小型流体軸受における軸受端テーパシールからの 油漏れに関する基礎研究*

(第3報, 界面形状および流体漏洩の基礎実験)

菱田 典明^{*1}, 橋本 賢樹^{*2}, 平山 朋子^{*1}
松岡 敬^{*1}, 矢部 寛^{*3}

Fundamental Study on Oil Leakage from Tapered Seal at the Ends of Fluid Film Bearing for Precision Equipments (3rd Report, Experimental Study on Meniscus Profile and Oil Leakage)

Noriaki HISHIDA^{*4}, Masaki HASHIMOTO, Tomoko HIRAYAMA,
Takashi MATSUOKA and Hiroshi YABE

^{*4} Department of Mechanical Engineering, Doshisha University,
1-3 Miyakodani, Tatara, Kyotanabe-shi, Kyoto, 610-0394 Japan

Fundamental experiments on fluid leakage from the tapered seal by sleeve rotation were performed. The apparatus was so designed that surface tension, which generates the sealing function, acts adequately in size and accuracy as similar as in an actual device. The shapes of the meniscus at several rotational speeds were measured by using ultra-focus laser microscope, and the features of fluid leakage were observed by using high-speed camera. The experimental results of the positions of the bottom portions of the meniscus coincide comparatively well with theoretical ones. It is also verified that the experimental threshold speeds of fluid leakage occurrence can broadly be estimated by the theoretical 'ultimate' and 'triggering' critical rotational speeds of the sleeve rotor.

Key Words: Tapered Seal, Fluid Seal, Oil Leakage, Surface Tension, Meniscus Profile, Experimental Research, Lubrication

1. 緒 言

小型流体軸受に使用されているテーパシールについて、第1報⁽¹⁾ではシールの作動原理を明らかにした上で、その性能を示す指標値を提案し、第2報⁽²⁾ではスリーブロータ回転による界面形状の変化および漏洩限界回転速度について理論解析を行った。本報では、第2報での理論結果を検証するための基礎実験について述べる。

テーパシールの作動特性の実験的検討に際して、対象とする実験項目としては、ロータが静止および任意の速度で回転している状態における界面形状、シールすきま内圧力、流体漏洩が生じる回転速度、その他の現象を挙げることができる。その際、表面張力を含む流体現象は単純な相似則を適用することができないので、実験部位の大きさや実験条件は、表面張力がシール作動原理に沿って機能することを保証したものでな

ければならない。

ところで、本研究で扱うテーパシールすきまにおける流体挙動の観察・測定に比較的類似した実験例としては、レーザ光線を用いた磁性流体シールのメニスカス形状の測定⁽³⁾、蛍光X線を用いたオイルシールのリップ部における油の流れの測定⁽⁴⁾、高速度カメラを用いた液滴の形状測定⁽⁵⁾、アルミニウム微粉末を用いた回転くさび形状すきま部での流体流動の可視化実験⁽⁶⁾などを挙げることができるが、テーパシールを対象にした報告例は見あたらない。

そこで、本報では、ロータの回転にともなうシールすきま内流体の界面形状の変化と、流体漏洩に到る過程について、基礎実験による観察および測定を行い、理論解析結果と比較することとする。

2. 実験装置と実験方法

2・1 実験装置 本研究で用いた実験装置の構造を図1に、主な仕様を表1に示す。軸固定、スリーブ回転の軸受構成としている。静圧気体軸受によってスリーブを軸方向および半径方向に支持し、スリーブ外周に設けたタービン翼に圧縮空気を噴射することによ

* 原稿受付 2009年4月13日。

^{*1} 正員, 同志社大学大学院工学研究科(〒610-0394 京田辺市多々羅都谷1-3)。

^{*2} 福井県工業技術センター(〒910-0102 福井市川合鷺塚町61字北稲田10)。

^{*3} 正員, 名誉員, 元: 京都大学大学院工学研究科。

E-mail: ANA31146@nifty.com

ってこれを回転駆動する。

スリーブ上端の内径はテーパ形状に加工しており、軸と組み合わせてテーパシールを構成する。このシールすきま部に注入された流体の状況について観察および測定を行う。実験内容としては、超深度レーザ顕微鏡を用いた界面底部の径方向および軸方向の位置情報の測定、および高速度カメラを用いた漏洩前後の流体挙動の観察の2項目とする。

