

# 特殊環境用軸受( Koyo EXSEV軸受 )について( 3 )

## - セラミック( 窒化けい素 )軸受の基礎性能 -

竹林 博明

### Bearings for Extreme Special Environments(3)

#### -Basic Performance of Ceramic (Silicon Nitride) Bearings-

H. TAKEBAYASHI

Outlines of Koyo EXSEV bearing series (bearings for extreme special environments) have been explained serially from the Koyo Engineering Journal no. 156. Herein basic performance of ceramic (silicon nitride) bearing is shown. That is, static load characteristic, life, the influence of scratch and flaking and fitting for ceramic bearing are described.

**Key Words:** bearing, special environment, silicon nitride, life, fatigue, performance

## 1. はじめに

最近の技術の進歩とともに、転がり軸受(以下軸受と称す)の使用される環境や条件は過酷でかつ多様化してきている。そのため各種産業分野からは、特殊な環境や厳しい条件で使用できる軸受が望まれている。当社ではこれらの要望に対応するため、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。

本誌のNo. 156より、特殊環境用軸受「Koyo EXSEV軸受」についてシリーズで紹介している。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に関して紹介する。セラミック材料に関しては、No. 156で窒化けい素( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )、ジルコニア( $\text{ZrO}_2$ )、炭化けい素( $\text{SiC}$ )、アルミナ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )などの各種セラミックスの、軸受への適用性について述べた。そこでここでは、セラミックスの中で軸受材料として最も優れた特性を示す窒化けい素にしぼり、軸受に適用した場合の基礎性能について紹介する。具体的には、セラミック(窒化けい素)軸受の静的負荷能力、転がり疲れ寿命、表面傷およびはく離の寿命に与える影響、はめあいなどに関して述べる。

## 2. 窒化けい素材料

ここでは、軸受用窒化けい素の製造工程と材料特性について紹介する。

### 2.1 製造工程

図1に、窒化けい素の一般的な製造工程を示す。窒化けい素は製造方法や製造条件が異なれば、密度や強度などの特性が大幅に異なってくる。そこで、軸受用窒化けい素の製造においては、成形、焼結、加工などの工程を厳密に管理している。

$\text{Si}_3\text{N}_4$



焼結助剤

図1 軸受用窒化けい素の製造工程  
Manufacturing process of silicon nitride

#### (1)原料

原料は 型の窒化けい素( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )微粉末と、焼結助剤である。焼結助剤としては、アルミナ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、イットリア( $\text{Y}_2\text{O}_3$ )などを用いている。

#### (2)調合

原料粉末に溶剤を加えて混合機(ボールミル)で混合する。この工程では、スラリーの状態で

- 窒化けい素粉末と焼結助剤を均一に混合する .
- (3)乾燥造粒  
混合されたスラリーにバインダを入れ、スプレードライヤー装置を使用し、スラリー状のものから一定粒径の球状粒子とする .
- (4)成形  
造粒粉末を金型に充填した後、単軸圧縮して成形する .
- (5)脱脂  
脱脂炉内で成形体を加熱し、バインダなどの有機物を除去する .
- (6)焼結  
次工程のHIP (Hot Isostatic Pressing) 工程で、ガス圧を成形体に十分作用させて開孔のない焼結体を製造する .
- (7)HIP  
高温、高压ガス雰囲気中で緻密な焼結体を得る .
- (8)研削加工  
HIP処理により得られた焼結体を最終製品の寸法、表面状態に加工する . 加工には主にダイヤモンド砥石を使用する .
- (9)検査  
加工後の表面にクラックやピンホールがないことを確認する .

## 2.2 特性値

表1に、窒化けい素と軸受鋼の特性比較を示す . 窒化けい素は軸受鋼に比べて、密度が約40%、縦弾性係数が約1.5倍、線膨張係数が約25%といった特徴を持っている . また破壊靱性値が軸受鋼に比べて小さいことより、極めてもろい材料であることがわかる .

表1 窒化けい素と軸受鋼の特性比較

Comparison of characteristics between silicon nitride and high carbon chromium bearing steel (SUJ2)

項目	試験片	窒化けい素	軸受鋼
密度, g/cm <sup>3</sup>		3.21	7.87
硬さ, HV		1 800	740
ヤング率, MPa		31.4 × 10 <sup>4</sup>	20.5 × 10 <sup>4</sup>
ポアソン比		0.26	0.28
線膨張係数, 1/		3.2 × 10 <sup>-6</sup>	11.8 × 10 <sup>-6</sup>
曲げ強度, MPa		1 040	5 400
破壊靱性, MPa · m <sup>-1/2</sup>		7	約20
8 mm玉の圧碎荷重, kN		12.9	33.2

なお窒化けい素の特性は、密度：アルキメデス法、硬さ：ピッカース硬度計 (JISR1610)、縦弾性係数、ポアソン比：超音波パルス法 (JISR1602)、曲げ強度：3点曲げ試験 (JISR1601)、破壊靱性値：IF (Indentation Fracture) 法 (JISR1607)、玉の圧碎荷重：図2の方法で測定した値である .

