

# 水力発電用水車の水潤滑樹脂軸受

Water-Lubricated Plastic Bearing for Hydroelectric Power Systems

タン トロン ロン 小 熊 証 木 崎 康 巳

■ THAN TRONG Long ■ OGUMA Tadashi ■ KIZAKI Yasumi

近年、水力発電機器の水車ガイド軸受から潤滑油が河川へ流出して環境が汚染されることを防止するために、油潤滑に代わる水潤滑軸受を採用したいというニーズが強くなっている。

東芝は、このニーズに対応するため、低摩擦で耐摩耗性と耐焼付き性に優れる炭素繊維(C<sub>f</sub>)とチタン酸カリウムウイスカ(KTiO<sub>w</sub>)を添加したポリテトラフルオロエチレン(PTFE)樹脂を用いた水潤滑軸受を開発した。実機を模擬した軸受性能試験、耐久試験及び起動停止試験を行った結果、優れた特性と信頼性が確認された。発電効率向上や環境負荷低減の観点から、今後、幅広い分野への応用が期待される。

In order to prevent lubricant oils of oil-lubricated white metal bearings for hydroelectric power systems from leaking into rivers, demand has been increasing for water-lubricated bearings in recent years.

To meet this market demand, Toshiba has developed a water-lubricated plastic bearing fabricated by adding carbon fiber and potassium titanate whisker (C<sub>f</sub>-KTiO<sub>w</sub>) to polytetrafluoroethylene (PTFE) to remarkably improve wear and seizure resistance. The characteristics and reliability of the PTFE-based composite bearing have been confirmed through demonstration tests including performance tests, endurance tests, and start/stop operation tests using experimental apparatus operated under conditions equivalent to those of a hydroelectric power plant. We are planning to expand the use of this PTFE-based composite to other industrial applications for energy saving and reduction of environmental burdens.

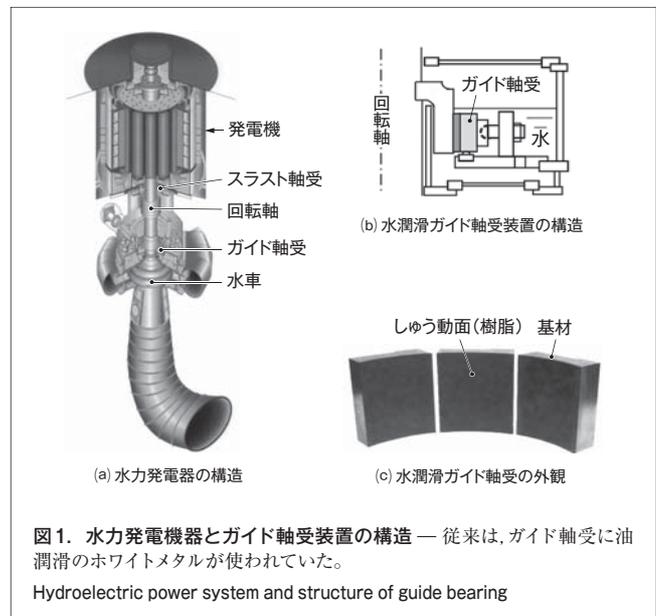
## 1 まえがき

水力発電は、再生可能なクリーンエネルギーを生み出し、また電力需要の変動に即応できることから、中小の水力発電を中心に積極的に開発が進められている。発電効率を更に向上させ、電力量を増加させることで、エネルギーの有効活用に貢献することが期待される。

水力発電機器には、発電機の回転軸の質量及び水のラスト荷重を支持するスラスト軸受と、ラジアル荷重を支持するガイド軸受が使用されている(図1)。

東芝は、1990年から樹脂軸受の開発に着手し、1994年に国内で初めて、樹脂軸受を水力発電機のスラスト軸受とガイド軸受に適用した。樹脂軸受のしゅう動面の摩擦係数が低いため、摩擦損失が低減するとともに、面圧としゅう動速度の適用限界が従来のホワイトメタル(Sn(すず)-8~10%Sb(アンチモン)-5~6%Cu(銅)より大幅に拡大した。面圧の適用限界の拡大により軸受の小型化が可能になり、油中での回転抵抗が低減し、回転損失が減少した。現在は、これら摩擦損失と回転損失の低減により軸受損失が減少し、発電効率が向上している<sup>(1)-(3)</sup>。

