

水車発電機用新素材軸受の高性能化

Development and Practical Application of New Bearing Material for Hydroelectric Generators

宇野 修悦
UNO Shuetsu

三上 誠
MIKAMI Makoto

南波 聡
NAMBA Satoshi

特集
II

発電機の軸受に用いられていた従来のホワイトメタルは、始動・停止過程で摩耗や面荒れを起こしやすく、スラスト軸受の小型・高面圧化（低損失化）の制約要素となっている。これを改善する手段として、オイルリフト装置により高圧油を強制的に供給し静圧油膜を形成する方法があるが、このような付属機器はメンテナンスの増大を招くことになる。これに対応して、当社は発電機の効率向上とメンテナンスフリー化を指向した新素材軸受を開発した。この軸受は、従来のホワイトメタルに代えて四フッ化エチレン（PTFE）樹脂系材料をすべり面に適用したもので、高信頼性とメンテナンスフリー化が期待でき、実機への適用拡大を進めている。

When white metal is used for the thrust bearings of a hydroelectric generator, because of its characteristics wear and roughness are liable to occur on the sliding surfaces during startup and stopping of the unit. Moreover, it is difficult to design a thrust bearing of compact size and with a higher oil-film pressure which could lower bearing loss. As one solution to overcome these problems, a high-pressure oil lifter is often used. However, this solution may increase maintenance work.

In response to these circumstances and with the aim of achieving higher efficiency and ease of maintenance, we have developed a new thrust bearing material using polytetrafluoroethylene (PTFE). The application of this material has been greatly expanding.

1 まえがき

諸外国では、膨大な水力資源をもつ大河川の水力エネルギーの開発が進められ、豊富な水量を利用した低落差の大容量水力発電所（発電専用機）が建設されてきた。

一方、わが国では主として大容量火力・原子力発電所が建設されてきたが、電力システムの効率的な運用のうえから、現在は揚水発電所（発電電動機）が重要視され建設が進んでいる。揚水発電所は、経済性を高めるため高落差化および単機出力の大容量化が顕著である。

水車発電機のスラスト軸受は、発電機と水車の回転部質量および水車内部の水圧アンバランスによって生ずる軸方

向水スラスト力を支えるもっとも重要なキーコンポーネントの一つである。

昨今、水車発電機の高速・大容量化に伴い、スラスト軸受の支持荷重とすべり面速度は、それぞれ 30 MN（3,000 トン）、60 m/s を超えるものもある。特に発電電動機は可逆回転機で、かつ電力需要に応じてすばやい始動・停止の運転が必要であるなど負荷条件が厳しく、スラスト軸受にはきわめて過酷な運転条件と電力安定供給のための高い信頼性が要求されている。

当社は、これらのニーズに対応できる図1に示す PTFE 樹脂系材料を採用した新素材スラスト軸受を開発し、実機への適用の拡大を進めている。

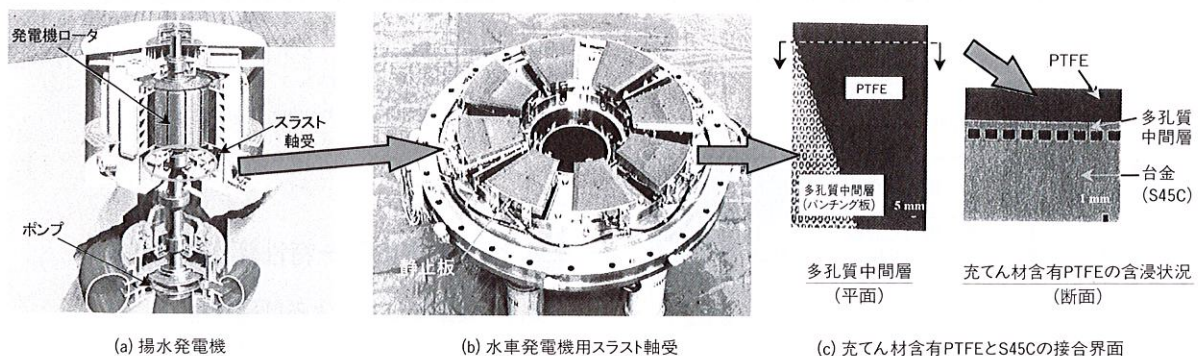


図1. 水車発電機と新素材スラスト軸受の構成 起動・停止時にオイルリフト装置が不要で、かつ耐摩耗性と低トルクに優れる。
Structure of hydroelectric generator and thrust bearing utilizing new material