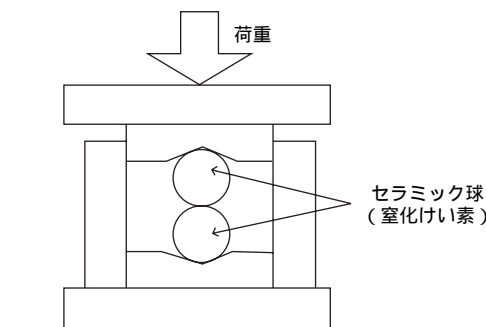


図2 圧碎試験方法

Test method of ball crushing load

## 3. セラミック軸受の静的負荷能力<sup>1)</sup>

転がり軸受に静的に負荷できる許容荷重は、基本静定格荷重として定められており、JISB1519 (1989)によると、「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ける、次に示す計算接触応力に対応する静ラジアル荷重

- 自動調心玉軸受 : 4 600MPa
- その他のラジアル玉軸受 : 4 200MPa
- ラジアルころ軸受 : 4 000MPa

と定義されている .

これは、これらの接触応力の下では転動体と軌道の総永久変形量が、転動体の直径のおよそ0.0001倍になることより、軸受の正常な回転が行えなくなるからである . つまり鋼製の転がり軸受では、許容荷重を軸受の永久変形量から定めている .

さて、塑性変形がほとんど期待できない窒化けい素のような脆性材料で軸受を製作した場合、JISB1519の静定格荷重の基準は採用できない . 窒化けい素などの脆性材料の平面に玉等の圧子を押すつくと、接触部分の境界に接触円の径方向の引張応力に起因する、ヘルツクラックと呼ばれるリング状のき裂が生じることはよく知られている<sup>2)</sup> . そこで当社ではこのクラックの発生する荷重から、総セラミック軸受の静定格荷重を検討した .

### 3.1 総セラミック軸受の静定格荷重

ここでは、内外輪・玉に窒化けい素を用いた総セラミック軸受に関して、窒化けい素に発生する

クラックに着目して許容荷重を検討する。(窒化けい素は負荷を受けると永久変形がほとんど発生せずクラックが発生することより)

図3に、クラック発生荷重の測定方法を示す。試料としては、窒化けい素平板と窒化けい素製の玉を用いた。試料に徐々に荷重を加えながら、アコースティックエミッションを検出することによりクラック発生荷重を求めた。試験には、5 / 32インチ、5 / 16インチ、3 / 8インチの3種類の玉を使用した。

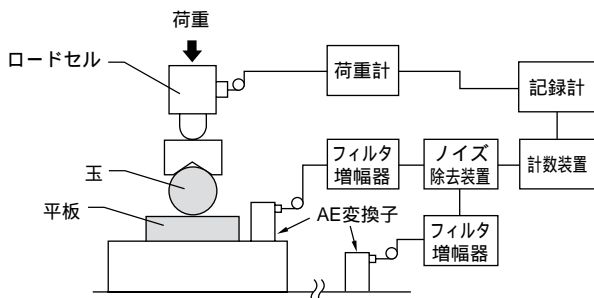


図3 クラック発生荷重の測定方法  
Measuring method of the cracking load

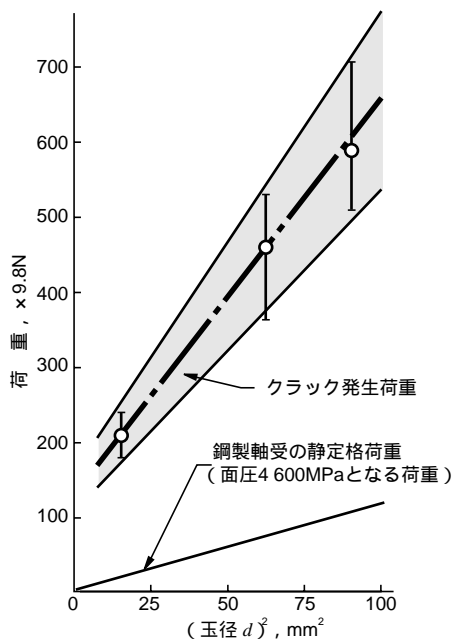


図4 クラック発生荷重と静定格荷重の比較  
Comparison of cracking load and static load rating

図4は、クラック発生荷重の測定結果と、最大接触応力を4600MPaとして計算により求めた静定格荷重の比較を行ったものである。この結果より、窒化けい素を用いた転がり軸受のクラック発生荷重を基準とした許容荷重は、鋼製の転がり軸受の静定格荷重よりかなり大きくなっていることがわかる。なお、窒化けい素平板に窒化けい素玉を押し込んだ場合、クラックが発生するのはすべて窒化けい素平板の方であった。

