

表面テクスチャメカニカルシールの流れに及ぼす溝形状の影響の可視化

Visualization of the Effect of Groove Geometry on the Flow in Surface Textured Mechanical Seals

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

メカニカルシールにおいて、最も大切な機能は密封機能である。一方、密封機能を長期的にかつ安定して維持するためには、しゅう動面間に適度な潤滑膜を形成し、しゅう動面を保護する必要がある。徳永らは、しゅう動面に潤滑機構としてレイリーステップを、密封機構としてレイリーステップの逆配置（以下、逆レイリーステップ）をそれぞれ配置したしゅう動面構造を提案しており、潤滑と密封を両立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）の実現を可能にした^{1,2)}。

上記にて提案されたしゅう動面構造では、ミクロン～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～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の防止という役割を果たしており、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の開放という役割を果たしている。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で、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り¹⁾、深溝の深さや形状の差異がテクスチャシールにどのような影響を与えるかの検討は少ない^{3,4)}。

前報⁵⁾では4種類の深さの深溝を付与したテクスチャシールにおいて流体の流れの可視化試験及び数値解析を行い、深溝内の流体の流れは可視化試験結果とCFD解析において定性的に一致すること、深溝深さ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、様々な半径深溝形状を付与したテクスチャシールにおいて可視化試験及び数値解析を行い、粒子追跡法（PTV, Particle Tracking Velocimetry）を用いて深溝形状と流体の流れ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。固定環には炭化ケイ素（SiC, silicon carbide）を用い、テクスチャ溝をレーザ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。

テクスチャ形状は前報⁵⁾で使用した形状をもとに半径深溝のしゅう動面外径に対する角度を変更した。概略図を Figure 1 に示す。前報⁵⁾と同様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。円環深溝および半径深溝は深さ $200\text{ }\mu\text{m}$ とした。円環深溝の溝幅は 0.1 mm である。半径深溝の最外周開口部の周方向長さは 0.54 mm であり、前報⁵⁾と同じ扇形を組み合わせたような形状（ 90° ）のほかに、レイリーステップへの流体の導入性を向上させる狙いで最外径との接線に対する角度を $+30^\circ$ 、 $+60^\circ$ とした形状と排出性を向上させる狙いで -30° 、 -60° とした形状の計5パターンとした。半径深溝8カ所のうち1カ所は外周側から逆レイリーステップ部まで連通させ、他7カ所は円環深溝まで連通させた。

2.2 実験装置および実験条件

しゅう動面可視化試験機を用いて、しゅう動面に生じる流体の流れを観察した。実験装置の概略図を Figure 2 に示す。回転環は軸に固定され回転しゅう動する。密封流体には水を使用し、トレーサ粒子として水と比重の近い平均粒径 $3\text{ }\mu\text{m}$ の蛍光粒子を使用した。トレーサ粒子を用いたシールの流れの可視化実験としては、オイルミストをトレーサ粒子とした気膜（厚さ $60\text{ }\mu\text{m}$ ）の可視化が知られている⁶⁾が、本実験条件でシールのしゅう動面に生じる液膜厚さは二桁小さいサブミクロンオーダーのため、トレーサ粒子は深溝内のみを流れる。

固定環のしゅう動面を回転するガラス越しにハイスピードカメラで撮影しながら、しゅう動面にむけて Nd:YAG レーザの第二高調波（波長 $\lambda = 532\text{ nm}$ ）を照射し、散乱光中のトレーサ粒子による蛍光を記録、画像解析して流体の流れを可視化した。液温は室温下で成り行きとし、軸回転数は 1500 rpm （ 1.5 m/s ）、しゅう動面外周側圧力はゲージ圧力で 0 MPa とした。

