

中部電力株式会社姫川第三発電所向け

水車主軸用水潤滑軸受の開発と現地試験結果

Development and Field Test Results of Water-Lubricating Turbine Guide Bearing for Himekawa 3rd Power Station, Chûbu Electric Power Co.

従来、油潤滑軸受が主体であった水車及びポンプ水車用主軸受は、軸受性能の向上、低摩擦損失形軸受の採用、運転維持費の低減、保守の省力化などが強く要望されている。昭和51年11月、新形軸受改造後の運転を開始した中部電力株式会社姫川第三発電所向け13,000kWカプラン水車用主軸受は、これらの要求を採り入れた無給油軸受である。本軸受は、軸受材にフェノール樹脂を用い、潤滑剤として冷却効果の大きい水を使用し、更に制心効果を高めるために特に考慮された軸受パッドに圧力水を供給する水潤滑軸受方式を採用している。この軸受方式は、実機大模型試験により性能及び信頼性を確認し実機に採用された。なお、実機軸受はこの模型試験の結果を基礎に設計、製作されたもので、現地試験でも良好な結果が得られ、現在、好調に営業運転中である。

内田光雄* Uchida Mitsuo
伊藤栄郎** Itô Hideo
岡野金平*** Okano Kinpei
富岡俊三*** Tomioka Syunzou
柳田 勲** Yanagida Isao

1 緒 言

従来、カプラン水車の主軸受には潤滑用グリースを間欠的に給油する方式が主に採用されているが、近年、軸受機械損失の低減、保守の省力化、運転維持費の低減などの見地から、潤滑剤としてグリースその他油脂類を用いない無給油軸受の早期実用化が望まれていた。そこで、軸受の潤滑剤として安価で、比較的容易に確保できる水を利用する水潤滑軸受方式に着目し、軸受材としてフェノール樹脂を用いた実機寸法の模型軸受により性能試験を行なった。この試験により軸受性能、及び信頼性を確認する一方、実機軸受への適用法、運転保護装置、その他給水系統などの信頼性を確認し実用化に成功した。これらの成果は、中部電力株式会社姫川第三発電所13,000kWカプラン水車に採用された。ここでは水潤滑軸受方式の開発経過、性能上の特長、現地試験結果などについて述べる。

2 水潤滑軸受の一般的特長

水車主軸受として用いられる水潤滑軸受は、一般的には軸受材としてフェノール樹脂、潤滑剤として水を用いることが多いが、現在、広く使用されているグリースあるいは油潤滑軸受と比べ、(1)潤滑剤としての水は、油に比べ熱伝導率が高く軸受放熱特性が優れている。(2)潤滑剤としての水は、油脂類に比べ粘度が非常に小さく、軸受の摩擦係数、摩擦損失及び軸受発熱量が小さい。(3)上記(1)、(2)より原動機としての機械的損失が小さく、効率が高まる。(4)安価で、比較的容易に確保できる水を用いるため、運転維持費の低減が可能で、保守も容易となるなどの利点をもっており、本軸受の早期実用化が望まれる一因とも考えられていた。

3 水潤滑軸受の開発経過

水車主軸受は構造上の重要部品であるため、水潤滑軸受でも高度の耐久性、信頼性及び負荷特性に対し優れた軸受性能が要求される。したがって、水潤滑軸受が長期間安定な運転を行なうためには、運転条件に適応した形式の選定及び潤滑水の供給が重要である。ここで水車主軸受として用いられて

いる水潤滑軸受の形式についてその概要を述べる。

3.1 水潤滑軸受の形式

軸受形式は、軸受負荷能力の発生機構により次の2方式に大別される。

なお、この2方式の構造比較を図1に示す。

(1) 動圧軸受方式

軸と軸受間の相対すべり運動によって、2面間の潤滑流体(水)に発生するくさび状水膜の圧力により、軸受荷重を支持する軸受形式であり、次のような特長をもっている。

- (a) 潤滑水供給量は軸受の摩擦発生熱を奪うだけの量で十分で、この量は後述の軸受方式より一般的に少量である。
- (b) 軸受構造及び付属設備が簡単で、保守が容易である。

ところで、潤滑剤として用いる水は冷却効果が大きい反面、油に比べると粘度が小さく、軸の相対すべり運動によって生ずるくさび状水膜圧力は小さい。このため、通常の油潤滑軸受より負荷能力に劣る難点があるため、この軸受方式ではフェノール樹脂基材などの軸受材固有の許容PV値(軸受面圧 $\text{kg/cm}^2 \times$ 軸周速 m/s)以下で設計されなければならない、比較的低速小荷重の条件下で使用されるのが一般的である。

(2) 静圧軸受方式

動圧軸受のような軸、軸受2面間の相対運動を必要としないで軸受荷重を支持させるため、図2に示すような軸受内面に静圧ポケット溝を設け、加圧水を強制給水する方式で軸受荷重は、静圧ポケット内の静圧により支持される。この方式の軸受は次のような特長をもっている。

- (a) 軸受の負荷能力発生機構は与えるべき給水圧、及び静圧ポケット溝形状、寸法で決まるため、これらを適当に設定することにより大きな負荷能力を得ることが可能で、大形かつ高荷重軸受に対し比較的容易に対応できる。
- (b) 負荷能力発生機構は軸、軸受2面間の相対運動を必要としないので、軸周速の大小にはほとんど無関係に使用できる。
- (c) 本軸受は制心効果が良好で、軸と軸受とは潤滑水膜で分離されているため、互いに接触することがなく、軸振れ