したがって、窒化けい素を使用した総セラミック軸受は、鋼製軸受の静定格荷重に十分耐えることができ、静定格荷重の面からは実用上何ら問題ないことがわかる。

### 3.2 セラミック軸受の静定格荷重の考え方

窒化けい素を用いたセラミック軸受には、主に内外輪、玉に窒化けい素を用いた総セラミック軸受と、内外輪が軸受鋼で玉に窒化けい素を用いた組合せセラミック軸受がある。

表2は、当社のセラミック軸受の静定格荷重に対する考え方を示したものである<sup>3)</sup>。総セラミック軸受の静定格荷重に関しては、今のところISO、JISなどで定められたものはない。そこで当社では、前項で述べたように窒化けい素のクラック発生荷重に着目して検討した結果、総セラミック軸受の静定格荷重は軸受鋼(SUJ2)製軸受と同じ値とすることとしている。また、組合せセラミック軸受は、軸受鋼の内外輪が永久変形することより軸受鋼製軸受の静定格荷重の考え方(JISB1519)を採用することができる。その結果、当社では組合せセラミック軸受の静定格荷重は、軸受鋼製軸受の0.85倍としている。

表2 セラミック軸受の静定格荷重  
Static load rating of ceramic rolling bearing

軸 受	静定格荷重の考え方	Koyoの静定格荷重
総セラミック軸受	クラック発生荷重	鋼製軸受と同じ (SUJ2)
組合せセラミック軸受 玉 : 窒化けい素 内・外輪 : SUJ2	永久変形量	鋼製軸受の0.85倍 (SUJ2)

## 4. セラミック軸受の転がり疲れ寿命<sup>4)</sup>

ここではセラミック軸受の寿命試験結果を紹介する。具体的には、内外輪、玉ともに窒化けい素で製作した総セラミック軸受、内外輪が軸受鋼で玉のみ窒化けい素を用いた組合せセラミック軸受、内外輪、玉ともに軸受鋼で製作した鋼製軸受の3種類の寿命試験結果を述べる。

### 4.1 試験軸受と試験方法

図5に試験軸受の寸法、表3に試験軸受の構成を示す。試験軸受は深溝玉軸受6206相当で、表3に示す3種類の軸受を用いた。内外輪、玉が窒化けい素の総セラミック軸受NC6206、内外輪がM50で玉が窒化けい素の組合せセラミック軸受3NC6206、内外輪、玉がM50の鋼製軸受6206の3種類である。3種類の軸受ともに保持器は、

AMS6414に銀メッキを施したものを使用している。使用した玉は、寸法が3/8 ( 9.525 )で個数は9個である。なお3種類の軸受は、内外輪の軌道曲率、内外輪の軌道および玉表面の粗さ、軸受の内部すきま等ほぼ同じように製作されている。

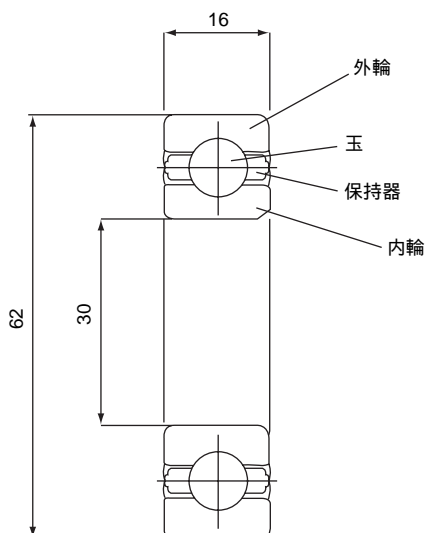


図5 試験軸受の寸法  
Dimensions of test bearing

表3 試験軸受の構成  
Materials of test bearings

種類	総セラミック軸受	組合せセラミック軸受	鋼製軸受
項目	NC6206	3NC6206	M50製6206
材質	内・外輪	窒化けい素 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	AISI M50
	玉	窒化けい素 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	AISI M50
	保持器	AMS6414 銀メッキ	AMS6414 銀メッキ

