樹脂材料軸受の エネルギー機器への適用

タントロンロン* 木本 淳志** 宇野 修悦***

1. はじめに

近年、エネルギー機器の効率向上を目指した大容量化、高速化、小型化の開発・設計が進み、これらのエネルギー機器に使われる各種軸受、摺動部材の使用条件が厳しくなりつつある。

水車発電機では、図1に示すように、回転部の質量と水車から発生する水スラスト荷重を支持するスラスト軸受と軸振れ止め用ガイド軸受が装備され、これらの軸受の損失低減を図るため、低摩擦材料の適用⁽¹⁾⁽²⁾や軸受装置の小型化が進められている。軸受装置を小型化することによって、回転部の抵抗が軽減する反面、軸受面圧が大幅に増大する。発電機器の大容量化、高速化に伴う荷重と摺動速度の増大により、すべり面温度が急激に上昇する。電力需要に応じて急始動・停止や種々の負荷変動に耐えられ、電力安定供給のため、高性能、高信頼性軸受の要求が高まっている。これまで、高速・高荷重軸受材料として、ホワイトメタル(第1種: Sn88~92 mass%, Sb5~7 mass%, Cu3~5 mass% または第2種: Sn83~87 mass%, Sb8~10 mass%, Cu5~7 mass%)が使用されてきた。しかし、これらの軟質金属材料の融点は低く、常温での強度不足と高温強度が大幅に低下することから使用範囲が制限されている。大容量の水車発電機軸受には、焼付き防止のため、オイルリフター装置を設け、これにより始動時には、油を強制的にすべり面に送り込み、油膜を形成した状態で運転している。また、摩擦によるホワイトメタルの温度上昇を防ぐため、油冷却装置を設け、この材料の許容温度範囲に制御し監視している。このような付属設備や監視システムに多大なコストがかかっている。

水車、ポンプ水車等の水力機械には、発電または揚水運転

時、水車・ポンプケーシング内からの漏水を防止するため、回転軸の回りに配置した環状のパッキングからなる軸封装置が設けられている。このような摺動部材は、水中での低摩擦・耐摩耗性、回転軸に対する攻撃性が小さいことが要求される。また、機器の運転状況によって使用環境が変化している。例えば、揚水始動時では、水がない状態で運転開始するため、空中における低摩擦、耐摩耗、耐焼付性が要求され、その後の灌水により、急速冷却による耐熱衝撃性も要求される。近年、ポンプ水車等の超高落差化に伴い、軸封装置は益々高面圧・高速化され、環状パッキングの高圧側と低圧側の圧力差による曲げや機械的振動に耐えられる材料が要求される。これまでのパッキング材料として、樹脂含浸カーボン系材料が一般に用いられているが、水中における耐摩耗性不足、機械的衝撃や曲げ許容応力が小さいという弱点がある。一方、耐摩耗性セラミックス材料の採用の試みもあるが、パッキングとして耐摩耗性に優れるものの、回転軸に対する攻撃性が大きく、耐熱衝撃性や価格の問題で実用上制約がある。

蒸気タービンには、始動・停止やその他に起因する軸受台のすべりを円滑にするため、軸受台と基礎コンクリートの間に、図2に示すように、ソールプレートが設けられている。鉄系材料ソールプレートの円滑なすべりを確保するため、ソールプレートの摺動面にグリース溝を設け、定期的に油を注入して補修・点検を行なっている。しかし、経年的に大気中の粉塵巻込みやグリースの固化により、円滑なすべりが妨害され、軸アライメントが変化し、回転軸系が激しく振動して、軸受破損に至ることがある。無潤滑状態で円滑なすべりが維持できれば、メンテナンスフリーと油汚染の環境問題を解消できる。

四ふっ化エチレン(PTFE)は、連続使用温度が高く(533 K)、耐熱性に優れ(373 Kでの引張強度は室温の約65%)、

* 株式会社東芝電力・産業システム技術開発センター主査(〒230-0045 横浜市鶴見区末広町2-4)

** 株式会社東芝電力・産業システム技術開発センター

*** 株式会社東芝電力・産業システム技術開発センター主査

Applications of Fiber Reinforced Plastics to Bearings of Energy Apparatus; Than Trong Long*, Atsushi Kimoto**, Shuetsu Uno*** (Toshiba Corporation, Yokohama)

