

特殊環境用軸受(Koyo EXSEV軸受)について(2)

- 低発塵軸受と真空用軸受 -

竹林博明

Bearings for Extreme Special Environment (2)

- Bearings for Vacuum and Clean Environment -

H. TAKEBAYASHI

Outlines of Koyo EXSEV bearing series (bearings for extreme special environment) have been explained serially from the last Koyo Engineering Journal no.156.

In no.156 characteristics of bearing materials and solid lubricants used for EXSEV bearing series were explained. Herein examples of EXSEV bearings and bearings for clean environment, bearings for vacuum environment are shown.

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. はじめに 2. 特殊環境用軸受の代表的構成 <ul style="list-style-type: none"> 2.1 高速回転用 2.2 クリーン環境用 2.3 真空環境用 2.4 耐食用 2.5 高温用 2.6 非磁性用 2.7 絶縁用 | <ul style="list-style-type: none"> 3. 低発塵軸受 <ul style="list-style-type: none"> 3.1 低発塵軸受の発塵性能比較 3.2 低発塵軸受の構成と特長 4. 真空用軸受 <ul style="list-style-type: none"> 4.1 真空用軸受の構成と特長 4.2 超高真空用軸受のアウトガス特性 5. おわりに |
|---|--|

1. はじめに

近年転がり軸受(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。すなわち、超高真空、クリーン、腐食および高温雰囲気といった特殊な環境への軸受の応用が求められている。

本誌では前号より、特殊環境用軸受「Koyo EXSEV(Extreme Special Environment)軸受」についてシリーズで紹介していくことにした。前号では、特殊環境用軸受に使用される軸受材料と固体潤滑剤について述べた。今回は、特殊環境用軸受の代表的な軸受構成を紹介し、次に特殊環境用軸受の中で中心的製品である低発塵軸受と真空用軸受に関して説明する。

2. 特殊環境用軸受の代表的構成

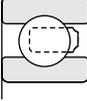
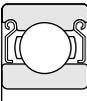
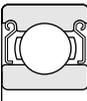
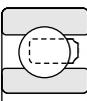
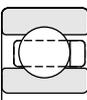
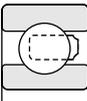
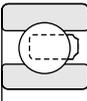
表1に、特殊環境用軸受の代表的構成を示す¹⁾。

軸受の使用される用途・環境に対して、外輪、内輪、転動体および保持器の材料と固体潤滑剤を示した。

2.1 高速回転用

高速回転用の転がり軸受としては、内外輪が軸受鋼で転動体に窒化けい素を用いた組合せセラミック軸受が一般的である。これは、高速回転する軸受の転動体に低密度の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、軸受鋼の転動体を用いた場合より高速回転が可能となるからである^{2), 3)}。さらに高速回転が要求され内輪の遠心膨張が問題(鋼製の内輪が遠心膨張し、軸受のすきまづまりや軸と内輪のしめしろが不足)となる場合は、外輪が軸受鋼で転動体と内輪が窒化けい素からなるセラミック軸受が適用される。

表1 特殊環境用軸受の代表的な軸受構成
Configurations of Koyo EXSEV bearings

用途・環境	材 料・潤 滑			軸受シリーズ
	外 輪・内 輪	転動体	保持器(記号)	
(1) 高速回転用 	SUJ2	窒化けい素 (Si ₃ N ₄)	強化ポリアミド樹脂(FG)	3NC...FG
	外輪: SUJ2 内輪: 窒化けい素 (Si ₃ N ₄)			6NC...FG
(2) クリーン環境用 	SUS440C + 特殊ふっ素 高分子コーティング	SUS440C + 特殊ふっ素 高分子コーティング	SUS304 + 特殊ふっ素 高分子コーティング	SE...STPR YS
	SUS440C	SUS440C	ふっ素樹脂 (FA・PT)	SE...ST FA(PT)
		高硬度炭素材		SL...ST4 FA(PT)
	SUS440C	SUS440C	SUS304 + 高温用 PTFEコーティング	SE...STMPD7 YS
	SUS440C	高硬度炭素材	SUS304	SL...ST4 YS
				SUS630
	高硬度炭素材		SL...MD4 FA(PT)	
(3) 真空環境用 	SUS440C	SUS440C	SUS304 真空用グリース使用	SV...ST YS
	SUS440C	SUS440C	SUS304 + MoS ₂ コーティング	SE...STMSA7 YS
			PEEK樹脂 (PG)	SE...ST PG
	SUS440C	SUS440C + 鉛コーティング	SUS304	SE...STMB3 YS
SUS440C + 銀コーティング		SE...STMG3 YS		
(4) 耐食用 	窒化けい素(Si ₃ N ₄)	窒化けい素(Si ₃ N ₄)	ふっ素樹脂 (FA・PT)	NC...FA(PT)
	耐食用窒化けい素	耐食用窒化けい素		NCT...FA(PT)
	炭化けい素(SiC)	炭化けい素(SiC)		NCZ...FA(PT)
(5) 高温用 	SKH4	窒化けい素	グラファイト (GF)	3NC...HT4 GF
	窒化けい素	窒化けい素(総玉形)	-	NC...V
(6) 非磁性用 	非磁性鋼	窒化けい素	ふっ素樹脂 (FA・PT)	3NC...YH4 FA(PT)
	窒化けい素			NC...FA(PT)
(7) 絶縁用 	SUS440C	窒化けい素	ふっ素樹脂 (FA・PT)	3NC...ST4 FA(PT)
	窒化けい素			NC...FA(PT)

