立軸ポンプ用セラミックス軸受に関する研究*
(第2報, 空気中および水中での摩擦係数について)相吉澤 俊 一*², 湧 川 朝 宏*¹
紺 野 大 介*¹, 高 木 清 和*²A Study of Ceramic Bearings for Vertical Pumps
(2nd Report, Friction Coefficients of Submersible Bearings in Air and Water)Shunichi AIYOSIZAWA, Asahiro WAKIGAWA,
Daisuke KONNO, and Kiyokazu TAKAGI

Friction coefficients of various sleeve-type submersible bearings for vertical pumps in air and water were investigated. The tested materials were SiC-sintered ceramics, WC-cemented carbides, self-fluxing alloys, and conventional bearing materials such as rubber, resin, PTFE # and soft sintered alloy. Test equipment simulated the frictional condition of the actual vertical pump shaft, that is, the shaft of the test equipment precessed to the bearing. It was clear that, in water, when silicon carbide was used as a stationary bearing, lower friction coefficients than conventional bearings could be obtained, regardless of rotating sleeve materials. In slurry, the abrasive grains had a bad influence on the friction coefficient of the conventional bearings. But, bearings of ceramics could keep low friction coefficients owing to their hardness. In air, a combination of silicon carbide and tungsten carbide showed low friction coefficient. And it is confirmed that dry start of vertical pumps can be attained with this material combination.

Key Words: Hydraulic Machine, Friction Coefficients, Submersible Bearings, Ceramics, Vertical Pump, Diffuser Pump, Hardness, Slurry

1. 緒 言

ディフューザ形立軸ポンプの中間軸受には、一般にゴム軸受や樹脂、銅系焼結合金、あるいは、カーボン製のスリーブ軸受が使用されている。これらの軸受をポンプ揚液自身で潤滑した場合、揚液中に含まれる固体粒子による摩耗のため、短時間で使用不能になった事例が多く経験されている。また、ポンプ起動前は吸込水位がディフューザケーシングの上部程度であるため、水位より上側に位置する中間軸受は空気中、すなわち、ドライの状態にある。このため、ポンプ起動直後から揚液が到達するまでの数秒から数十秒間はドライ運転となり、軸受材によっては焼付きの可能性がある。これらの対策として、通常は、保護管で軸および軸受をおおい、この内部に清浄な潤滑水を供給する方法が採用されている。しかし、この場合にも潤滑水ユニットの設置が必要になること、また運転操作やメンテナンスが煩雑になるなどの問題がある。このため保護管や潤滑水ユニットを廃止しても無給水起動が可能で

長寿命が得られる軸受の出現が切望されており、このような無給水軸受を実現するため、近年しゅう動材にセラミックスを適用する試みが盛んに行われている。

保護管および潤滑水ユニットを廃止した場合、水中軸受は前報⁽¹⁾で述べたように優れた耐摩耗性を有するものであるとともに、ポンプ起動直後のドライ運転時とその後の揚液潤滑時に焼付きを起こさず、低い摩擦係数を有する材料組合せであることが必要である。

従来、セラミックスの摩擦係数に関する研究は盛んに行われているが、岩佐⁽²⁾や石垣⁽³⁾のようにピンオンディスク方式で回転体にピンを一定方向から押しつけて測定したものが多く、セラミックスの摩擦係数は摩擦面形状に大きく依存することが考えられるが、立軸ポンプのように回転軸が歳差運動するような軸受の摩擦係数を空気中および水中環境下で測定した例は少ない。

本報では、セラミックスを中心とした種々の軸受材料について、実機ポンプと同様に回転軸が歳差運動する実験装置にて、空気中および水中での摩擦係数を測定し、無給水軸受の実現可能性を検討した。

