイル潤滑(微量油量)

鋼製玉軸受の振動値は、1 000 hまでに全てロックしたのに対しセラミック玉軸受のロックまで3倍以上回転した。

鋼製玉軸受の玉表面(図18)とセラミック玉軸受のセラミック球表面(図19)を比較すると、鋼球は表面が損傷(なし地, 変色, 凝着摩耗など)していたがセラミック球には損傷が認められなかった。

2) グリース潤滑

鋼製玉軸受の振動値は、10 000 hで初期値の約3倍に増大したのに対し、セラミック玉軸受の増大量は約10%以下であった。

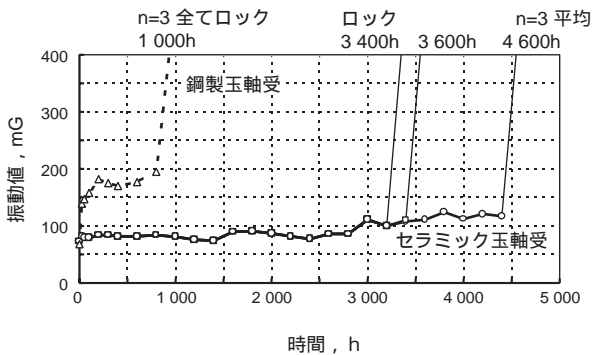


図16 オイル潤滑耐久試験結果(微量油量)  
Test results (few oil lubrication)

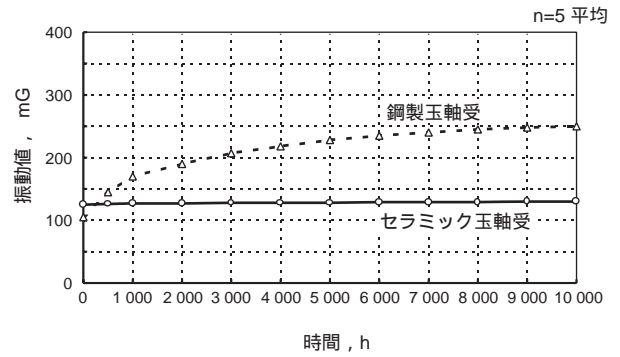


図17 グリース潤滑耐久試験結果  
Test results (grease lubrication)

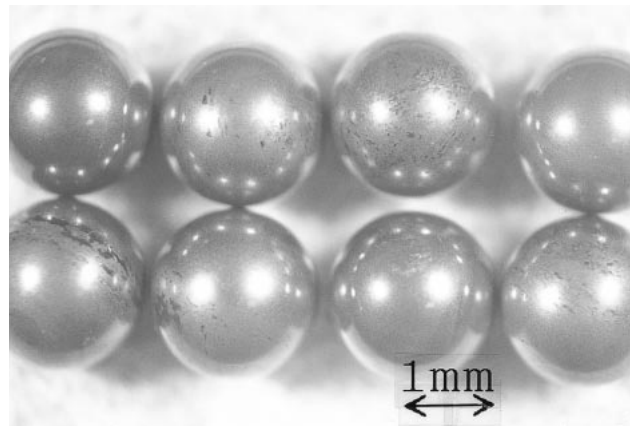


図18 鋼球  
Steel balls

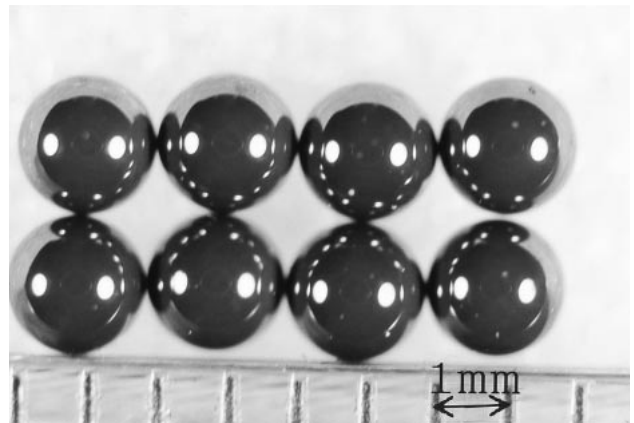


図19 セラミック球  
Ceramic balls

以上、小径セラミック玉軸受は、特に微量油量の潤滑下での耐久性に優れていることがわかった。これは貧潤滑下での部分的油膜破断時に金属間接触をさけることができ、面あれ進行をおさえることができるためと考えられる。

## 7. おわりに

小径セラミック玉軸受の用途拡大にあたって、セラミック球を用いることにより以下のことが明らかとなった。

- 1) 定格荷重、強度などの基本特性は問題なく、転がり疲れ寿命も、計算寿命の5倍以上を示した。
- 2) 振動寿命は
  - ① オイル貧潤滑下で全鋼製軸受の3倍以上
  - ② グリース潤滑下で振動増大量は鋼製玉軸受の1/30以下となる。

以上、小径セラミック玉軸受の実用上の優位性が確認でき、今後ますます用途拡大が図れると考えられる。

## 参考文献

- 1) 六角和夫：KOYO Engineering Journal, no.139 (1991) 16.
- 2) KOYO Engineering Journal, no.145 (1994) 24.
- 3) 橋本紘造，佐藤 寛，本橋信綱，野村達也：KOYO Engineering Journal, no.145 (1994) 102.
- 4) 北村和久：KOYO Engineering Journal, no.147 (1995) 20.
- 5) 北村和久：KOYO Engineering Journal, no.152 (1997) 33.
- 6) 竹林博明：トライボロジスト，vol.34, no.2 (1989) 119.
- 7) 谷本清：FC Report vol.12 no.8 (1994) 211.
- 8) 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.102 (1998) 55.
- 9) 瀧井裕一：月間トライボロジ，no.141 (1999) 37.
- 10) 向笠正弘：月間トライボロジ，no.136 (1998) 25.

## 筆 者



谷本 清\*  
K. TANIMOTO



池田哲雄\*  
T. IKEDA

\* 総合技術研究所 基礎技術研究所 軸受技術開発部