

## 潤滑膜の形成に焦点をあてた高分子弾性体による水潤滑軸受

Water-lubricated bearings using elastomers with focus on the formation of lubrication films.

ミカサ（非） 四方 正孝 （正）\*横垣 賢司

Masataka Yomo, Kenji Yokogaki

Mikasa Corporation

### 1. 緒言

環境負荷低減の取り組みとして従来は油潤滑システムを採用していた設備を水潤滑システムに置き換える事例が増えている。水潤滑システムの潤滑剤となる水は油と比較すると粘度が低く潤滑膜が途切れやすいという性質を持っているので潤滑剤としての本質的な性能では油に及ばない。水潤滑システムで摺動性を向上させるには水によって形成される潤滑膜の内部圧力を向上させることで途切れにくくする必要がある。ゴム軸受が発明されたのは1920年代のことであるが、その後の研究により軸受摺動面に高分子弾性体を使用することで潤滑膜の状態が向上することが多方面で確認されている。本研究では潤滑膜の形成に焦点をあてて高分子弾性体による水潤滑軸受の内部構造を評価した。

### 2. 着眼点

弾性流体潤滑 (Elasto-Hydrodynamic Lubrication) という概念は用途や使用環境によって若干意味が違ってくる。油潤滑システムの玉軸受（ボールベアリング）の場合には接触部に発生する圧力が数 GPa に達して金属表面に弾性変形が生じる。加えて内輪とボールの回転が逆方向となる為に圧力分布が生じて潤滑油の粘度が上昇するので高荷重の回転体を支持しても流体潤滑状態を維持することが可能である。一方で水潤滑システムの滑り軸受（ラジアルベアリング）の場合には潤滑水の流れに一定の方向性があり圧力分布が生じにくい。本質的に粘度が上がりにくいという水の性質も伴って高荷重の水潤滑システムは境界潤滑となる。

船舶の推進装置や横軸の水車など回転軸が水平に保持される設備では軸受荷重は重力が支配的となり、荷重は軸受内面の極狭い部分（負荷支持エリア）に集中する。(Fig.1) 一般的な水潤滑ラジアル軸受は内面の全周に水冷溝を配置して潤滑剤である水を供給するとともに摺動面で生じた摩擦熱を排出している。摩擦熱は主に負荷支持エリアで発生するので冷却という目的に限ればこのエリアに水冷溝を多く配置したいが、負荷支持エリアに水冷溝を配置すると回転軸と軸受の隙間に形成される潤滑膜が分散して内部圧力が低下するというデメリットもある。

Fig.2は下部面の負荷支持エリアに水冷溝を配置しないパーシャルアーク軸受の断面図である。負荷支持エリアにおいて潤滑膜の内部圧力を高めることを優先しており、多くの場合は冷却性能を別の手法で補填するか素材の耐熱性を向上させるなど工夫している。本研究では水冷溝は配置されるエリアによって異なる役割を担っていると考え、第一段階では水冷溝の配置による潤滑膜への影響を評価した。特に重要な負荷支持エリア直前の溝を導入溝(Intake-groove)、直後の溝を開放溝(Discharge-groove)と名付けた。

### 3. 導入溝の配置

船舶の推進装置では新造時における推進軸と軸受の隙間は1.5 mm程度である。6時の位置で推進軸と軸受が接しているとすれば隙間は2時>3時>4時となる(Fig.3)。出来る限り多くの水を取り込んで負荷支持エリアに送る為には導入溝をより高い位置に配置することが有効である。負荷支持エリアで形成される潤滑膜の厚さ（隙間）は10 $\mu$ m程度しかないので、隙間が小さくなるにつれて潤滑水の流速が上がリ、潤滑膜の内部圧力が上昇する。取水量を増すことで潤滑膜の内部圧力を高めることができる。

導入溝エリアにおいては軸受摺動面に弾性高分子を用いることでくさび膜効果(Wedge-film effect)と呼ばれるポンプに似た追加的な作用が発生する。(Fig.4) 導入溝を高い位置に配置することでポンプ効果も増強されると考えた。

