

深溝形状が表面テクスチャメカニカルシールの流体潤滑性能に及ぼす影響 -レーザー誘起蛍光法による膜厚観察-

The Effect of Deep Groove Geometry on Fluid Lubrication Performance of Surface Textured Mechanical Seals -Observation of Film Thickness by Laser-Induced Fluorescence Method-

イーグル工業（正）*巻島 創 （正）王 岩 （正）徳永 雄一郎

九大（正）八木 和行

So MAKISHIMA*, Iwa OU*, Yuichiro TOKUNAGA*, Kazuyuki YAGI**

*Eagle Industry Co., Ltd. **Kyushu University

1. はじめに

メカニカルシールはポンプや攪拌機などの回転機械内にある流体の漏洩を防ぐ機械要素であるが、漏洩防止機能向上とともに摩擦低減や負荷能力向上の要求が高まっている。近年、テクスチャ形状をメカニカルシール表面に付与した表面テクスチャメカニカルシール（以下、テクスチャシール）が提案されている^{1,2)}。テクスチャシールしゅう動面には潤滑機構として機能するレイリーステップ形状と、密封機構として働くレイリーステップの逆配置（以下、逆レイリーステップ）形状が付与され、潤滑機構と密封機構がそれぞれシール表面に共存し、メカニカルシールの性能向上が実現されている。

このテクスチャシールのしゅう動面構造では、ミクロンからサブミクロンオーダーの深さのレイリーステップ・逆レイリーステップのほかに、円周・半径方向に数十から数百 μm オーダーの深さの深溝が配置されている。円周方向に配置した深溝（以下円環深溝）は、潤滑機構・密封機構の物理的な分離や潤滑機構から密封機構への側方漏れの流入を防止しており、半径方向に配置した深溝（以下半径深溝）は、レイリーステップへの流体の導入および逆レイリーステップにおける圧力を開放している。このように深溝はテクスチャシールにおいて重要な役割を果たしており、深溝がメカニカルシールに及ぼす影響を明らかにすることは重要である。一方、表面テクスチャ形状の解析・設計においては薄膜スケールで円筒座標系のレイノルズ方程式を解き計算を行うことが一般的であるが³⁾、深溝の幾何学的な形状の違いが流体挙動に及ぼす影響に関する研究は限られている^{3,4)}。

前々報⁵⁾および前報⁶⁾では、様々な深さや形状の深溝を付与したテクスチャシールにおいて粒子追跡法（PTV, Particle Tracking Velocimetry）を用いた流体の流れの可視化実験および数値解析を行い、深溝内の流体の流れは実験と解析において定性的に一致すること、深溝深さや形状を変更することで深溝内の流体の流れは大きく変化することを明らかにした。本報ではレーザー誘起蛍光法（LIF 法, Laser Induced Fluorescence）を用いた膜厚測定実験を行い、深溝形状・深さと潤滑性能の関係について考察したので報告する。

2. 実験方法

2.1 シール試験片

メカニカルシールの回転環には、光学ガラス基板（合成石英）を用いた。固定環には鏡面研磨した炭化ケイ素（SiC, silicon carbide）を用い、テクスチャ溝をレーザー加工により付与した。しゅう動面内径は $\phi 17.6\text{ mm}$ 、面幅 1.6 mm 、荷重は 23 N に設定した。

テクスチャ形状の概略図を Fig. 1 に示す。外周側に潤滑機構として幅 0.3 mm 、深さ $1.5\text{ }\mu\text{m}$ のレイリーステップを 8 等配、内周側に密封機構として幅 0.5 mm 、深さ $1.5\text{ }\mu\text{m}$ の逆レイリーステップを 1 カ所配置した。半径深溝形状は、最外径との接線に対して $+30^\circ$ 、 90° 、 -30° の 3 パターンとした。円環深溝および半径深溝の深さは 50 、 $200\text{ }\mu\text{m}$ の 2 パターンとし、形状と深さの違いを組み合わせると計 6 種類のサンプルを用意した。

2.2 実験装置および実験条件

Figure 2 に示すしゅう動面可視化試験機を用いて、LIF 法により液膜厚さの測定を行った。回転環は軸に固定され回転しゅう動する。密封流体には 0.05 wt\% の蛍光色素（Rhodamine 6G）を溶解させた水を使用した。しゅう動面にむけて波長 $\lambda = 532\text{ nm}$ のレーザーを照射し、バンドパスフィルタによって蛍光波長（中心波長 550 nm 、透過幅 $\pm 10\text{ nm}$ ）のみを透過させることで、しゅう動面間の液膜による蛍光を CMOS カメラで記録した。