2.2 クリーン環境用

クリーン環境用の低発塵軸受は、作業環境の清浄度(クリーン度)が最も重視される半導体・液晶製造をはじめさまざまな用途で、ニーズが急速に広がっている。このような用途では油分の飛散が問題となるため、軸受潤滑への油・グリースの使用が嫌われる。

そこで低発塵軸受としては、ステンレス製(SUS440C)軸受に特殊ふっ素高分子、PTFE、高硬度炭素材、ふっ素樹脂等の固体潤滑剤を使用したものが適用される。具体的には、軸受全面に特殊ふっ素高分子膜をコーティングした軸受、転動体(主に玉)に高硬度炭素材を用いた軸受、保持器をふっ素樹脂で製作した軸受、保持器にPTFEをコーティングした軸受等がある。

2.3 真空環境用

一口に真空用軸受といっても、低真空から超高真空、また、大気雰囲気と真空雰囲気の繰り返しなど種々の条件で使用される。したがって真空環境用軸受は、軸受材料がステンレス鋼(SUS440C)でグリースや固体潤滑剤を、軸受の使用される条件に合わせて使い分けている。具体的には、真空用グリースを用いたもの、保持器に二硫化モリブデンをコーティングしたもの、転動体(主に玉)に鉛(Pb)や銀(Ag)をイオンプレーティングしたもの等が使用される。

2.4 耐食用

酸・アルカリをはじめとする各種薬液中で軸受を使用する場合、耐食性に優れた軸受が必要となる。耐食用軸受としては、主に内外輪・転動体がセラミックスで保持器がふっ素樹脂の総セラミック軸受が適用される。セラミック材料としては、主に窒化けい素(焼結助剤: $Al_2O_3 - Y_2O_3$)が使用されるが、腐食環境の度合により、耐食性を高めた窒化けい素(焼結助剤: スピネル)や、セラミックスの中では特に耐食性に優れている炭化けい素を用いる場合もある⁴⁾。

2.5 高温用

食品製造用のオープンや金属材料の熱処理炉等の高温雰囲気で軸受が使用される場合、特に問題となるのは潤滑剤で、300 程度まではグリースや油が使用できるが、それ以上は固体潤滑剤を使用する必要がある。

また軸受材料としては、300 まではステンレス鋼(SUS440C)が使用できる。そこで300 以上で使用される高温用軸受としては、内外輪が

SKH4、転動体が窒化けい素で保持器にグラファイトを用いた組合せセラミック軸受と、内外輪・転動体(玉)ともに窒化けい素を用いた総セラミック軸受が使用される。保持器にグラファイトを用いたものは、500 以下の使用が一般的である。なお例としては少ないが、総セラミック軸受を固体潤滑剤なしで、500 ~ 800 までの高温雰囲気で使用した例もある⁵⁾。

2.6 非磁性用

超電導関連、半導体製造装置あるいは各種検査装置に用いられる軸受の中には、磁場内で使用されるものがある。一般の鋼製軸受をこのような環境で使用すると、磁場を乱したり軸受の回転トルクが大きく変動することがあり非磁性軸受が要求される。