本研究では、スリーブは壁面の傾斜角度が 10° および 15° の2種類を準備し、作動流体としては諸物理特性が明確な蒸留水を使用した。蒸留水の物性量は、 20°C で、密度 $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$ 、粘性係数 $\mu = 1.002 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、表面張力 $\sigma = 0.0728 \text{ N/m}$ であり、また、接触角は $\alpha_0 = 3.0^\circ$ 、最大接触角は $\alpha_{\max} = 100.0^\circ$ とした。

スリーブ壁面には流体の滲み出し防止のための撥油

剤被膜処理を施した。撥油剤としてはアモルファスフッ素樹脂〔旭硝子(株)製 CYTOP CTX-100〕を用いた。被膜は、回転治具を用いてスリーブを低速で回転し、極細ブラシを用いてテーパ壁面の所定の位置に撥油剤液を塗布し、加熱乾燥 (80°C , 3時間) して形成した。

表2に、設定した流体量に関する実験条件を示す。表中、液面高さとはシールすきま底部からのスリーブ壁面に接する液面高さ位置、すなわち撥油剤被膜の下端までの軸方向距離を示す。

なお、完成状態における諸精度は、ロータの回転精度および部品の真円度 (テーパ部近傍での全振れで表示) を含めて 0.001mm 以下であった。

2・2 実験準備 ①シリンジ〔注油器〕を用い、流体に気泡が混入しないように注意しながら、所定の体積分、すなわちスリーブ壁面における液面位置が撥油剤被膜の下端となるような体積の流体をシールすきまに注入する。②静圧軸受用の圧縮空気のパルプを調整して、スリーブが自在に回転できるようにする。③回転用の圧縮空気のパルプを調整して、スリーブ回転速度が所定の値になるように設定する。④所定の測定を行う。⑤一回の測定が終了すると、スリーブを取り外して残存した流体を圧縮空気除去し、再度①～④を繰り返して実験を行う。

2・3 界面形状の測定 超深度レーザ顕微鏡〔(株)キーエンス製 VK8510〕は波長 685nm の赤色レーザ光を直径約 $1\mu\text{m}$ の光束にして測定面に投射し、反射光を検出して測定部位の基準位置からの距離を計測するものであり、検出されたデータを処理することによって種々の画像が得られる。

この超深度レーザ顕微鏡による測定では、測定面が液体や鏡面仕上げ壁面などの場合は乱反射が少ないので正しい測定ができるが、測定面が傾斜している場合は検出経路に進入してくる反射光が少なく、測定が困難となる。そこで、予備実験として、レーザ光線の入射軸を傾斜させて測定を行い、検出可能な流体面傾斜角度の確認を行った結果、 11° を得た。これは、界面が傾斜したり、曲面をなしている場合、水平に対して $\pm 11^\circ$ の範囲の液面のみが検出され、その他はノイズであることを意味する。

超深度レーザ顕微鏡による測定状況の説明を図2に示す。図2(a)は超深度レーザ顕微鏡の走査範囲 (約 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$) を、(b)は界面の検出部 (水平 $\pm 11^\circ$ の領域) を説明した模式図である。図(b)では、スリーブ回転によって形成された凹形状の底面と、外周近傍で隆起した凸形状の上面の2箇所を検出している状態を示している。

Fig. 1 Cross-sectional view of apparatus

Table 1 Main specifications of apparatus

Item	Specification
Shaft material	SUS420
Shaft diameter $2r_0$ [mm]	12.0
Radial clearance at bearing portion c_r [μm]	10.0
Sleeve material	Aluminum alloy
Sleeve surface angle δ [deg]	10.0, 15.0
Axial length of tapered portion [mm]	3.5
Max. rotational speed [min^{-1}]	20000

