

半導体製造装置向け特殊環境用軸受の開発技術動向

Trends of Technological Development of Special Environment Bearings for Semiconductor Manufacturing Equipment

木村和博 K. KIMURA

In line with technological progress of recent years, the environment and conditions in which rolling bearings are used are becoming increasingly advanced and diversified year by year. Bearings are being required to perform in harsher operating conditions, such as special environments with high temperature, vacuum, cleanliness, and corrosiveness.

Since developing vacuum bearings (silver ion plate bearings) in 1978, JTEKT has studied lubricants and bearing materials while promoting the development of the EXSEV (Extreme Special Environment) bearing series that supports various special environments in order to keep pace with cutting-edge technical fields.

Many bearings are exposed to diverse and harsh special environments during the semiconductor manufacturing process in particular. This paper will highlight the needs of each operating environment for the main manufacturing processes and the JTEKT bearings that support such needs.

Key Words: semiconductors, vacuum, clean, high temperatures, corrosive, solid lubricant, EXSEV

1. はじめに

近年の技術進歩にともなって、転がり軸受が使用される環境や条件は年々過酷化・多様化しており、それに伴い特殊環境用軸受の使用条件も同様にますます厳しくなっている。なかでも半導体市場は、スマートフォンの機能向上やIoT（Internet of Things：モノのインターネット）、AI（Artificial Intelligence：人工知能）、自動運転などの普及により需要が急速に拡大し、各種製造装置には信頼性及び耐久性の向上が求められている。

当社では、1978年に開発した真空用玉軸受（銀イオンプレーティング軸受）を皮切りに、さまざまな製品を開発し、特殊環境に適合したEXSEV（Extreme Special Environment）軸受をシリーズ化し、先端デバイスの製造装置に広く使用されてきた。特に半導体製造装置に用いられる軸受の使用環境は表1に示すように各工程で真空やクリーン、高温、腐食と多岐にわたり、それぞれの環境に適合した軸受が求められている。

本報では特殊環境用軸受の概要に加え、半導体製造装置に使用される軸受の特長について紹介する。

表1 半導体製造工程と主な軸受使用環境

Semiconductor manufacturing processes and main bearing operating environments

半導体製造工程		酸化	露光	エッチング	薄膜生成	平坦化 (CMP)	電極形成	洗浄	検査	搬送	真空ポンプ
軸受使用環境	真空	○	—	○	○	—	○	—	○	○	○
	クリーン	—	○	—	○	—	○	○	○	○	—
	高温	○	—	—	—	—	○	—	—	○	—
	腐食	○	—	○	—	○	—	○	—	—	—
適用製品	EXSEV-EX : 2.1項	○	—	○	○	○	—	—	○	○	—
	NEW クリーンプロ-PR : 2.2項	—	○	—	—	—	—	○	—	—	—
	MV コーティング : 2.3項	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○
	EXSEV-XT : 3.1項	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—
	セラミック軸受 : 4.2項	○	—	○	—	—	○	○	—	—	—

2. 真空・クリーン環境

2.1 EXSEV-EX (真空・クリーン用ふっ素グリース)

一般的な軸受には、鉱油系潤滑油を基油とするグリースが多く使用される。しかし半導体製造装置では、油分の蒸発、グリースの分解などの問題から使用できない場合が多い。そのため 200℃ を超える高温環境や、油分の蒸発、汚染が問題となる真空やクリーン環境においては、低蒸気圧で、化学的に安定しているパーフルオロポリエーテル (PFPE) を基油とし、ポリテトラフルオロエチレン (PTFE) を増ちょう剤としたグリース、いわゆるふっ素グリースが使用される。

