

特殊環境用転がり軸受

Rolling Bearings for Extreme Special Environments

藤井義樹 Y. FUJII 小野 浩 H. ONO

As a result of recent advances in technology, bearings have come to be used in severer environments and under extreme conditions. Specifically, highly advanced technology requires bearings that can be used in special environments, such as in vacuum, clean, high-temperature, and corrosive environments. It is extremely difficult for conventional bearings made of bearing steel and lubricated with ordinary oil or grease to meet these requirements. JTEKT has developed and commercialized various types of bearings for extreme special environments in order to meet such needs. In this paper, the materials, lubricants and configurations of bearings for extreme special environments are presented.

Key Words: special environment, solid lubricant, ceramics, vacuum, cleanliness

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過酷化、かつ多様化してきている。

特に、半導体、液晶などの薄型ディスプレイ、記録メディア、医療などの先端技術分野においては、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。図1に特殊環境と産業の関わりを示す。

このような特殊環境においては、通常的环境で使用される軸受鋼や、潤滑油、グリースが使用できない軸受の用途も多い。

当社ではこれまで、さまざまなニーズに対応出来るような各種の特殊環境用軸受を開発し、EXSEV® (Extreme Special Environment) 軸受シリーズとして商品化を進めてきた。特殊環境で使用する軸受においては、使用される環境や軸受に要求される性能に応じて、軸受材料と潤滑剤をどのように選択し、どのように組み合わせるかが重要なポイントとなる。

そこでまず、特殊環境で使用される軸受材料と潤滑剤について述べ、次に用途別の軸受、および軸受構成例について紹介する。

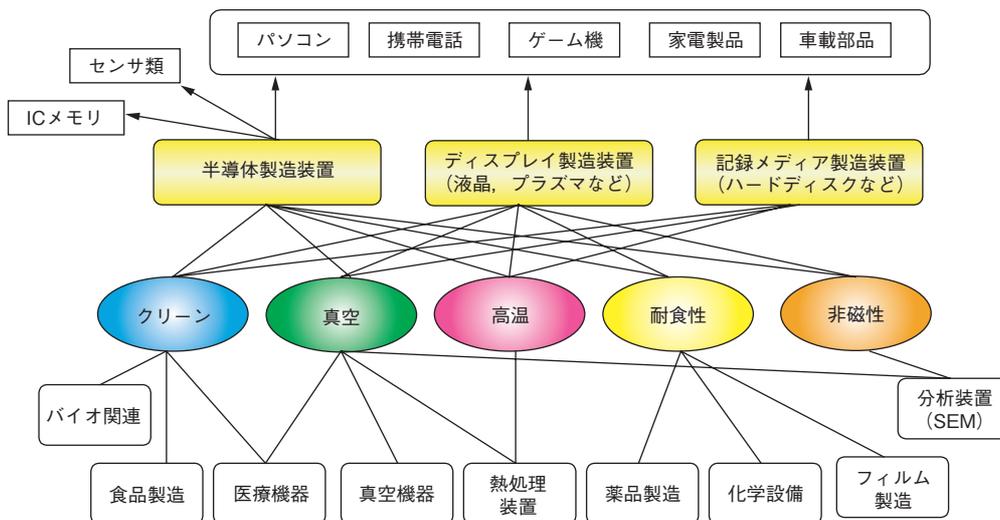


図1 特殊環境と産業の関わり

Relationship between extreme special environments and industries

2. 軸受材料

2.1 金属材料

軸受の内輪・外輪，転動体に使用される代表的な鉄系材料を表1に示す^{1), 2)}。

通常，一般軸受の内輪・外輪，転動体には転がり疲れに強い高炭素クロム軸受鋼（SUJ2）が使用される。しかし，真空，クリーン，高温などの特殊環境では，さび止め油を使用できない場合が多く，SUJ2では発錆の問題が生ずる。このため，耐食性に優れたマルテンサイト系ステンレス鋼（SUS440C）を特殊環境の標準材料として使用する。SUS440Cは比較的耐熱特性に優れ，300℃でもHRC55程度の硬さを有することから，300℃程度までの準高温用材料として使用可能である。

