

特殊環境用軸受(Koyo EXSEV軸受)について(1)

軸受材料と固体潤滑剤に関して

竹林博明

Bearings for Extreme Special Environment (1) – Bearing Materials and Solid Lubricants –

H. TAKEBAYASHI

Koyo is the first company which has developed and produced EXSEV bearing series (bearings for extreme special environment) on a commercial scale.

EXSEV bearing series are used in such environments as high temperature, vacuum, cleanliness and corrosive condition. Outlines of EXSEV bearing series will be explained serially in Koyo Engineering Journal.

First, herein characteristics of bearing materials and solid lubricants used for EXSEV bearing series are shown.

Materials; ferrous alloys, non-ferrous alloys and ceramics.

Solid lubricants; the soft metals, layer lattice substances and polymers.

Life; service life formulas of solid lubricated bearings.

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. はじめに 2. 特殊環境用軸受(Koyo EXSEV 軸受)とは 3. 特殊環境に用いられる転がり軸受材料 <ol style="list-style-type: none"> 3.1 鉄系材料 3.2 非鉄材料 3.3 セラミック材料 | <ol style="list-style-type: none"> 4. 特殊環境に用いられる固体潤滑剤 <ol style="list-style-type: none"> 4.1 各種固体潤滑剤 4.2 寿命式 5. おわりに |
|---|---|

1. はじめに

最近の技術の進歩に伴って転がり軸受の使用される環境や条件は、従来と比較して過酷でかつ多様化してきており、一般のグリースや油を使用した高炭素クロム軸受鋼製の転がり軸受（以下軸受と称す）だけでは対応できなくなっている。とりわけ電子部品、医薬品等の製造装置や、半導体・液晶関係、真空・宇宙機器関係等の最先端技術分野から、「軸受に油グリースを使いたいが、使用環境が厳しくて...」、「腐食環境のため、従来の軸受が使用できない...」、「軸受からの、油分の飛散や発塵が問題...」、「非磁性、絶縁性を満足する軸受はないか...」といった要求が日まじに強くなってきている。

そこで当社では、このような動向をいち早く察知し、特殊な環境で使用できる軸受つまり特殊環境用軸受「Koyo EXSEV (Extreme Special Environment) 軸受」の商品化をすすめてきた。特殊環境用軸受には、真空用軸受、セラミック軸受、低発塵軸受などがあり、多種多様の技術が応用されている。そこで特殊環境用軸受を、種々の技術分野でより一層使用していただくため、今回から本誌で特殊環境用軸受をシリーズで紹介していくことにする。

今回はまず、当社の特殊環境用軸受つまり「Koyo EXSEV軸受」に使用される軸受材料と、固体潤滑剤について紹介する。

2. 特殊環境用軸受 (Koyo EXSEV軸受) とは

図1は特殊環境用軸受を示したものである。当社では、真空・腐食・クリーン・高温雰囲気といった軸受の使用環境と高速、非磁性といった軸受到要求される性能を一括して特殊環境と位置づけ、特殊環境用軸受の開発を進めてきた。

例えば真空雰囲気で軸受を使用する場合、潤滑剤として油またはグリースが使用できないことが多い。そこで固体潤滑剤の使用が必要となるが、真空(圧力)の程度や温度によって固体潤滑剤に何をを用いるかが重要となる。また、腐食環境で軸受を使用する場合は、従来の軸受鋼はさびが発生するため耐食性に優れた材料を軸受材料として使用する必要がある。つまり特殊環境用軸受を検討する場合、軸受材料としてどのような材料を使用するか、さらに潤滑剤としてどのような固体潤滑剤を適用するかが重要となる。

当社は、他社にさきがけて特殊環境用軸受の商品化をおこなった。したがって、開発の過程での技術蓄積と、供給実績に裏付けされた豊富なノウハウから、特殊環境に最も適した軸受材料と固体潤滑剤を選定することが可能である。