液温は実験中計測し続け、 $20\text{ }^\circ\text{C}$ から $23\text{ }^\circ\text{C}$ の範囲内で管理した。軸回転数は 500 、 1000 、 1500 rpm （回転速度 0.5 、 1.0 、 1.5 m/s ）、しゅう動面内外周側圧力は 0 MPaG とした。また、しゅう動実験とは別に、鏡面研磨した SiC と平凸球面レンズの接触面間に試験液を満たしてレーザーを照射・蛍光させ、蛍光強度と液膜の間の校正値を導出した。

2.3 流体潤滑解析

実験結果における液膜厚さの考察のため、しゅう動面の圧力分布を円筒座標系の Reynolds 方程式を有限差分法で解

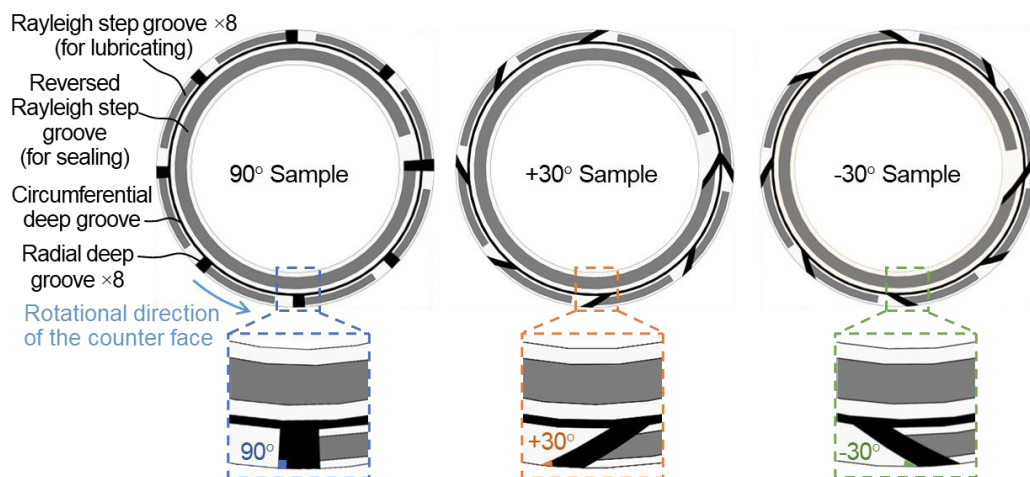


Fig. 1 Structure of textured mechanical seals

析することで膜厚を求めた。実験条件と同様にしゅう動面内外周側の差圧なし、深溝内も差圧なしとし、流体粘度 $0.89 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (水 25°C) を用いた。キャビテーション境界条件には Elrod のアルゴリズム⁷⁾を用い、キャビテーション圧力は先行研究⁸⁾より水の飽和蒸気圧である 3 kPa (絶対圧) とした。しゅう動面の組立荷重は実験と同じ 23 N とし、軸回転数 200 から 2000 rpm (回転速度 0.2 から 2.0 m/s) における液膜厚さを求めた。

3. 実験結果および流体潤滑解析結果

流体潤滑解析により求めた膜厚と膜厚測定実験によって得られた膜厚について、深溝深さ $200 \mu\text{m}$ の形状を Fig. 3 に、深溝深さ $50 \mu\text{m}$ の形状を Fig. 4 に示す。解析結果については、深溝形状および深さによる差は見られなかったため、代表として Fig. 3 には「半径深溝形状角度 90° 、半径深溝深さ $200 \mu\text{m}$ 」の結果、Fig. 4 には「半径深溝形状角度 90° 、半径深溝深さ $50 \mu\text{m}$ 」の結果のみをプロットした。膜厚測定実験では、各軸回転数について 3 回以上の測定を行い、得られた膜厚の平均値をプロットしている。

Figure 3 と 4 に示すように、実験における膜厚は「半径深溝形状角度 90° 、半径深溝深さ $200 \mu\text{m}$ 」、「半径深溝形状角度 -30° 、半径深溝深さ $50 \mu\text{m}$ 」を除き解析結果と良好に一致した。同形状・同回転数においても複数回実施した実験ごとに膜厚測定結果にばらつきがみられ、特に 500 rpm ではばらつきが顕著であった。