非磁性用軸受としては、内外輪に非磁性鋼(非磁性ステンレス鋼、非磁性超合金等)を使用し転動体に窒化けい素を用いた組合せセラミック軸受と、内外輪、転動体ともに窒化けい素を用いた総セラミック軸受がある。なおこのとき保持器は主にふっ素樹脂を使用している⁶⁾。

2.7 絶縁用

鉄道車両のトラクションモータをはじめとする各種モータで使用される軸受の損傷の一つに、電食という現象がある。電食とは、回転中の軸受内部を電流が通過したとき転がり接触部分の非常に薄い油膜を通してスパークが発生し、接触部の表面が局部的に溶融する損傷である。そこで、軸受内部を電流が通過しないように軸受外部(正確には軌道部以外)にバイパスをもうけるか、または軸受内部に電流を流さない絶縁軸受を用いる場合がある。

絶縁軸受としては、内外輪が金属で転動体に絶縁材料である窒化けい素を用いた組合せセラミック軸受と、内外輪・転動体ともに窒化けい素を用いた総セラミック軸受がある。なおこのほかにも内輪の内径もしくは外輪の外径に、セラミックス等の絶縁材料をコーティングした軸受もある。

3. 低発塵軸受

半導体・液晶製造装置、電子部品製造装置および医薬品・食品製造関係では、軸受からの油分の飛散が最も嫌われるため、油・グリース等を使用しない脱脂した軸受が使用されている。そのため一定時間軸受を使用すると、軸受から金属摩耗粉(軸受構成材料)が発生し問題となっている。

そこで当社では軸受からの摩耗粉の発生を極力抑えた低発塵軸受の開発を行った。

ここでは低発塵軸受の性能を明らかにするとともに、各種低発塵軸受の構成と特長を紹介する。

3.1 低発塵軸受の発塵性能比較

図1に試験方法、表2に試験条件を示す¹⁾。

試験は図1に示す試験装置を、クリーンルーム内に配置したクリーンベンチ(クリーン度：クラス10)の中に置き実施した。発塵量は、2個の軸受から発生した粒子径0.3 μm以上の粒子を、パーティクルカウンタで20時間測定したものである。

表3に試験軸受の構成を示す¹⁾。

試験軸受としては11種類用いている。内外輪、転動体にマルテンサイト系ステンレス鋼(SUS440C)や窒化けい素セラミックスを用い、潤滑剤のないものや固体潤滑剤として二硫化モリブデン、PTFE、特殊ふっ素高分子等をコーティングした軸受である。

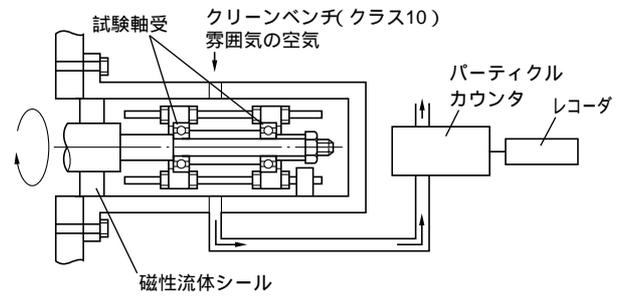


図1 試験方法

Test method

表2 試験条件

Test conditions

項目	条件
軸 受	基本呼び番号 ML6012
	主寸法 6 × 12 × 3 mm
荷 重	ラジアル 2.9N/軸受 2個
回 転 数	200r/m
雰 囲 気	クラス10 クリーンベンチ内、室温
試 験 時 間	20h
計測粒子径	0.3 μm以上

表3 試験軸受の構成

Test bearings

軸受記号	軸受の構成部品の材料および表面処理の部位			表面処理法, その他
	外輪・内輪	転動体	保持器	
A	SUS440C	SUS440C	SUS304	潤滑剤なし
B		窒化けい素		潤滑剤なし
C		SUS440C		ふっ素系グリース
D	SUS440C	SUS440C + Ag	SUS304	イオンプレーティング法
E		SUS440C		SUS304 + MoS ₂
F	SUS440C + PTFE	SUS440C	SUS304 + PTFE	PTFE 焼付け法
G	SUS440C	SUS440C	SUS304 + PTFE	PTFE 焼付け法
H			ふっ素樹脂 (FA)	-
I			SUS304 + 高温用 PTFE	高温用 PTFE 焼付け法
J	窒化けい素	窒化けい素	SUS304 + 高温用 PTFE	高温用 PTFE 焼付け法
K	SUS440C + 特殊ふっ素高分子	SUS440C + 特殊ふっ素高分子	SUS304 + 特殊ふっ素高分子	特殊ふっ素高分子 焼付け法

