

表面テクスチャメカニカルシールにおける深溝内の気泡挙動の可視化

Visualization of Bubble Behavior in Deep Grooves of 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力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)}。テクスチャシールの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、円周および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、潤滑機構および密封機構の物理的な分離をしており、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。このように深溝はこの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。潤滑面内に付与される表面テクスチャ形状は、一般的にレイノルズ方程式導出にあたって適用される仮定を崩すものではないため、レイノルズ方程式を解く際、テクスチャ形状は液膜厚さの変化として考慮すればよい。一方、潤滑面外に付与されている深溝の深さは液膜厚さよりも一桁から二桁程度大きいいためレイノルズ方程式が適用できない。しかしながら、深溝部での流れは本テクスチャシールの潤滑部および密封部とは独立ではなく流れの収支があるため、深溝の形状が潤滑機構および密封機構に与える影響を調べることは本テクスチャシールにとって重要である^{3,4)}。

これまでの研究において、テクスチャシールに付与した深溝内の流体流れは深溝の深さや形状によって大きく変化すること^{5,6)}、一部の深溝深さ・形状において、潤滑性能を示す液膜厚さの実測値は他の形状と比較して薄くなること⁷⁾を明らかにしている。液膜厚さが薄くなった条件においては、半径深溝内に気泡が残存している様子が観察された⁷⁾ことから、気泡の存在が液膜厚さに影響を与えている可能性が示唆されている。これまでの実験ではテクスチャシールの半径深溝という非常に狭く小さい深溝の内部流れを精緻に観察していたことから、円周状のしゅう動面全体の様子を同時に観察することはできず、気泡の発生要因や変化の様子については複数の観察結果をもとにした推測にとどまっていた。本報では深溝内の気泡に着目したしゅう動面全体の可視化実験を行い、気泡の発生からの挙動を実際に観察することで気泡の発生要因や抑制方法について考察を行ったので以下に報告する。

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 $1.5 \mu\text{m}$ 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 $1.5 \mu\text{m}$ 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、円環深溝および半径深溝の深さは 50 、 $200 \mu\text{m}$ の 2 パターンとした。これらの形状と深さの組み合わせにより、計 6 種類のサンプルを複数個ずつ用意した。

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、しゅう動面の観察を実施した。回転環は軸に固定され回転しゅう動する。密封流体には水を使用し、液温は実験中に継続的に計測し、 21°C から 26°C の範囲内で管理した。実験開始前の深溝内を液で完全に満たすため、水を若干内周側へ漏らしながら組付けを行った。しゅう動面内外周側の圧力は 0 MPaG 、実験時間は 2 時間とした。光学ガラス基板の回転数は 1500 rpm （回転速度 1.5 m/s ）一定とした。気泡の挙動を観察する目的から、前報までよりも広視野を撮影可能なレンズを使用し、しゅう動面全体を同時に撮影可能な構成とした。実験実施中は、1 秒あたり 1 枚写真を等間隔でインターバル撮影（シャッタースピード $1/2000 \text{ sec}$ ）し、記録した。実験終了後、撮影画像からしゅう動面の時間経過に伴う変化を確認した。

3. 実験結果

各深溝条件において実験中に確認された気泡に関する現象を Table 1 に示す。また、特筆すべき現象について項目ごとに記述する。半径深溝の位置関係は Fig. 1 に示すように、逆レイリーステップまで連通した半径深溝を 12 時方向とし、クロックポジション（アナログ時計の文字盤をもとにした表示）で記述する。すべての実験条件において密封機構の働きによって組付け時起因の内周側に存在した水は吸い込まれ、実験途中に内周側は完全に空気がなった。

3.1 半径深溝形状角度 90°, 半径深溝深さ 50 μm

12 時方向の半径深溝において、実験開始直後から内周側半径深溝の内周側に小さな気泡の出現および消失が繰り返された。内周側の気泡は時間経過とともに成長する様子が確認された。一方、12 時方向以外の半径深溝では気泡の出現はほとんど確認されず、出現した場合もすぐに排出された。

3.2 半径深溝形状角度 90°, 半径深溝深さ 200 μm

12 時方向において、実験開始直後から内周側半径深溝内の内周側に気泡が出現した。気泡は周方向に平行な渦を描く流れを形成した後、時間経過とともに径方向に広がり、円周溝を超えて外周側半径深溝まで到達し、半径深溝全体を占有する大きな気泡に成長した。気泡の外周側は細長くとり断続的に分離されて密封機構部外周部、すなわちメカニカルシール外部へ排出された。

12 時方向以外の半径深溝では気泡の出現はほぼ確認されなかった。複数回の実験のうちには、10 時半や 9 時方向の半径深溝に気泡が出現し、滞留し続ける様子が確認された実験もあった。