Keywords: fiber reinforced plastics, poly-tetrafluoroethylene(PTFE), wear properties, lubrication, bearing, energy apparatus

2000年8月9日

固体物質の中で最も低い摩擦係数を呈している。しかし、高負荷において、初期の圧縮変形と永久歪みが大きいという弱点である。そこで、各種の強化繊維や自己潤滑材を含有させることによって、摩擦・摩耗特性を犠牲せずに機械的性質を大幅に向上することができる。ポリエーテルエーテルケトン(PEEK)、ポリイミド(PI)は、摩擦・摩耗特性がPTFEと比較して、一段劣っているが、機械的性質に優れたエンジニアリングプラスチックであり、充填材を添加して摺動特性を改善することができる。

本稿では、エネルギー機器の軸受、摺動部品への適用を目的

図1 水車発電機モデル図およびスラスト軸受、ガイド軸受の外観。

図2 蒸気タービンモデル図。

的として、最近、著者らが開発・評価した各種繊維強化材および自己潤滑材を含有したPTFE系材料の摩擦・摩耗特性を紹介し、PEEK系、PI系材料と比較する。

2. 油中用樹脂摺動材料

油潤滑用に開発した代表的な摺動材料の組成および摩耗試験条件を表1に示す。PTFE母材に、ガラス繊維(平均径 $\sim 7\mu\text{m}$, 平均長さ $\sim 50\mu\text{m}$)、炭素繊維(平均径 $\sim 10\mu\text{m}$, 平均長さ $\sim 100\mu\text{m}$)と自己潤滑材 MoS_2 (平均粒径 $\sim 20\mu\text{m}$)、BN(平均粒径 $\sim 10\mu\text{m}$)を添加し、摩擦・摩耗特性とせん断強度、圧縮弾性率、圧縮クリープ等の機械的性質の向上を図った。高摺動速度用には、ホウ酸アルミニウムウイスカ(平均径 $0.5\sim 1\mu\text{m}$, 平均長さ $10\sim 30\mu\text{m}$)充填材を用いた。比較として、炭素繊維、グラファイトとPTFEを含有したPEEK系、PI系の市販の摺動材料を用いた。

PTFE系材料は、所定成分のPTFE粉末と充填材を混合し、混合原料を圧力 $4\sim 5\text{MPa}$ で成形した後、大気中で温度 650K , 1時間加熱し、PTFEの融着処理をして製作した。

摩擦・摩耗特性は、リング・オン・ディスク摩耗試験機を用い、油温 293K (常温)および 313K , 負荷面圧 $0.5\sim 8\text{MPa}$, 摺動速度 $0.5\sim 3.4\text{m/s}$ の試験条件で評価した。

油温 293K で測定したガラス繊維/PTFE系、PEEK系およびPI系材料の静摩擦係数と負荷面圧の関係を図3に示す。ガラス繊維/PTFE系材料の静摩擦係数は 0.10 程度で、負荷面圧の上昇に伴い僅かに低下している。静摩擦係数の小さい順は、ガラス繊維/PTFE系、PI系、PEEK系材料である。また、広い負荷面圧範囲($2\sim 8\text{MPa}$)において、PEEK系材料の静摩擦係数はガラス繊維/PTFE系材料の約2倍である。

油温 293K , 面圧 8MPa , 速度 1.1m/s で摺動した3種類の材料の動摩擦係数と摺動距離の関係を図4に示す。動摩擦係数は、3種類の材料とも始動してから約30分経過した後(摺動距離 $\sim 2\text{km}$ 相当), はぼ一定になっている。動摩擦係数は、静摩擦係数より遥かに小さく、ガラス繊維/PTFE系材料が約 0.05 と最も小さいが、その他の2種類の材料と顕著な差が見られない。