3. 特殊環境に用いられる転がり軸受材料

ここでは、真空・腐食・高温などの特殊環境用軸受 (Koyo EXSEV軸受) に使用される軸受材料に

ついて紹介する。軸受材料としては、主に金属材料(鉄系材料、非鉄材料)とセラミック材料がある。

3.1 鉄系材料

表1は、特殊環境用軸受の軌道輪や転動体を使用している代表的な鉄系材料を示す¹⁾。

高炭素クロム軸受鋼(SUJ2)、マルテンサイト系ステンレス鋼(SUS440C)、析出硬化系ステンレス鋼(SUS630)、高速度工具鋼(M50, SKH4)などが主な鉄系材料である。

高炭素クロム軸受鋼(SUJ2)は一般軸受標準材料であるが、特殊環境用軸受に使用される場合がある。当社の特殊環境用軸受では、真空・耐食・耐熱等を考慮してマルテンサイト系ステンレス鋼(SUS440C)がEXSEV軸受標準材料となっている。

マルテンサイト系ステンレス鋼(SUS440C)と析出硬化系ステンレス鋼(SUS630)は、耐食用軸受材料である。マルテンサイト系ステンレス鋼(SUS440C)は、硬さがHRC60以上と高いことより軸受として十分な耐荷重性を確保できるが、腐食性が強い雰囲気では耐食性が十分とはいえない。そのため、より耐食性が要求される軸受には、硬さがHRC40程度で耐荷重性はマルテンサイト系ステンレス鋼(SUS440C)に劣るが、優れた耐食性を有している析出硬化系ステンレス鋼(SUS630)が用いられる。



図1 特殊環境用軸受 (Koyo EXSEV軸受)
Extreme special environment bearing

表1 特殊環境用軸受に使用される代表的な鉄系材料

Typical ferrous alloys for EXSEV Bearing

: 優, : 良, : 可

	硬 さ	縦弾性係数 GPa	線膨張係数 10 ⁻⁶ / °C	耐荷重性	耐摩耗性	放出ガス	備 考
高炭素クロム軸受鋼 (SUJ2)	61 HRC	208	12.5				一般軸受標準材料
マルテンサイト系ステンレス鋼 (SUS440C)	60 HRC	208	10.5				EXSEV軸受標準材料
析出硬化系ステンレス鋼 (SUS630)	40 HRC	196	11.0				
高速度工具鋼 (M50)	61 HRC	207	10.6				
高速度工具鋼 (SKH4)	64 HRC	207	12.0				

次に、高速度工具鋼のM50とSKH4は高温用軸受材料として使用されている。図2は、鉄系材料の高温硬さを示したものである²⁾。一般軸受標準材料であるSUJ2は、温度が高くなってくると硬さが大幅に低下し耐荷重性や寿命が問題となる。一方、高速度工具鋼のM50とSKH4は、温度が400～500℃でも硬さがHRC60程度と、高温でも硬度が低下しないということより高温用軸受材料として用いられている。またマルテンサイト系ステンレス鋼(SUS440C)は、比較的耐熱性に優れているので、準高温用材料として用いられている。