2 水車発電機用新素材スラスト軸受の概要

従来、軸受のすべり面にはホワイトメタル (WJ2) などの軟金属が適用されていた。新素材スラスト軸受では WJ2 に代わってガラス繊維と MoS₂ を含有した PTFE 樹脂を採用した。この材料を高周速・高荷重用の大型スラスト軸受に適用するためには、高信頼性と長寿命化などの観点から、鉄製台金にある程度厚い PTFE 樹脂層を強固に固着する技術がきわめて重要である。

開発した固着技術による新素材スラスト軸受には次の特長がある。

- (1) 油膜が形成されない始動・停止時の耐摩耗と摩擦特性に優れていること (摩耗量は従来の約 1/50, 始動摩擦係数は従来の約 1/3 以下) から、オイルリフタ装置が不要で、かつ長寿化できる。
- (2) スラスト軸受の高面圧化 (実負荷試験で従来軸受の 1.5 倍を達成) により、軸受損失の低減と軸受冷却水レス化の適用拡大が可能である。
- (3) すべり面の摩耗形態は鏡面摩耗で耐摩耗性と耐凝着性に優れることから定期的なすべり面の仕上げ、手入れが容易になる。

3 固着技術

開発した新素材スラスト軸受は、PTFE 樹脂、多孔質層と台金の三層構成からなる。表 1 と図 2 は、これまで実施した主な接合方法と製作手順を示す。

表 1 と図 2 のいずれの組合せにおいても、すべり面の摩擦係りに十分に耐えられる固着技術が確立できた。このなかで特に固着強度が高く、かつ経済性に優れるのは表 1 の二層バックメタルブリッジと図 2 の A 方式の組合せである。

次にその固着プロセスの概要について述べる。

図 1 (b) に示したように、2 層からなる多孔質中間層 (パンチング板) を鉄製台金に液相焼結法で接合する。次に PTFE 樹脂を冷間加圧により成形し、その後 PTFE 樹脂を高温で融着処理することで PTFE 樹脂を多孔質中間層を介して台

表 1. 台金と多孔質層の接合方法

Method of binding porous layer with metal base

多孔質層		台金材質	接合方法	PTFE 多孔質層 静止板台金
形状	材質			
ワイヤ層	黄銅 ステンレス	鉄 銅	真空槽内で低融点金属により接合	
パンチング板	ステンレス 鉄	鉄	同上後さらに大気中で周辺ティグ溶接	
ボール層	ステンレス	ステンレス	HIP 接合	
二層バックメタルブリッジ	鉄	鉄	真空中で液相焼結	

HIP: 熱間静水圧成形

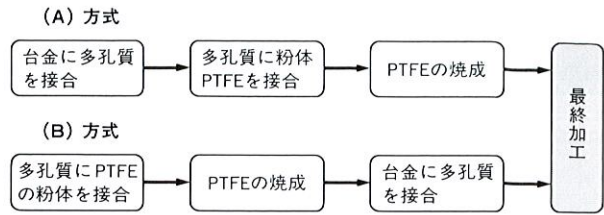


図 2. 新素材スラスト軸受の製作手順 PTFE 樹脂の融着性について、製作手順による検討をした。

Manufacturing process

金に強固に固着する。この固着技術に関し、次の接合部の強度試験を実施して実運用上問題ないことを検証した。

- ①引張り試験, ②せん断試験, ③せん断疲労試験, ④圧縮クリープ試験, ⑤変動荷重による耐剥(はく)離試験, ⑥熱ヒステリシス試験など。主な試験例を図 3 と図 4 に示す。