* 中部電力株式会社設備運営室 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所日立研究所

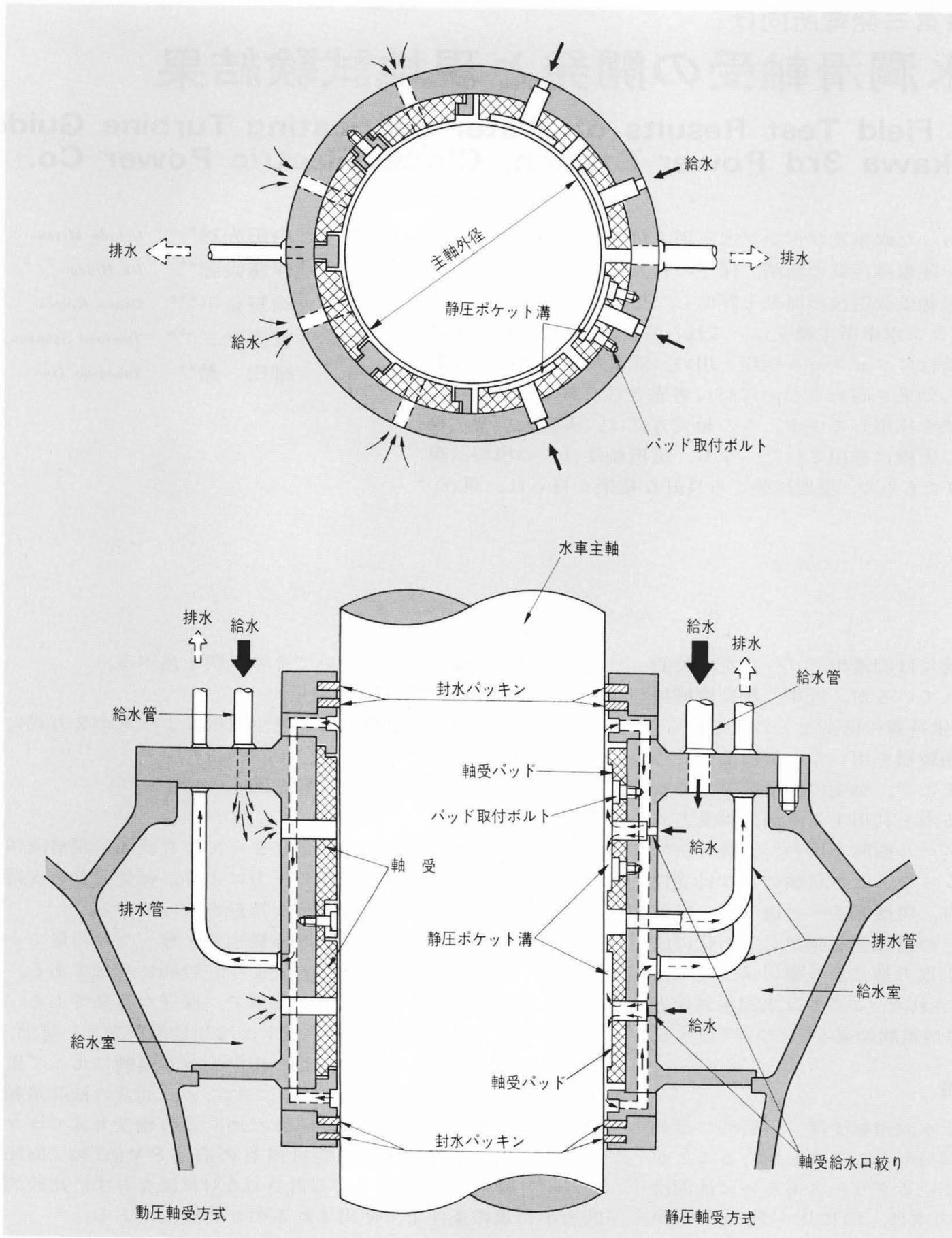


図1 水潤滑軸受方式の構造比較 水車主軸中心より左側に動圧軸受方式を、右側に静圧軸受方式を示す。

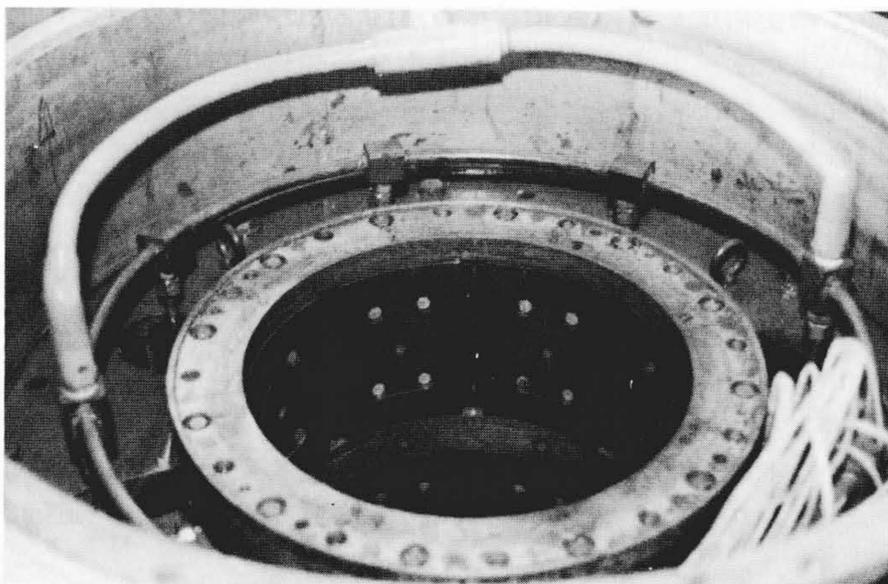


図2 軸受パッドの構造 静圧軸受方式の軸受パッド構造を示す。8等分割パッドを上下2段に配列し、パッド内面には静圧ポケット溝が設けられている。

及び摩擦が非常に小さい。また、銹、異物などの影響を受けにくく、軸、軸受ともに摩耗も小さく、高周速での使用が容易である。

(d) 軸受間隙内でのスキーズ効果による軸振動の減衰性、軸受給水入口部、絞りオリフィスの粘性減衰抵抗による減衰などがあり、動圧軸受方式より軸振動の減衰性が大きい。

この反面、軸受構造、給水設備などで動圧軸受方式より複雑になり、軸受給水量も多くなる傾向にある。なお、この方式は、動圧軸受の適用範囲を超えるような大容量機、高速高荷重用軸受に対し適用されることが多い。