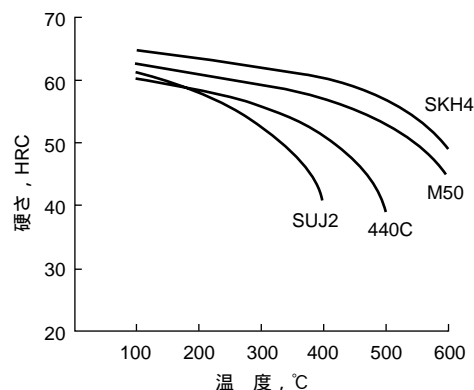


図2 鉄系材料の高温硬さ

Hardness of ferrous alloys at high temperature

3.2 非鉄材料

表2は、耐食・耐熱・非磁性等の特殊環境用軸受に使用される代表的な非鉄材料を示している²⁾。

表2に示した非鉄材料は、いずれもオーステナイト系ステンレス鋼と同等以上の耐食性を有して

表2 特殊環境用軸受に使用される代表的な非鉄材料

Typical non-ferrous alloys for EXSEV Bearing

区 分	種 類	ベース成分	主要添加成分(%)	硬 さ (HRC)	備 考
Co基超合金	ステライト1	Co	30Cr, 12W, 2.5C	57	高温硬さ大 耐摩耗性大
	ステライト6	Co	28Cr, 4W, 1C	47	ステライト1より 靱性大
Ni基超合金	ハステロイC	Ni	17Mo, 16Cr, 5Fe, 4.5W	29	耐食性大
Cu合金	ベリリウム銅合金	Cu	2Be, 0.2Co	40	非磁性 導電性大
Ti合金	6Al・4V合金	Ti	6Al, 4V	38	非磁性, 耐食性大 軽量(比重 0.5×鋼)

おり、特にNi基超合金(ハステロイC)とTi合金は優れた耐食性を示す。

またCo基超合金(ステライト1)は、常温硬さ、高温硬さともに優れており、特に600以上の高温域では高速度工具鋼よりも優れた高温硬さを有している。

ベリリウム銅合金とTi合金は、非磁性用軸受材料である。特にベリリウム銅合金は溶体化処理と時効処理によってHRC40以上に硬化できるので、非磁性用軸受材料として広く用いられている。しかし最近では、ベリリウム銅は環境負荷物質であるベリリウムを含んでいることより使用が嫌われる傾向がある(ベリリウムは有毒、しかしベリリウム銅の状態では無害)。

3.3 セラミック材料

表3は各種セラミック材料の特性を示したものである³⁾。

セラミックス材料としては、窒化けい素(Si_3N_4)、ジルコニア(ZrO_2)、炭化けい素(SiC)、アルミナ

(Al_2O_3)などがある。機械的強度はアルミナ<炭化けい素<窒化けい素<ジルコニアの順で優れている。また耐食性に関しては、窒化けい素<ジルコニア<炭化けい素=アルミナの順で優れていることが知られている。

図3は、各種セラミック材料の軸受への適用性を評価するために、スラスト形軸受試験機を用いて転がり寿命試験を行った結果を示したものである⁴⁾。

応力繰返し数 1.08×10^7 回毎に試験荷重を増加させていき、セラミック平板に損傷が発生した時点をも寿命として図中に示している。その結果、窒化けい素、ジルコニア、炭化けい素、アルミナの順に、耐荷重性及び転がり寿命が低下していくことがわかる。

表4は、各種セラミック材料の特性及び図3の転がり寿命試験結果から、各種セラミックスの軸受への適用性について検討したものである⁵⁾。つまり、当社での各種セラミックスの軸受への適用基準を示している。窒化けい素は、耐荷重性および

表3 各種セラミックス材料の特性
Characteristics of fine ceramics

セラミック材料 項目 単位	窒化けい素 Si_3N_4	ジルコニア ZrO_2	炭化けい素 SiC	アルミナ Al_2O_3
密度, g/cm^3	3.2	6.0	3.1	3.8
線膨張係数, $1/^\circ\text{C}$	3.2×10^{-6}	10.5×10^{-6}	3.9×10^{-6}	7.1×10^{-6}
ピッカース硬さ, HV	1 500	1 200	2 200	1 600
縦弾性係数, GPa	320	220	380	350
ポアソン比	0.29	0.31	0.16	0.25
3点曲げ強さ, MPa	1 100	1 400	500	300
破壊靱性, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	6	5	4	3.5