Table 2 Experimental condition

No.	Sleeve angle δ [deg]	Fluid level	
		z_1 [mm]	$Z_1 (= z_1 / r_0)$
1	10.0	1.2	0.2
2		2.4	0.4
3	15.0	1.2	0.2
4		2.4	0.4

Fig. 2 Schematic diagram of scanned area and imaged sectional view of meniscus

以上を前提として、超深度レーザ顕微鏡による界面形状測定をつぎの手順で行う。スリーブ回転速度を所定の値に設定し、超深度レーザ顕微鏡を作動させて測定範囲を走査し、得られた界面各部の半径方向、周方向および軸方向の位置情報をパソコンに保存する。データを処理することによって界面の3D画像や、任意の位置の断面形状を得る。検出された界面の、基準位置からの距離を、デジタルマイクロメータを用いて、装置固定台の移動距離によって測定する。回転速度は非接触式回転計を用いて測定する。

2・4 漏洩前後の流体挙動の観察 スリーブを徐々に加速しながら回転させた場合の界面の状況を高速度カメラ〔加藤光学工業(株)製 K-2〕で近接撮影する。実験装置に対して傾斜方向から撮影すれば界面の変化を立体的に観察できる。真上から撮影すれば流体漏洩の流跡を観察できる。設定した撮影速度 (frames/sec) とマーキングの回転角度からスリーブ回転速度を算出する。

3. 結果と考察

以下では実験結果の表示に際し、半径方向距離 r および軸方向距離 z に関しては軸半径 r_0 で除して無次元して表示 [$R=r/r_0$, $Z=z/r_0$] し、スリーブ回転速度に関しては回転速度パラメータ $A (= \mu\omega/p_a)$ を用いる。ただし、 μ : 流体の粘度, ω : 回転角速度, p_a : 周囲圧力, である。ちなみに、本実験での設定の場合、スリーブ回転速度 1000 min^{-1} が $A=0.1036 \times 10^{-5}$ に相当する。

3・1 界面形状の計測

3・1・1 界面形状測定結果 表2の条件No.4の場合の界面形状測定結果を図3に例示する。図では、左列に超深度レーザ顕微鏡を用いて計測した界面形状の3D表示画像を、右列に界面の断面形状〔実線は理論結果、丸印は実験結果〕を示す。理論値については、参

Fig. 3 3D data by laser microscope and meniscus profile

考として、界面傾斜角度が水平に対して $\pm 11^\circ$ になる箇所を Δ 印で、最低位置を $\blacktriangle$ 印で示している。また、実験値については、検出された光帯〔3D表示画像中に下向き矢印で示す〕の内側と外側の位置〔 $\circ$ 印〕、および、これらの測定値をもとに計算によって推定した最低部の位置〔 $\bullet$ 印〕を示している。

右列図において、理論解析結果から、低速域では界面は半円に近い形状を成しており、実験によってそのときの底面近傍が検出されていることが分かる。(a)→(b)→(c)→(d)と、スリーブ回転速度が上昇するに伴い底面が軸側下方に移動している。(d)の速度では、理論解析では、スリーブ面上での接触角は 68.6° であり、外周付近での流体の隆起は生じていないが、界面の水平面に対する傾きは 6.4° となり、超深度レーザ顕微鏡による測定可能範囲に入る。これに対応して、実験ではスリーブ壁面近傍で、水平面と認識された領域が検出さ

れている。

3・1・2 理論解析と実験結果の比較 回転速度を変化させた場合の界面の最低位置について、理論解析結果〔図3、▲印に相当〕と実験値〔図3、●印に相当〕の比較を図4に示す。図中の各マークに添えた数値はスリーブ回転速度 $[\text{min}^{-1}]$ である。No.3およびNo.4については2回実験を行った〔図中の“Experimental (1)”