3.2 試作水潤滑軸受の概要及び特長

3.2.1 フェノール樹脂軸受材

軸受材料として選定したフェノール樹脂材は次のような特長、及び物理的特性をもっており、軸受材としての十分な強度と特性をもつものとなっている。

- (1) 一般的特長
 - (a) 軽量である。
 - (b) 表面硬度が軟らかいため、異物の埋没性がよく、相手軸を傷つけにくい。
 - (c) 布ベースであるため、衝撃吸収能力及び消音効果が大である。
 - (d) 耐摩耗性及び耐薬品性が良好である。
 - (e) 水中摺動特性は金属材料よりも優れている。
- (2) 物理的特性
 - (a) 比重：1.3～1.4
 - (b) 熱膨張率： $1 \sim 2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$
 - (c) 熱伝導率： $4 \sim 7 \times 10^{-4} \text{ cal/s} \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}$
 - (d) 引張強さ： $\geq 500 \text{ kg/cm}^2$
 - (e) 硬さ： $\geq \text{HRM80}$
 - (f) 圧縮強さ： $\geq 1,400 \text{ kg/cm}^2$
 - (g) 衝撃値： $\geq 5 \text{ kg} \cdot \text{cm/cm}^2$

3.2.2 試作軸受の形式、構造及び特長

(1) 軸受形式

姫川第三発電所用軸受は、前述の動圧軸受の適用限界を超える高速・高荷重下で過酷な運転が強いられるため静圧軸受方式が選定された。したがって、軸受パッドのそれぞれにはその内面に運転条件に適応した静圧ポケット溝を配置し、軸受の負荷能力を有効に発揮できる構造とした。なお、この試作軸受の構造、外観形状を図1、図3に示す。

(2) 軸受構造

水潤滑軸受の構造で特に考慮を払わねばならないものは、フェノール樹脂成形材固有の特性である膨潤をいかに小さく、しかも均一に抑えるかである。そこで今回の試作軸受は、これらの対策を考慮に入れ、分割パッドとし、かつ各パッドの取付けは静圧ポケット溝内で内周側からボルト締めする構造が採用された。

(3) 試作軸受の構造的長

本軸受は前記3.1の(2)項で述べた静圧軸受としての長のほか、次のような水潤滑軸受としての構造的な長をもっている。

- (a) 分割パッド構造により軸受材の膨潤変形が小さく、かつ不均一変化がなく、軸受性能の安定化が期待できる。
- (b) 分割パッド構造により樹脂成形、加工能力の制約を受

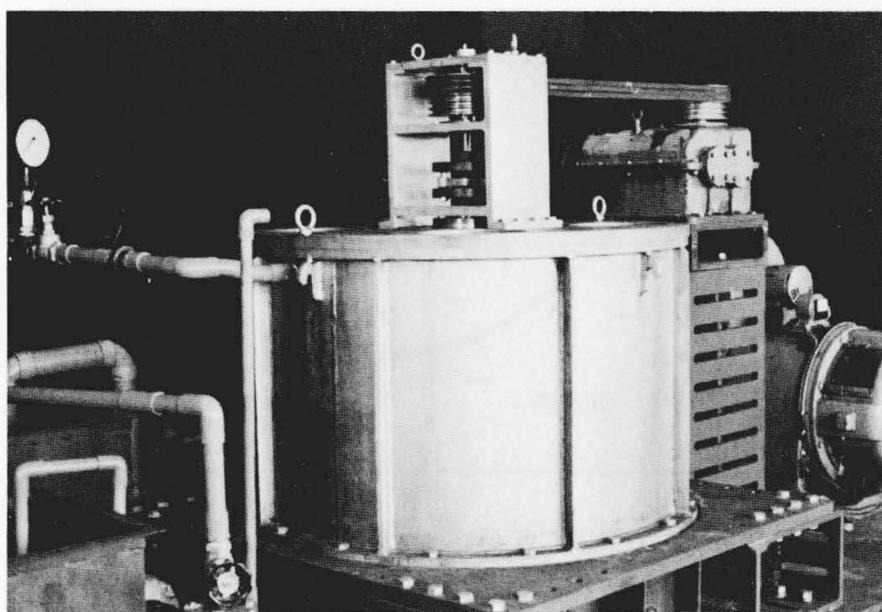


図3 軸受特性試験用装置外観 立て軸、実機大寸法で製作されたもので、その装置外観を示す。軸受荷重は、アンバランスウエートによる遠心荷重として与えられる。

けなくなるので、大形軸受への適用が容易であり、更に予備軸受の保管が容易である。

4 試作軸受による軸受特性試験

4.1 試験装置及び試験条件

(1) 試験装置

試験軸受としては前記3.1項に示す動圧軸受方式、及び静圧軸受方式とし、それぞれの優位性を実測検討した。この試験に使用した装置の外観を図3に示す。

(2) 試験条件

- (a) 試験軸受： $\phi 520 \times 260 \times 8$ パッド $\times 2$ 段、フェノール樹脂成形材
- (b) 回転速度：400rpm(周速10.9m/s)、520rpm(周速14.2m/s)
- (c) 軸受荷重：立て軸遠心負荷 400rpm……880kg
520rpm……1,400kg
- (d) 潤滑水：水道水加压給水……水道水+異物(JIS 5号けい砂0.5%重量比混入)
- (e) 軸：発錆軸……溶接構造用鋼
不錆軸……18-8ステンレス鋼+クロムめっき

4.2 試験結果

4.2.1 膨潤特性

樹脂材の膨潤は、軸受間隙の縮小による軸受材の軸への抱き付きや性能不安定を招く原因となるため、間隙の選定に際しては膨潤特性を事前に十分把握する必要がある。今回の試験結果によると、動圧軸受方式では内径への膨潤量が過大で、直径減少0.35mmになってもなお進行を続け、かつ内径への膨潤は均一性を欠く不安定なものであった。これに対し、分割パッドの静圧ポケット内ボルト締め構造では、完全平衡に達した状態で直径0.14mm(約0.2%)に抑えることができ、また均一な変化とすることができた。なおこの膨潤は、約6箇月で完全平衡に達することも確認された。この結果、長期使用による寸法変化の軸受性能に与える影響は少なく、使用上の問題はないことが分かった。なお、膨潤特性の比較を図4に示す。