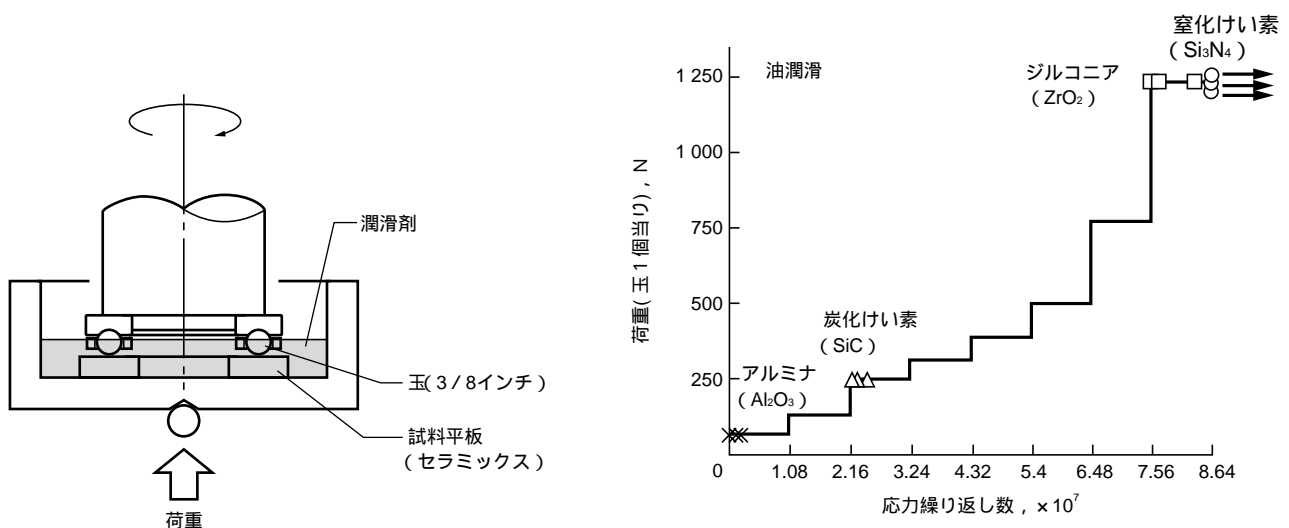


図3 各種セラミックスの転がり寿命試験結果
Life test results of ceramics

表4 各種セラミックスの軸受への適用性

Application of ceramics to bearing

: 適する : 用途によって適する x : 適さない

	転がり軸受への応用		
	判 定	性 能・用 途	特 性
窒化けい素 Si ₃ N ₄		・軸受鋼と同等以上の耐荷重性, 寿命を有する ・高性能が要求される用途に適用可能	・高速回転 ・高真空 ・耐食性 ・耐熱性 ・非磁性 ・高剛性
ジルコニア ZrO ₂		・使用できる荷重が制限される ・腐食性の強い薬液中などで適用可能	・高耐食
炭化けい素 SiC		・使用できる荷重が制限される ・腐食性の強い薬液中などで適用可能	・高耐食 ・超高温
アルミナ Al ₂ O ₃	x	・転がり軸受には適さない	-

び転がり寿命が高炭素クロム軸受鋼と同等以上ということより、一般に軸受材料として使用される。しかしながら窒化けい素は、高温の酸またはアルカリ中といった特殊な腐食雰囲気では耐食性が問題となってくる。したがって特殊な腐食雰囲気中で軸受を使用する場合は、軸受材料としてジルコニア、炭化けい素が使用される。ジルコニア、炭化けい素は窒化けい素に比べて耐荷重性及び転がり寿命が劣っていることより、軸受に負荷される荷重を制限して使用する必要がある。

なお、アルミナは耐荷重性(強度)が低いことから基本的には軸受材料として使用しない。

4. 特殊環境に用いられる固体潤滑剤

ここでは、各種固体潤滑剤に関して紹介するとともに、固体潤滑を用いた軸受の寿命予測を行うための寿命式に関して述べる。

4.1 各種固体潤滑剤

真空、高温および低温といった特殊環境下では、軸受にグリースや油が使用できないことが多く、固体潤滑剤が使用される。しかし、固体潤滑剤はグリースや油と異なり、軸受の使用条件や環境によって潤滑性が異なってくるので、使用条件や環境に適した固体潤滑剤を見い出す必要がある。

表5に、特殊環境用軸受に使用される代表的な固体潤滑剤を示す⁶⁾。

軟質金属や層状結晶構造物質、高分子材料などの各種固体潤滑剤に関して、結晶構造、熱安定性、摩擦係数、耐荷重性、発塵、放出ガスなどについてまとめたものである。これをもとに、特殊環境用軸受の使用条件や環境にあわせて固体潤滑剤の適用を検討する。