上記の結果から、安定な油膜が形成した状態で測定した動

表1 油中用樹脂摺動材料の組成および摩耗試験条件。

母材	充填材	面圧 (MPa)	速度 (m/s)	温度 (K)	潤滑条件	相手材
PTFE	15 mass%ガラス繊維-5 mass% MoS_2	2~8	0.5~3.4	293 K(RT) ~353 K	油(VG-32)	S45C $R_{\text{max}} = 6\mu\text{m}$
	(15, 20, 25, 30)mass%ホウ酸アルミニウムウイスカ					
	20 mass%ホウ酸アルミニウムウイスカ-5 mass% MoS_2					
	20 mass%ホウ酸アルミニウムウイスカ-5 mass%BN					
PEEK	10 mass%炭素繊維					
PI	30 mass%(炭素繊維-グラファイト-PTFE)		1.1	293 K(RT)		
	25 mass%(グラファイト-PTFE)

図3 油中における各種材料の静摩擦係数と負荷面圧の関係。

図5 油中における各種材料の静摩擦係数と負荷面圧の関係。

図4 油中における各種材料の動摩擦係数と摺動距離の関係。

図6 油中における各種材料の動摩擦係数と負荷面圧の関係。

摩擦係数は、材料の依存性が小さく、相手材と直接接触した状態で測定した静摩擦係数は、材料の固有特性に大きく依存することがわかった。実際、水力発電機軸受は、始動・停止や急激な負荷変動により安定な油膜が形成されない状態または定常状態から大きく変動した場合には、回転軸との接触により、摩耗損傷や焼付き等が多発することがよく知られている。従って、摩擦・摩耗の観点から、静・動摩擦係数とも小さく、負荷面圧の影響が小さいガラス繊維/PTFE系材料は、発電機用軸受材料として、他の2種類の材料より適していることがわかる。

高速・高負荷面圧の摺動条件では、すべり面に大きなせん断力が働き、塑性流動を抑制するため、母材の強化が必要と考えられる。ホウ酸アルミニウムウイスカは、機械的性質および耐摩耗性に優れ、相手材に対する攻撃性が小さく、繊維径はガラス繊維や炭素繊維の約1/10であり、同一含有率で大きな分散強化効果が期待される。

油温 313 K で測定したホウ酸アルミニウムウイスカ/PTFE 系材料の静摩擦係数と負荷面圧の関係を図5に示す。ホウ酸アルミニウムウイスカ/PTFE 系材料の静摩擦係数は、ガラス繊維/PTFE 系材料より小さく、MoS₂やBNを添加することによってさらに改善される。負荷面圧による

図7 油中における各種材料の動摩擦係数と摺動速度の関係。

静摩擦係数への影響はほとんど見られない。

油温 313 K において、ホウ酸アルミニウムウイスカ/PTFE 系材料の動摩擦係数と負荷面圧および摺動速度の関係をそれぞれ図6および図7に示す。ホウ酸アルミニウムウイスカ/PTFE 系材料の動摩擦係数は、ガラス繊維/PTFE 系材料と比較して遥かに小さく、ある負荷面圧を越えると上

昇する傾向が見られる。これは、高い摩擦により温度が上昇し、潤滑油の粘性が低下した結果、油膜形成機能が減少するためと考えられる。なお、動摩擦係数は摺動速度の依存性が小さい。

すべり面直下に埋設した熱電対より測定した摺動面温度と摺動距離の関係を図8に示す。油温 313 K、面圧 8 MPa において、摺動速度 1.1 m/s では、ホウ酸アルミニウムウイスカ/PTFE 系材料の摺動面温度はガラス繊維/PTFE 系材料より低いものの、両者の顕著な差が見られないが、摺動速度 3.4 m/s の高速になるとガラス繊維/PTFE 系材料の摺動面温度は 400 K 近くまで上昇し、摺動時間と共に徐々に低下したが安定な温度まで長時間を要した。一方、ホウ酸アルミニウムウイスカ/PTFE 系材料は、遥かに低い摺動面温度を呈し、早期安定へ推移した。

ホウ酸アルミニウムウイスカ/PTFE 系材料の摩耗減量は、図9に示すように、摺動速度 1.1 m/s ではガラス繊維/PTFE 系材料と顕著な差が認められない。しかし、摺動速度 3.4 m/s の高速において、ガラス繊維/PTFE 系材料の急激な摩耗減量の上昇に対して、ホウ酸アルミニウムウイスカ/PTFE 系材料は初期に遥かに小さい摩耗減量を呈し、その後、ほとんど摩耗が進行していない。