図6に試験方法，表4に試験条件を示す。試験には，ラジアル形の寿命試験機を用いている。荷重はコイルバネによって負荷し，潤滑油の温度は70 である。1回の試験には軸受を4個使用し，図6に示すように両端の2個に試験軸受を組み込んでいる。試験軸受の異常は振動加速度計により検出し，振動値が初期の2倍になると試験機が停止するようにしている。また，総セラミック玉軸受内輪と鋼製軸には約14 μ mのしめしろを付与しており，セラミック内輪内径に発生する円周応力は約110MPaである。

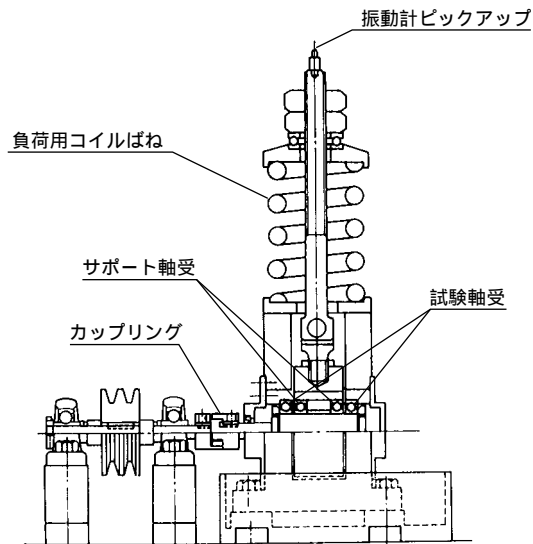


図6 試験方法  
Test equipment

表4 試験条件  
Test conditions

項目	条件
荷重, N	5 800
回転数, r/m	8 000
油	エアロシェルタービンオイル#500
温度,	70 ± 2

#### 4.2 試験結果

図7に寿命試験結果を示す。総セラミック軸受NC6206と組合せセラミック軸受3NC6206，鋼製軸受6206の寿命比較を行ったもので，1回の試験に試験軸受を2個使用し，Sudden Deathの手法を用いてワイブル確率紙にプロットしている。試験荷重5 880Nでは，3種類の軸受に発生する最大接触応力Pmaxは，総セラミック軸受Pmax = 4.3Gpa，組合せセラミック軸受Pmax = 3.8Gpa，鋼製軸受Pmax = 3.3Gpaである。図7の結果から，総セラミック軸受NC6206と組合せセラミック軸受3NC6206は，鋼製玉軸受6206に比べて同じ荷重下で最大接触応力が高くなっているにもかかわらず，鋼製軸受と同等もしくはそれ以上の転がり疲れ寿命を有していることがわかる。また，総セラミック軸受と組合せセラミック軸受の寿命による破損形態は，軸受鋼で観察される転がり疲れはく離と同様の形態を呈している。したがって，総セラミック軸受と組合せセラミック軸受の寿命は，鋼製軸受と同様に振動加速度計によって検出できる。

以上より，当社では総セラミック軸受および組合せセラミック軸受の寿命に関しては，動定格荷重は鋼製軸受と同じ値とし，鋼製軸受の寿命計算式を用いて寿命予測を行っている。

試料	荷重, N	回転数, r/m	L <sub>10</sub> 寿命, h	L <sub>50</sub> 寿命, h	ワイブルスロープ
○ NC6206	5 880	8 000	82.6	589.2	0.95
× 6206	5 880	8 000	46.2	269.5	1.06
★ 3NC6206	5 880	8 000	49.4	294.6	10.5

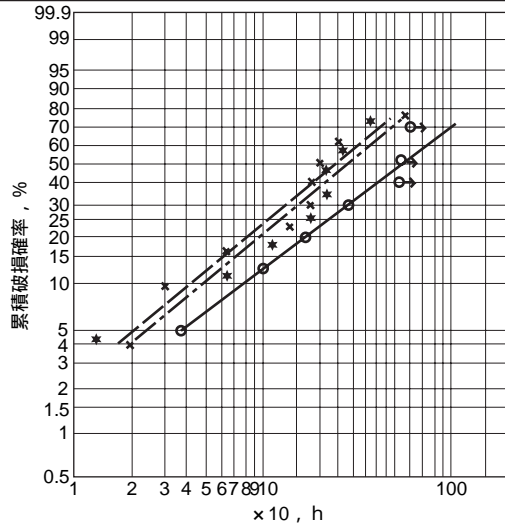


図7 寿命試験結果  
Test results

## 5. 表面傷およびはく離の寿命に与える影響<sup>5)</sup>

脆性材料である窒化けい素を使用したセラミック軸受では、転走面に傷が存在したりはく離が発生した場合、強度や信頼性の低下が懸念される。つまり、転走部に傷のあるセラミック軸受を用いた場合や、セラミック軸受を使用中はく離が発生した場合は、極めて短時間で軸受の大きな破損につながるのではないかと心配がある。