4. 考察

LIF 法によって測定した液膜厚さの深溝形状による違いについて考察する。Fig. 3 より、「半径深溝形状角度 90° 、半径深溝深さ $200 \mu\text{m}$ 」は他の形状と比較して各軸回転数における液膜厚さが薄いことが確認された。既報⁵⁾の観察結果の要約を Table 1 に示すが、「半径深溝形状角度 90° 、半径深溝深さ $200 \mu\text{m}$ 」の場合、半径深溝内に気泡が残存することがあると確認されている。本実験においても同様に半径深溝内に気泡が存在していた場合、気泡によってレイリーステップへの流体の供給が妨げられ、液膜厚さが薄くなった可能性が考えられる。

Figure 4 に示すように「半径深溝形状角度 -30° 、半径深溝深さ $50 \mu\text{m}$ 」は他の形状と比較して液膜厚さが薄いという結果が得られた。既報⁶⁾の観察結果の要約および、既報⁶⁾と同様の粒子追跡法 (PTV, Particle Tracking Velocimetry) を用いた流体の流れの可視化実験で新たに観察された結果を Table 1 に示す。「半径深溝形状角度 -30° 、半径深溝深さ $200 \mu\text{m}$ 」の場合、半径深溝における流体の流れは、①周方向に平行かつ径方向に内周側から外周側へ向かう渦流れ、②渦の中心を径方向に外周側から内周側へ流れる流れ、の二種類に大別さ

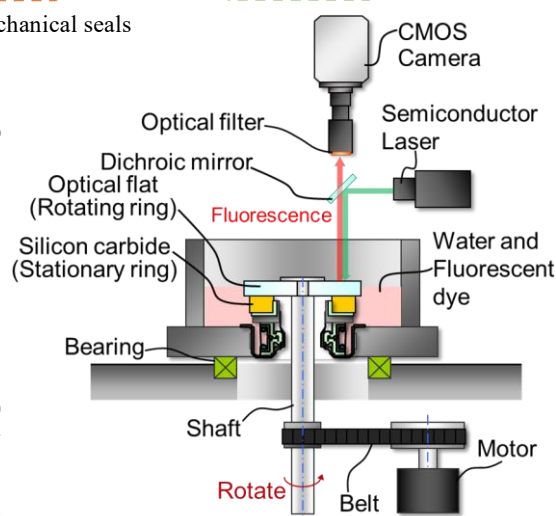


Fig. 2 Schematic of Experimental test rig

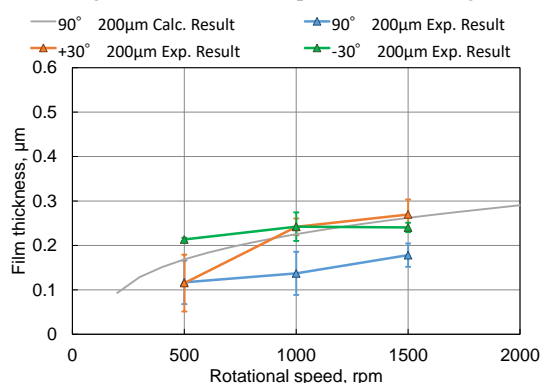


Fig. 3 Result of film thickness measurement test and Calculation (Groove depth: $200 \mu\text{m}$)

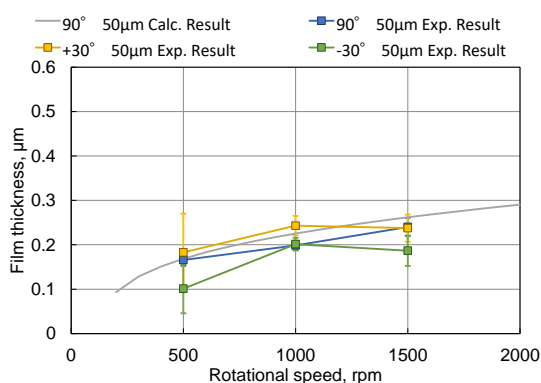


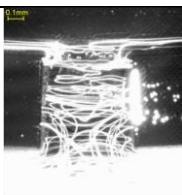
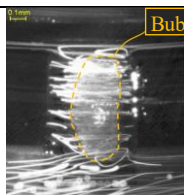
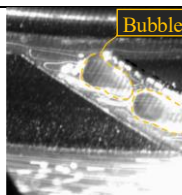
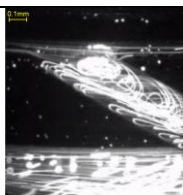
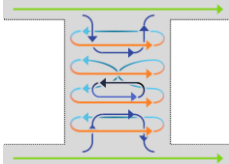
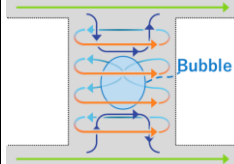
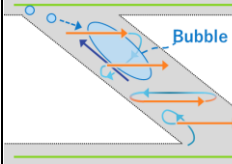
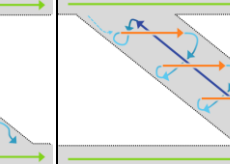