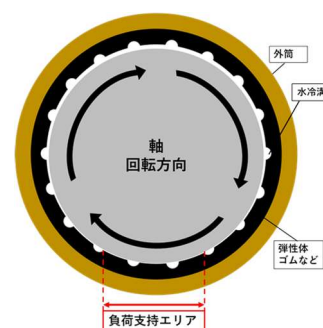


Fig. 1 Water-lubricated radial bearing, cross section

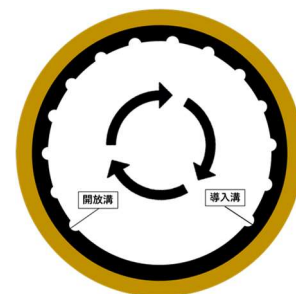


Fig. 2 Partial arc bearing, cross section.

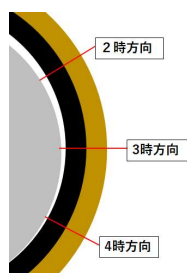


Fig.3 Position of Intake-groove

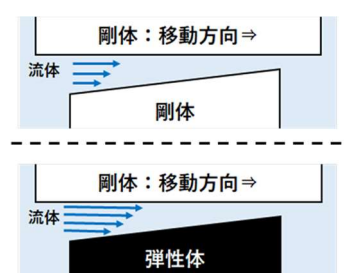


Fig.4 Wedge-film effect

#### 4. 導入溝の位置評価

導入溝の位置を変化させて促進試験機にて周速毎の摩擦係数を測定した。開放溝は導入溝に対抗する位置とした (Fig.5)。推進軸の回転方向は時計回りで、0 時の方向を  $0^\circ$  として試験サンプルの名称は「RB-」導入溝角度」とした。「RB-全周溝」とは Fig.1 に示す標準的なゴム軸受であり、水冷溝が全周に均等配置されている。試験条件は船舶の推進装置での使用を想定し、軸受荷重は  $0.25\text{MPa}$ 、周速は 0 から  $4.0\text{m/s}$  とした。試験結果を Fig.6 に示す。