ここでは、スラスト形軸受試験機を用いて窒化けい素平板上の傷が寿命に与える影響について調査した結果と、ラジアル形軸受試験機により、総セラミック軸受の玉のはく離が軸受の寿命に及ぼす影響について検討した結果を紹介する。

### 5.1 スラスト形軸受試験による結果

ここでは、窒化けい素平板に線条痕(人工欠陥)を付与して寿命試験を行い、線条痕の影響について検討した結果を示す。図8に窒化けい素平板上の線条痕を示す。線条痕の大きさは幅40 μmで、マイクロピッカーダイヤモンド圧子を窒化けい素平板に押し込み、窒化けい素平板を圧子に対して垂直に移動させることによって作製している。

図9に試験方法、表5に試験条件を示す。試験は窒化けい素平板上を窒化けい素玉が荷重を受けながら転走し、窒化けい素平板上の線条痕を窒化けい素玉が必ず通過するようにしている。このとき表5の荷重条件より、窒化けい素平板と窒化け

い素玉の間に発生するヘルツの最大接触応力は5 800MPaとなる。なお振動加速度計によって試験中の振動を検出しており、初期の振動値の2倍になると試験が停止するようにしている。

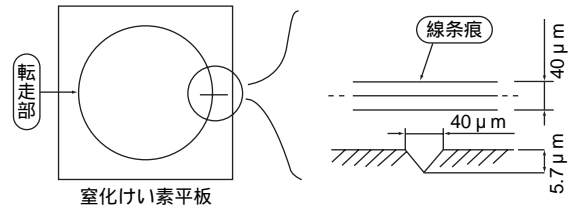


図8 窒化けい素平板上の線条痕  
Linear scratch on silicon nitride flat plate

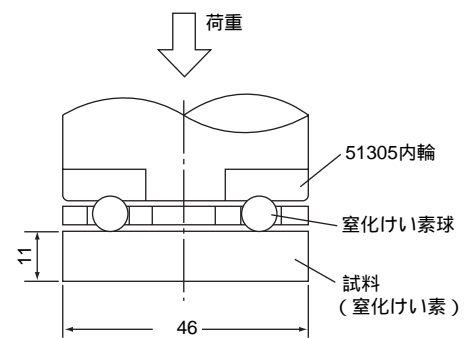


図9 試験方法  
Thrust-type test method

表5 試験条件  
Test conditions

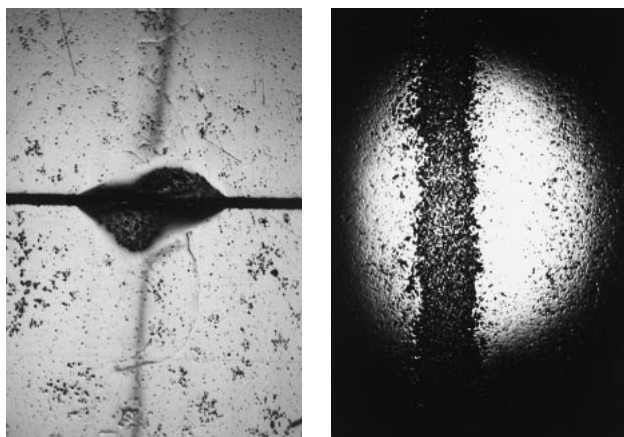
項目	条件
荷重, N	2 450
回転数, r/m	1 200
潤滑油	エアロシエルタービン #500
玉数, 個	3
玉径	3/8" (= 9.525)
最大接触応力, MPa	5 800

表6に試験結果、図10に試験後の窒化けい素平板の線条痕部と窒化けい素玉表面の外観を示す。表6の試験結果から、窒化けい素平板に幅40 μmの線条痕を作製して寿命試験を行っても、250時間継続して試験が可能であった。したがって、線条痕を起点とするような大きな損傷は発生せず、また振動も初期の値から極端に大きくなることかわかる。次に、図10から、窒化けい素平板上の線条痕両側には摩耗が発生しているのが認められる。この摩耗は寿命試験の過程で線条痕上を窒化けい素玉が繰り返し転走することにより発生・進展したものと考えられる。また、窒化けい素玉表面にも同様に発生したと思われる摩耗が認められる。

表6 試験結果

Test results

No.	試験時間, h	試験結果
1	250	打切り
2	250	打切り
3	250	打切り



(1)窒化けい素平板の線条痕部 (2)窒化けい素玉の表面

図10 試料の外観(試験結果)

Appearances of specimen (test results)

以上のことより、線条痕のような傷の存在する窒化けい素平板で転がり寿命試験を行うと、短時間では傷が原因となる大きな破損には至らないこと。また、線条痕の両側と窒化けい素玉表面に摩耗が発生し、それが進展することなどが明らかとなった。