Fig. 4 Theoretical and experimental results of the bottom position of meniscus

および“Experimental (2)”〕。静止状態では、最低点は、径方向についてはすきまの中央付近にあり、回転速度が大きくなると軸側下方に移動する。いずれの実験条件の場合も、理論解析と実験結果はよく似た傾向を示しており、定量的にもかなりよい一致がみられる。ただし、図3(d)の場合のように、スリーブ回転速度が大きくなると、界面形状は、理論解析結果では全域で凹形状であるのに対し、実験ではスリーブ壁面近傍が隆起して凸形状部が生じるなどの差が見られ、漏洩限界速度についても理論値と実験値の差が大きくなる傾向がある。

Fig. 5 Changes of meniscus profile as increases of the rotational speed

Fig. 6 Photograph of leaking (top view)

3・2 流体漏洩状況の観察

3・2・1 高速度カメラによる観察の結果 実験条件 No. 4 について

図5に、スリーブ回転速度を徐々に大きくした場合の界面形状の変化を高速度カメラによって観測した結果を例示する。低速時には流体界面は凹形状を成し、速度を大きくすると界面外径側が隆起し、凸形状となる。さらに速度を大きくすると、 6110min^{-1} の場合の写真の界面左方に見られるように、周方向の一部の流体が突起状となる。本論文では、これを「流塊」と呼ぶこととする。一旦このような流塊が生じると、それと同時に、流塊部以外の界面は低下する。そして流塊が成長して漏洩に至る。

図6に、流塊がスリーブ上面に沿って外縁から漏洩している状況を示す。空中に飛散した流体はスパイラル状流跡を描く。漏洩は周上1箇所で行われる場合と、図のように、2箇所で行われる場合がある。

図7に、成長した流塊がスリーブ壁面を這うように上昇し、スリーブ上面で外縁に向かって流動していく状況を示す。図では最初1箇所から漏洩が生じ、その後、2番目の漏洩が生じている。

以上の他に、実験による観察の結果として次のような現象が確認された。

- (i) 一旦流塊が生じた後に、スリーブ回転速度を下げても、流塊は成長する。
- (ii) 流塊が生じる周方向位置は一定ではない。
- (iii) 流塊はスリーブの回転方向に移動するが、移動速度はスリーブ回転速度よりも遅い。
- (iv) 流塊が2箇所から生じる場合は、両流塊の位置はほぼ180度の位相関係にある。また、2つの流塊は、この位相関係を保って、スリーブ回転速度の93~97%の速度で回転する。

Fig. 7 Photographs of leaking (side view)

(v) 一旦流体の漏洩が生じると、シールすきまには流体はほとんど残存しない。

(vi) 流体表面の観察では気泡はみられなかった。

3・2・2 理論解析と実験結果の比較 漏洩を生じるスリーブ回転速度について、理論値〔△印〕と実験値〔○印〕(各6回の実験を行った)の比較を図8に示す。理論値として示した A_{cr} は、第2報で述べた「漏洩要因(A)」による限界回転速度の無次元化量である。

実験値については、流塊の発生をもって漏洩と判断すべきであるが、本研究では、高速度カメラによる真上からの撮影画像において、1番目の流塊がスリーブ壁面の上端まで成長したことが画像上で確認できた時点をもって漏洩の発生とみなした。これはスリーブ上面に印したマーキングをもとに回転速度を算出するには真上からシール全体を撮影する必要があるが、そのような撮影条件では流塊の発生初期の詳細状況を確認できなかったからである。

図8において、No.1の条件では、実験装置の最大回転速度 $A=2.37 \times 10^{-5}$ ではまだ漏洩が生じなかったことを示す。他の3条件の実験では漏洩が生じた。各6回の実験による限界回転速度の平均値を $\bar{A}_{cr,ex}$ で示す。 A_{cr} に対する $\bar{A}_{cr,ex}$ の比 $\bar{A}_{cr,ex}/A_{cr}$ の値は、No.2の実験では約78%、No.3では100%、No.4では約85%となった。