近年、国際的に環境負荷物質の規制が強まっており、PTFE に含有するパーフルオロオクタン酸 (PFOA) とその塩はストックホルム条約で規制の対象となったことから、ふっ素グリースが広く使用される半導体業界でも早急な環境対応が求められている。このような環境規制の動きに対応し、当社は 2019 年にこれまで提供してきたふっ素グリース (KDL グリース) に代わる PFOA フリー品として EXSEV-EX (図 1) を開発した。開発品の発じん量およびアウトガス量を従来品の KDL グリースと比較評価した結果を以下に示す。発じん評価装置を図 2、評価条件を表 2 に示す。クリーンベンチ内にクリーンエアを供給した環境下で軸受を二つ配置し、ばねでアキシアル荷重を負荷した状態で回転させながら、軸受からの発じん量をパーティクルカウンターで計測した。図 3 のように開発品の発じん量は従来品同等以下に抑えられた。さらにガスクロマトグラフィー質量分析法 (以下、GC/MS) を用いて表 3 の条件でアウトガス量を測定したところ、図 4 のように従来品同等以下であった。開発品の発じん量およびアウトガス量は従来品同等以下に抑えることができた。また開発品は、起動トルク、回転トルク、音響、寿命においても従来品同等以上の性能を有しているうえ、環境規制にも対応できたことにより、お客様である半導体製造装置メーカーの環境規制対応にも広く貢献している。



図 1 EXSEV-EX (グリース)
EXSEV-EX (grease)

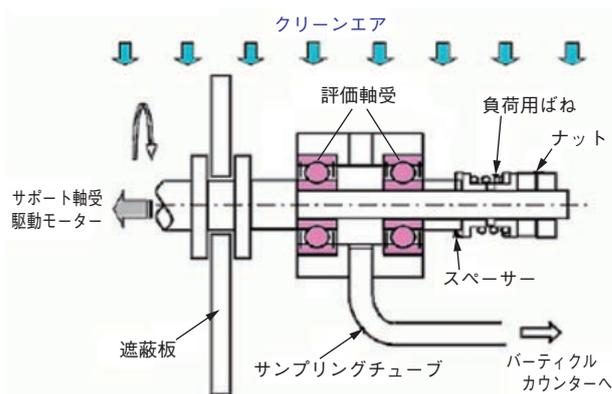


図 2 発じん評価装置
Testing equipment

表 2 評価条件
Test conditions

試験軸受	6000ZZ ($\phi 10 \times \phi 26 \times 8\text{mm}$)	
材料	軌道輪・玉	SUS440C
	保持器・シールド	SUS304
回転速度	$1\,000\text{min}^{-1}$	
アキシアル荷重	50N	
温度	室温	
雰囲気	大気・クリーンベンチ内 (クラス 10)	
試験時間	20h	
試験項目	粒子径 $0.1\mu\text{m}$ 以上の発じん量	