### 5.2 ラジアル形軸受試験による結果

ここでは、玉にはく離の発生した総セラミック軸受を用いて寿命試験を行い、はく離した玉が軸受に与える影響について調査した結果を示す。

図5(4.1項参照)に試験軸受の寸法を示す。試験軸受は深溝玉軸受6206相当であり、内外輪・玉ともに窒化けい素の総セラミック軸受である。試験軸受には窒化けい素玉が9個使用されており、そのうち1個は、はく離の発生した玉を使用している。図6(4.1項参照)に試験方法、表4(4.1項参照)に試験条件を示す。試験は軸受4個を用いて行い、ここではそのうちの1個が試験軸受である。振動加速度計により試験中の振動を測定しており、振動が初期の2倍になると試験機が停止するようにしている。

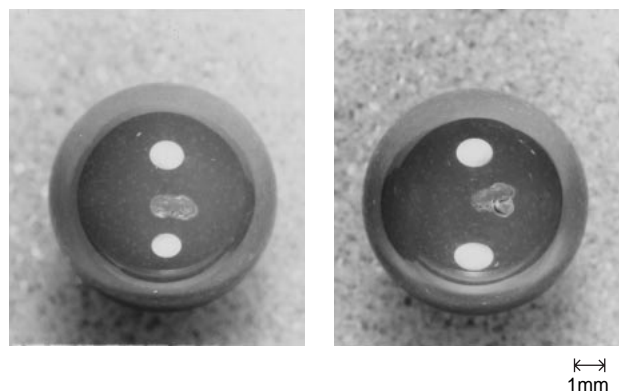
表7に試験結果、図11に試験前後の窒化けい素玉のはく離部の外観を示す。表7に示したように2回試験を行い、どちらも窒化けい素玉のはく

離部が初期の状態より拡大した。またそれと同時に、内輪もしくは外輪の軌道に新たにはく離が発生している。しかし、はく離の発生した窒化けい素玉を用いて、総セラミック軸受を高荷重で試験を行ったにもかかわらず、玉の割損等の致命的な破損には至っていない。図11の試験前後の窒化けい素玉表面のはく離部を比較すると、試験の前後ではく離部が拡大しているのが確認できる。

表7 試験結果

Test results

No.	初期状態	試験時間, h	試験結果
1	玉1個 はく離	13	・玉のはく離進展 ・内輪にはく離発生
2	玉1個 はく離	7	・玉のはく離進展 ・外輪にはく離発生



(1)試験前 (2)試験後

図11 試験前後の窒化けい素玉はく離部

Flaked-off portions of silicon nitride balls before and after the test

以上の結果より、はく離の発生した窒化けい素玉を使用して試験を行うと、玉表面のはく離部が拡大し、また内外輪軌道にもはく離が発生する可能性があることがわかった。しかし、軸受の重大な破損(窒化けい素玉の割損等)には至らないことが明らかとなった。つまり、セラミック軸受の場合、窒化けい素玉にはく離が発生しさらに継続して運転しても、短時間では軸受の重大な破損には至らないものと推測できる。

## 6. セラミック軸受のはめあい<sup>6)</sup>

軸受のはめあいでは、内輪と軸、外輪とハウジングの2通りを考える必要がある。総セラミック軸受の場合、窒化けい素内輪と鋼製軸のはめあいでは、窒化けい素に比べて鋼の方が4~5倍線膨張係数が大きい。したがって、軸受の雰囲気温度

が高くなると軸が膨張し、窒化けい素内輪が破損する可能性がある。一方、窒化けい素外輪と鋼製ハウジングとの関係では、ハウジングが膨張することにより窒化けい素外輪とハウジングの間に過大のスキマが生じて、軸受の回転性能に悪影響を及ぼす可能性がある。

ここでは、軸受の致命的な破損に結びつく可能性がある窒化けい素内輪と鋼製軸とのはめあいについて検討した結果を紹介する。まず、窒化けい素リングと鋼製軸を用いて、窒化けい素リングが破損する静的はめあい限界を明らかにし、次に総セラミック軸受を用いて、運転中の窒化けい素内輪と鋼製軸の動的はめあい限界を明らかにする。

6.1 静的はめあい限界

はめあい試験の試料としては、窒化けい素リングと鋼製軸を用いた。表8に窒化けい素と軸に使用したSUS303の物理定数を示す。SUS303の線膨張係数は窒化けい素の約5倍である。図12に窒化けい素リングの形状、図13に鋼製軸の形状を示す。鋼製軸の形状としては、中実軸、中空軸およびスプライン軸の3種類を用いている。スプライン軸は、窒化けい素リング内径との接触部が30%となるようにしている。

