

Koyo固体潤滑軸受について

Koyo Bearings with Solid Lubricants

藤井義樹 Y.FUJII 小野 浩 H.ONO

With recent progress in technology, bearings have been used in severer environments and in extreme conditions. Specifically, highly advanced technology requires bearings to be used in special environments, such as vacuum, cleanliness and high-temperature.

As for the conventional bearings lubricated with oil or grease, it is extremely difficult to meet these requirements.

Koyo have developed and marketed various types of bearings with solid lubricants, which have met the various needs.

In this paper, the development of the bearings with solid lubricants is presented.

Key Words: EXSEV bearing, solid lubricant, special environment

1. はじめに

近年の技術の進歩に伴い、転がり軸受に求められる性能は年々厳しく、かつ多様化してきている。

中でも、半導体・液晶、宇宙、医療などの先端分野においては、真空、クリーン、高温などの特殊環境で軸受が使用される場合がある。

このような特殊環境においては、油やグリースの使用が困難で、固体潤滑剤を使用しなければならない場合が多い。

Koyoではこれまで、さまざまなニーズに対応し、各種の固体潤滑仕様の軸受を開発してきた。本報では、Koyoの固体潤滑仕様軸受について紹介する。

2. 固体潤滑剤の分類と軸受への適用

固体潤滑剤は大きく分けて軟質金属系、層状結晶構造物質系および高分子系の3系統に分けられる。主な用途と特性、軸受への使用法を表1に示す¹⁾。

銀(Ag)や鉛(Pb)などの軟質金属系は軸受からのアウトガスが問題とされる超高真空中で使用する。なお、Agは大気中で使用すると、酸素の影響などにより耐久性が急激に低下するので注意が必要である。

高分子系はクリーン性能が求められる場合や腐食環境で使用される場合が多い。また雰囲気依存性が低いことから、大気～真空を繰り返す軸受としても使用可能である。

層状結晶構造物質は高温用途、および固体潤滑仕様で、より長寿命を得たい場合に使用する。MoS₂やWS₂は、真空領域でも使用可能である。

表1 転がり軸受に使用する主な固体潤滑剤

Typical solid lubricants for rolling bearing

分類	潤滑剤	主な特性				軸受への適用	
		熱安定性,		発塵	アウトガス	主な使用方法	主な用途, 目的
		大気	真空				
軟質金属	銀(Ag)	-	500			・玉にコーティング	・超高真空
	鉛(Pb)	-	300				
層状結晶構造物質	MoS ₂	350	400			・保持器や軌道輪にコーティング	・高温 ・長寿命
	WS ₂	425	400				
	黒鉛	500	-				
高分子	PTFE	260	200			・保持器材料	・クリーン ・腐食環境
	ポリイミド	300	200				

表2 Koyo固体潤滑軸受の構成と特長
Configurations and features of Koyo bearings with solid lubricants

潤滑剤の系統		高分子			層状構造物質	軟質金属	
名称		クリーンプロ	高温用 クリーンプロ	PTFE コーティング	MoS ₂ コーティング	Agイオン プレーティング	
コーティングタイプ	軸受構造 (太線部がコーティング部)						
	コーティング膜の内容	コーティング部品	全面 (シールド除)	内外輪軌道, 玉, 保持器内面	保持器	保持器	玉
		膜成分	ふっ素系高分子	ふっ素樹脂	PTFE (有機系バインダー)	MoS ₂ (無機系バインダー)	Ag (特殊下地膜)
	性能	雰囲気圧力, Pa	大気圧 ~ 10 ⁻⁵				10 ⁻³ ~ 10 ⁻¹⁰
		温度, *	- 100 ~ 200	- 100 ~ 260	- 100 ~ 200	- 100 ~ 300	- 200 ~ 500
		クリーン性	優	優	優		
潤滑剤の系統		高分子	高分子 層状物質複合	層状構造物質			
名称		FA保持器	PN保持器	WS ₂ セパレータ	グラファイト保持器		
保持器材料タイプ	軸受構造						
	保持器材料の成分	潤滑剤	ふっ素樹脂	ふっ素樹脂 層状物質系潤滑剤	WS ₂	グラファイト	
		他	強化繊維	PEEK樹脂 強化繊維	金属系焼結材	無機添加剤	
	性能	雰囲気圧力, Pa	大気 ~ 10 ⁻⁵			大気圧	
		温度, *	- 100 ~ 200	- 30 ~ 300	- 100 ~ 350	- 100 ~ 500	
		クリーン性	優				

* 温度は潤滑膜, 潤滑用保持器材のみの対応数値. 使用温度により別途内外輪, 玉材料の検討要.