油温 313 K、面圧 8 MPa、速度 3.4 m/s で 20 km 摺動した3種類の材料の摺動面観察結果を図10に示す。ガラス繊維/PTFE 系材料では、ガラス繊維の脱落やすべりが見られ

ず、ガラス繊維が母材の PTFE 面より突出し、凸面を形成し、相手材と摺動接触している。この現象は負荷面圧および速度が高いほど顕著に見られる。これは以下の二つの原因が考えられる。(1)ガラス繊維が PTFE 母材より硬く、耐摩耗性に優れるため、母材より摩耗が少なく、凸面が残存する。(2)摺動過程で油膜を介して静水圧(Isostatic Pressure)を受けた摺動面の PTFE 母相が永久変形するためと考えられる。ホウ酸アルミニウムウイスカ-MoS₂/PTFE 系材料も同様な傾向を呈しているが、微細なウイスカの分散効果により、比較的平滑な摺動面が観察される。ホウ酸アルミニウムウイスカ-BN/PTFE 系材料では、ウイスカの突出がほとんど見られず、摺動面全体に PTFE 皮膜に覆われ、PTFE 皮膜による保護と BN の自己潤滑効果により摩耗が著しく抑制されている。

本試験装置および試験条件の範囲において、高温、高速および高負荷面圧の摺動条件では、ホウ酸アルミニウムウイスカ/PTFE 系材料、特に BN を添加した材料が優れた摺動特性を発揮している。水車発電機のような大型機械の軸受では、本試験装置より遥かに大容量の潤滑油で軸受を潤滑し、冷却しているため、摺動面の温度上昇が極めて小さく、ガラス繊維/PTFE 系材料を採用した軸受が優れた性能を示している。

○—15 mass%ガラス繊維-5 mass%MoS₂/PTFE
□—20 mass%ホウ酸アルミニウムウイスカ-5 mass%MoS₂/PTFE
◇—20 mass%ホウ酸アルミニウムウイスカ-5 mass%BN/PTFE

図8 油中における各種材料の摺動面温度の摺動速度の影響(油温: 313 K、面圧: 8 MPa、相手材: S45C)。

○—15%ガラス繊維-5%MoS₂/PTFE
□—20%ホウ酸アルミニウムウイスカ-5%MoS₂/PTFE
◇—20%ホウ酸アルミニウムウイスカ-5%BN/PTFE

図9 油中における各種材料の摩耗減量の摺動速度の影響(油温: 313 K、面圧: 8 MPa、相手材: S45C)。

(a)15%ガラス繊維-5%MoS₂/PTFE

(b)20%ホウ酸アルミニウムウイスカ-5%MoS₂/PTFE

(c)20%ホウ酸アルミニウムウイスカ-5%BN/PTFE

図10 油中における各種材料の摺動面の光学顕微鏡組織(油温: 313 K、負荷面圧: 8 MPa、摺動速度: 3.4 m/s、摺動距離: 20 km)。

表2 水中用樹脂摺動材料の組成および摩擦試験条件.

母材	充 填 材	面圧 (MPa)	速度 (m/s)	温度 (K)	潤滑条件	相手材
PTFE	10 mass%炭素繊維	2~8	0.5~3.4	293 K (RT)	水	SUS-431 $R_{\max}=6\ \mu\text{m}$
PEEK	30 mass%(炭素繊維-グラファイト-PTFE)		1.1			
PI	25 mass%(グラファイト-PTFE)

図11 水中における各種材料の静摩擦係数と負荷面圧の関係.

図12 水中における各種材料の動摩擦係数と摺動距離の関係.

3. 水中用樹脂摺動材料

水中用の炭素繊維/PTFE 系材料と比較材の PEEK 系, PI 系材料の組成および摩擦試験条件を表 2 に示す.

水温 293 K で測定した各種材料の静摩擦係数と負荷面圧の関係を図 11 に示す. 炭素繊維/PTFE 系材料の静摩擦係数は, 負荷面圧にはほとんど依存せず, 約 0.10 であり, 油中で測定したガラス繊維/PTFE 系材料(相手材 S45C)の静摩擦係数よりやや高いが, ほぼ同レベルである. PEEK 系, PI 系材料はより高い静摩擦係数を呈している.