さらに，300℃を超える高温環境においては高速度工具鋼（SKH4）を，腐食性が強い環境においては，より耐食性に優れた析出硬化系ステンレス鋼（SUS630）を

それぞれ使用する。また非磁性用途としては，時効硬化処理を施すことによりHRC43程度の硬さが得られるオーステナイト系の非磁性ステンレス鋼を使用する場合がある³⁾。非鉄金属としては，非磁性のベリリウム銅，耐熱性に優れたコバルト合金や耐食性に優れたチタン合金，ニッケル合金などが挙げられる。しかし，軸受材料としてセラミックスが普及してきた現在，これらの非鉄金属は一部の用途を除き，ほとんど使用されなくなっている。

2.2 セラミックス

セラミックスは耐熱性，耐食性，軽量，非磁性，耐摩耗性などの多くの優れた特性を持ち，さまざまな特殊環境用軸受に使用される。主なセラミックスの特性を表2に示す^{1), 2)}。耐荷重性，転がり寿命の点から，軸受には窒化けい素（Si₃N₄）がセラミックスの標準材料として使用される。

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 bearings

	硬さ HRC	縦弾性係数 GPa	線膨張係数 ×10 ⁻⁶ K ⁻¹	耐荷 重性	アウト ガス	耐食性	軸受への適用実績		備 考
							内輪・外輪	玉	
高炭素クロム軸受鋼 (SUJ2)	61	208	12.5	◎	◎	×	有	有	一般軸受 標準材料
マルテンサイト系 ステンレス鋼 (SUS440C)	60	208	10.5	◎	◎	△	有	有	特殊環境用 軸受標準材料
高速度工具鋼 (SKH4)	64	207	12.0	◎	◎	×	有	有	高温用
析出硬化系ステンレス鋼 (SUS630)	40	196	11.0	○	◎	○	有	無	耐食用
非磁性ステンレス鋼	43	200	18.0	○	◎	△	有	無	非磁性用

◎：優，○：良，△：可，×：不可

表2 各種セラミックスの特性
Characteristics of fine ceramics

	窒化けい素 Si ₃ N ₄	ジルコニア ZrO ₂	炭化けい素 SiC	アルミナ Al ₂ O ₃	軸受鋼 SUJ2 (参考比較用)
硬さ, HV	1 500	1 200	2 200	1 600	750
密度, g/cm ³	3.2	6	3.1	3.8	7.8
縦弾性係数, GPa	320	220	380	350	208
線膨張係数, K ⁻¹	3.2 × 10 ⁻⁶	10.5 × 10 ⁻⁶	3.9 × 10 ⁻⁶	7.1 × 10 ⁻⁶	12.5 × 10 ⁻⁶
耐荷重性	◎	○	○	△	◎
耐摩耗性	◎	◎	◎	◎	◎
耐熱性	800	200	1 000 以上	←	180
備考	セラミック軸受用 標準材料	—	高耐食用	耐荷重小 軸受には不適	—

◎：優，○：良，△：可

また、セラミックスは耐熱、耐食、軽量、非磁性といった、一般的に知られた特性のほか、その結合形態が共有結合であるため、金属材料のような凝着という現象を生じにくい特性を持っている。このため、500℃を超える高温や、真空中で固体潤滑剤も使用できないような特殊な環境においては、セラミックスを使用した軸受が無潤滑で使用される場合もある。

セラミックスの凝着抑制効果を示す試験例を紹介する。玉に SUS440C および Si₃N₄ を使用した軸受について、潤滑剤を使用しない状態で軸受を回転させ、軸受からの発じん量を測定した^{1), 4)}。試験装置を図2に、試験条件を表3に、結果を図3に示す。玉に Si₃N₄ を使用した軸受 B は、玉に SUS440C を使用した軸受 A に比べ、発じん量は 1/100 以下に低減した。発じん成分を捕集して分析した結果、Si₃N₄ 製玉の軸受は、SUS440C 製玉の軸受よりも、転がり接触面の摩耗が抑制されたことが確認されている。