2. 記 号

F: 軸受荷重 N

* 昭和63年10月19日 第66期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和63年3月9日。

*¹ 正員、(株)荏原製作所羽田工場 (〒144 東京都大田区羽田旭町11-1)。

*² ㈱荏原製作所羽田工場。

m : 不釣り合いおもり質量 kg

N : 軸回転数 min^{-1}

r_1 : 軸受半径 mm

r_2 : 実験装置軸心から不釣り合いおもり重心までの距離 mm

l_1 : 実験装置ボールベアリング中心より供試軸受中心までの距離 mm

l_2 : 実験装置ボールベアリング中心より不釣り合いおもり重心までの距離 mm

T : トルクメータの測定値 $\text{N}\cdot\text{m}$

v : 軸受しゅう動速度 $=10^{-3}r_1\omega$ m/s

ω : 軸回転角速度 $=2\pi N/60$ rad/s

μ : 軸受動摩擦係数

Al_2O_3 : アルミナセラミックス

Cr_2O_3 : 酸化クロムセラミックス

PTFE: ポリ四フッ化エチレン

SFCA: コバルト系自溶合金

SiC: 炭化けい素セラミックス

SUS 316: オーステナイト系ステンレスの一種

WC: タングステンカーバイド

ZrO_2 : ジルコニアセラミックス

3. 実験装置および実験方法

図1に摩擦係数測定装置を示す。回転軸は上部の転がり軸受とタンク内の供試軸受で支持されており、トルクメータを介して可変速モータで駆動される。供試軸受は静止側の円筒形すべり軸受と回転側のスリーブよりなり、実験条件に応じて空気、清水あるいはスラリー環境下に置かれる。また、回転軸には不釣り合いおもりが取り付けられており、回転中はこの遠心力により供試軸受に対して歳差運動を行うと同時に式(1)に示すような軸受荷重 F が発生する。すなわち、供試軸受

$$F = mr_2\omega^2 l_2 / l_1 \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (1)$$

のしゅう動状態は実機ポンプの軸受とほとんど同一である。なお摩擦係数 μ はトルクメータによる測定値 T を次式のように換算して求めた。

$$\mu = \frac{T}{10^{-3}Fr_1} \quad \dots\dots\dots (2)$$

供試軸受の仕様を表1に示す。供試材料としてはファインセラミックスを中心とした硬質材料に加えて、無給水軸受として可能性のある軟質軸受についても調査した。軟質軸受材料用のスリーブ材にはオーステナイト系ステンレス SUS 316 を使用した。

使用した硬質材料の機械的性質を表2に示す。また、スラリー中のアブレイブ粒子の組成は前報⁽¹⁾と同一である。

4. 実験結果と考察

4.1 清水中での摩擦係数 立軸ポンプ用軸受は軸の歳差運動のため軸受端部に局所的な強い当たりを生じる。すなわち、液膜による支持は困難となり、固体接触した状態で運転される。このため、通常のゾンマーフェルド数による流体摩擦、境界摩擦などの分類により摩擦係数を推定することはできず、材料自身のしゅう動特性に大きく依存する。

図2～5に軸受荷重を変化させた場合、各軸受しゅう動速度における清水中の摩擦係数測定結果を示す。なお、軸受荷重およびしゅう動速度は実機立軸ポンプで起こり得る条件の範囲で決定したものである。静止軸受側に SiC を使用した組合せはスリーブ材のいかににかかわらず常に低い摩擦係数を示し、軸受荷重が 100 N 以上ではしゅう動速度にかかわらずほぼ一定の値を示すことが判明した。これに対し、静止軸受側に WC を使用した場合はスリーブ材によっては荷重依存性が高いことがわかる。すなわち、スリーブ材が ZrO_2 や SFCA の場合、摩擦係数は荷重の増加とともに急

表1 供試軸受の仕様

Item	Specification
Bearing Diameter	60 mm
Radial Load	20 ~ 1300 N
Speed	500 ~ 1300 min^{-1}
Peripheral Velocity	1.6 ~ 4.1 m/s
Diametral Clearance	0.134 ~ 0.196 mm
Max. Surface Roughness Height	3.2 μm
Slurry Temperature	20 ~ 40 $^{\circ}\text{C}$

図1 実験装置

表 2 供試軸受材料の機械的性質(参考)

	SiC	WC	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	SFCA
Vickers Hardness	2500~3000	1470	1400	1600	1200	600
Density g/cm ³	3.1	14.7	6.1	3.9	4.7	9.0
Bending Strength MPa	867	2000	1100	390	-	-
Young's Modulus MPa	4.04×10^5	6×10^5	1.96×10^5	3.43×10^5	-	2.4×10^5
Thermal Expansion 1/K	3.9×10^{-6}	3.3×10^{-6}	8.3×10^{-6}	$7 \sim 8 \times 10^{-6}$	6.8×10^{-6}	12.6×10^{-6}
Thermal conductivity KW/mK	0.08	0.08	0.003	0.029	-	0.015
K ₁ C MPa ^{1/2}	5.6	12	8~10	5	-	-