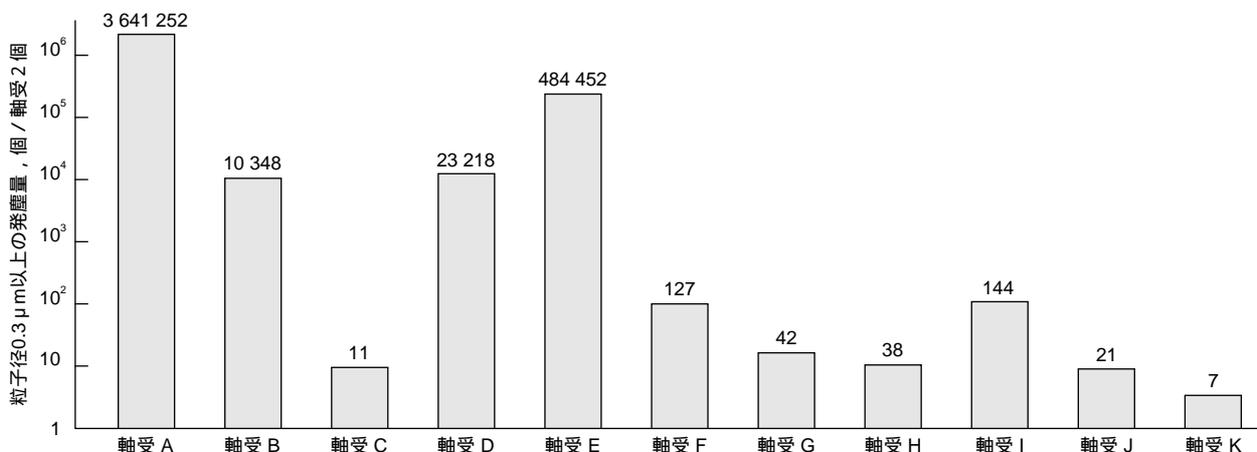


図2 試験結果(20時間試験中の全発塵量の比較)

Test result (comparison of total amount of generated dust for 20 hours test)

図2に試験結果を示す¹⁾。

11種類の軸受に対して、それぞれ20時間試験を行った際の、粒子径0.3 μm以上の発塵量を測定し比較している。その結果、固体潤滑剤を使用した軸受の中では、軸受全面に特殊ふっ素高分子をコーティングした軸受(K)、ふっ素樹脂保持器の軸受、保持器にPTFEコーティングを用いた軸受等(F , G , I , J)が、転動体(玉)に銀(Ag)をイオンプレーティングした軸受(D)や保持器に二硫化モリブデン(MoS₂)をコーティングした軸受(E)より発塵量が少なく、低発塵軸受として優れた発塵性能を示すことが明らかとなった。

つまり、転動体(玉)に銀(Ag)をイオンプレー

ティングした軸受(D)や保持器に二硫化モリブデン(MoS₂)をコーティングした軸受(E)の発塵量が、10⁴個～10⁵個オーダであるのに対して、軸受全面に特殊ふっ素高分子をコーティングした軸受(K)やふっ素樹脂保持器の軸受、保持器にPTFEコーティングした軸受(F , G , I , J)の発塵量は、10～10²個オーダとなっている。

なお潤滑剤を用いていないステンレス軸受は10⁶個オーダ、組合せセラミック軸受は10⁴個オーダの発塵量である。またふっ素グリースを用いた軸受(C)の発塵量は10個オーダであるが、油分等の蒸発や飛散があるため、低発塵軸受としては使用されない。

表4 低発塵軸受の構成と特長

Configurations Koyo EXSEV bearings for clean environment

推奨区分	構成			圧力 Pa	温度	低発塵	耐食
	外輪・内輪	転動体	保持器				
汎用低発塵軸受	SUS440C	SUS304 + PTFEコーティング	ふっ素樹脂	～10 ⁻⁵	～200	優	-
			SUS440C + 特殊ふっ素高分子コーティング				
高温用低発塵軸受	SUS440C	室化けい素	SUS304 + 高温用PTFEコーティング	～10 ⁻⁵	～300	良	-
	室化けい素					優	優
耐食用低発塵軸受	SUS630	室化けい素	ふっ素樹脂	～10 ⁻⁵	～200	優	優
	室化けい素	ふっ素樹脂					
		SUS304 + PTFEコーティング					