以上の3系統の固体潤滑剤を, 用途に応じて製品化した主な固体潤滑仕様軸受の構成を表2に示す. 軟質金属の銀は玉へのコーティングで対応, 高分子系と層状結晶構造系の潤滑剤は, 軸受部品にコーティングする仕様と, 直接保持器材料として使用する仕様がある.

3. 固体潤滑仕様軸受の寿命

固体潤滑仕様軸受の寿命は, 潤滑剤の軸受への適用方法によって異なる.

コーティングタイプでは, 膜が摩耗してなくなれば供給が絶たれて寿命に至る.

これに対して保持器やセパレータの材質自身が潤滑剤の場合, 膜の場合のように供給が絶たれる心配がないため適切な回転条件下では, 長時間使用での潤滑剤の供給過多による潤滑剤自身のかみこみによるトルク増大, 保持器やセパレータの摩耗による軸受の振動増大などにより寿命となる.

3.1 コーティングタイプの寿命

潤滑膜タイプでは, 実験結果をもとに数種の潤滑仕様について, 寿命推定式が得られているので紹介する^{1), 3)}.

a) クリーンプロ, PTFE, MoS₂コーティングの場合

$$L_{av} = b_2 \cdot (Ce/P)^3 \times 0.016667/n$$

L_{av}: 50%信頼寿命, h

b₂: 材料係数

PTFE, MoS₂コーティング = 6

クリーンプロ = 42

Ce: 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

n: 回転速度, min⁻¹

b) Agイオンプレーティング球の場合

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

L_{vh} : 90%信頼寿命, h

C_v : 同一寸法の鋼製軸受の

基本動定格荷重 × 1 / 13

P : 動等価荷重, N

n : 回転速度, min⁻¹

ただし, 10 ≤ n ≤ 10 000

b₁ : 回転速度依存係数

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

b₂ : 材料係数, = 1 (特殊イオンプレーティング法により銀をイオンプレーティングした場合)

b₃ : 雰囲気・温度による係数

$$= 1 (10^{-3} \text{Pa, 室温の場合)}$$

3.2 保持器材タイプの寿命

前述したように、保持器やセパレータの材質自身が潤滑剤であるタイプの軸受寿命は、コーティングタイプの軸受に比べて、一般的に長い。固体潤滑仕様で、長寿命を目的として開発したWS₂セパレータ軸受の寿命について紹介する⁶⁾。

本軸受の寿命評価結果を図1に示す。現状で得られているデータは、ほとんどが異常なく試験を打ち切っているデータであり、現在なお試験中である。その寿命はコーティングタイプの中では長寿命であるクリーンプロ軸受の100倍以上と推定されている。