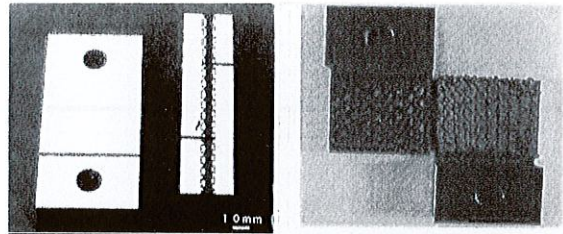


図 3. せん断強度試験 接合強度は軸受すべり面作用力の約 15 倍以上であり、すべり面方向の接合強度の健全性を確認できた。

Shear strength test of bonding PTFE layer

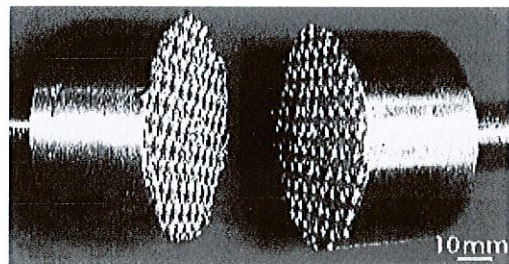


図 4. 引張り強度試験 パンチング板と台金の接合強度試験で、破断応力は 4 MPa 以上と強い。

Tensile strength test of binding porous layer

4 トライボロジー特性評価試験

4.1 要素モデルによる評価試験

要素モデル試験では諸環境下での PTFE 樹脂の摩擦・摩耗基本特性と信頼性評価試験を実施した。主な試験結果を次に述べる。

4.1.1 起動・停止とヒートサイクル耐久試験 (図5)

実機の始動・停止と熱サイクルを想定した高面圧 (6 MPa) で、高温 (約 80°C) と室温間の繰返し試験を行い、新素材スラスト軸受の耐久性が確認できた。

- (1) PTFE 樹脂の摩耗は初期に少し進むが、その後ほとんどない。なお、相手材 S45C の摩耗はまったくない。
- (2) 始動および低回転速度 ($V=1.1 \text{ m/s}$) の摩擦係数は繰返し回数の増加に伴い若干減少する。
- (3) PTFE 樹脂および相手材 S45C のすべり面の表面粗さは試験後のほうが良好である。
- (4) 接合界面の剥離はまったくなかった。

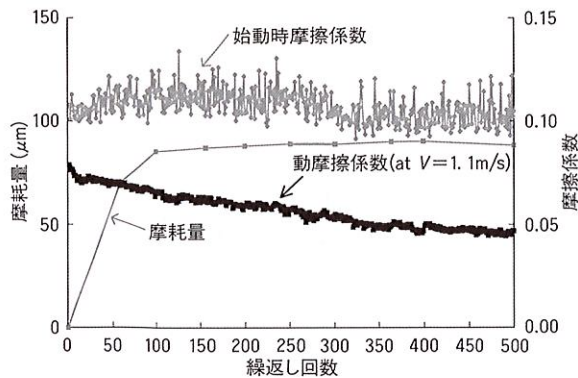


図5. 起動・停止とヒートサイクル結果 実機の起動・停止・定常運転を想定した繰返し試験で耐久性を確認した。

Results of heating cycle test during start and stop operation

4.1.2 諸環境下での PTFE 樹脂の摩耗特性試験 (図6)

台金に接合・融着された PTFE 樹脂の摩耗量について、諸環境下での評価試験を実施した。この結果、異物および高温油での摩耗量はやや増加するが、実用上特に問題はないことを確認した。ただ潤滑油中の水分が非常に大きくなると、急激に摩耗量が増加する。したがって、冷却水の