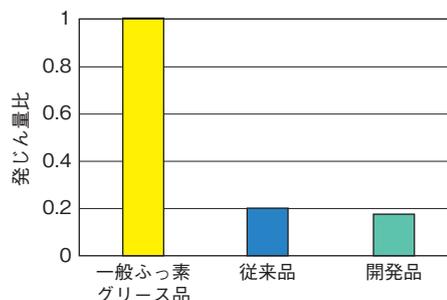


図 3 軸受発じん量の比較
Comparison of bearing dust generation amount

表3 試験条件
Test conditions

試料	グリース
測定方法	GC/MS
温度	160℃
試験時間	0.75h

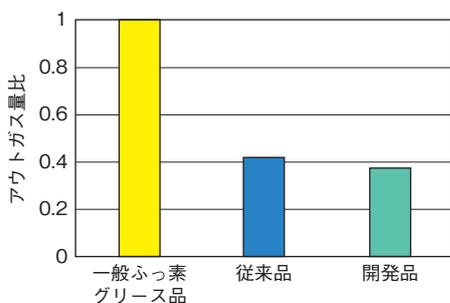


図4 アウトガス量の比較
Comparison of outgassing amount

2.2 NEW クリーンプロ-PR (真空・クリーン用特殊ふっ素固体潤滑被膜)

露光装置など半導体製造工程の一部では、ふっ素グリース以上の高度なクリーン性が要求される。このようなクリーンな環境に対応可能な軸受としてクリーンプロベアリングが使用されている。特殊なふっ素系高分子でできた固体潤滑被膜を軸受全面に施しており、ISO クラス 4 (FED-STD-209D に基づくクラス 10) のクリーン環境に対応できることが本製品の特長である。2017 年にはこの特殊なふっ素系高分子固体潤滑被膜を改良した NEW クリーンプロ-PR (図5) を開発した。グリースと同様に発じん量評価を行った結果、従来品に対して軸受回転中の発じん量は 50% 低減した。長時間軸受を回転させ、発じん量が ISO クラス 4 のレベルを超えるまでの時間である発じん寿命を評価した結果、図6のように発じん寿命は 10 倍以上となった。さらに GC/MS を用いて常温から 200℃ の温度にてアウトガス量を測定したところ、従来品同等以下であった。このように NEW クリーンプロ-PR は発じん性能と発じん寿命において大幅に性能が向上し、半導体製造装置の信頼性向上、ランニングコストの低減に貢献している。



図5 NEW クリーンプロ-PR
NEW Clean Pro-PR

表4 試験条件
Test conditions

試験軸受		6000ZZ ($\phi 10 \times \phi 26 \times 8\text{mm}$)
材料	軌道輪・玉	SUS440C
	保持器・シールド	SUS304
回転速度		200min^{-1}
アキシャル荷重		50N
温度		室温
雰囲気		大気・クリーンベンチ内 (ISO クラス 4)
試験項目		粒子径 $0.1\mu\text{m}$ 以上の発じん量



図6 発じん寿命比較
Comparison of dust generation life

2.3 MV コーティング (真空用固体潤滑コーティング)

半導体製造工程の多くには高真空が求められるため、磁気軸受型のターボ分子ポンプ (図7) が広く採用されている。磁気軸受に異常が起きるとローターを支えることができなくなり、ローターとステーターが接触しポンプが損傷する恐れがある。このような部品同士の接触を防止し、安全にローターを停止させるためにタッチダウン軸受が用いられる。ポンプの信頼性のため、タッチダウン軸受には高い耐久性が求められる。タッチダウン軸受は高真空下で使用されるため、アウトガスなどの発生を考慮するとグリースは使用できないので、固体潤滑剤を採用している。その過酷な潤滑条件下では長寿命化が

課題であった。今回、当社は二硫化モリブデン被膜のバインダーを見直すことで、より密着性を高めた MV コーティングを開発した。実機を模擬したタッチダウン試験機で寿命比較試験を実施した。ローターを定格回転速度まで回転させた状態から磁気軸受の動力を切り、ローターを落下させてローターが停止するまでタッチダウン軸受で支える。ローターの停止後に磁気軸受を再起動させローターが正常に浮上すればタッチダウンは成功と見なし、このサイクルを繰り返して耐久性能を評価した。試験条件を表5、試験結果を図8に示す。MV コーティング品の耐久性能は従来品と比べ4倍以上（当社評価基準）となり、ターボ分子ポンプの信頼性向上に貢献している。

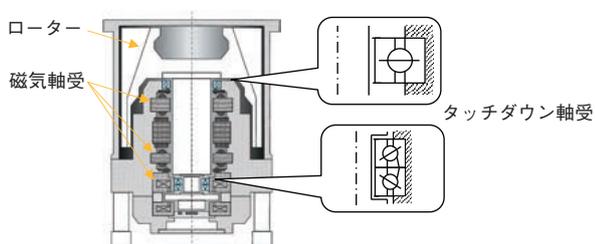


図7 ターボ分子ポンプ
Turbomolecular pump

表5 試験条件
Test conditions

軸受サイズ	6909 (φ45 × φ68 × 12mm) 7904DF (φ20 × φ37 × 18mm)
材質	軌道輪 SUS440C
	玉 Si ₃ N ₄
潤滑	内外輪に MV コーティング
ローター質量	6.6kg
回転速度	34 000min ⁻¹
温度	室温
真空度	10 ⁻⁴ Pa