4.2.2 圧力分布特性

それぞれの試験軸受での内面圧力分布を実測した結果を図5に示す。静圧軸受方式の場合は動圧軸受方式のような負圧発生はなく、各パッドともほぼ理論値に近い台形分布を示しており、軸受荷重を支持するに十分な負荷能力となることが確認され、動圧軸受方式に比べ著しい性能向上となることが確認された。

4.2.3 軸受温度特性

軸受温度はほとんどの場合、給水温度と全く等しい。これは水膜が保持され、流体潤滑状態であることを裏付けている。

4.2.4 軸制心特性

動圧軸受方式、静圧軸受方式の各々に対し、軸制心特性を実測した結果を図6に示す。この結果より、静圧軸受方式は動圧軸受方式より優れ、約2倍の制心能力をもっていることが確認された。

4.2.5 錆及び異物の影響

水潤滑軸受では、給水系統、主軸などに生じた錆及び異物が軸受に対し悪影響をもたらすと考えられるため、この影響を試験により確認する必要がある。試験の結果、発錆軸は不錆軸とほぼ同等の摩擦損失を示し、軸受面のダメージは皆無であった。また0.5%重量比の土砂混入水では、摩擦損失は約20%増加となるが樹脂パッド表面の荒損は極めて少なく、

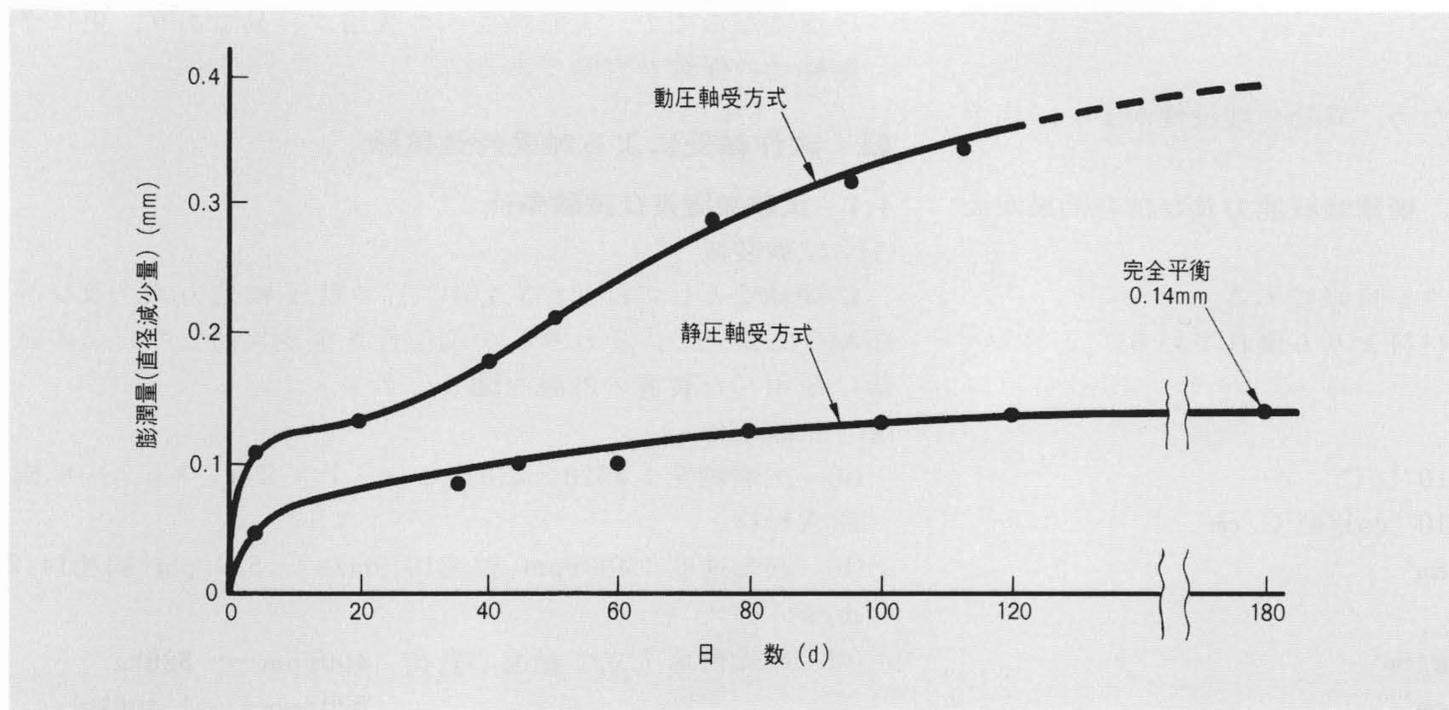


図4 軸受材の膨潤量比較
静圧軸受は動圧軸受方式に比べ約
半に低減されている。

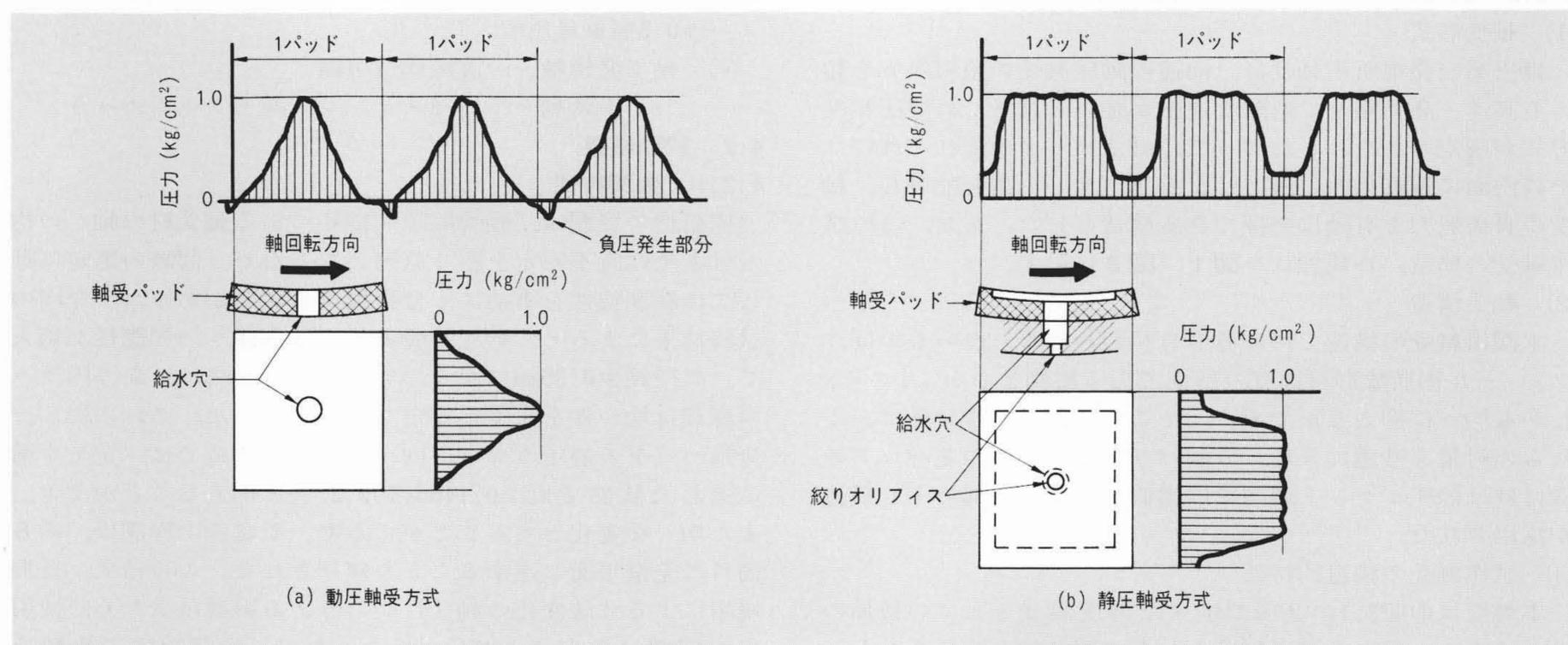


図5 軸受パッド内面の圧力分布特性比較 (a)の動圧軸受方式は、大略三角形分布をなし、一部負圧
を発生している部分がある。(b)の静圧軸受方式では、静圧ポケット溝内に規則的な台形分布が得られている。