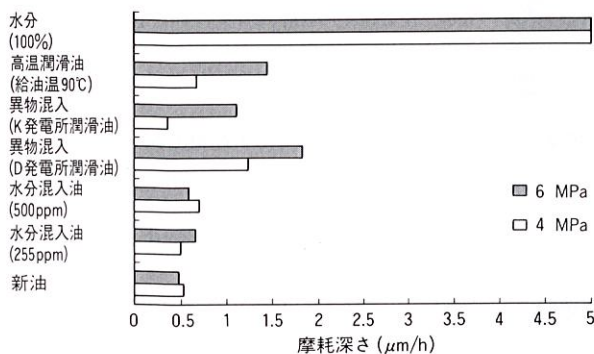


図6. 諸環境下における PTFE 樹脂の摩耗量の比較 実機運用上の厳しい諸環境でも新素材軸受の摩耗量はきわめて少ないことがわかる。

Comparison of wear of PTFE under various environments

漏れ混入は注意を要するが、水分混入油の交換規定値は 300 ppm であり、通常運用では水分による影響はまったくないことがわかった。

4.2 実機大モデルによる評価試験

図7に示すスラスト軸受装置により実機負荷模擬検証試験を実施した。この試験装置の特長は、急速な発電・揚水始動、揚水入力調相除外や発電出力最大異常での負荷遮断などの過渡時を模擬できることと、多量の諸データを CPU 処理をしていることである。

図8には試験結果の代表例を示す。新素材スラスト軸受は、従来の WJ2 軸受実績面圧の約 1.5 倍 (7.3 MPa) でもパッドの最小油膜厚さ、油膜温度上昇、油膜圧力などの諸特性から安定したスラスト軸受であることを確認した。

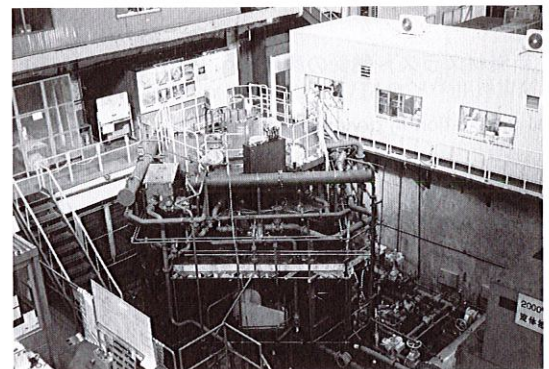


図7. 実負荷スラスト軸受装置 この装置は実機の過渡時 (変動荷重、加減速など) 運転モードを自動コントロールできる。

Actual load thrust bearing equipment

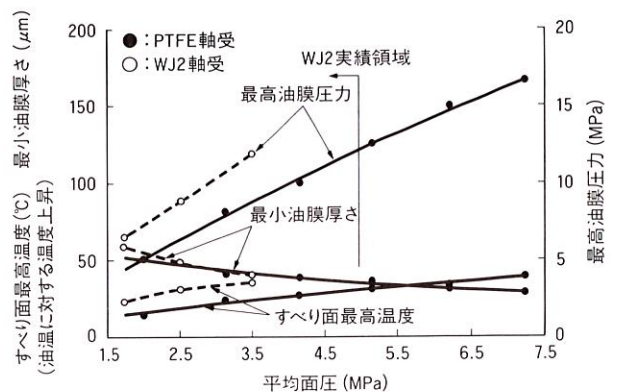


図8. 発電専用機用実負荷試験結果 回転速度 800 min^{-1} ($V=27.3 \text{ m/s}$) で、平均面圧による各特性変化を示す。

Loading test results

5 商用機への製品化の実績

新素材スラスト軸受は、東京電力(株)7 MVA 発電機用 (1994年2月納入)をはじめとし、5電力会社の計12台の発

電専用機に適用されている。図9は、適用1号機と最近の適用例を示す。図10は4発電所での始動トルクの実測例を示す。始動時の水車のガイドベーン（流量調整弁）の開度は新素材スラスト軸受を適用することによりWJ2の1/2～1/5となり、大幅な始動トルク低減と良好なすべり面が確認され、オイルリフタ装置が必要でないことを立証した。