図 2 清水中の摩擦係数 ($v=1.6$ m/s) 図 4 清水中の摩擦係数 ($v=2.8$ m/s) 図 3 清水中の摩擦係数 ($v=2.2$ m/s)) 図 5 清水中の摩擦係数 ($v=4.1$ m/s)

上昇している。また、スリーブ材が Cr₂O₃ の場合でもしゅう動速度および荷重条件が厳しくなると摩擦係数は急激に上昇する。

種々のしゅう動速度における摩擦係数を軸受荷重に対しまとめて図 6 に示す。また図 7 は軸受荷重が一定の場合の摩擦係数のしゅう動速度に対する変化を示す。摩擦係数は多少のばらつきはあるものの、しゅう動速度にほとんど依存しないことがわかる。金ら⁽⁴⁾は四球式摩擦試験機にてタービン油中における Al₂O₃ 同士の摩擦係数を測定し、摩擦係数はすべり速度の影響をほとんど受けないことを示したが、本実験でも同様の結果を得た。

図 8 に SiC と WC の組合せと従来から使用されている軟質軸受材の摩擦係数の測定結果を示す。SiC と

WC の組合せは清水中において従来の中軸受材よりも低い摩擦係数を示しており、ポンプ用水中軸受として十分使用可能であることが判明した。

4.2 スラリー中での摩擦係数 前報⁽¹⁾で述べたようにポンプ揚液自身で軸受を潤滑する場合にはポンプ揚液に含まれる砂やシルトなどのアブレイブ粒子が軸受の摩擦係数に大きく影響すること考えられるため、ここでは、スラリー環境下での軸受の摩擦係数について調査した。

図 9 に 3000 ppm 濃度のスラリー中と清水中における各種軸受材の摩擦係数測定結果を示す。3000 ppm という濃度レベルは洪水時の河川で予想される

懸濁度である。テフロンやゴムの場合だけでなく、WCとSFCAの組合せでもスラリー中での摩擦係数が清水中に比べ著しく増大し絶対値も高い。この理由としては次のことが考えられる。すなわち、テフロンやゴムの場合、硬い SiO_2 が軸受内に埋め込まれ、これによりステンレス製スリーブが切削摩耗したため摩擦係数が大きくなったものと考えられる。また、WCとSFCAの組合せの場合でも同様にSFCAが SiO_2 よりも低硬度であるため、SFCAが切削摩耗し摩擦係数が増大したのであろう。

これに対し、SiCとWCの組合せでは、双方とも SiO_2 より硬いため SiO_2 がむしろ潤滑剤として作用し摩擦係数が増大しなかったものと考えられる。このようにSiCとWCの組合せはスラリー中においても低い摩擦係数が維持できるため良好なしゅう動状態が得

られることが明らかとなった。

4.3 空気中での摩擦係数 図10および図11にしゅう動速度を一定とし、軸受荷重を変化させてドライ環境下にて測定した硬質材料の摩擦係数測定結果を示す。ドライ雰囲気、すなわち、空気中でのこれらの摩擦係数は清水中に比べ10倍以上大きくなっている。

石垣ら⁽³⁾はピンオンディスク法により相対湿度がセラミックスの摩擦係数に与える影響について調査した。これによると水中での摩擦係数は空気中に比べ同等かむしろ高い結果が得られている。すなわちピンオンディスク法では吸着水分による機械的強度の変化のため摩擦係数が増加することもあり得る。しかし本実験のような水中における二重円筒のしゅう動では、局所的な強い当たりのため固体接触はしているものの、水膜のくさび作用による潤滑効果も存在するため、水中摩擦係数が大きく低下したのと考えられる。