一方近年、河川に近い水車ガイド軸受から潤滑油が河川へ流出して環境が汚染されることを防止するために、油潤滑に代わる水潤滑軸受を採用したいというニーズが強くなっている。



軸受の潤滑油には摩擦や粘度の調整剤などを配合し、しゅう動面に安定な油膜を形成することで、摩擦や摩耗、焼付きを防止している。一般に動粘度が313 Kで50 mm<sup>2</sup>/s程度のタービン油が用いられ、運転中に50 μm程度の油膜厚さが保たれている。しかし、水潤滑軸受の潤滑剤である水の動粘度は293 Kで1 mm<sup>2</sup>/s程度とはるかに低いため、起動や停止、あ

るいは低速回転において十分な潤滑性と水膜厚さが得られず、しゅう動面の直接接触による激しい摩耗や焼付きが発生しやすい状態にある。そのため、軸受の水潤滑材料には、より優れたしゅう動特性と自己潤滑性が要求される。

ここでは、水潤滑軸受用樹脂材料の特性と、それを用いた水力発電用水車の水潤滑樹脂軸受の性能について述べる。

## 2 水潤滑軸受用材料の特性

一般に、軸受用の樹脂材料には、ポリテトラフルオロエチレン (PTFE) や、ポリエーテルエーテルケトン (PEEK)、ポリフェニレンサルファイド (PPS)、ポリイミド (PI) などが用いられる。PEEKとPIは摩擦係数が高く、PIは吸水率が高いため、水潤滑軸受用材料としてはPTFE又はPPSが適している。PTFEは摩擦係数が小さく、PPSはホワイトメタルに匹敵する強度を持つ反面、摩擦係数が高い(表1)。また、これらの樹脂材料を母材として、各種のセラミックス系充填材が添加され、摩擦・摩耗特性の向上が図られている(表2)。

今回の開発では、母材としてPTFEを、充填材として炭素繊維(C<sub>f</sub>)とチタン酸カリウムウイスカ(KTiO<sub>w</sub>)を用いた。比較材料として、その他の充填材を添加したPTFE及びPPSを用いた(表3)。

C<sub>f</sub>は、六角形の網目構造で、層間に弱いファンデルワールス

表1. 樹脂母材の材料特性

Properties of resin-based materials

| 項目                           | PTFE | PPS  | ホワイトメタル |
|------------------------------|------|------|---------|
| 融点 (K)                       | 600  | 558  | 513     |
| 密度 (g/cm <sup>3</sup> )      | 2.18 | 1.3  | 7.3     |
| 熱膨張係数 (×10 <sup>-5</sup> /K) | 10   | 5    | 2       |
| 熱伝導率 (W/(m·K))               | 0.35 | 0.3  | 60      |
| 吸水率 (%、24 h)                 | 0.01 | 0.05 | —       |
| 摩擦係数                         | 0.05 | 0.24 | 約0.25   |
| 引張強度 (MPa)                   | 30   | 80   | 80      |
| 弾性率 (GPa)                    | 0.6  | 3.5  | 54      |

\*日本トライボロジー学会「固体潤滑ハンドブック」及び日本金属学会「金属便覧」を元に作成

表2. セラミックス充填材の材料特性

Properties of ceramic filler materials

| 項目                      | C <sub>f</sub> | Gr <sub>p</sub> | KTiO <sub>w</sub> | ZnO <sub>w</sub> |
|-------------------------|----------------|-----------------|-------------------|------------------|
| 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.75           | 2.25            | 3.5               | 5.78             |
| 直径 (μm)                 | 7              | 20              | 0.3~0.6           | —                |
| 長さ (μm)                 | 約30            | —               | 10~20             | 10               |
| 引張強度 (GPa)              | 3.6            | —               | 7                 | —                |
| 弾性率 (GPa)               | 235            | —               | 280               | —                |