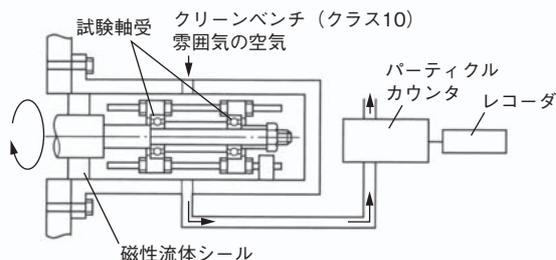


図2 試験装置
Test equipment

表3 試験条件
Test conditions

軸受サイズ	φ6mm × φ12mm × 3mm
荷重	ラジアル 2.9N / 軸受 2 個
回転速度	200min ⁻¹
試験時間	20h
計測粒子径	0.3μm 以上

	内輪・外輪	玉	保持器	潤滑剤
A	SUS440C	SUS440C	SUS304	なし (無潤滑)
B	SUS440C	Si ₃ N ₄	SUS304	なし (無潤滑)



図3 組合せセラミック軸受とステンレス軸受の発じん比較

Comparison of emitted particles of hybrid ceramic bearing and steel bearing

3. 潤滑剤

潤滑剤としては、グリースを用いる場合と固体潤滑剤を用いる場合に大別される。

グリースは、固体潤滑剤に比べてはるかに潤滑性があるので、使用が許容出来る場合はグリースを使用する。特殊環境用グリースとしては、主に低蒸気圧で、化学的に安定で、かつ、200℃程度まで使用可能なふっ素系グリースを使用する。

一方、使用温度・アウトガスなどの問題でグリースを使用できない環境では、固体潤滑剤を使用することになる。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三系統に分けられる。主な用途と軸受への使用例を表4^{1), 2), 5)}に示す。

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される。軸受へはイオンプレーティング法により、転動体 (玉) にコーティングして使用する。Ag を大気中で使用すると、酸化により耐久性が急激に低下するので注意が必要である。

層状結晶構造物質は主に高温用途で使用される。二硫化モリブデン (MoS₂) や二硫化タングステン (WS₂) は、真空領域でも使用可能である。軸受へは、スパッタリング法や焼付け法により、保持器や軌道輪にコーティングして使用する場合と、複合材料として保持器材料に含有させて使用する場合がある。

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。また、雰囲気依存性が低いことから、大気と真空を繰り返す条件用の軸受としても使用される。軸受へは、保持器や軌道輪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使用する場合がある。

4. 各種特殊環境での転がり軸受仕様

4.1 クリーン環境

クリーン環境では、軸受からの発じんが問題となる。各種潤滑剤を用いた発じん性能比較試験結果を図4に示す^{1), 4)}。

銀や二硫化モリブデン潤滑の軸受の発じん量が1万個以上のレベルであるのに対し、ふっ素系高分子の固体潤滑剤使用の軸受3種は、3桁以上少ない発じん量であることが分かる (図4の E, F, G)。このため、クリーン環境ではふっ素系高分子を潤滑剤とした軸受が多く使