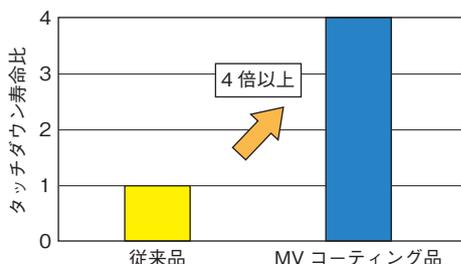


図8 タッチダウン寿命比
Touchdown life ratio

3. 高温環境

3.1 EXSEV-XT (真空・高温用ふっ素グリース)

一般的に、グリースが使用できない環境では固体潤滑剤が使用される。グリースは高温や真空雰囲気中で酸化、分解、蒸発などが加速される¹⁾。しかし、固体潤滑剤は、耐熱性などの特長により高温、超高真空中での使用が可能である。高温環境で使用可能な代表的な固体潤滑剤は層状結晶構造物質の二硫化モリブデン (MoS₂) や二硫化タングステン (WS₂) である。主に固体潤滑剤は、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され、MoS₂ は 300℃、WS₂ は 350℃ の高温環境で使用される。ただし固体潤滑剤は、使用条件によっては潤滑剤からの発じんや、グリースと比較すると短寿命になるなどデメリットもある²⁾。

一方、ふっ素グリースは高温環境において増ちょう剤である PTFE の熱分解温度約 260℃ が使用限界である。そこで当社は耐熱 350℃ と長寿命の特長を併せ持つ軸受として、2017 年に EXSEV-XT を開発した。蒸発しにくい基油と熱分解に強い増ちょう剤を組み合わせたグリースを封入することで 350℃ での高温環境に対応できた。このグリースを表6の試験条件の基で熱重量分析を行い、その結果を図9に示す。重量が 5% 低下するまでの温度は 397℃ であり、非常に耐熱性の高いグリースであることがわかる。また高温下で従来の固体潤滑軸受と EXSEV-XT の耐久性能比較を行った。試験方法は、図10のように加熱炉の中に軸受を組み込んで加熱炉の外部から軸を押すことでアキシャル荷重を負荷し、軸受を回転させた。試験条件を表7に示す。その結果、図11に示すように従来の固体潤滑軸受と比較して高温下での EXSEV-XT の軸受寿命は 6 倍以上であった。これにより、製造工程の高温化や装置のメンテナンスコストの低減に貢献している。

表6 試験条件
Test conditions

試料量	10mg
昇温速度	5°C/分

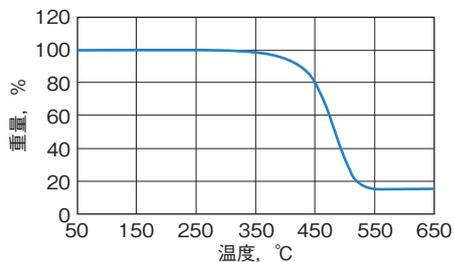


図9 熱重量分析結果
Thermogravimetric analysis results

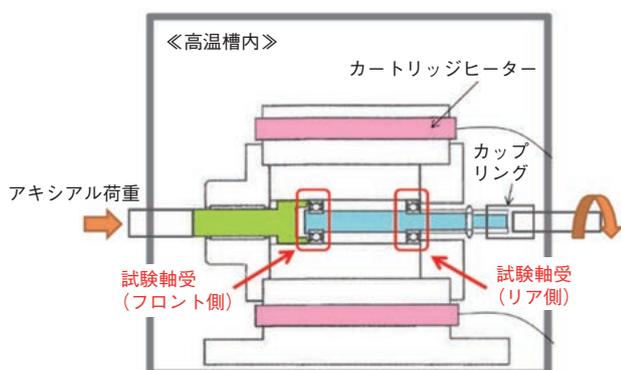


図10 高温耐久評価試験機
High temperature endurance evaluation unit

表7 試験条件
Test conditions

試験軸受	6000ZZ (φ10 × φ26 × 8mm)	
材料	軌道輪・玉	SUS440C
	保持器	固体潤滑軸受：PEEK 樹脂 EXSEV-XT：SUS304
	シールド	SUS304
回転速度	500min ⁻¹	
アキシアル荷重	185N	
温度	300°C	