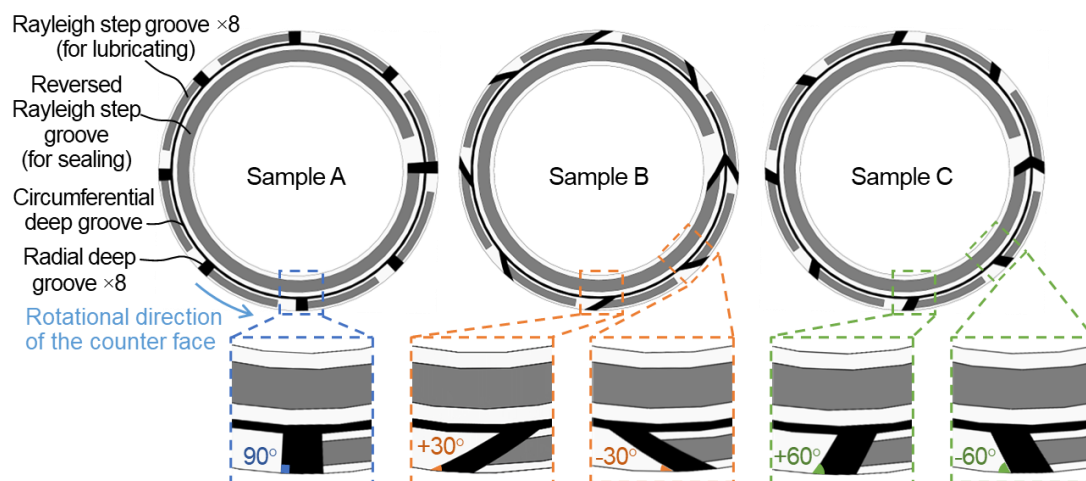


Fig. 1 Structure of textured mechanical seals

2.3 数値流体解析

実験結果の考察のため、深溝内の流体の流れについて数値流体解析（CFD, Computational Fluid Dynamics）を実施した。流体解析ソフトウェアは ANSYS CFX 2022 R2 を使い、乱流モデルの設定は Shear Stress Transport (SST) Model とした。このモデルは、Menter の SST Model⁷⁾を元に改良したモデルである。しゅう動速度は 1500 rpm (1.5 m/s)、しゅう動面外周側にあたる圧力はゲージ圧力で 0 MPa、流体粘度 0.89 mPa・s (水 25 °C) の単相流とした。

3. 実験結果および数値解析結果

3.1 実験結果

円環深溝まで連通した深さ 200 μm の半径深溝について、実験結果を Table 1 に示す。しゅう動面上部から溝底に向けて 100 fps と遅いフレームレートで撮影することで、トレーサ粒子の流れを流線のように撮影した。

角度 90°では、溝内で周方向に平行に渦を描く流れが確認された。渦においては半径深溝外周から内周へおよび内周から外周へ向かう流れのどちらも存在し、多くの粒子は円環深溝へ流れることなく半径深溝内で渦を描き続けていた。

角度 +30°, -30°, +60°, -60°においては、半径深溝内で観察された流線は大きく周方向に渦を描く流れと渦の中心部を流れる流れの二つに分けられた。角度 +30°と +60°においては時計回りに渦を描きながら半径深溝外周から内周へ向かう流れと、渦の中心を通過して内周から外周へ向かう流れが確認された。半径深溝から円環深溝へ流れる粒子はわず

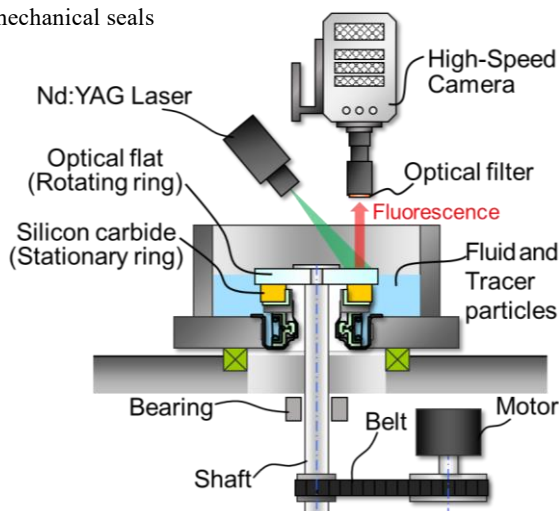


Fig. 2 Schematic of Experimental test rig

Table 1 Experimental observation results and analysis results

Radial deep groove geometry	90°	+30°	-30°	+60°	-60°
Experimental results Observed area Fluid flow					
CFD Analysis Results Velocity [m/s] 0 0.75 1.50					
Vortex flow direction of top area	Same as fluid flow	Same as fluid flow	Same as fluid flow	Same as fluid flow	Same as fluid flow
Vortex flow direction of bottom area	Opposite (Opp.) as fluid flow	Opp. as fluid flow and outer to inner radius (r.) direction	Opp. as fluid flow and inner to outer r. direction	Opp. as fluid flow and outer to inner r. direction	Opp. as fluid flow and inner to outer r. direction
Flow direction of vortex center	Various flows	Inner to outer r. direction	Outer to inner r. direction	Inner to outer r. direction	Outer to inner r. direction