表4 特殊環境用軸受に使用される主な固体潤滑剤
Typical solid lubricants for EXSEV bearings

固体潤滑剤		主な特性						軸受への適用	
		熱安定性, °C		摩擦係数		発じん	アウトガス	主な使用方法	主な用途
		大気	真空	大気	真空				
軟質金属	銀 (Ag)	-	600	-	0.2 ~ 0.3	△	◎	玉にコーティング	超高真空
	鉛 (Pb)	-	300	0.05 ~ 0.5	0.1 ~ 0.15	△	◎		
層状結晶構造物質	二硫化モリブデン (MoS ₂)	350	400	0.01 ~ 0.25	0.001 ~ 0.25	△	○	保持器や内輪・外輪にコーティング	真空
	二硫化タングステン (WS ₂)	425	400	0.05 ~ 0.28	0.01 ~ 0.2	△	○		高温
	グラファイト (C)	500	-	0.05 ~ 0.3	0.4 ~ 1.0	△	○		高温
高分子	ポリテトラフルオロエチレン (PTFE)	260	200	0.04 ~ 0.2	0.04 ~ 0.2	◎	△	保持器材料	クリーン
	ポリイミド (PI)	300	200	0.05 ~ 0.6	0.05 ~ 0.6	○	△		真空, 耐食

◎：優, ○：良, △：可

用される。

また、ふっ素系グリースも低発じんである。ふっ素系グリース潤滑仕様軸受の発じん成分の大半は、基油であるふっ素油（パーフルオロポリエーテル）である。ふっ素油の少量の飛散が許容できるなら、ふっ素系グリースは低発じん固体潤滑仕様よりも長寿命な軸受として使用できる。

4.2 真空環境

真空中で使用される各種潤滑剤について、圧力と温度による一般的な使用区分を図5に示す^{5), 6)}。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。ただし、徐々にではあるが油分が蒸発するため、油分の汚染に対する注意が必要である。

また、同じ圧力領域で高分子系や層状結晶構造物質系の固体潤滑剤は、ふっ素系グリースよりも高い温度範囲まで使用できる。10⁻⁵Pa以下の超高真空領域になると、軸受からのアウトガスが重要視され、軟質金属を使用する。

	軸受の材料構成			潤滑方法	
	内輪・外輪	玉	保持器	適用部位	潤滑剤
C	SUS440C	SUS440C	SUS304	玉	Agイオンプレーティング
D				保持器	MoS ₂ 焼付け膜
E				保持器	PTFE焼付け膜
F			ふっ素樹脂	保持器	ふっ素樹脂
G			SUS304	全面	ふっ素系高分子膜
H				封入	ふっ素系グリース

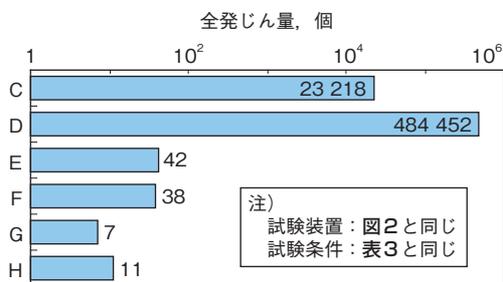


図4 試験結果 (20時間試験中の全発じん量の比較)
Test result (comparison of total emitted particles in 20-hour test)

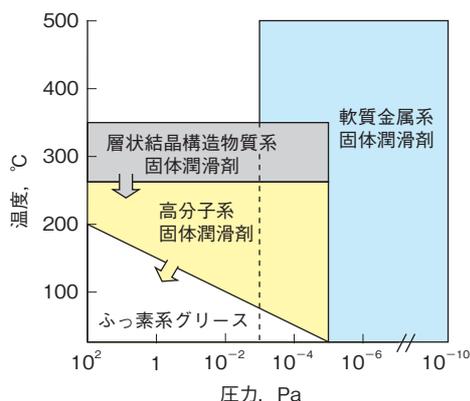


図5 真空環境での潤滑剤使用区分
Application range of each lubricant in vacuum environments

4.3 高温環境

高温環境では、その温度により軸受材料とともに潤滑剤でも検討する必要がある。図6に軸受材料および潤滑剤の一般的な使用区分を示す^{5), 6)}。

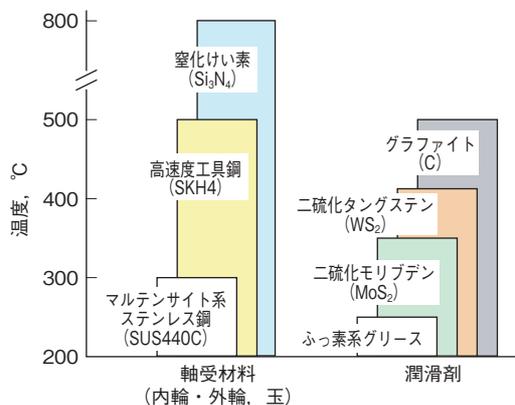


図6 高温環境での軸受材料、潤滑剤使用区分
Application range of each lubricant and bearing material in high-temperature environments