表8 各鋼種 of 材料特性
Material properties of various steel

	硬さ HRC	縦弾性係数 GPa	線膨張係数 10 ⁻⁶ , K ⁻¹	耐食性
一般軸受	61	208	12.5	×
ステンレス軸受	60	208	10.5	△
コロガードプロベアリングー MD	40	196	11	○

○：優れる △：少し劣る ×：劣る

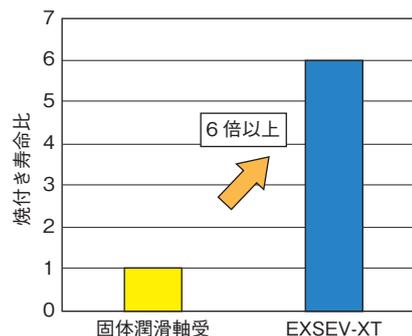


図11 耐久試験結果
Endurance test results

4. 腐食環境

4.1 コロガードプロベアリングー MD (析出硬化系ステンレス軸受)

半導体製造用軸受材料には高炭素クロム軸受鋼 (SUJ2) やマルテンサイト系ステンレス (SUS440C) が主に使用される。しかし、腐食環境下で使用される軸受では、腐食性のある液体やガスにより軸受の短寿命につながる恐れがあるため、腐食環境で使用される半導体製造装置には析出硬化系ステンレス鋼が使用される。この析出硬化系ステンレス鋼を軌道輪に、セラミックスを玉に採用した軸受がコロガードプロベアリングー MD である。軌道輪に使用される各種材料の機械特性を表8に示す。

これらの鋼種の耐食性を比較するために、JIS Z 2371 の塩水噴霧試験方法に準拠したカス (CASS) 試験を実施した。試験条件を表9に示す。一般軸受 (SUJ2)、ステンレス軸受 (SUS440C)、コロガードプロベアリングー MD のカス試験の結果を図12に示す。この結果から耐食性はコロガードプロベアリングー MD > ステンレス軸受 > 一般軸受の順に優れることがわかる。

表9 キャス試験条件
CASS test conditions

使用液	塩化ナトリウム：50 ± 5g/l 塩化銅（Ⅱ）：0.26 ± 0.02g/l
pH	3.0 ~ 3.2
温度	50 ± 2℃
試験時間	4h



一般軸受 SUJ2 ステンレス軸受 SUS440C コロガードプロ ベアリングーMD

図12 キャス試験結果
CASS test results

4.2 セラミック軸受

セラミックスは、金属材料と比較してじん性が低く、加工性に乏しいが、その反面、軽量、耐熱性、耐食性など優れた特性を有している¹⁾。表10に各種セラミック

スの機械的特性を示す²⁾。窒化けい素 (Si₃N₄)、ジルコニア (ZrO₂)、炭化けい素 (SiC) などに代表されるセラミックスは、従来の金属材料では対応できない過酷な環境下でも使用できる。そこで、各種セラミックスの転がり特性を、図13に示すスラスト転動寿命試験により確認した。各種セラミックスで軌道（平板）を製作して試料とし、スラスト荷重を負荷した。玉は油潤滑の場合は軸受鋼、水潤滑の場合はセラミックスを用いた。その試験結果を図14³⁾に示す。縦軸に玉1個あたりに作用する荷重、横軸に応力繰り返し数を示す。荷重をステップアップさせ、各々の軌道（平板）に剥離が発生し、試験停止した時点のプロットしている。この結果により、窒化けい素が最も転がり軸受に適していることを確認した。当社はこのような評価を経て窒化けい素を使用したセラミック軸受を世界で初めて実用化するに至った。

次にセラミックスの耐食性について述べる。セラミックスの耐食性は軸受鋼、ステンレス鋼に比べ非常に高く、多様な腐食環境で使用可能である。各種セラミックスの代表薬液に対する耐食性を表11⁴⁾に示す。この表から分かるように、セラミックスの種類によって耐食性が異