Fig. 4 Result of film thickness measurement test and Calculation (Groove depth: $50 \mu\text{m}$)

Table 1 Experimental observation results and flow model of radial deep groove^{5,6)}

Radial deep groove geometry				
Sliding speed	1500 rpm (1.5 m/s)			
Groove depth	50 μm	200 μm	50 μm	200 μm
Experimental results				
Model of Fluid flow				

「半径深溝形状角度 90°, 半径深溝深さ 50 μm / 200 μm 」は文献 5) Table 1 をもとに再作成

「半径深溝形状角度-30°, 半径深溝深さ 200 μm 」は文献 6) Table 1 をもとに再作成

「半径深溝形状角度-30°, 半径深溝深さ 50 μm 」は新規に実験を実施して作成

れる。また、しゅう動速度一定の常状態においては、半径深溝内の流れと円環深溝の流れはそれぞれ独立した流れに分かれている。

一方、「半径深溝形状角度-30°, 半径深溝深さ 50 μm 」の場合、半径深溝内の流体の流れは、③外周寄りでは半径深溝外との間で流体の流入・排出が観察生じ、内周側では円環深溝との間で流体の流入・排出、が観察された。また、実験において④円環深溝から気泡が半径深溝へ流入し、半径深溝内に存在し続ける様子、が確認された。このことから、「半径深溝形状角度-30°, 半径深溝深さ 50 μm 」では気泡によってレイリーステップへの流体の供給が妨げられ、その結果、液膜厚さが薄くなった可能性が考えられる。

5. 結論

テクスチャシールについて、3 種類の半径深溝形状および 2 種類の深溝深さの組み合わせ（計 6 通り）に対し、LIF 法を用いた膜厚測定実験を行い、半径深溝形状・深さと潤滑性能の関係を調査した。また前々報⁵⁾・前報⁶⁾と合わせて考察した結果、次の事項を明らかにした。

- (1) LIF 法によって求めた液膜厚さは、多くの場合解析で求めた液膜厚さと定量的に一致する結果を示した。
- (2) 半径深溝形状角度 90°, 半径深溝深さ 200 μm のテクスチャシールにおいては、解析で求めた膜厚と比較して、測定された液膜厚さが顕著に薄かった。これは、半径深溝内に気泡が残存し、レイリーステップへの流体の供給が妨げられた可能性が考えられる。
- (3) 半径深溝形状角度-30°, 半径深溝深さ 50 μm のテクスチャシールにおいては、解析で求めた膜厚と比較して、測定された液膜厚さが顕著に薄かった。要因として、円環深溝から流入した気泡が半径深溝内に残存し、レイリーステップへの流体の供給が妨げられた可能性が考えられる。

文献

- 1) 徳永・上村・山本：密封機構と摩擦低減機構を有するメカニカルシールの開発と性能評価-理論的検討-, トライボロジスト 58, 2 (2013) 102.
- 2) 徳永・杉村・山本：密封機構と摩擦低減機構を有するメカニカルシールの開発と性能評価-実験的検討-, トライボロジスト 60, 5 (2015) 332.
- 3) 板谷・徳永・千葉・吉柳・上村：トライボロジー会議予稿集 2016 東京, A30
- 4) 板谷・福原・徳永・上村：トライボロジー会議予稿集 2016 新潟, D31
- 5) 巻島・徳永・王・八木：トライボロジー会議予稿集 2024 東京, D23
- 6) 巻島・徳永・王・八木：トライボロジー会議予稿集 2024 名護, C24
- 7) H. G. Elrod: A Cavitation Algorithm, ASME J. Lubrication Technology, 103, 3 (1981) 350.
- 8) 板谷・上村・杉村：メカニカルシールにおけるキャビテーション領域の観察と圧力測定—水を密封流体とした場合—, トライボロジスト 66, 12 (2021) 940.