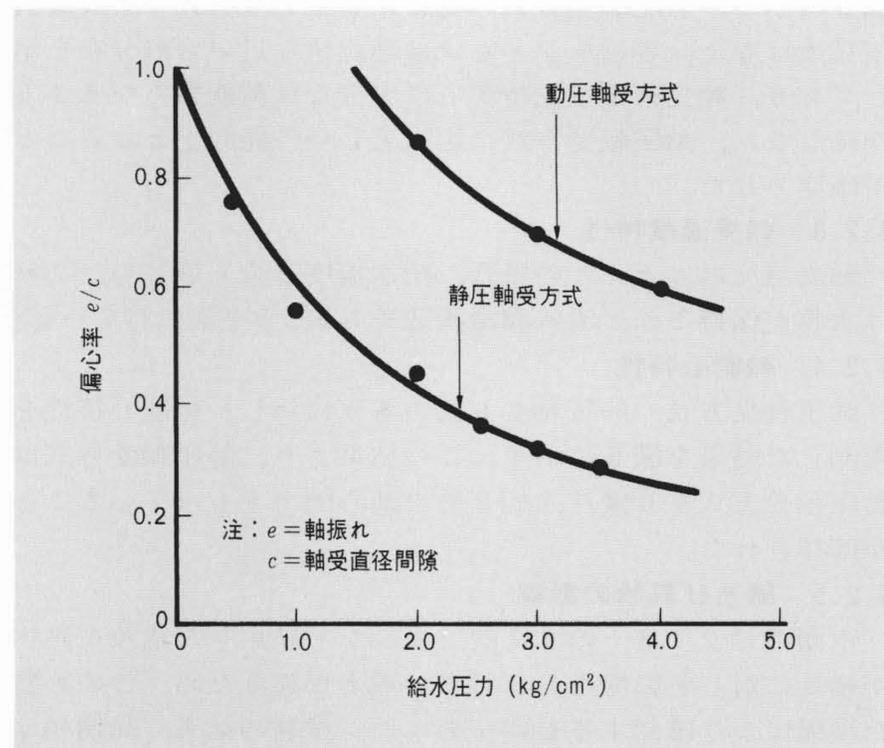


図6 軸受方式による制心効果比較 給水圧力を高くするほど制心効
果は高められる。また、静圧軸受方式は動圧軸受方式の約2倍の制心効果をも
っている。

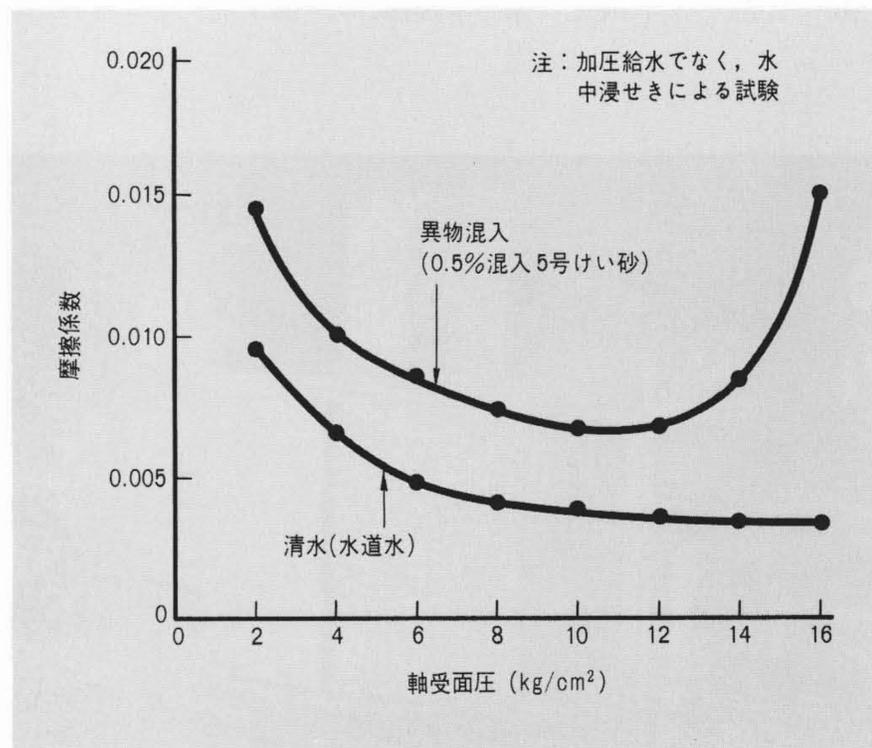


図7 異物混入の影響 異物混入があると、清水の場合に比べ約30~50
%摩擦係数が増加する。更に、面圧12kg/cm²以上では急激に上昇する傾向がある。

本軸受材の錆、土砂に対する耐久性が確認され、実用上の問題は極めて少ないことが明らかとなった。なお、これとは別に、軸受を単に異物混入水中へ浸せきした試験では図7に示すように、約30~50%摩擦係数が増加し、面圧12kg/cm²以上では急激な摩擦係数の上昇を生じ境界潤滑状態になっていることを示している。この結果より、動圧軸受方式で使用する場合は、異物混入の影響を考慮し、面圧12kg/cm²以下で使用する事が望ましい。

5 実機軸受の概要

実機軸受は、前述の模型試験から得られた基礎データをもとに基本設計が行なわれ、実際の設計、製作に対しては軸受の保護用計器、軸受ケース、配管などの材質、防錆処理、軸受材の寸法変化防止など信頼性を重視した種々の考慮が払われた。

5.1 適用水車の仕様

- (1) 形式：立て軸カプラン水車×1台
- (2) 最大出力：13,000kW
- (3) 最高有効落差：55.0m
- (4) 最大流量：26.5m³/s
- (5) 回転速度：400rpm

5.2 実機軸受の仕様

5.2.1 軸受仕様

- (1) 形式：水潤滑立て軸案内軸受(静圧軸受方式)
- (2) 軸受内径：519.5mm
- (3) 軸受材質：含油性フェノール樹脂(綿布基材)
- (4) 軸受構成：8分割パッド×上下2段(計16パッド)
- (5) 軸受給水量：300l/min(設計値)

- (6) 軸受給水圧：静落差57.0m

なお、本軸受構造は図1に示すとおりである。

5.2.2 給水系統仕様

- (1) 給水方式：清水循環方式(取水源：清水井戸)
- (2) 清水循環経路：清水井戸→給水ポンプ→上水槽→軸受→下水槽→井戸
- (3) 給水ポンプ：5段タービンポンプ(常用, 予備各1台)
全揚程74m, 揚水量900l/min
- (4) 上水槽：有効容量8.72m³(ステンレス鋼製)
- (5) 下水槽：有効容量3.0m³(ステンレス鋼製)

なお、本給水系統を図8に示す。

5.2.3 軸受保護用計器仕様

この軸受は運転状態を常時監視するとともに、異常状態に即刻対処できるように次のような各種の保護計器が設けられている。

- (1) 軸受温度計
- (2) 給水温度計
- (3) 各部水圧測定用圧力計
- (4) 軸受入口・出口差圧継電器
- (5) 給排水用流量継電器
- (6) 非接触式軸変位計(軸振動監視用)
- (7) 上水槽用水位継電器