表10 各種セラミックスの機械的特性
Mechanical properties of various ceramic materials

項目 単位	セラミックス	窒化けい素 Si ₃ N ₄	ジルコニア ZrO ₂	炭化けい素 SiC
密度, g/cm ³		3.2	6.0	3.1
線膨張係数, K ⁻¹		3.2 × 10 ⁻⁶	10.5 × 10 ⁻⁶	3.9 × 10 ⁻⁶
ビッカース硬さ, HV		1 500	1 200	2 200
縦弾性係数, GPa		320	220	380
ポアソン比		0.29	0.31	0.16
3点曲げ強さ, MPa		1 100	1 400	500
破壊じん性, MPa·m ^{1/2}		6	5	4
耐熱性 (大気中), °C		800	200	1 000 以上
耐熱衝撃性, °C		750 以上	350	350
熱伝導率, W/(m·K)		20	3	70
比熱, J/(kg·K)		680	460	670

試験条件

	油潤滑	水潤滑
潤滑剤	スピンドル油	水道水
玉	軸受鋼	セラミックス
荷重	応力繰り返し数 1.08 × 10 ⁷ 回ごとにステップアップ	
回転速度	1 200min ⁻¹	

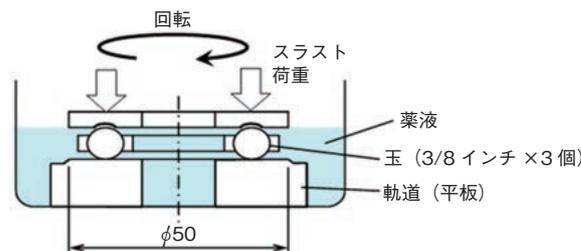


図13 スラスト転動寿命試験
Thrust rolling life test

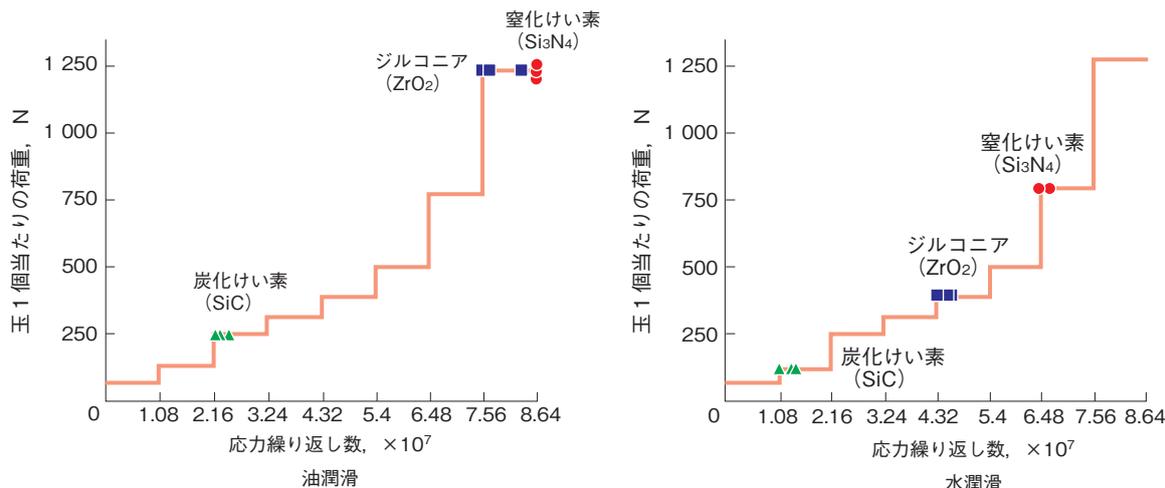


図14 スラスト転動寿命試験結果
Thrust rolling life test results

表11 各種セラミックスの耐食性比較
Comparison of anti-corrosiveness of each ceramic type

薬品種類	濃度	温度	時間	窒化けい素 Si ₃ N ₄	ジルコニア ZrO ₂	炭化けい素 SiC
HCl	35%	Boiling	30min	A	B	A
HNO ₃	70%	Boiling	30min	A	B	A
H ₂ SO ₄	98%	Boiling	30min	A	C	A
H ₃ PO ₄	90%	Boiling	30min	A	B	B
HF	60%	20℃	24h	C	B	A
KOH	10%	80℃	7 days	A	A	C
KOH	100%	Boiling	24h	C	C	C
NaOH	100%	500℃	24h	C	—	C
Na ₂ CO ₃	100%	900℃	24h	C	C	C
Na ₂ SO ₄	100%	Melting	—	C	B	C
KNO ₃	100%	Melting	—	A	—	A