静止軸受側にSiCを使用した場合は、相手材の種類にかかわらず低い摩擦係数を示しており、ばらつきも

図6 軸受荷重に対する摩擦係数の変化

図7 しゅう動速度に対する摩擦係数の変化

図8 軟質軸受との比較

図9 スラリー環境下での摩擦係数

比較的小さい。また、静止軸受側に WC を用いた場合は、軸受荷重が大きくなると摩擦係数が上昇する傾向が見られるものがあり、全体的に摩擦係数の絶対値も大きい。しかしゴム軸受で起こるような焼付き現象はいずれの組合せでも発生しておらず、これらの材料を使用すれば立軸ポンプのドライ起動が可能であることが明らかになった。

図 12 にはしゅう動速度を 2.8 m/s 一定として軸受荷重を変化させた増の摩擦係数の経時変化を示す。なお軸受荷重は立軸ポンプのドライ運転時に予想される範囲内の値である。また運転時間は最大 5 min 間で

ありこれは 840 m のしゅう動距離に相当する。図 12(a) は軸受荷重が 90 N の場合で、軸受材が WC の場合は運転開始直後から 0.5 程度の高い摩擦係数を示しているが、軸受材が SiC の場合は、0.3 と比較的低い値で安定している。しかし、図 12(b) に示すように軸受荷重が 120 N の場合では、SiC と ZrO₂ の組合せでも 3.5 min 後に 0.55 程度まで上昇している。さらに、図 12(c) に示すように軸受荷重を 180 N まで増加させると、SiC と WC の組合せ以外は運転開始直後から 0.5 程度の高い値を示している。ところが SiC と WC の組合せはこのような大きな軸受荷重でも 3.5 min までは、0.3~0.4 と低い摩擦係数を維持しており、本実験の範囲内では、ドライしゅう動に対し最も優れた組合せであることが判明した。

津谷⁽⁵⁾はセラミックスの摩擦係数を低く抑えることが損傷や摩耗の抑制に効果があることを示している。立軸ポンプ用軸受のドライ運転時間は 1 回あたり数秒という短い時間であるが、摩耗および損傷の蓄積を考慮すると摩擦係数のより低い材料組合せを選定すべきであろう。とくに、SiC と WC の組合せは低い摩擦係数を広範囲のしゅう動条件にわたって維持できるため供試しゅう動部材の中ではポンプのドライ起動に対し良好な組合せであることが判明した。

5. 結 言

歳差運動をする回転軸を有する実験装置を使用し、水中、スラリー中、空気中にて種々のすべり軸受材料の摩擦係数を測定した結果、以下の成果を得た。

(1) 硬質材料の組合せの場合、軸受材に SiC を使用すれば、清水中の摩擦係数は相手材の種類によらずほぼ一定の値を示す。

(2) WC をしゅう動材に使用した場合、清水中の

図 10 空気中の摩擦係数 ($v=3.5$ m/s)

図 11 空気中の摩擦係数 ($v=4.1$ m/s)

図 12 空気中の摩擦係数の経時変化

摩擦係数は相手材の種類および軸受荷重に大きく依存する。とくに、 ZrO_2 や SFCA との組合せでは摩擦係数が比較的高く、荷重依存性も強い。

(3) 従来から使用されているゴムやテフロンのような軟質軸受は清水中とスラリー中で摩擦係数が大きく異なる。すなわち、これら軸受はスラリーに含まれるアブレシブ粒子の影響を大きく受けることが明らかになった。これに対し、SiC と WC の組合せは高濃度のスラリー中でも清水中と同様に低い摩擦係数を有しており、アブレシブ粒子の影響をほとんど受けずに良好な運転が可能である。

(4) 空気中における硬質材料同士の摩擦係数は清水中に比べ1けた以上大きな値を示すが、ゴム軸受に

見られるような焼付き現象はなく、立軸ポンプ用軸受としてドライ起動が可能であることが判明した。

(5) SiC と WC との組合せではドライしゅう動条件の広い範囲にわたって低い摩擦係数を維持でき、本実験の範囲ではポンプのドライ起動に対し、最適な組合せである。

文 献

- (1) 湧川・ほか3名, 機論, 53-491, B(昭62), 2094.
- (2) 岩佐, 潤滑, 31-7(昭61), 449.
- (3) 石垣, 潤滑, 30-9(昭60), 627.
- (4) 金・ほか2名, 潤滑, 31-5(昭61), 329.
- (5) 津谷, 潤滑, 28-11(昭58), 815.