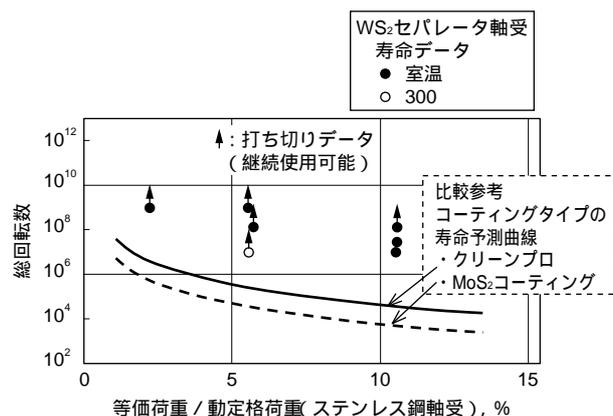


図1 寿命試験結果
Life test results

4. 特殊環境別の軸受構成

4.1 真空用途

雰囲気圧力と温度による潤滑剤の使用区分を図2に示す。

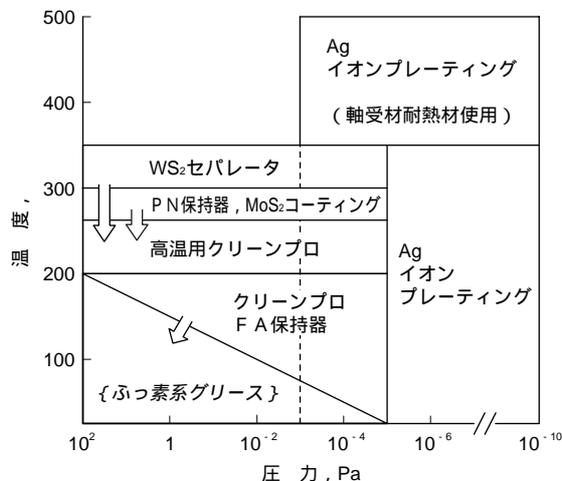


図2 真空環境での潤滑剤対応区分

Application range by lubricants for vacuum environment

真空中でも、室温程度であれば、10⁻⁵Pa程度まではふっ素系グリースが使用できるが、ふっ素油分の汚染に対する注意が必要である。

油分の汚染が嫌われる場合、また同じ圧力でもより高温の領域では固体潤滑剤を使用することになる。温度に応じて図中の各潤滑仕様が使用可能である。

10⁻⁵Paよりも圧力の低い超高真空になると、軸受からのアウトガス特性が重要となり、軟質金属、主に銀(Ag)を使用することになる。

玉にAgイオンプレーティング処理した軸受のアウトガス特性について評価を行った試験を紹介する²⁾。図3に試験方法、表3に試験条件を、図4に試験結果を示す。

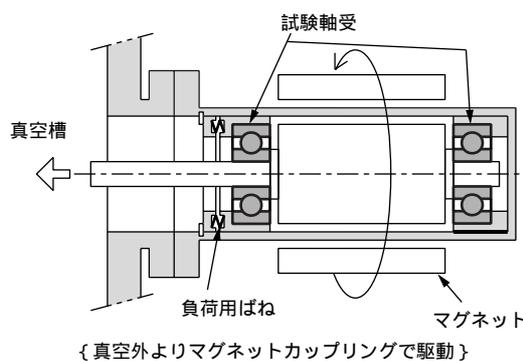


図3 試験方法
Test method

表3 試験条件
Test conditions

試験軸受	基本呼び番号	608(8 × 22 × 7)
	材質仕様	内外輪, 玉: ステンレス鋼 保持器: ステンレス鋼板 * 玉にAgイオンプレーティング処理
試験条件	雰囲気圧力	1.3×10^{-8} Pa
	荷重	アキシャル: 98N ラジアル: 3N
	回転速度	140min^{-1}
	雰囲気温度	室温

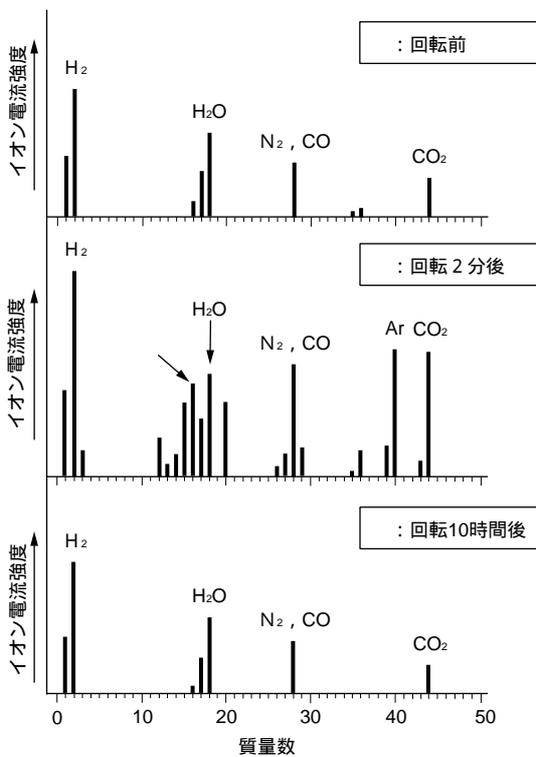


図4 試験結果(真空槽内残留ガス分析結果)
Test results (mass spectra of residual gas)

本試験方法では、真空内にセットした試験軸受を磁気カップリングにより真空外から駆動させる構造となっており、真空槽にガス分析装置を取り付けてガス分析を行った。

軸受の回転開始直後は、軸受に吸着していたと考えられる各種ガス、およびイオンプレーティング処理に使用したArなどのガスの放出が確認されるが、約10時間回転後には回転前と同様の状態となり、軸受からのアウトガスは確認できなくなる。

同様の評価で、玉にMoS₂のスパッタリング処理を行った軸受では、回転開始後60時間後でもアウトガスが確認されることや、アウトガス成分に

膜成分である硫黄(S)があることが確認されている²⁾。

また、保持器にPTFEコーティング(焼付処理)を行った軸受では、より圧力の高い 10^{-6} Pa程度の圧力での評価において、ふっ化炭素(CF)系や炭化水素(CH)系のアウトガスが確認されている¹⁾。