軟質金属である銀(Ag)、鉛(Pb)は、潤滑膜の自己修復性に優れ、また蒸気圧が極めて低いことから、超高真空用軸受や超高真空・高温用軸受等

表5 特殊環境用軸受に使用される代表的な固体潤滑剤

Typical solid lubricants for EXSEV Bearing

: 優, : 良, : 可

固体潤滑剤	結晶構造	熱安定性,		摩擦係数		耐荷重性 MPa	発塵	放出 ガス	備 考
		大気	真空	大気	真空				
銀(Ag)	面心立方	-	600以上	-	0.2~0.3	最大2500			大気不可
鉛(Pb)	面心立方	-	300以上	0.05~0.5	0.1~0.15	最大2500			
二硫化モリブデン(MoS ₂)	六方晶	350	400	0.01~0.25	0.001~0.25	最大2000			
二硫化タングステン(WS ₂)	六方晶	425	400	0.05~0.28	0.01~0.2	最大2500			
黒鉛(C)	六方晶	500	-	0.05~0.3	0.4~1.0	最大2000			真空不可
ポリテトラフルオロエチレン(PTFE)	長鎖状	260	200	0.04~0.2	0.04~0.2	最大1000			
ポリイミド	長鎖状	300	200以上	0.05~0.6	0.05~0.6	最大1000			

の潤滑剤として使用されている。軸受への適用方法としては、イオンプレーティング法やスパッタリング法により転動体(玉)にコーティングして使用することが多い。なお、銀(Ag)は酸素に弱いという欠点があるため、大気中での使用に関しては注意する必要がある。

層状結晶構造の二硫化モリブデン(MoS₂)は、比較的万能な固体潤滑剤としてよく知られている。スパッタリング法や焼き付け法により保持器や軌道輪にコーティングされ、主に真空用軸受に適用されている。一方、二硫化タングステン(WS₂)や黒鉛(C)は、直接保持器材料(複合材料)として使用されることもあり、主に高温用軸受の潤滑剤として適用されている。

さらに、高分子系材料の四ふっ化エチレン(PTFE)やポリイミドは転動体・保持器などにコーティングして使用される場合と、直接保持器材料として適用される場合がある。耐薬品性と転着(移着)性に優れ、雰囲気依存性が低いことから、大気～真空雰囲気を繰り返す軸受や低発塵軸受に使用されている。

4.2 寿命式

特殊環境用軸受のように固体潤滑剤を使用する軸受は、一般には静定格荷重の10%以下といった比較的軽荷重のもとで使用される。固体潤滑軸受は、転走部に固体潤滑剤が存在する間は安定した回転性能が得られるが、固体潤滑剤がなくなると金属同士の接触が発生し、回転トルクが急激に増加し寿命に至る。この寿命は、固体潤滑剤の種類や使用条件によって異なるため、各種寿命試験結果をもとに固体潤滑軸受の寿命予測を行うことが必要である。

4.2.1 玉に銀(Ag)をコーティングした高真空対応軸受の寿命

当社では1983年に、玉に銀(Ag)をイオンプレーティングした軸受の寿命実験式を発表した⁸⁾。この寿命実験式は多くの寿命試験データから得られたもので、それによると、玉に銀(Ag)をイオンプレーティングした高真空対応軸受の寿命は、次の(1)式から推定できる。

$$L_{vh} = b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot (C_v / P)^f \times 16\,667 / n \dots (1)$$

L_{vh} : 90%信頼寿命, h

C_v : 真空用玉軸受の基本動定格荷重(同一寸法の鋼製軸受の基本動定格荷重の1/13), N

P : 動等価荷重, N

q : 指数, q = 1

n : 回転速度, min⁻¹ ただし, 10ⁿ < 10 000

b₁ : 回転速度依存係数

$$b_1 = 1.5 \times 10^{-3n + 1}$$

b₂ : 材料係数

b₂ = 1 (特殊イオンプレーティング法により銀をプレーティングした場合)