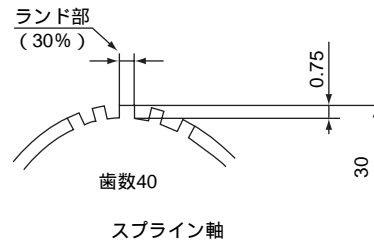
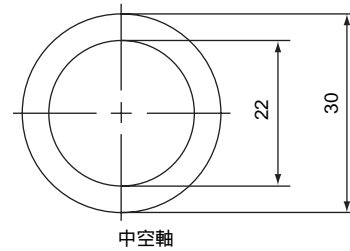
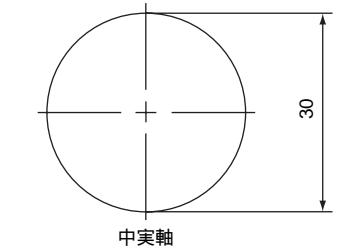


図13 鋼製軸の形状  
Dimensions of steel shaft

表8 リングと軸の物理定数

Physical properties of ring and shaft

項目	リング	軸
材質	HIP-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	SUS303
ヤング率, MPa	31 × 10 <sup>4</sup>	21 × 10 <sup>4</sup>
ポアソン比	0.29	0.3
線膨張係数, 1/	3.2 × 10 <sup>-6</sup>	17.2 × 10 <sup>-6</sup>

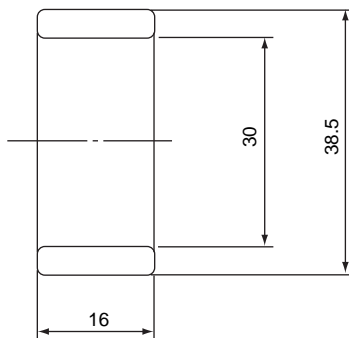


図12 窒化けい素リングの形状  
Dimensions of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ring

図14に試験方法を示す。試験は、鋼製軸に窒化けい素リングを取り付け、軸の両端からヒーターで加熱した。その結果、線膨張係数の差によるしめしろが付与され、温度の上昇とともにしめしろが増加し、ついには窒化けい素リングの割損に至る。

表9に窒化けい素リング割損に及ぼす軸形状の影響を示す。試験は3種類の軸に対してそれぞれ n = 15実施した。3種類の軸で累積破損確率50%における割損しめしろを比較すると、中実軸に比べて中空軸、スプライン軸の方が約1.3倍と大きくなっていることがわかる。したがって、中実軸に比べて中空軸およびスプライン軸は、窒化けい素リング内径に発生する円周応力の緩和に効果があり、割損しめしろを増加させることがわかる。なお中実軸においては、累積破損確率10%における割損しめしろは約50 μmで、その時窒化けい素リング内径に発生する円周応力は400MPa程度となる。

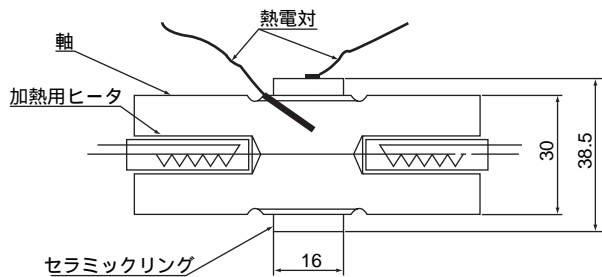


図14 試験方法

Test method

表9 軸形状の影響

Test results

	B10, μm	B50, μm	割損応力の 最小値, MPa	ワイブル 係数	しめしろ 比
中実軸	49.8	58.4	399	11.8	1
中空軸	68.1	77.3	332	14.9	1.3
スプライン軸	66.6	74.6		16.5	1.3

## 6.2 動的はめあい限界

試験軸受は6206相当の総セラミック軸受 NC6206を使用している。(図5, 表3参照) 図13 (6.1項参照)に試験軸のはめあい部の詳細を示す。軸は材料がSUJ2で中実軸, 中空軸, スプライン軸の3種類である。

図6(4.1項参照)に試験方法, 表4(4.1項参照)に試験条件を示す。試験は軸受を4個使用し, そのうちの1個が試験軸受である。窒化けい素と軸受鋼 (SUJ2:  $12.5 \times 10^{-5} / \text{ }^\circ\text{C}$ ) の線膨張係数の違いにより総セラミック軸受を組込んだ場合, 10の昇温に対してしめしろは  $2.8 \mu\text{m}$  増加する。表4の条件で試験を行うと軸の温度は  $80^\circ\text{C}$  となり試験中の常温 ( $20^\circ\text{C}$ ) からのしめしろ増加量は  $16.8 \mu\text{m}$  となる。