水温 293 K, 面圧 4 MPa, 速度 1.1 m/s で摺動した各種材料の動摩擦係数と摺動距離の関係を図 12 に示す. 水中の動摩擦係数は, 各種材料とも始動時高い値を呈した後, 急激に低下し, 再び上昇した後, 徐々に低下して安定へ推移する. この挙動は油中の場合と大きく異なっている. 水中で摺動した材料の典型的な摺動面を図 13 に示し, 極めて平滑な表面を呈し, 図 10(a) で観察された油中で摺動したガラス繊維/PTFE 系材料摺動面のガラス繊維の突出と対照的である. PEEK 系, PI 系材料も同様に, 平滑な摺動面を示している. ガラス繊維の耐摩耗性は炭素繊維より優れる点はあるが, 水中では油中のように高粘性の油膜が形成し難く, 前述した静水圧による摺動面の PTFE の永久変形が生じず, 相手材と摺動接触により充填材と母材が均等に削り取られ, 平滑な摺動面を呈すると考えられる.

油中で優れた耐摩耗性を呈したガラス繊維/PTFE 系材料は水中で激しい摩耗を起こすことがよく知られ, これも上記の理由で説明することができる.

図 12 で見られた動摩擦係数の始動時の急激な変動は, 初

図13 水中で摺動した10%炭素繊維/PTFE 摺動面の光学顕微鏡組織(水温: 293 K, 負荷面圧: 4 MPa, 摺動速度: 1.1 m/s, 摺動距離: 80 km).

期段階から材料と相手材の摺動面の凹凸および非平行による局部接触部の摩耗が急速に進行し, 全面接触の安定段階へ推移するまでの実負荷面圧が変化するためと考えられる.

炭素繊維/PTFE 系材料の水中摩耗減量は, 図 14 に示すように, PEEK 系材料より少なく, PI 系材料と同レベルである. 図 15 に水中で摺動した炭素繊維/PTFE 系材料の摺動面の走査電子顕微鏡組織を示す. 摺動方向に沿って炭素繊維の後方に尾を引く形で炭素繊維の摩耗粉が残存し, 潤滑効果を発揮している.

PTFE 系材料の水中摩耗は, 油中で見られた摺動面の PTFE 被覆や相手材への PTFE 移着現象が認められず, 切削(abrasive)摩耗が支配的と見られる. 耐摩耗性を向上するため, PTFE 母相強化より自己潤滑性向上が効果的であ

り、切削性の高いガラス繊維より潤滑性の優れた炭素繊維充填材を含有した PTFE 系材料が優れた水中摩耗特性を示したのはそのためと考えられる。

PI 系材料は、摩擦係数は若干高いが耐摩耗性は炭素繊維系/PTFE と同水準であり、吸水性と価格の問題はあるが、水中摺動材料の一つの候補と考えられる。

4. 無潤滑用樹脂摺動材料

無潤滑用樹脂摺動材料の組成および摩耗試験条件を表 3 に示す。無潤滑状態で摩擦・摩耗特性は、往復摺動摩耗機を用い、空中で高負荷 (20 MPa) との低速 (0.05 mm/s) の試験条件で評価した。摩擦・摩耗特性に及ぼす異物混入の影響を調査するため、平均粒径 100 μm のアルミナ粒子を大量に摺

動面投入し、粒子混入試験を行なった。

無潤滑状態において、室温 298 K、面圧 5 MPa および速度 0.1 m/s で摺動した炭素繊維/PTFE 系材料の動摩擦係数と摺動距離との関係を図 16 に示す。始動初期の動摩擦係数は、約 0.20 であり、早期に約 0.18 まで低下し、安定状態へ推移する。空中における炭素繊維/PTFE 系材料の典型的な摺動面を図 17 に示す。炭素繊維の脱落は認められないものの、油中および水中では見られない PTFE 母材の塑性流動が局部的に観察される。3.6 km 摺動した炭素繊維/PTFE 系材料の摩耗減量は、図 18 に示すように、約 50 μm であり、純 PTFE の約 1.2 mm と比較して極めて小さい。相手材の摺動面には、PTFE および炭素繊維摩耗粉の移着が多く観察され、炭素繊維の摩耗粉が母材の PTFE と相手材に移着した PTFE 同士の摩擦を軽減させ、凝着摩耗を抑制すると見ら