Gr<sub>p</sub>: グラファイト粒子 ZnO<sub>w</sub>: 酸化亜鉛ウイスカ

\* 日刊工業新聞社「マテリアル・データベース」及び(株)アムラック製「酸化亜鉛単結晶バナテトラ」の諸性質を元に作成

表3. 材料の成分と吸水率

Compositions and water absorption rates of plastics for water-lubricated bearing materials

| 材料    | 成分                                      | 吸水率 (%) <sup>*</sup> |
|-------|---|----------------------|
| 開発材料  | C <sub>f</sub> -KTiO <sub>w</sub> /PTFE | 0.004                |
| 比較材料1 | C <sub>f</sub> -ZnO <sub>w</sub> /PTFE  | 0.004                |
| 比較材料2 | C <sub>p</sub> -Gr <sub>p</sub> /PTFE   | 0.017                |
| 比較材料3 | C <sub>f</sub> /PPS                     | 0.019                |

\* JIS K7209: 浸漬(しんせき)296 K×24 h, 乾燥323 K×24 h

結合のグラファイト結晶構造を持ち、またKTiO<sub>w</sub>は、八面体の連鎖間にトンネル構造を持つことから、自己潤滑性が期待される。C<sub>f</sub>とKTiO<sub>w</sub>の同時添加は、微細なウイスカがC<sub>f</sub>間のPTFE母材を強化し、過酷なしゅう動条件において、塑性流動を抑制するためである<sup>(1)</sup>。以下に、C<sub>f</sub>-KTiO<sub>w</sub>/PTFEの特性について述べる。

### 2.1 吸水率

C<sub>f</sub>-KTiO<sub>w</sub>/PTFEの吸水率は小さく(表3)、また、吸水によるしゅう動面の寸法変化は許容範囲にあることを確認した。

### 2.2 材料組織

C<sub>f</sub>とPTFEと、及びKTiO<sub>w</sub>とPTFEとのぬれ性は良好で、KTiO<sub>w</sub>がC<sub>f</sub>間に分散している状態を確認した(図2)。

### 2.3 摩擦・摩耗特性

摩耗試験を、JIS K7218のA法に準じて、面圧0.5~4 MPa、しゅう動速度1 m/sの条件で、純水中で実施した。相手材にはステンレス鋼SUS410を用いた。

面圧2 MPaにおける、動摩擦係数としゅう動時間の関係の一例を図3に示す。C<sub>f</sub>-KTiO<sub>w</sub>/PTFEの動摩擦係数は0.10以下と最も低く、その変動も小さく、試験開始後、早期に安定した。C<sub>f</sub>/PPSの動摩擦係数是最も高く、その変動は終始大きく、局所的にスティックスリップ現象が発生した。

C<sub>f</sub>-KTiO<sub>w</sub>/PTFEのしゅう動面には微細なしゅう動傷が発生したものの、C<sub>f</sub>及びKTiO<sub>w</sub>のPTFE母材からの離脱は観察されなかった。相手材のSUS410のしゅう動面には、C, Ti, Oが全面に検出され、微量のフッ素(F)があった(図4)。電子プロー