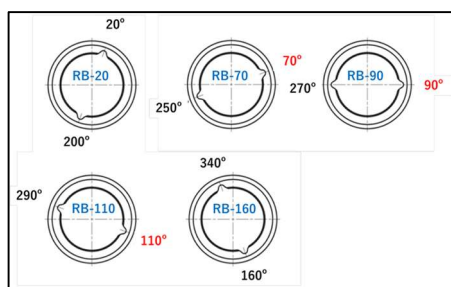


Fig.5 Position of Intake-groove and discharge-groove

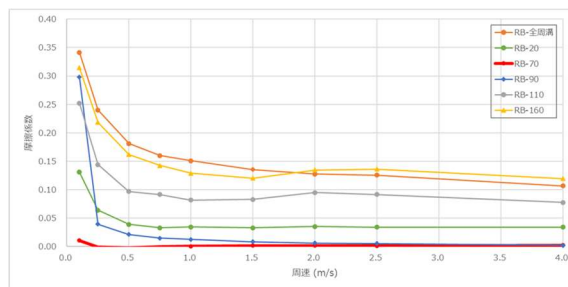


Fig.6 Test result, Peripheral speed / Friction coefficient / Groove position

全周に水冷溝を配置した標準的なゴム軸受に対して負荷支持エリアの水冷溝を排除した軸受は何れも摩擦係数が低い。RB-70, RB-90, RB-110 に注目すると 導入溝の位置の違いは僅かであるにも関わらず摩擦係数で大きな差が表れている。導入溝を 3 時方向に設置した RB-90 は RB-全周溝 に対して摩擦係数が 10 分の 1 以下となっているが、導入溝位置をわずかに下げた RB-110 の摩擦係数は RB-全周溝の 60% 程度であった。逆に導入溝位置をわずかに上げた RB-70 の摩擦係数は限りなくゼロに近いレベルで安定している。特筆すべきは RB-70 の低速域での摩擦係数である。水潤滑システムでは停止時には潤滑膜を形成できないので回転軸が軸受と接触している。停止状態から低速域の潤滑膜が形成されていない範囲が水潤滑システムの弱点であるが、RB-70 は始動直後の極低速域で良好な潤滑状態を構築できている。RB-160 は本研究の主旨に対する逆の構造となっており、摩擦係数は RB-全周溝と大差なく、周速が  $2.0\text{m/s}$  を超えると逆転している。この試験の結果、高分子弾性体による水潤滑システムにおいては弾性体の物理的特性と導入溝の位置で潤滑状態を大きく変化させることが可能であることが分かる。

#### 5. 導入溝付近の弾性調整

導入溝付近でのポンプ効果を増大させるには局所的にゴム弾性を大きくすることが有効であると考えた。一般的にゴム製品は一体成型にて製造される、これはゴムが変形を繰り返すので成形後に接着を行うと長期的に見れば接着力が低下して剥離のリスクが高まるからである。一体成型で製造されるゴム軸受ではエリア毎に異なる組成のゴムの配置することが非常に難しい。そこで本研究の第二段階として、導入溝付近の弾性を増大させるために外筒内面に裏溝 (Back-groove) を彫り (Fig.7)、部分的にゴム厚を大きくして摩擦係数の測定を行った。試験結果を Fig.8 に示す。

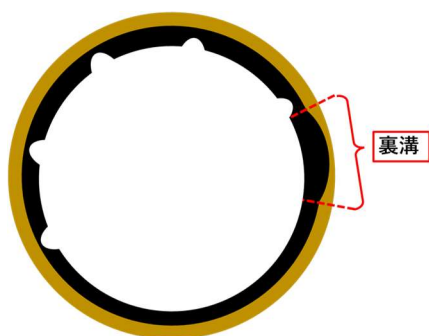


Fig.7 Back-groove

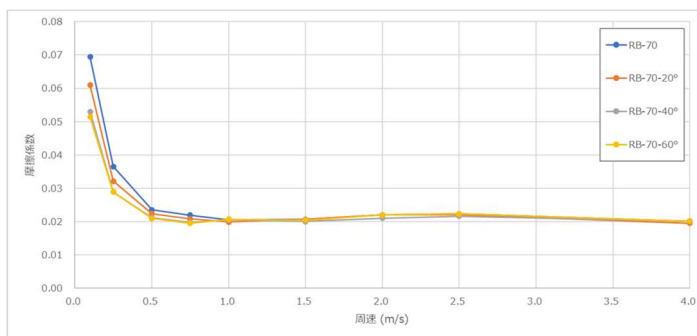


Fig.8 Test result, Peripheral speed / Friction coefficient / Back-groove

導入溝の配置評価試験で最高の性能を発揮した RB-70 の導入溝中心線から下方向に軸受中心角  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  の範囲で裏溝を彫りゴム厚を大きくした。裏溝の深さはゴム厚の 20% とした。  $0.25\text{MPa}$  の軸受荷重では摩擦係数が限りなくゼロに近く、差を測定することが難しいので裏溝の効果を測定する試験は  $0.60\text{MPa}$  で行った。結果としては水潤滑軸受の弱点である低速域で摩擦係数に差が表れた。裏溝無しの RB-70 と比較すると RB-70- $20^\circ$  は若干下がり、RB-70- $40^\circ$  は更に下がったが RB-70- $60^\circ$  との差はみられなかった。この試験結果から裏溝がゴム厚の 20% の場合には導入溝から中心角  $40$  度の範囲で裏溝を配置することで低速域での潤滑状態を向上させる効果があることが分かる。

#### 6. 結言

水潤滑システムの用途拡大と大型化を目指すのであれば水で形成される潤滑膜の内部圧力を高めて回転軸と軸受の固体接触を極限まで減らすことに挑まなければならない。その為には高分子弾性体の特性を生かして弾性流体潤滑の効果を引き出すというアプローチが有効である。