6 現地運転結果

6.1 軸受ならし試験

この試験は、定格回転数まで段階的に増速し実施された。軸振れは $\frac{2}{100}$ mm程度であり、軸受温度は給水温と同一であっ

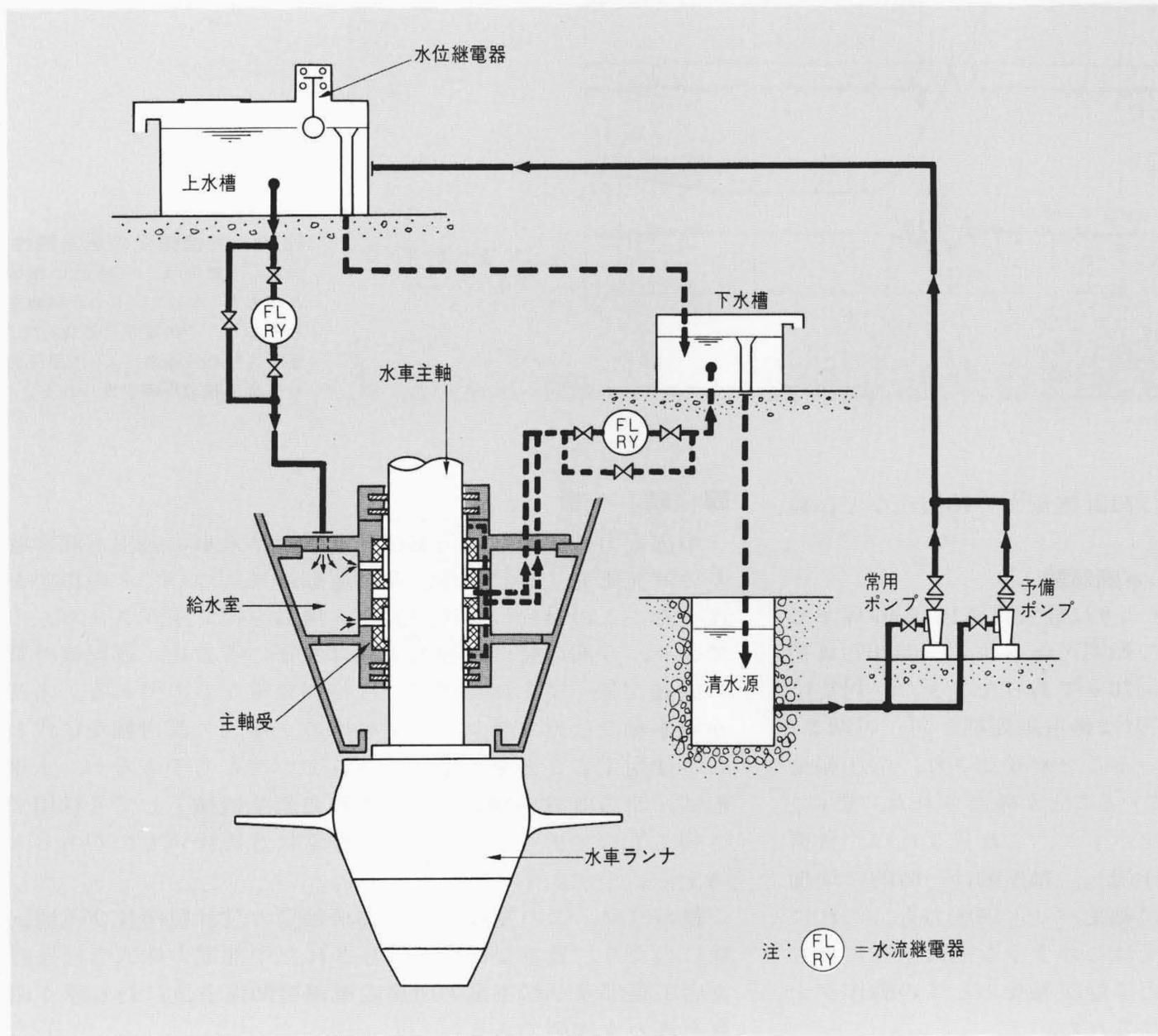


図8 水潤滑軸受の給排水系統例 一例として、姫川第三発電所用水潤滑軸受の給排水系統を示す。