b₃ : 雰囲気・温度による係数

$$b_3 = (10^{-3} \text{Pa, 室温の場合})$$

4.2.2 二硫化モリブデン(MoS₂), 四ふっ化エチレン(PTFE), 特殊ふっ素高分子膜(Koyoクリーンプロ)をコーティングした軸受の寿命

二硫化モリブデン(MoS₂), 四ふっ化エチレン(PTFE), 特殊ふっ素高分子膜(Koyoクリーンプロ)を潤滑に用いた固体潤滑軸受の寿命式を紹介する。

図4は、軸受寿命とアキシャル荷重の関係を示したものである⁹⁾。

試験軸受は型番608(8×22×7)のステンレス(内外輪・玉がSUS440C)軸受である。軸受Aはステンレス保持器にMoS₂コーティングしたもの、軸受Bはステンレス保持器にPTFEコーティングしたもの、軸受Cは軸受全面に特殊ふっ素高分子膜(Koyoクリーンプロ)を処理したものである。それぞれ4条件の荷重で寿命試験を行い、回帰線を求めている。軸受A, Bは、どちらもほぼ同程度の寿命を示しており、軸受Cはそれらの約7倍の寿命を示していることがわかる。その結果、図4より次の(2)式の寿命式を得ることができる。

$$L_{av} = b_2 \cdot (C_e / P)^3 \dots (2)$$

L_{av} : 50%信頼寿命 総回転数

b₂ : 材料係数

MoS₂コーティング : 6

PTFEコーティング : 6

特殊ふっ素高分子膜 : 42

C_e : 同一寸法の鋼製軸受の基本動定格荷重 × 0.85, N

P : 動等価荷重, N

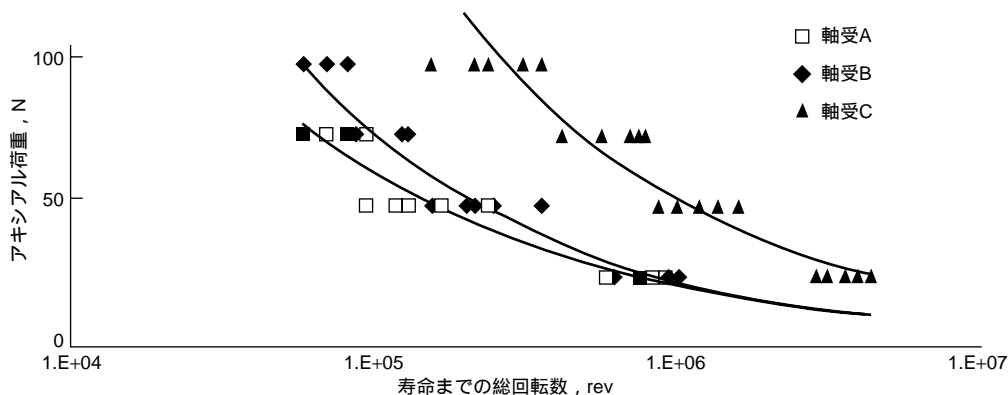


図4 軸受寿命とアキシャル荷重の関係
Relationship between bearing life and axial load

5. おわりに

ここでは、特殊環境用軸受(Koyo EXSEV軸受)の軸受材料と固体潤滑剤に関して紹介してきた。今後も、特殊環境用軸受の使用される環境や条件は、年々過酷で多様化していくものと考えられる。したがって、これらの要求に対応する軸受材料や固体潤滑剤の基礎研究と、その成果を軸受に適用する応用研究を継続して実施することが重要となる。

参考文献

- 1) 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, 30.
- 2) Koyo Engineering Journal, no. 145(1994)36
- 3) 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, 12.
- 4) 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, 14.
- 5) 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, 15.
- 6) 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, 30.
- 7) 角本賢一: 機械設計, vol. 29, no. 2(1983)109.
- 8) 藤原有宏, 林田一徳, 豊田泰: 日本トライボロジー会議予稿集(東京1998 - 5)216.

筆 者



竹林博明*
H. TAKEBAYASHI

* 軸受事業本部 製品技術センター EXSEV事業室
工学博士