3.3 半径深溝形状角度 +30°, 半径深溝深さ 50 μm

12 時方向において、実験開始直後から内周側半径深溝の内周側に気泡が出現した。気泡は時間経過とともに一定サイズまで成長した後、一部分離を繰り返した。分離された気泡は、外周側半径深溝を通過してメカニカルシール外部へ排出されるものや円環深溝へ流入するものがあった。円環深溝へ流入した気泡については、10 時半方向の半径深溝に到達してメカニカルシール外部へ排出される様子が確認された。

12 時方向以外の半径深溝には 12 時方向から流入した気泡の排出以外には気泡の出現は確認されなかった。また、内周側ランド部には明瞭な筋状のキャビテーションが形成された。

3.4 半径深溝形状角度 +30°, 半径深溝深さ 200 μm

12 時方向において、実験開始後にメカニカルシール内周側の水を吸い込みきってから内周側半径深溝の内周側に気泡の出現が確認された。気泡は円周深溝に到達する程度まで成長し、その後気泡の外周側は細長くとり断続的に分離されてメカニカルシール外部へ外周側半径深溝を通過して排出された。

12 時方向以外の半径深溝には気泡の出現は確認されなかった。また、内周側ランド部には明瞭な筋状のキャビテーションが形成された。

3.5 半径深溝形状角度 -30°, 半径深溝深さ 50 μm

12 時方向において、実験開始直後から内周側半径深溝の内周側に気泡が出現した。気泡は時間経過とともに成長し、外周側の半径深溝まで到達後大きさは安定し、分離排出を繰り返した。分離は径方向に対して気泡の中ほどの位置で生じ、分離された気泡は円環深溝に流入する様子が確認された。

12 時以外の半径深溝では、実験開始直後から多数の小さな気泡が出現し、時間経過とともに頻繁に出現や消失を繰り返しており、気泡の流入や排出が繰り返されていると考えられる。6 時や 7 時半方向の半径深溝内には、比較的大きな気泡の出現が確認された。

全ての半径深溝において、時間経過とともに気泡が大きく成長し、円環深溝内を流れる気泡と繋がる様子や、半径深溝内の気泡がレイリーステップ内へ流入する様子が確認された。また、内周側ランド部には明瞭な筋状のキャビテーションが形成された。

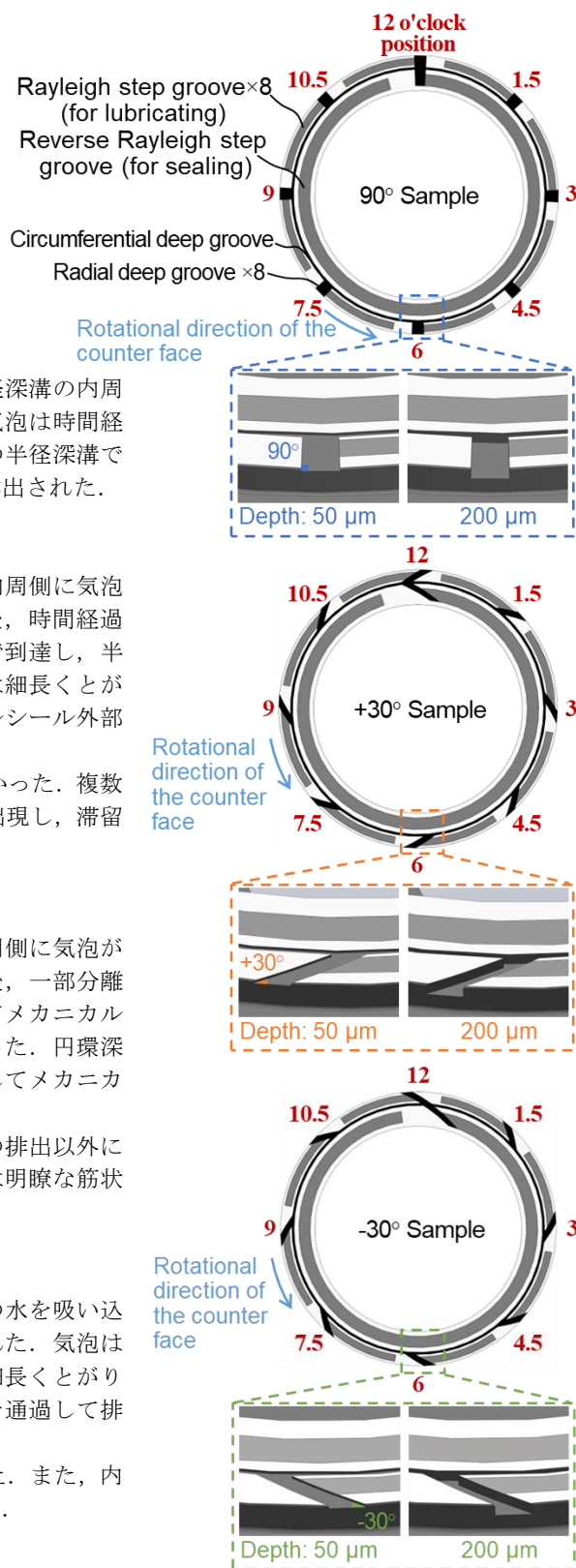
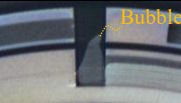