3.2 低発塵軸受の構成と特長

低発塵軸受が要求される半導体・液晶製造装置では、高温雰囲気や低発塵軸受が要求される場合と腐食雰囲気や低発塵軸受が要求される場合がある。したがって低発塵軸受としては、汎用低発塵軸受、高温用低発塵軸受および耐食用低発塵軸受の3種類が必要となってくる。

表4にこれらの低発塵軸受の構成と特長を示す¹⁾。これは、前述の図2の試験結果をもとに、低発塵軸受の使用される環境に合わせて、軸受の構成を検討し商品化したものである。

汎用低発塵軸受としては、ステンレス軸受の保持器(SUS304)にPTFEコーティングを行ったものと、ステンレス軸受の全面に特殊ふっ素高分子をコーティングしたものがあり、どちらも温度200℃まで使用できる。

次に高温用低発塵軸受としては、ステンレス軸受の保持器(SUS304)に高温用PTFEコーティングを行ったものと、総セラミック軸受の保持器(SUS304)に高温用PTFEコーティングを行ったものがあり、どちらも温度300℃まで使用できる。つまり高温用低発塵軸受は、使用される温度が200～300℃でクリーン性が要求される場所に適用される軸受である。

また耐食用低発塵軸受としては、内外輪が析出硬化型ステンレス鋼(SUS630)、転動体(玉)が窒化けい素で保持器にふっ素樹脂を適用した組合せセラミック軸受と、内外輪・転動体(玉)ともに窒化けい素で保持器がふっ素樹脂の総セラミック軸受、同じく保持器にPTFEコーティングを行った総セラミック軸受および3種類がある。これらのものは腐食雰囲気や温度が200℃まででかつクリーン性が要求される場所に使用される。

4. 真空用軸受

真空用途の軸受としては、一般に軸受材料がマルテンサイト系ステンレス鋼(SUS440)が使用されている。一方潤滑剤に関しては、真空用途で大気から超高真空雰囲気までのすべてをカバーできる潤滑剤がないため軸受が使用される条件に合わせて、潤滑剤(主に固体潤滑剤)を選定することが重要である。

4.1 真空用軸受の構成と特長

表5に、真空用軸受の構成と特長を示す¹⁾。真空用軸受に使用する潤滑剤(主に固体潤滑剤)区分で、軸受の特長と性能および用途に関してまとめたものである。

表5 真空用軸受の構成と特長

Configurations Koyo EXSEV bearings for vacuum environment

		真空用グリース封入	MoS ₂ コーティング	PEEK樹脂	特殊ふっ素高分子	鉛イオンプレーティング	銀イオンプレーティング
軸受構造							
特長	超高真空対応	-				優	
	大気圧対応	優				-	
	クリーン性	-			優		-
性能	温度範囲	- 40 ~ 200	- 100 ~ 300		- 100 ~ 200	- 200 ~ 300	max. 550
	高速回転性	優	良	-		良(dn 値 ¹⁾ max. 8×10^4)	
	耐荷重性	優	良	-		良	
	導電性	-	優(半導体)		-		優
用途		真空ポンプ ・T.M.P. ・クライオポンプ など	半導体製造装置 ・ウェハ搬送用軸受(スパッタ装置) ・大型トレイ搬送用軸受(P-CVD) ・ドア開閉部軸受(エッチング装置) ・ボールねじ支持軸受(縦型拡散炉) ・ロボットアーム支持軸受 など			半導体製造装置 ・各種搬送用、回転部支持軸受 (スパッタ, CVD, MBE装置) 医療機器 ・X線管用軸受 各種計測・分析機器 など	

注1) dn 値: 軸受内径(d)×回転速度(n)

真空用グリース封入のものは、真空度 10^{-4} Pa程度まで使用できる。この軸受は、比較的高速回転まで対応できるとともに耐荷重性にも優れているので、真空用途の軸受としては、できる限り真空用グリース封入品で対応することが望ましい。