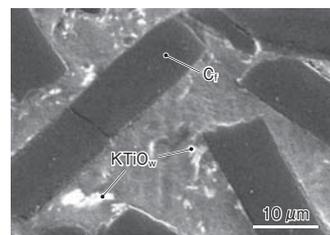
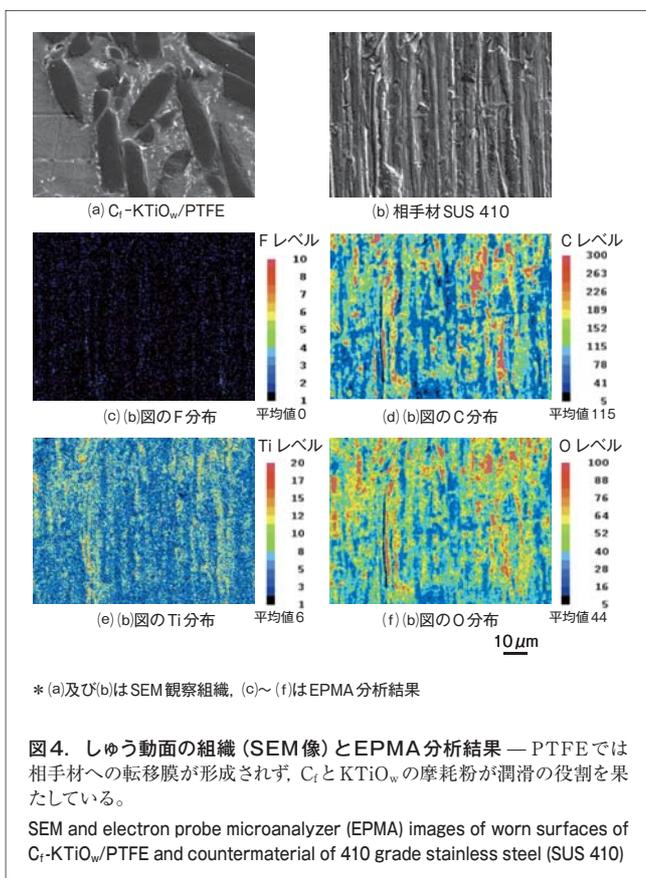
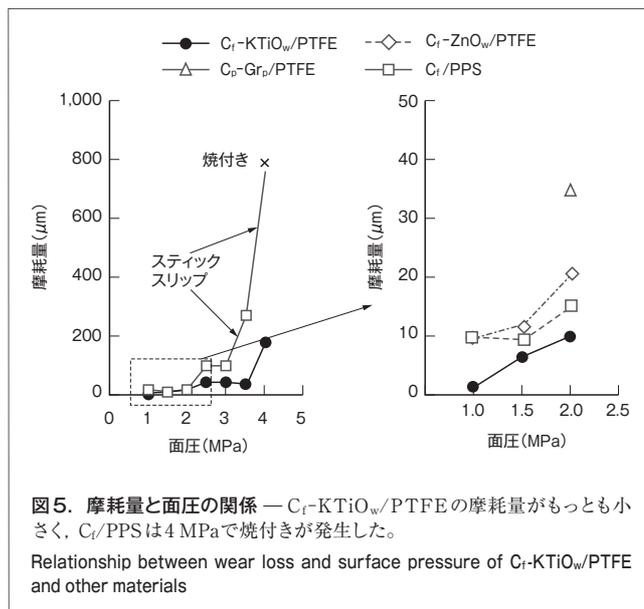
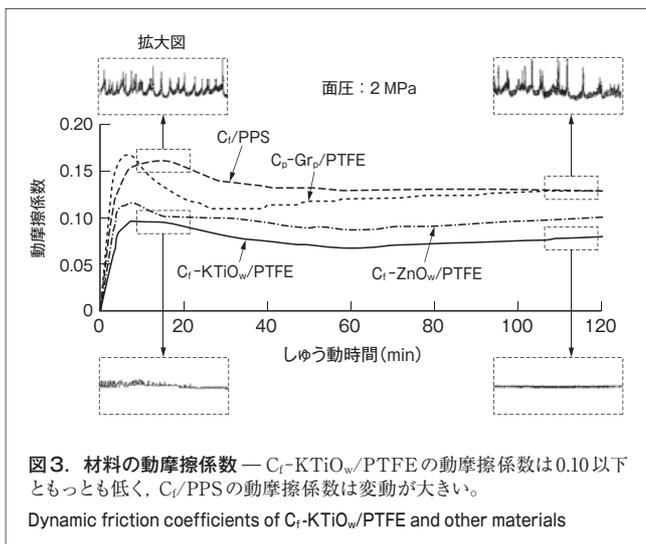