図 14 水中における各種材料の摩耗減量と摺動距離の関係。

図 16 空中における炭素繊維/PTFE 系材料の動摩擦係数と摺動距離の関係。

図 15 水中で摺動した 10% 炭素繊維/PTFE 摺動面の走査電子顕微鏡組織。負荷面圧：4 MPa、摺動速度：1.1 m/s。

図 17 空中における 10% 炭素繊維/PTFE 摺動面の走査電子顕微鏡組織。負荷面圧：5 MPa、速度：0.1 m/s、摺動距離：3.6 km。

表 3 無潤滑用樹脂摺動材料の組成および摩耗試験条件。

母材	充填材	面圧 (MPa)	速度 (m/s)	温度 (K)	潤滑条件	相手材
PTFE	10 mass% 炭素繊維	5~20	0.05~0.10	293 K (RT)	無潤滑 その他*)	S45C $R_{\text{max}} = 6 \mu\text{m}$
	25 mass% (カーボン-グラファイト)					

*) 平均粒径 100 μm のアルミナ異物粒子混入

図18 空中における各種材料の摩耗減量.

図19 空中における10%炭素繊維/PTFE 摺動面の走査電子顕微鏡組織. 負荷面圧: 5 MPa, 速度: 0.1 m/s, 摺動距離: 3.6 km, 異物混入: アルミナ粒子径 100 μ m.

れる.

相手材の摺動面に大量に投入したアルミナ粉末は、ほとんど摺動範囲外に排出され、その一部は、図19に示すように、母材の PTFE に埋め込まれる。埋め込まれたアルミナ異物粒子は、充填材の炭素繊維と同様な摩耗挙動を示し、異物の堆積やそれに伴う摩耗損傷が観察されない。異物混入した炭素繊維/PTFE 系材料の動摩擦係数は、図16に示すように、無混入の場合との差が見られず、摩耗減量も、図18に示すように、特別な増加は認められない。

摺動面圧が 10 MPa に上昇すると、図16および図18に示すように、動摩擦係数は若干低下するが、摩耗減量が増加している。高負荷の摺動条件において、充填材を含まない PTFE 部位に沿って塑性変形が生じ、低いせん断力で塑性流動を起こし、大きなせん断力が撈り取られる塑性流動メカニズムが支配的と見られる。しかし、この摺動条件においても、摩耗減量は 150 μ m 程度で、純 PTFE の約 2.3 mm と比較して、遥かに小さく、炭素繊維が十分な潤滑効果を発揮している。

摺動面圧 20 MPa の高負荷において、炭素繊維/PTFE 系材料の塑性流動が顕著になり、図20および図21に示すように、動摩擦係数がさらに低下し、摩耗減量が増加する。同条件で摺動した(カーボン-グラファイト)/PTFE 系材料は、動摩擦係数と摩耗減量が炭素繊維/PTFE 系材料と比較して

図20 空中における各種材料の動摩擦係数と摺動距離の関係.

図21 空中における各種材料の摩耗減量.

若干高いが、塑性流動が認められず、切削摩耗が進行している。高い含有率のカーボンとグラファイトを添加することによって、PTFE 母材が強化され、塑性流動摩耗から切削摩耗へ推移すると見られる。

無潤滑用摺動材料の代表的な例を紹介したが、負荷条件および要求される機械的性質に応じて、充填材の種類および含有量を適宜に変更し、使用することが望ましい。

5. おわりに

本稿は代表的な樹脂摺動材料の油中、水中および無潤滑状態における摩擦・摩耗特性を紹介した。エネルギー機器用軸受、その他の摺動部品として要求される機械的性質、その他の材料特性、実用上、樹脂と金属材料の接合・評価技術、軸受の性能、適用実績および樹脂材料適用の利点については次回紹介する。

文 献

- (1) 宇野修悦, 安藤雅敏, 南波 聡, 向井一馬: トライボロジスト, **42**(1997), 129.
- (2) タントロンロン, 宇野修悦, 安藤雅敏: ターボ機械, **29**(2001), 281.