次にMoS₂コーティング(保持器にコーティング)のもの、PEEK樹脂(保持器がPEEK樹脂)のものおよび特殊ふっ素高分子(軸受全面にコーティング)のものに関しては、主に半導体製造装置を中心に適用されている。MoS₂コーティングのものは、PEEK樹脂のもの、特殊ふっ素高分子のものに比べて、より高速回転に適用可能でかつ耐荷重性にも優れている。また、特殊ふっ素高分子のものは特にクリーン性に優れているため、半導体製造装置のなかでもクリーン性を要求される場所に使用されている。

次に鉛イオンプレーティング(玉にPb-IP)のものと、銀イオンプレーティング(玉にAg-IP)のものは、軟金属を潤滑として使用しているため潤滑剤からのアウトガスの発生がなく、超高真空中に適應する軸受である。さらにこれらの軸受は、耐熱性、高速回転性および耐荷重性で比較的優れた特性を示すことから、医療用の回転陽極X線管に採用されている。

4.2 超高真空用軸受のアウトガス特性

前項では、転動体(玉)に鉛もしくは銀をイオンプレーティングした軸受が、超高真空用軸受として適していることを述べた。ここでは、超高真空中で玉に鉛をイオンプレーティングした軸受と玉に銀をイオンプレーティングした軸受を運転した場合の、アウトガス特性を明らかにする。

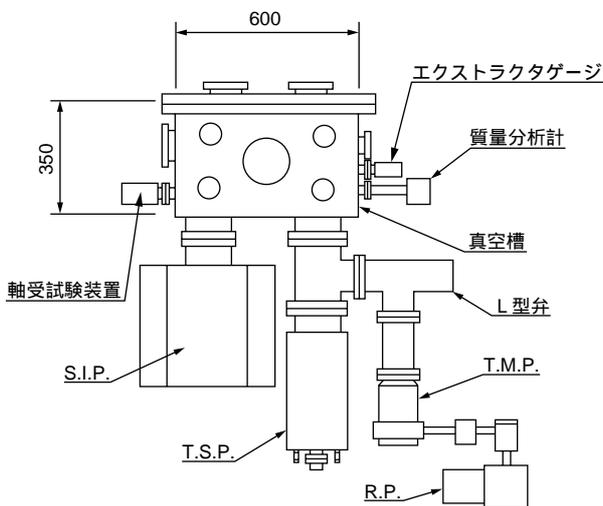


図3 超高真空試験装置
Ultra-high vacuum tester

図3に、ここで使用した超高真空試験装置を示す⁷⁾。

真空槽はアルミニウム合金製で、内寸法600×500×350である。排気系は、ロータリポンプ、ターボ分子ポンプ、スパッタイオンポンプ、チタンサブリメンションポンプ等で構成されている。

図4に試験方法、表6に試験条件を示す⁷⁾。

試験軸受(#608)を2個使用し、ばねによりアキシャル荷重を負荷する構造となっている。真空槽内の圧力は 1.3×10^{-8} Paで、マグネットカップリング型回転導入機により軸受を真空槽外から回転させる。

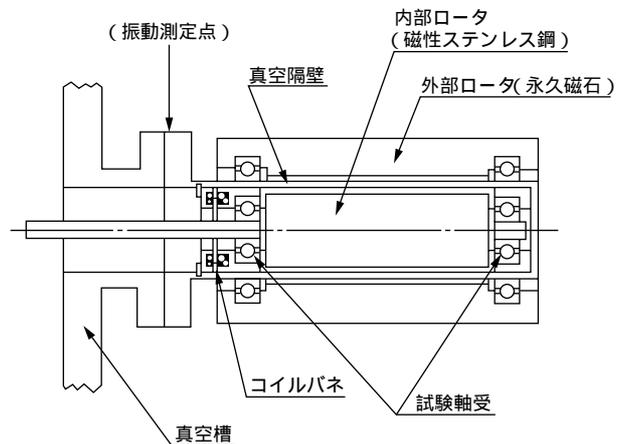


図4 試験方法
Test method

表6 試験条件
Test conditions

雰囲気圧力	荷重	回転数	温度
1.3×10^{-8} Pa (1.0×10^{-10} Torr)	$F_r = 3$ N $F_a = 98$ N	140r/m	室温