以上の結果より、 10^{-5} Pa以下の超高真空領域での潤滑剤は、Agが適していることが分かる。

4.2 クリーン用途

各種潤滑剤を用いた発塵性能比較試験の試験装置を図5に、結果を図6に示す^{1), 4)}。

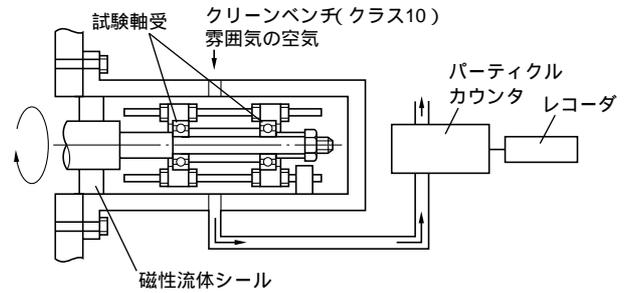
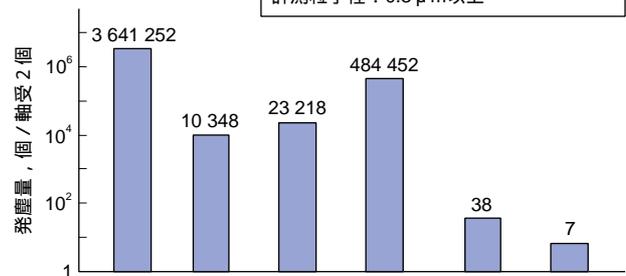


図5 試験方法
Test method

試験条件
軸受: ML6012(6 × 12 × 3)
荷重: ラジアル2.9N / 軸受2個
回転速度: 200min^{-1}
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



軸受記号	A	B	C	D	E	F
内外輪	SUS440C					SUS440C + クリーンブ口
玉	SUS440C	Si ₃ N ₄	SUS440C + Agイオンプレーティング	SUS440C		SUS440C + クリーンブ口
保持器	SUS304			SUS304 + MoS ₂ コーティング	F A 保持器	SUS440C + クリーンブ口

図6 試験結果
Test results

AgやMoS₂潤滑の軸受(図中のC , D)の発塵量が1万個以上のレベルであるのに対し, ぶっ素系高分子の固体潤滑剤の軸受(図中のE , F)は, 3桁以上少ない発塵であり, クリーン用途に適していることが分かる。

図7にクリーン環境用軸受の潤滑仕様対応区分を示す。

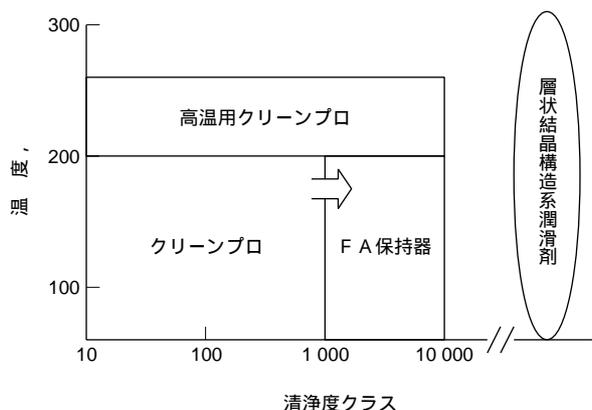


図7 クリーン環境での固体潤滑剤対応区分

Application range by solid lubricants for clean environment

4.3 高温用途

図8に高温用途の固体潤滑仕様の区分を示す。

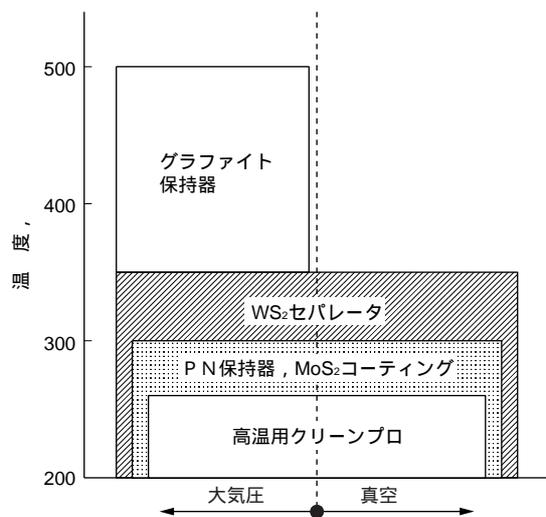


図8 高温領域での固体潤滑剤対応区分

Application range by solid lubricants for high-temp. environment

350 までは温度に応じて「高温用クリーンプロ」や「PN保持器」, 「WS₂セパレータ」などが大気圧中, 真空中の双方で使用可能である。

さらに高温では, 「グラファイト保持器」が500 まで使用可能であるが, 真空中では潤滑効果がなく大気圧中のみでの使用となる。

500 を超える超高温領域では, 現在安定して使用できる潤滑剤はない。この領域ではやむなく内外輪, 転動体がセラミックの総セラミック軸受を無潤滑状態で使用する場合があります。