軸受材料では、300°C程度まではマルテンサイト系ステンレス鋼、300°Cから500°C程度までは高速度工具鋼を使用する。窒化けい素は800°Cまで使用可能である。

潤滑剤では、250°C程度まではふっ素系グリースが使用可能で、これを超えると二硫化モリブデン、二硫化タングステン、グラファイトなどの層状構造物質の固体潤滑剤を使用する。グラファイトは500°C程度まで使用可能であるが、真空中では潤滑効果が無く使用できない。500°Cを超える高温領域では、現在安定して使用できる潤滑剤は無い。この領域では、内輪・外輪、玉がセラミックスの総セラミック軸受を、無潤滑状態で使用する場合がある。

4.4 腐食環境

腐食環境は、腐食性液中や液飛散環境、腐食性ガス環境、またその液やガスの種類、濃度や温度などさまざまであり、内輪・外輪材料では析出硬化系ステンレス鋼、セラミックスを使い分けている。転動体はセラミックスで、保持器にはふっ素樹脂を使用している。

セラミックスとしては、一般的には焼結助剤に Al₂O₃-Y₂O₃ を用いた窒化けい素を使用しており、金属材料に比べてはるかに耐食性に優れている。しかし、薬液の種類や使用温度などにより、過酷な腐食条件下では焼結助剤が溶出して腐食する場合がある。このような条件下で

は、焼結助剤に MgAl₂O₄ スピネルを使用して耐食性を向上させた窒化けい素⁷⁾、や炭化けい素 (SiC) を用いる場合もある。

4.5 非磁性

非磁性用途では、内輪・外輪材料としてセラミックス、非磁性ステンレス鋼³⁾ を目的に応じて使用する。いずれの場合も転動体はセラミックスであり、保持器はふっ素系を主とした樹脂保持器を使用する。

5. 軸受の構成例

実際に市場で使用される特殊環境は、「真空+クリーン」あるいは「真空+高温」などの、いくつかの特殊環境からなる複合特殊環境であるケースが多い。軸受に求める性能の中で、優先順位をつけて軸受を選定することが重要なポイントとなる。

当社の特殊環境用軸受の代表的な構成例を表5に示す¹⁾。前述した材料、潤滑剤を、これまで培ってきた技術に組み合わせて、各種の複合環境に対応している。

特殊環境が最も多い分野は、半導体製造工程の「前工程」と分類される各工程で、ウェハ上に半導体を作りこむ工程である。半導体製造の前工程で要求される特性と、主に使用されている軸受を表6に示す。あらゆる工程で、当社の特殊環境用軸受が使用されているのが分かる。

6. おわりに

以上、特殊環境用軸受の材料、潤滑および環境別の軸受について紹介してきた。

軸受の使用される環境はますます過酷化、多様化してくるものと考えられる。たとえば、半導体においては、年々回路の微細化が進行しており、その製造装置に使用される軸受のクリーン性、アウトガス特性は、現状よりも高いレベルが要求されてくることが予想される。