図5に試験結果を示す⁷⁾。

図5(1)は、玉に鉛をイオンプレーティング(Pb-IP)した軸受の真空槽内圧力変化を、図5(2)は、玉に銀をイオンプレーティング(Ag-IP)した軸受の真空槽内圧力変化を示す。玉に鉛をイオンプレーティングした軸受および玉に銀をイオンプレーティングした軸受はどちらも、回転開始と同時に圧力は急増するが、約10時間経過するとほぼ回転前の圧力に回復することがわかる。また、10時間以内でも軸受の回転を停止させれば、圧力は速やかに回転前の圧力にもどることを確認している。したがって、 1.3×10^{-8} Paの超高真空中で軸受の回転試験を行った結果から玉に鉛や銀のイオンプレーティングをおこなった軸受は、超高真空中で使用可能であることが明らかとなった。

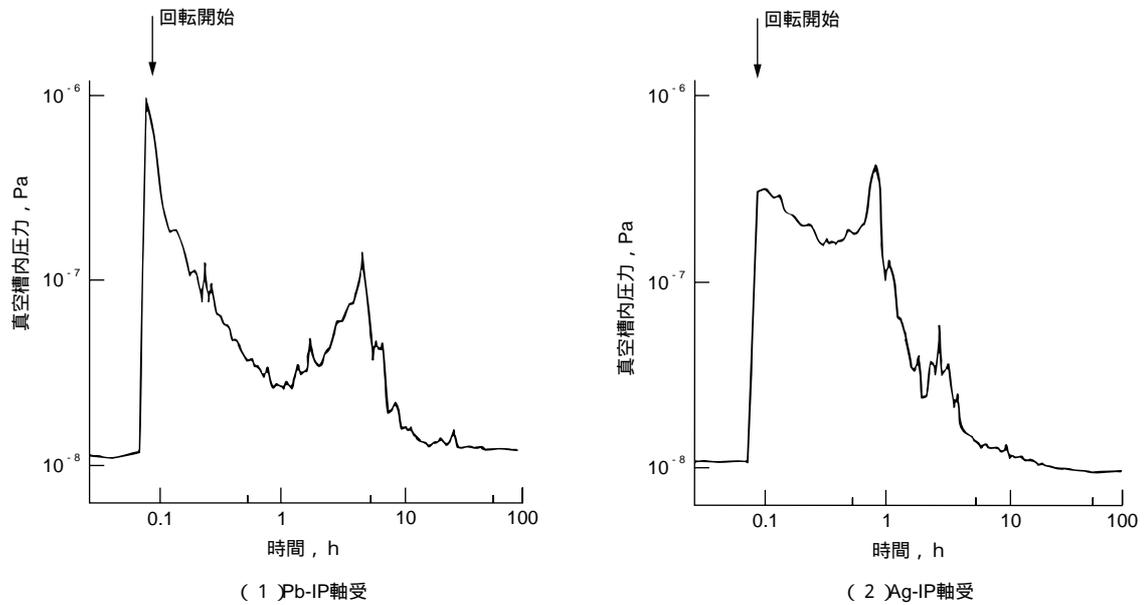


図5 試験結果(真空槽内圧力変化)
Test results (Pressure change in vacuum chamber)

5. おわりに

ここでは、特殊環境用軸受 (Koyo EXSEV軸受) の代表的な軸受構成に関して紹介し、次に特殊環境用軸受のなかで中心的な製品である低発塵軸受と、真空用軸受に関して詳細に説明した。低発塵軸受と真空用軸受は、グリースや油が嫌われる用途の軸受であり、半導体・液晶製造装置を中心に使用されている。半導体・液晶関係では年々技術が進歩しているため、それにともない軸受に要求される性能や使用環境も、年々厳しくなっていくものと思われる。

したがって、低発塵軸受や真空用軸受の性能向上のために、軸受材料や固体潤滑技術の開発を今後も継続して進めていくことが必要である。

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.
- 2) 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) 55.
- 3) J. R. Miner, W. A. Grace, R. Valori: ASLE Priprint No. 80 - AM - 3C - 3(1980).
- 4) 竹林博明, 林田一徳: Koyo Engineering Journal, no. 145(1994) 32.
- 5) 竹林博明, 唯根 勉, 吉岡武雄: トライボロジスト, vol. 38, no. 10(1993) 35.

- 6) 服部智哉, 北村和久, 林田一徳: Koyo Engineering Journal, no. 156(1999) 34.
- 7) Y. Fujii, H. Ishimaru: J. Vac. Technol. A(3)

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