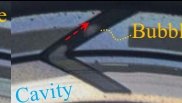
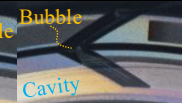
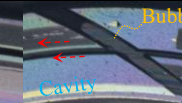









Fig. 1 Structure of textured mechanical seals

Table 1 Experimental observation results

<- Bubble flow direction

Radial deep groove geometry		90°		+30°		-30°	
Groove depth		50 μm	200 μm	50 μm	200 μm	50 μm	200 μm
12 o'clock position	Cropped image						
	Bubbles	Appeared and disappeared	Grown large and discharged to outside	Discharged to outside and into circumferential deep groove	Discharged to outside	Discharged into circumferential deep groove	Discharged to outside and into circumferential deep groove
Other positions	Cropped image						
	Bubbles	Rarely appeared	Rarely appeared	Not appeared or moved from 12 o'clock	Not appeared	Appeared and disappeared → Grown large	Slowly grown large

3.6 半径深溝形状角度-30°，半径深溝深さ 200 μm

12 時方向において，実験開始直後から内周側半径深溝の内周側に気泡が出現した．気泡は時間経過とともに成長し，円環深溝よりも外周側の半径深溝最外周まで到達後，分離排出を繰り返した．分離された気泡は，主として外周側へ排出される様子が確認されたが，円環深溝に流入する様子も確認された．

12 時方向以外の半径深溝にも気泡の出現が確認され，一度出現した気泡は安定して半径深溝内に滞留し，時間経過とともに 10 時半方向，9 時方向と反時計回りに気泡の成長が進行していく傾向が見られた．

また，円環深溝内を流れる気泡が半径深溝内気泡と繋がる様子が確認された．ただしレイリーステップ内への気泡の流入する様子は確認されなかった．また，逆レイリーステップ始端と 12 時方向の半径深溝の間には明瞭な筋状のキャビテーションが形成された．

4. 考察

本実験で観察された深溝内での気泡について考える．いずれの深溝形状であっても実験開始後，12 時方向の逆レイリーステップ終端が連通している半径深溝内周側から気泡が発生し，一定時間経過すると半径深溝内の気泡は一定の大きさで安定した．気泡の分離排出は断続的に続いているにも関わらず，気泡は一定の大きさで存在し続けることから，気泡の排出と同時に気泡の発生もしくは流入が断続的に続いていると推測される．

気泡の発生原因には圧力低下に伴う蒸気性もしくは気体性キャビテーションが考えられる．しかしながら，キャビテーションが原因であれば全ての深溝で気泡発生が確認されることが考えられるが，全ての深溝形状において 12 時方向の内周側半径深溝で気泡の発生が確認された一方，他の半径深溝では気泡が発生しない実験も多かったことから，本実験では深溝内ではキャビテーションは生じていないと考えられる．このため，12 時方向の内周側半径深溝内で観察された気泡は深溝外部から流入してきたものであると考えられる．気泡の流入経路については，①回転にともなう外周側流体と空気の攪拌，②逆レイリーステップ部のキャビテーション領域からの流入，③メカニカルシール内周側の空気の吸い込み，の 3 通りが可能性として考えられる．このうち①については気泡の発生起点が半径深溝外周側ではなく，内周側であること，しゅう動面外から深溝へ流入する気泡の挙動が観察されていないことから本実験では生じていないと考えられる．以上より半径深溝に生じる気泡は②および③によるものであると考えられる．

気泡発生後の成長，および排出過程を各溝形状における観察結果を元に考察する．「半径深溝形状角度-30°，深さ 50 μm 」および「半径深溝形状角度-30°，深さ 200 μm 」においては，半径深溝の内周側に気泡が滞留，成長していく様子が観察され，10 時半や 9 時の位置にある深溝でも滞留現象がみられた．以前行った深溝内流れの PTV 計測における深溝形状角度が-30°の場合，半径深溝内で渦中心に径方向に対して外側から内側への流れが生じていることが明らかになっている^{6,7)}が，今回観察された気泡の滞留挙動はこの流れによるものであると考えられる．