なお、No.3の実験では漏洩発生回転速度が理論限界速度を超えた場合があった。これについては、①実験作業において、撥油剤被膜位置や流体注入量が設定値より漏洩しにくい方向にずれていた可能性があること、②シールすきま内の流体がすべて流塊となり、流体圧力による押し上げ作用が理論解析での値を下回っていた可能性があること、③解析で適用した静的条件下での接触角の値と、実験での動的条件下での接触角との

Fig. 8 Critical speeds for fluid leakage

間に差が含まれ得ること⁽⁷⁾, などが考えられる. ただし, ②, ③は他の実験条件でも共通であるので, ①の要因が主になってこのような結果となったものと推測している.

3・3 漏洩状況の観察結果についての考察 3・2

に示した実験結果において, 漏洩状況に関していくつかの特徴的な現象がみられる. すなわち, 漏洩は周方向全域から放射状に生じるのではなく, 周方向 1~2 箇所から生じること, 漏洩流体は回転するスリーブ壁面に, 遠心力によって押し付けられて扁平形状になるのではなく, 円に近い断面の柱形状を保ちながら壁面に沿って上昇すること, 一度どこかで漏洩が生じるとシールすきま内の流体が全部漏洩すること, などである. このような現象については, つぎのようなメカニズムを想定することができる.

(i) 流体に作用する遠心力は, 界面が凹形状の場合はスリーブ壁面で支持されているため, 流体の流動は比較的安定である. 回転速度の上昇に伴って界面形状が変化し, 凸形状部が生じると, 凸形状部の界面の圧力差による押上力は表面張力によって支持される. このような状態では, 理論解析に適用した条件以外の要因, 例えば微小な偏心回転による凸形状部に揺らぎの発生などが影響して界面は不安定になりやすく, 一部の流体が撥油剤被膜の下端位置よりも隆起する.

(ii) 「隆起」を拘束する力は「隆起」周囲の表面張力のみであり, 固体壁面で拘束されるより, 拘束力が弱い. その結果, 「隆起」は成長し易くなり, 「隆起」は「流塊」に成長する.

(iii) 流体界面より上部のスリーブ壁面近傍では, 壁面に付着した周方向空気流がある⁽⁸⁾. この空気流は遠心力によってスリーブ壁面に押し付けられようとする流塊を浮上させる力として作用し, その結果, 「流塊」の断面形状は扁平にならず, 円形に近くなる. なお, 「流塊」の移動速度が, 比較的僅かではあるが, スリーブ回転速度より遅いことも, 「流塊」がスリーブ壁面には付着していないことを示唆している.

(iv) 「流塊」が伸長して空中に漏洩し始めると, 漏洩流塊に作用する遠心力は残りの流体を吸引する力として作用し, 後続の流体は, 表面張力の皮膜により形成された流塊の管の中を移動して上昇する. このようにして, シールすきま内の流体はすべて漏洩する.

以上の考察を適用すれば, 流体漏洩の最初の引き金は流体の「隆起」の発生であると言える. 「隆起」は界面の周方向不安定性によるものであり, それは界面が半径方向に凸形状になったとき助長され易いと考えられる. そこで, 非常に単純に考えて, 流体漏洩の引

Fig. 9 Schematic diagrams of the contact angle at the critical rotational speeds

き金が生じる可能性がある, 言わば「下の漏洩限界速度」を, 「スリーブ壁面における界面の形状が水平になるような回転速度」によって定義することとする. 図 9(b) はこのときの界面形状の模式図である. この限界速度の無次元化量を Λ'_{cr} とする.

限界速度 Λ'_{cr} は, 第 2 報で述べた界面形状解析における境界条件として, スリーブ壁面上での接触角 α_s を

$$\alpha_s = \frac{\pi}{2} - \delta \quad (1)$$

とすることによって求めることができる.