豊富な清水源を利用していること、給水しゃ断時に備え上水槽、下水槽を設けていることが特徴である。

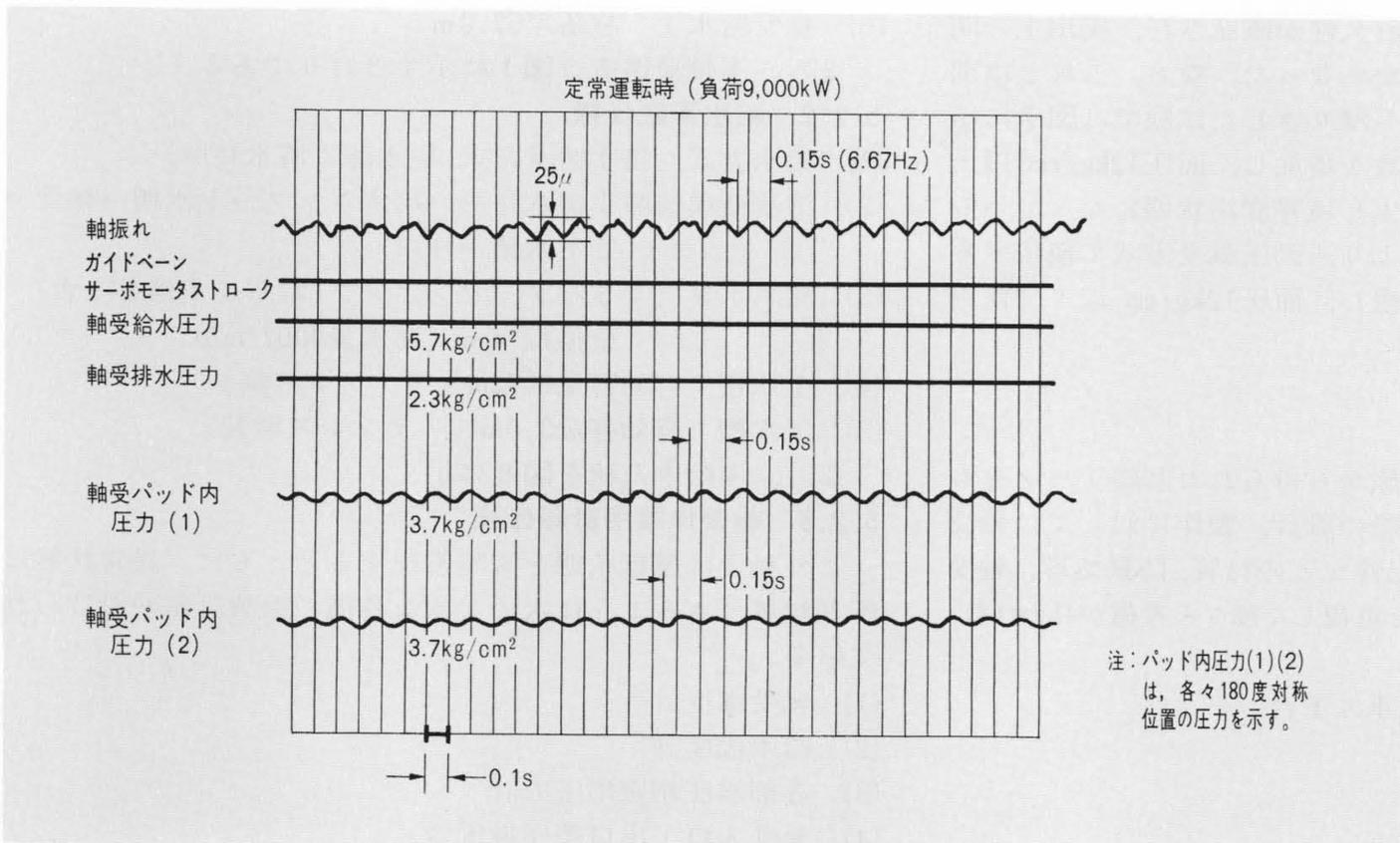


図9 実機の試運転結果

定常運転時の運転結果を示しており、軸振れ周期は軸の回転サイクルとほぼ一致している。なお対称の位置に相対する軸受パッド内面の圧力は、同一周期で互いに位相の反転した分布特性を示した。