今後も、材料、表面処理、潤滑剤、最適設計など、さまざまな技術を駆使した開発を進め、より高機能な特殊環境用軸受を市場に提案していきたい。

表5 特殊環境用軸受の代表的な構成例
Typical compositions of JTEKT EXSEV bearings

製品名	構成			潤滑		適応可能環境					
	内輪・外輪	玉	保持器	シールド	潤滑剤	適用部位	クリーン	真空 (圧力, Pa)	高温 (温度, °C)	耐食性	非磁性
クリーンプロ ベアリング	マルテンサイト系 ステンレス鋼		オーステナイト系 ステンレス鋼		ふっ素系 高分子	全面に コーティング	○	~10 ⁻⁵	200	△	-
高温クリーンプロ ベアリング					ふっ素樹脂	軌道面, 玉に コーティング	○	~10 ⁻⁵	260	△	-
DL ベアリング					ふっ素系 グリース	封入	○	~10 ⁻⁵	200	△	-
MG ベアリング					銀	玉に コーティング	-	10 ⁻³ ~10 ⁻¹⁰	300	△	-
MO ベアリング					二硫化 モリブデン	保持器に コーティング	-	~10 ⁻⁵	300	△	-
PN ベアリング					PEEK 樹脂	保持器に含有	-	~10 ⁻⁵	300	△	-
WS ベアリング					焼結 セパレータ	セパレータに 含有	-	~10 ⁻⁵	350	△	-
耐食組合せ セラミック軸受	析出硬化系 ステンレス鋼	無し			ふっ素樹脂	保持器材料	○	~10 ⁻⁵	200	○	-
セラミック軸受	窒化けい素						○	~10 ⁻⁵	200	○	○
耐食 セラミック軸受	耐食仕様 窒化けい素						○	~10 ⁻⁵	200	○	○
高耐食 セラミック軸受	炭化けい素						○	~10 ⁻⁵	200	○	○
非磁性組合せ セラミック軸受	非磁性 ステンレス鋼						○	~10 ⁻⁵	200	△	○
高温組合せ セラミック軸受	高速度工具鋼						-	-	500	-	-
総玉形セラミック 軸受	窒化けい素						無し (総玉形)	無し	無し	-	-

○：適応可，△：場合によって適応可

表6 半導体製造装置用軸受に要求される特性
Required characteristics of bearings for semiconductor manufacturing equipment

主な半導体製造工程	軸受に要求される特性*					主に使用される軸受**
	アウトガス (真空)	クリーン	耐食性	非磁性	高温	
酸化膜形成	B	D	A	D	A	WS ベアリング, MO ベアリング
露光	A	B	D	D	D	クリーンプロベアリング
エッチング	D	C	A	D	D	セラミック軸受, 耐食組合せセラミック軸受
イオン注入	B	B	D	D	D	DL ベアリング
スパッタリング, CVD	B	A	D	D	A	クリーンプロベアリング, 高温クリーンプロベアリング
平坦化 (CMP)	D	B	A	D	D	セラミック軸受, 耐食セラミック軸受
検査装置 (SEM)	C	B	D	A	D	セラミック軸受, 非磁性組合せセラミック軸受
搬送	B	B	B	D	B	クリーンプロベアリング, DL ベアリング
洗浄	D	B	A	D	D	クリーンプロベアリング, セラミック軸受

* 特性の必要性：(高) A ←必要性→ D (低)

**各軸受の仕様については、表5参照

参考文献

- 1) 株式会社ジェイテクト：特殊環境用軸受シリーズ セラミック軸受・EXSEV 軸受, CAT. no. B2004(2006).
- 2) 竹林博明：Koyo Engineering Journal, no. 156(1999) 66.
- 3) 服部智哉, 北村和久, 林田一徳：Koyo Engineering Journal, no. 156(1999)34.
- 4) 竹林博明：Koyo Engineering Journal, no. 157(2000) 76.
- 5) 藤井義樹, 竹林博明：設計工学, 38, 3(2003)115.
- 6) 藤井義樹, 小野 浩：Koyo Engineering Journal, no. 164(2003)24.
- 7) 竹林博明, 林田一徳：Koyo Engineering Journal, no. 145(1994)132.

筆者



藤井義樹*
Y. FUJII



小野 浩**
H. ONO

* 軸受・駆動事業本部 実験解析技術部

** 軸受・駆動事業本部 産業機器技術部