表10に動的はめあい試験結果を示す。3種類の軸で, それぞれほぼ3段階のしめしろ試験を行った。表内のそれぞれのしめしろで寿命試験を行い, 異常がなければ100時間で試験を打ち切っている。軸受の破損は, 内輪の割損または内外輪の割損といった形態で発生している。また軸受の破損は, ほとんどのものが運転後1時間以内に発生している。なお, 外輪の割損はまず内輪の割損が発生し, その影響で外輪の割損に至ったものと思われる。図15に, 内輪の代表的な割損形態を示す。割損の形態は, 内輪の1箇所できが開く形態である。表10の試験結果から, 中実軸:  $31 \mu\text{m}$ , 中空軸:  $43 \mu\text{m}$ , スプライン軸:  $39 \mu\text{m}$  のしめしろまでは内輪の割損が発生しないことがわかる。したがって動的はめあい試験においても, 中実軸

に比べて中空軸, スプライン軸は内輪割損までのしめしろを増加させることが明らかとなった。

表10 試験結果

Test results

	しめしろ, μm		
	中実軸	中空軸	スプライン軸
n = 1	33(内輪割損)	51(内外輪割損)	53(内外輪割損)
2	33(内輪割損)	51(内輪割損)	53(内外輪割損)
3	33(内輪割損)	51(内外輪割損)	47(内輪割損)
4	39(内輪割損)	51(内外輪割損)	48(内外輪割損)
5	38(内輪割損)	49(内輪割損)	47(内輪割損)
6	35(内輪割損)	43(異常なし)	39(異常なし)
7	34(内輪割損)	41(異常なし)	39(異常なし)
8	15(異常なし)	41(異常なし)	38(異常なし)
9	31(異常なし)	34(異常なし)	38(異常なし)
10	29(異常なし)	35(異常なし)	38(異常なし)
11	29(異常なし)	29(異常なし)	30(異常なし)
12	31(異常なし)	34(異常なし)	29(異常なし)

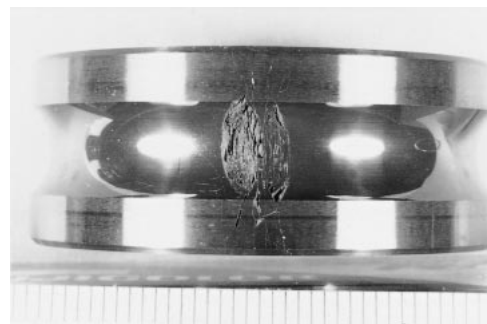


図15 窒化けい素内輪の割損形態

Appearance of silicon nitride inner ring

表11は, 中実軸, 中空軸について内輪割損の発生しないしめしろと, その時の窒化けい素内輪内径に発生する円周応力をまとめたものである。スプライン軸に関しては, 材料力学の公式で円周応力の計算ができないため省略した。これを見ると, 総セラミック軸受を鋼製軸受に組込んで使用する場合, 窒化けい素内輪に発生する円周応力を  $200\text{MPa}$  以下にする必要のあることがわかる。

表11 はめあい限界

Limit of fitting

	しめしろ, μm	円周応力, MPa
中実軸	31	243
中空軸	43	204
スプライン軸	39	



## 7. おわりに

ここでは、特殊環境用軸受のなかで中心的な地位を占めているセラミック軸受の基礎性能を明らかにしてきた。具体的にはセラミック軸受の静的負荷能力、転がり疲れ寿命、表面傷およびはく離の寿命に与える影響、はめあい等について述べた。

セラミックスは金属に比べて、物理的および機械的特性が大きく異なっている。したがって、セラミック軸受の応用を拡大していくためには、これらの特性を十分に把握して、軸受としての長所・短所を理解することが重要となる。今後も、当社としては、セラミック軸受の基礎性能を明らかにするため、研究開発を精力的に進めていく。

## 参考文献

- 1) 藤原孝誌, 竹林博明他: 潤滑, vol. 33, no. 4 (1988) 55.
- 2) R. W. ダヴィジ: セラミックスの強度と破壊, 共立出版(1981)114.
- 3) 竹林博明: Koyo Engineering Journal, no. 145 (1994) 24.
- 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) 31.
- 5) Hiroaki Takebayashi, Kiyoshi Tanimoto etc.: The Growth of the Fatigue - Flaking Spot in the Silicon Nitride Raceway, Fatigue 90 (1990).
- 6) 竹林博明, 北村和久, 服部智哉: トライボロジスト, vol. 44, no. 1(1999) 61.

## 筆 者



竹林博明\*

H. TAKEBAYASHI

\* 軸受事業本部 軸受技術センター EXSEV技術部  
工学博士