図2. 材料の組織(走査型電子顕微鏡(SEM)像)—微細なKTiO<sub>w</sub>がC<sub>f</sub>間のPTFE母材を強化している。

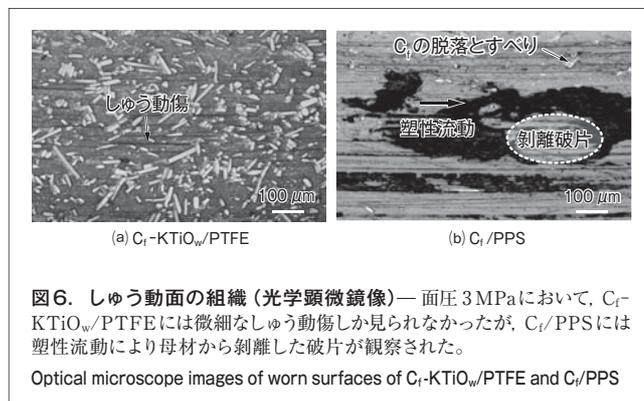
Scanning electron microscope (SEM) image of C<sub>f</sub>-KTiO<sub>w</sub>/PTFE



ブマイクロアナライザ (EPMA) による分析結果から、PTFEの相手材への転移膜が形成されず、 $C_f$ と $KTiO_w$ の摩耗粉が潤滑の役割を果たしていると考えられる。

面圧を上昇させると、 $C_f$ - $KTiO_w$ /PTFEの動摩擦係数は、若干上昇するが、試験範囲である面圧 4 MPa まではスティックスリップや焼き付きが発生しなかった。一方、 $C_f$ /PPSは、面圧が 3 MPa を超えると激しくスティックスリップが発生した<sup>(3)</sup>。

これらの材料のうちでは、 $C_f$ - $KTiO_w$ /PTFEの摩耗量が



最も小さく、 $C_f$ /PPSは 2 MPa までの低い面圧では摩耗量が小さいものの、面圧が 3 MPa を超えると激しいスティックスリップが発生するとともに摩耗量が急激に上昇し、面圧 4 MPa で焼き付きが発生した (図5)。

また、面圧 3 MPa において、 $C_f$ /PPSのしゅう動面には塑性流動により母材から剝離した破片が観察されたが、 $C_f$ - $KTiO_w$ /PTFEのしゅう動面には塑性流動が見られなかった (図6)。PPSはPTFEよりはるかに強度が高いにもかかわらず、摩擦係数が高いため、しゅう動面における高いせん断応力、温度上昇、及びスティックスリップの繰返しにより、疲労限界に達したと見られる。

### 3 水潤滑樹脂軸受の性能

実機を模擬した軸受試験装置を用いて、 $C_f$ - $KTiO_w$ /PTFEを適用した直径 500 mm のガイド軸受の性能を、面圧 0.5 ~ 2 MPa、速度 5 ~ 20 m/s (軸の回転数 200 ~ 800  $min^{-1}$ ) の条件で検証した (図7)。