A：浸食認められず B：微量浸食 C：浸食大

なるため、半導体製造工程のさまざまな腐食薬液、腐食ガスに適合したセラミックスを選定する必要がある。

たとえば、半導体製造工程の一部にはふっ化水素酸 (HF) が軸受に触れる工程がある。このような環境では窒化けい素製の軸受は腐食される可能性がある (表11中のC)。当社では炭化けい素製の高耐食セラミック軸受 (表11中のA、図15) を提供することにより軸受の長寿命化を実現し、これまで対応の難しかった酸環境での軸受の長期使用が可能となった。



図15 高耐食セラミック軸受 (炭化けい素製)
High anti-corrosive ceramic bearing (silicon carbide)

さらに半導体製造工程における腐食環境の多様化に対応するため、新たなセラミックスとしてアルミナ-ジルコニア複合材料 (Al₂O₃-ZrO₂) を適用したコロガードプロベアリング®-AZを開発した。耐食性能に優れるアルミナと耐荷重性に優れるジルコニアの長所を持つことが大きな特長であり、材料にSiを含有していないこと

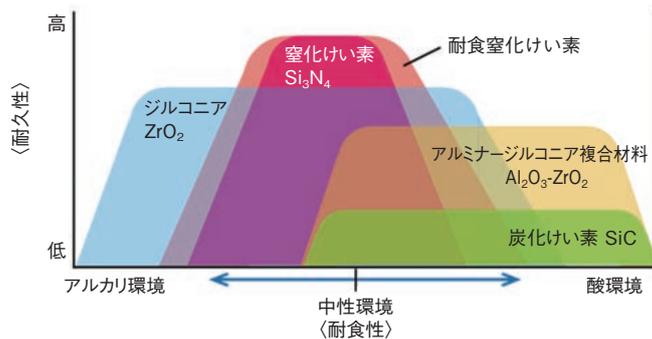


図16 セラミックスの各種腐食環境への適用
Application of ceramics under various corrosion environments

から一部の半導体製造装置においてSiの反応生成物による悪影響を回避でき、半導体の生産性向上への貢献が期待される。

環境別のセラミックスの適用範囲を図16に示す。縦軸に耐荷重性、横軸に環境を示している。今後予想される腐食環境の多様化に向け、より広い範囲をカバーできる材料選定が可能となる。

5. おわりに

特殊環境用軸受が使用される環境は大きく変化し多様化している。あらゆる半導体製造装置の使用条件に対応できる単一の軸受仕様は存在しない。そのため、軸受の選定時には寸法精度の他に材質、潤滑など多方面にわたる検討が必要である。さまざまな半導体製造装置に必要な使用条件や性能に応じて、適切な軸受仕様にすることが、装置の性能、耐久性、信頼性の向上につながっていくものとする。今後とも、半導体産業における要求性能のさらなる高度化と生産性向上の両方を視野に入れて、軸受開発を進め、先端デバイスの性能向上と安定供給に微力ながら貢献していきたい。

- * 1 EXSEV は、株式会社ジェイテクトの登録商標です。
- * 2 クリーンプロは、株式会社ジェイテクトの登録商標です。
- * 3 コロガードプロベアリングは、株式会社ジェイテクトの登録商標です。

参考文献

- 1) 社団法人日本トライボロジー学会固体潤滑研究会編：固体潤滑ハンドブック(2010)。
- 2) 株式会社ジェイテクト：特殊環境用軸受シリーズ EXSEV 軸受・セラミック軸受カタログ, CAT. No. BA004AJA-1DS.
- 3) 竹林博明, Koyo Engineering Journal, 156(1999)66.
- 4) 大山忠夫, Koyo Engineering Journal, 158(2000)57.

筆者



木村和博*
K. KIMURA

* 産機・軸受事業本部 産業機器技術部