これに対して, 第 2 報で提示した限界回転速度 Λ_{cr} は, 全円周で一様に界面が漏洩限界状態になるとしたときの速度であり [このときの界面形状を模式的に図 9(a) に示す], それ以上の回転速度では, 理論上は, 必ず流体漏洩が生じることになる. その意味で, 前報での限界速度 Λ_{cr} は, 「上の漏洩限界速度」と言える.

そこで, 各実験条件に対して「下の漏洩限界速度」を求め, 図 8 中に×印で示す. 図 8 の結果から, 実験での漏洩発生回転速度にはある程度のばらつきは見られるが, ごく概略的には, 理論解析による「上の漏洩限界速度 Λ_{cr} 」と「下の漏洩限界速度 Λ'_{cr} 」によって流体漏洩発生速度を推定できるようであり, 上述の考察がほぼ妥当であったと考えられる.

4. 結 言

本報告では, 精密小型流体軸受に用いられているテーパシールを取り上げ, 基礎実験装置を用いて, スリーブ回転による界面形状の変化および漏洩を生じる限界回転速度を測定した. 本研究で得られた主な成果はつぎのようにまとめることができる.

- (i) スリーブ回転時の界面の形状 [水平部] を測定した. 実験結果を理論解析値と比較し, 比較的良好な一致を見た.
- (ii) テーパシールからの流体漏洩現象を実験的に観察した. そして, 漏洩の瞬間の流体挙動の分析が

ら、漏洩を引き起こす可能性が生じる「下の漏洩限界速度」の概念を提示した。

- (iii) テーパシールからの流体漏洩発生回転速度は、概略的には、理論解析による「上の漏洩限界速度」と「下の漏洩限界速度」によって予測できることを確認した。

文 献

- (1) Hishida, N., Hashimoto, M., Hirayama, T., Matsuoka, T., & Yabe, H., Fundamental Study on Oil Leakage from Tapered Seal at the Ends of Fluid Film Bearing for Precision Equipments - 1st Report: Proposal of Sealing Capacity Index, *Trans. of JSME, Ser. C*, Vol. 75, No. 751, (2009), pp. 727-734.
- (2) Hishida, N., Hashimoto, M., Hirayama, T., Matsuoka, T., & Yabe, H., Fundamental Study on Oil Leakage from Tapered Seal at the Ends of Fluid Film Bearing for Precision Equipments - 2nd Report: Theoretical Study on Critical Speed for Oil Leakage, *Trans. of JSME, Ser. C*, (Under submission).
- (3) Mitsuya, Y., Tomita, K., Takeuchi, K., & Matsunaga, S., Meniscus Shape and Splashing of Magnetic Fluid in Magnetic Fluid Seal, *Trans. of ASME, Journal of Tribology*, Vol. 121, No. 2, (1999), pp. 377-383.
- (4) Nakamura, K. & Kawahara, Y., An Investigation of Sealing Properties of Lip Seals through Observation of Sealing Surface under Dynamic Condition, *Proc. 10th ICFS*, BHRA, Innsbruck, (1984).
- (5) Moradian, A. & Mostaghimi, J., Surface Tension Measurement at High Temperatures by Using Dynamic of Melt Flow, *Trans. of ASME, Journal of Fluid Engineering*, Vol. 129, No. 8, (2007), pp. 991-1001.
- (6) Van Dyke M., An Album of Fluid Motion, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford, CA., USA, (1988), p. 13.
- (7) Hasegawa, T., Karasawa, M., & Narumi, T., Modeling and Measuring of the Dynamic Surface Tension of Surfactant Solutions, *Trans. of ASME, Journal of Fluid Engineering*, Vol. 130, No. 8, (2008), pp. 081505-1~8.
- (8) Matsumura, K., Kaminaga, F., & Saito, H., Drag Reduction on Super Water Repellent Surface with Air Injection Method, *Trans. of JSME, Ser. B*, Vol. 68, No. 671, (2002), pp. 1857-1863.