5. セラミックスの適用

セラミックスは潤滑剤ではないが, その結合形態が共有結合であるため, 金属材料のように凝着という現象を起こしにくいという特性をもっている。このため, 特殊な環境においては, セラミック材を使用した軸受を無潤滑で使用する場合もある。前出の図6における無潤滑状態での発塵比較で, 玉をセラミックス(Si₃N₄)にすることにより, すべて鉄系材料の軸受より発塵が2桁も減っていることからその効果も分かる。(図6の軸受AとBの比較)

また, 固体潤滑を使用する場合でも, 軸受材料をセラミックスにすることにより, 優れた性能が得られる場合が多い。

固体潤滑剤とセラミックスを組み合わせた試験例を紹介する⁵⁾。表4に試験軸受と試験条件を, 図9に結果を示す。保持器に施したPTFEコーティングからの移着により固体潤滑を行う仕様の軸受において, 軸受材料のみを変え, 軸受からの発塵量が一定量以上に達する「発塵寿命」を評価した例である。軸受材料をステンレスからセラミックスにすることにより, 発塵寿命が大きく伸びることが分かる。これは, PTFEの相手材料による移着特性, およびセラミックスの方が少ない潤滑剤量で潤滑可能であったことが確認されている。

表4 試験軸受と試験条件

Test bearings and conditions

		軸受A	軸受B	軸受C
		ステンレス軸受	組合せセラミック軸受	セラミック軸受
試験軸受	呼び番号	608(8 × 22 × 7)		
	内外輪	SUS440C		窒化けい素
	保持器	SUS440C	窒化けい素	窒化けい素
試験条件	回転速度	200min ⁻¹		
	雰囲気測定	クラス10 クリーンベンチ内, 室温		
	寿命判定	粒子径0.3 μm以上の発塵粒子数が1000個 / 0.1cfを超える時間		

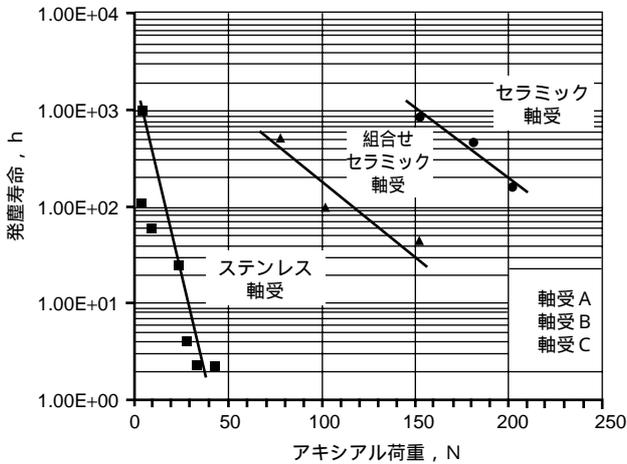


図9 PTFE潤滑セラミック軸受の発塵寿命
Particle life of ceramic bearing coated with PTFE film

6. おわりに

以上，Koyoの固体潤滑仕様軸受について簡単に紹介してきた。

今後も軸受の使用される環境はますます苛酷化，多様化してくるものと考えられる．多様化するニーズに対応し，より多くの要求性能を満足させる特殊環境用固体潤滑軸受の開発は，今後ますます重要となる．

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.
- 2) 安井啓剛，角本賢一，藤井義樹：Koyo Engineering Journal, no. 139 (1991) 106
- 3) 竹林博明：Koyo Engineering Journal, no. 156 (1999) 66.
- 4) 竹林博明：Koyo Engineering Journal, no. 157 (2000) 76.
- 5) 豊田 泰：Koyo Engineering Journal, no. 150 (1996) 53.
- 6) 光洋精工(株)：WSベアリング，CAT. no. 184.

筆者



藤井義樹*
Y. FUJII



小野 浩**
H. ONO

- * 軸受事業本部 解析技術部
** 軸受事業本部 産業機器技術部