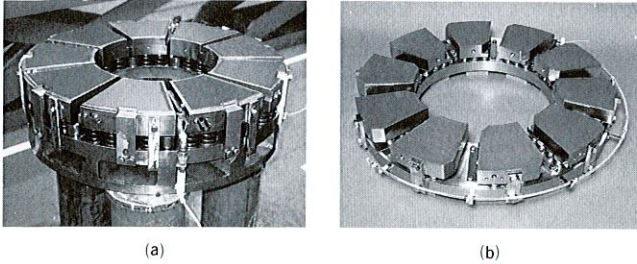


図9. 新素材スラスト軸受の商用機への適用例 適用1号の7 MVA 発電機用(a)と40 MVA 発電機用(b)の軸受を示す。
Typical application in generator

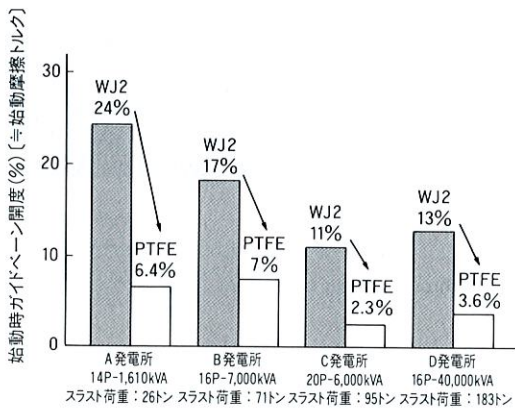


図10. ガイドベーン開度の改善 実機に新素材軸受を適用することにより、始動時の摩擦トルクが大幅に低減した。
Improvement of guide vane opening

6 解析技術

PTFE樹脂はすべり面に発生する油膜圧力により、弾性変形するため、今までの熱・弾性流体潤滑解析にさらにPTFE樹脂の変形を加えた解析が必要になる。

図11は、従来の軸受と新素材軸受の静止板の変形と油膜圧力の分布を示す。特長なのはPTFE樹脂の弾性変形により油膜圧力が平滑化され、高面圧化ができることである。

7 今後の展望

現在、新素材スラスト軸受は、中・小容量から大容量の

	従来軸受	新素材軸受
変形図	 最大変形 0.4μm	 最大変形 21μm
油膜圧力分布	 最大圧力 100kg/cm ²	 最大圧力 80kg/cm ²

図11. 従来の軸受と新素材軸受の解析結果 新素材は発生油膜圧力により変形するため油膜圧力分布は平滑化され高面圧軸受に優れる。
Analysis results

発電専用機に適用の拡大を図っている。一方、揚水発電機用新素材スラスト軸受の研究開発は'95年度から開始し、平均面圧5 MPa級の実用化に見通しがついた。今後は、さらなる大容量水車発電機への適用が期待できる。

8 あとがき

新素材スラスト軸受を発電専用機および揚水発電機に適用することにより、水力機器の簡素化と軸受損失低減による発電機効率の向上が図れ、さらに水車発電所機器の高信頼性とメンテナンスフリー化が期待できる。

文献

- 宇野修悦, 他, 最近の水車発電機用スラスト軸受の動向, トライボロジスト, 42, 2, 1997, p.129-134.
- Namba, S., et al. "Development of Non-metallic Thrust Bearing". ICOPE-'97 Tokyo Proceeding, Volume 2, 1997, p.35-40.



宇野 修悦 UNO Shuetsu

電力・産業システム技術センター 回転電機技術担当主査。
トライボロジー技術の開発に従事。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



三上 誠 MIKAMI Makoto

電力・産業システム技術センター 回転電機技術担当主査。
トライボロジー技術の開発に従事。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



南波 聡 NAMBA Satoshi

京浜事業所 発電機部主務。
水車発電機の設計に従事。
Keihin Product Operations