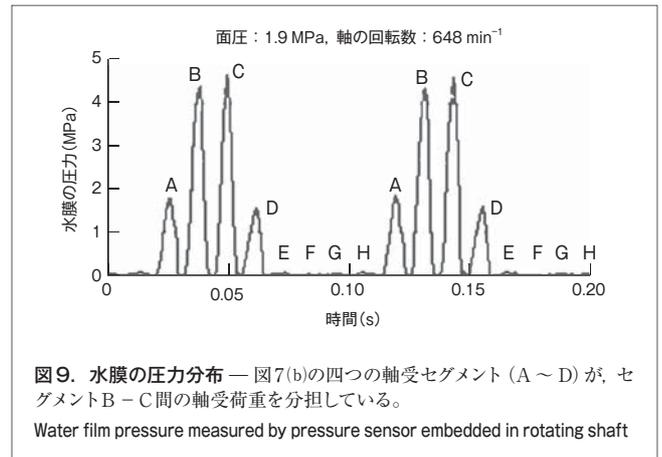
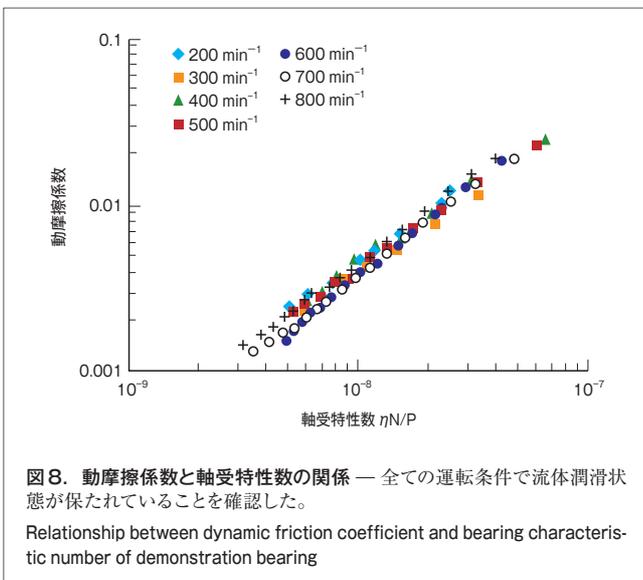
### 3.1 軸受特性

動摩擦係数と軸受特性数  $\eta N/P$  ( $\eta$ : 水の粘度,  $N$ : 軸の回転数,  $P$ : 軸受の面圧) の関係(ストライベック線図) から、全ての運転条件において動摩擦係数は0.10以下で、水膜を介した流体潤滑状態が保たれていることを確認した(図8)。

### 3.2 耐久性

実機を模擬した条件(面圧 0.5 ~ 1.9 MPa, 軸の回転数 500 ~ 650  $\text{min}^{-1}$ ) で約 320 h の耐久試験を行った結果、動摩擦係数が0.005程度と小さく、かつ水膜の圧力分布も安定していた(図9)。軸受の摩耗量は8  $\mu\text{m}$ 程度と小さかった。

面圧 0.18 MPa, 軸の回転数 500  $\text{min}^{-1}$  の条件で、10年間運転したときに相当する回数の起動、停止(2回/日)の繰返し試験を行い、安定した運転状態の継続を確認した。起動停止



試験後のしゅう動面の表面粗さ( $R_a$ )は1  $\mu\text{m}$ 程度と良好であり、異常摩耗は認められなかった。

### 3.3 適用範囲

これまでの試験結果に安全率を見込んで、定常運転時の水潤滑樹脂軸受の適用範囲を面圧 2 MPa 以下、及びしゅう動速度 5 ~ 20 m/s とした。これは、ポンプ水車と横軸水車を除く、立軸水車のほとんどに適用できることを示している。

## 4 あとがき

今後、軸受損失低減による発電効率の向上及び環境負荷低減の観点から、既設及び新設のプラントへの採用拡大が見込まれており、幅広い分野への応用展開も期待される。

## 文献

- 1) タントロンロン 他. 樹脂材料軸受のエネルギー機器への適用. まてりあ. 42, 1, 2003, p.45 - 51.
- 2) タントロンロン 他. 樹脂軸受の実用化による水力発電機器の効率向上. 日本エネルギー学会誌. 90, 4, 2011, p.300 - 305.
- 3) タントロンロン. 環境にやさしい水潤滑樹脂軸受 低損失による水力発電機器の効率向上. 電気学会誌. 132, 1, 2012, p.26 - 29.



タン トロン ロン THAN TRONG Long, D.Eng.  
電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 高機能・絶縁材料開発部主幹, 工博. 高機能材料の開発に従事。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center



小熊 証 OGUMA Tadashi  
電力システム社 京浜事業所 水力機器部主幹. 水力機器の設計・開発に従事。ターボ機械協会会員。  
Keihin Product Operations



木崎 康巳 KIZAKI Yasumi  
東芝プラントシステム(株) 電力プラント事業部 水力機器システム部主幹. 水車の設計・開発に従事。  
Toshiba Plant Systems & Services Corp.