注：パッド内圧力(1)(2)は、各々180度対称位置の圧力を示す。

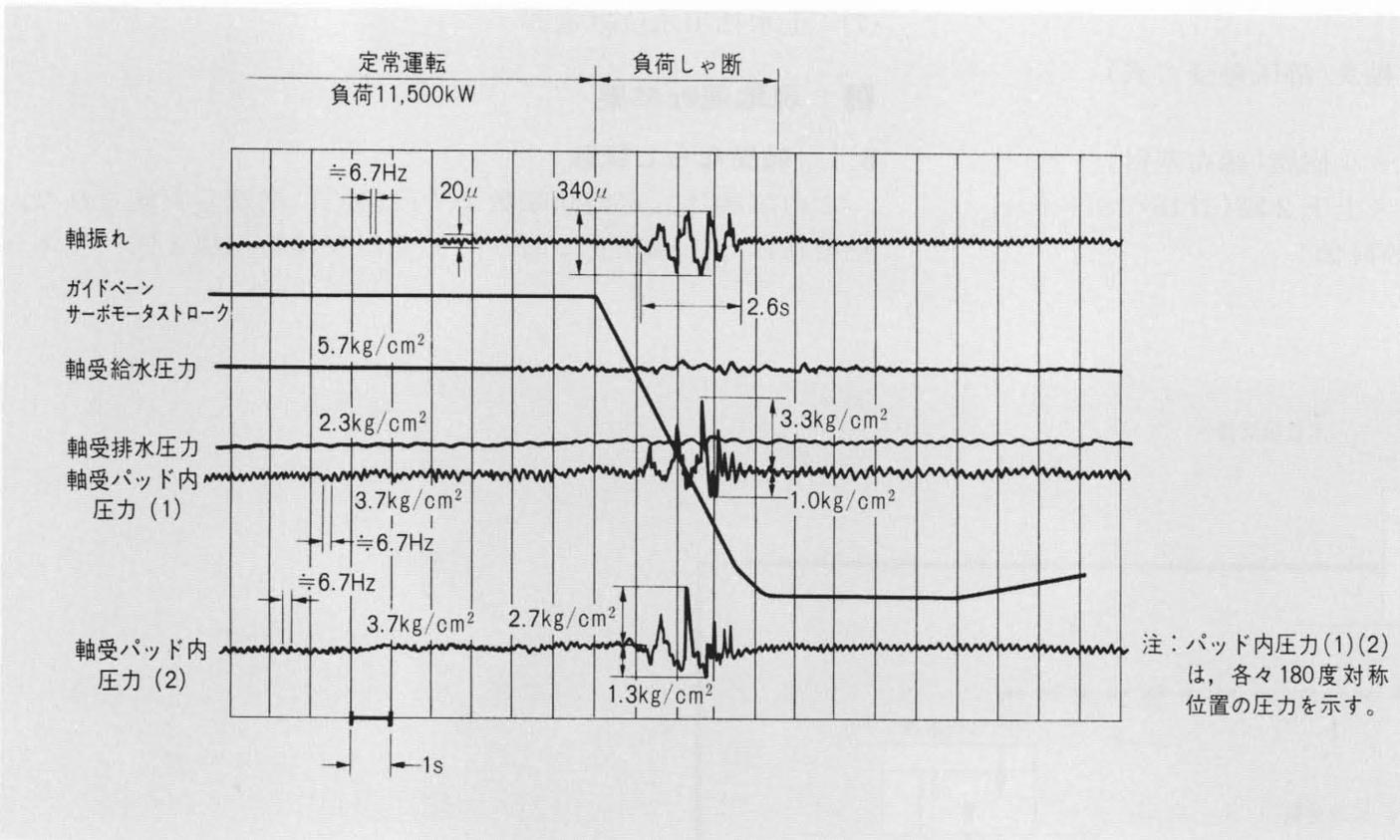


図10 実機軸受の過渡特性
負荷しゃ断時は、一時的に軸振れが大きくなっているのが観察されており、この変化に追従して、互に対称位置のパッド内面圧力も位相反転の現象が見られる。

注：パッド内圧力(1)(2)は、各々180度対称位置の圧力を示す。

た。給水量は徐々に絞り、ほぼ設計流量まで軸振れなどに異常のないことを確認した。

6.2 開度出力試験及び負荷しゃ断試験

この試験結果は、図9に示すように最大負荷11,500kWまでほぼ一定値を示し、25~40μの範囲にあるが、一部20%負荷領域では最大の軸振れを示し約70μであった。また、対称位置に取り付けた軸受パッド内圧力は軸振動周期と同一周期で、かつ互いに逆位相で変化していることが確認され、静圧軸受としての機能が十分発揮されていることが確認された。更に、図10に負荷しゃ断試験の結果を示すが、これによれば、負荷しゃ断直後の衝撃力が軸受に作用し、軸振動は一時的に増加していることが分かる。同様に軸受パッド内圧力も、これに追従した変化を示し、この軸受はこのような過渡状態にでも十分安全な範囲にあること、更に静圧軸受としての動作が十分に行なわれていることが確認された。

7 結 言

中部電力株式会社姫川第三発電所向け水車主軸用水潤滑軸受の開発研究、設計製作、及び運転結果についてその概要を述べた。この軸受は各種の試作、検討を経て完成されたものであり、今回の製作、運転実績は保守の省力化、運転維持費の低減が強く望まれる現状では特に貴重なものである。当初から本軸受はカプラン水車主軸用のグリース潤滑軸受に代わって使用することを主目的とされていたものであるが、水車形式、新設既設を問わず、また他の産業機械としても採用でき得るものであり、この点でも非常に意義深いものがあると考えられる。

終わりに、この発電所用水潤滑軸受の設計製作及び現地試験に当たり、貴重な指針を供与された中部電力株式会社長野支店工務部及び松本電力所発電変電課の関係各位に対し厚く謝意を表わす次第である。