かに確認された一方で、円環深溝から半径深溝への流れは確認されず多くの粒子は半径深溝内部のみで滞留していた。
角度-30°と-60°においては反時計回りに渦を描きながら半径深溝内周から外周へ向かう流れと、渦の中心を通って外周から内周へ向かう流れが確認された。半径深溝から円環深溝へ流れる粒子は確認されない一方、円環深溝から半径深溝へ流れる粒子は一定数確認され、多くの粒子は半径深溝内部のみで滞留していた。

3.2 数値解析結果

円環深溝まで連通した深さ 200 μm の半径深溝について、しゅう動速度 1500 rpm (1.5 m/s) における CFD 解析結果を Table 1 に示す。流線の流速分布を色で表した。赤色は流速が速く青色は流速が遅いことを示している。すべての半径深溝形状において、半径深溝の上面(相手面近傍)領域に相手側表面の回転方向と同じ向きの流れが確認された。半径深溝の底部領域において、角度 90°においては相手側表面の回転方向と逆方向への流れが、角度+30°、+60°においては相手側表面の回転方向と逆方向かつ外周から内周方向への流れが、角度-30°、-60°においては相手側表面の回転方向と逆方向かつ内周から外周方向への流れが確認された。渦の中心部分においては、角度 90°では外周側から内周側への流れと内周側から外周側への流れのどちらも存在する一方で、角度+30°、+60°においては内周側から外周側への流れのみが、角度-30°、-60°においては外周側から内周側への流れのみが確認された。

4. 考察

円環深溝まで連通した半径深溝における流れについて考える。Table 1 より角度 0°以外の半径深溝の実験結果において、半径深溝の底部領域や渦の中心の流れが太く鮮明な線として撮影された一方で、半径深溝の上面領域の流れは細く薄い線として撮影された。この要因として、鮮明に撮影された流れは流速が遅く、細く薄く撮影された流れは流速が速いため、同一露光時間において各場所での光量が異なったことが考えられる。CFD 解析においては、解析結果をもとに瞬間の流れを見ており、流速によって流線の鮮明度に差が生じない。実験結果で観察された流速と光量の関係を考慮すると、Table 1 における実験結果の流れおよび CFD 解析結果の流線はどの角度の半径深溝においても同一の形状を描いていることから、半径深溝内の流れは定性的に一致することが確認された。

溝角度が流れに及ぼす影響について考える。半径深溝において、相手側表面とのしゅう動によって相手側表面付近ですべり方向と同方向の流れが生じ、半径深溝下流側の側壁(画像右側)の存在により、流れは溝底へ向かい、底面方向において相手側表面のすべり方向に対して逆方向へ向かう渦となる。この側壁が角度+30°、+60°の場合、側壁の角度によって径に対しては外周から内周方向へ向かう流れとなり、角度-30°、-60°の場合は径に対して内周から外周方向へ向かう流れとなると考えられる。実験結果より、円環深溝内を流れるトレーサ粒子の大半は円環深溝内を流れ続け、円環深溝から半径深溝へ、もしくは半径深溝から円環深溝へ流れる粒子はわずかであった。以上より、定常状態においては、円環深溝の流体の流れと半径深溝の流体の流れは切り離して考えることができる。このことから、先述したしゅう動によって生じた渦は、円環深溝内周側・外周側において流量を保存するため、渦の中心部分において径方向の流れを生じると考えられる。

実験より半径深溝のしゅう動面外径に対する角度によって溝内の流れが特に径方向に対して大きく変わることが明らかになった。半径深溝はレイリーステップへ流体を導入するために設けられているため、溝内の流れは流体の導入に影響を及ぼす可能性が考えられ、テクスチャシールの設計の上で半径深溝の形状についても考慮することは重要であると考えられる。

5. 結論

テクスチャシールについて、5種類の形状の半径深溝において流体の流れの可視化試験を行い、深溝形状と流体の流れの関係を調査した。その結果、次の事項を明らかにした。

- (1) 半径深溝内部において、複雑な渦流れが発生していることが分かった。
- (2) テクスチャシールにおいて、深溝内の流体の流れは可視化試験結果と CFD 解析において定性的に一致した。
- (3) テクスチャシールにおいて、半径深溝のしゅう動面外径に対する角度を変更することで深溝内の流体の流れは特に径方向について大きく変化した。

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：トライボロジー会議予稿集 2024 東京, D23
- 6) 明戸・落合：ドライガスシールの正・逆回転時における気体流れの可視化実験, 日本機械学会 2016 年度年次大会, S1170403
- 7) F. R. Menter: Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, AIAA Journal, 32, 8 (1994) 1598-1605.