対照的に，「半径深溝形状角度+30°，深さ 50 μm 」では，10 時半方向の半径深溝において，円環深溝から半径深溝に流入した気泡がメカニカルシール外周へ排出される様子が確認されたが，これは溝形状角度が+30°の場合に生じる径方向に内側から外側への流れ^{6,7)}と同様の挙動を示している．「半径深溝形状角度+30°，深さ 200 μm 」では，気泡の出現および排出ともに観察できなかった．これは 12 時方向の深溝に生じた気泡がそのまま積極的に外部へ排出されてい

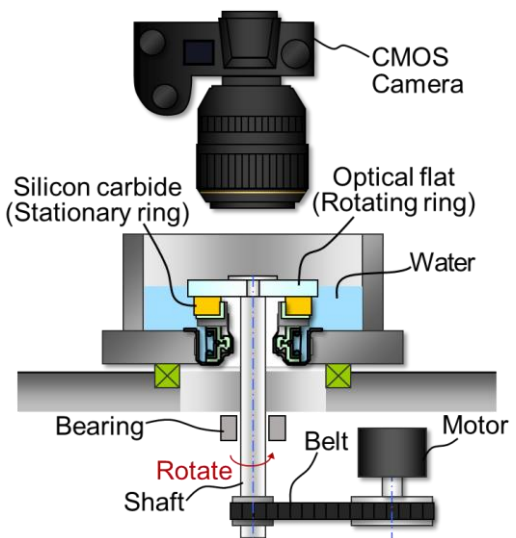


Fig. 2 Schematic of Experimental test rig

たこと、また円環深溝へ流入した場合でも、半径深溝角度-30°の場合と異なりすぐに外部へ排出されてしまうため、滞留しないことが理由と考えられる。

「半径深溝形状角度 90°、深さ 50 μm 」および「半径深溝形状角度 90°、深さ 200 μm 」の条件では、半径深溝形状角度+30°や-30°の場合のような明確な傾向は見られなかった。深溝深さ 200 μm の方が 50 μm よりも半径深溝内に気泡が滞留しやすい傾向は確認されたが、滞留する気泡の出現頻度は半径深溝形状角度-30°の条件と比較し非常に少なかった。これは、溝形状角度が 90°の場合には-30°のときのような強い内周方向への流れは発生せず、深溝内周側では内側への流れ、中央部では滞留流れ、外周側では外側への流れが生じている^{6,7)}ためだと考えられる。

同じ半径深溝形状角度において、深溝深さが 50 μm の場合と 200 μm の場合での深溝内の流れの差について考える。半径深溝において、相手表面である光学ガラスディスク側である上部領域は回転環の回転と同方向に、深溝の底部となる下部領域は逆方向に渦流れを生じることがわかっている^{5,9)}。半径深溝が深さ方向に深くなると、上部領域で周方向に平行な渦流れは方向を変えて深さ方向に向かって底部で逆方向流れになって渦を形成するが、渦中心に空間が生じ、そこでは渦流れと別の流れが生じる⁹⁾。その結果、深さ 50 μm の方が深さ 200 μm よりも気泡の出現、滞留、排出といった状態変化がより明瞭に生じる傾向が観察されたと考えられる。

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、しゅう動面全体の写真をインターバル撮影し、撮影画像からしゅう動面の気泡に関する時間経過に伴う変化を確認した。この結果、次の事項を明らかにした。

- (1) 本テクスチャシールの深溝内に存在する気泡は、まず内周側の空気もしくは逆レイリーステップ部のキャビテーションを起因として、次に逆レイリーステップまで連通した半径深溝に集約的に発生する。その後、気泡は外周へ排出されるか、円環深溝を経由して他の半径深溝へ移動し、そこで滞留もしくは排出される。
- (2) 半径深溝形状角度が-30°の場合、気泡は半径深溝に滞留しやすい傾向が確認された。滞留が続くことでレイリーステップへの流体の供給を妨げる場合もあることが確認された。
- (3) 半径深溝形状角度が+30°の場合、気泡は半径深溝に滞留しにくい傾向が見られた。これはレイリーステップへの流体の供給においては良い方向に作用すると考えられる。
- (4) 半径深溝形状角度が 90°の場合、気泡の滞留挙動は一様ではなく、明確な傾向を示さなかった。
- (5) 半径深溝深さが 50 μm の場合、200 μm の場合と比較して気泡の状態変化はより激しくなる傾向が確認された。

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・八木：トライボロジー会議予稿集 2024 東京, D23
- 6) 巻島・王・徳永・八木：トライボロジー会議予稿集 2024 名護, C24
- 7) 巻島・王・徳永・八木：トライボロジー会議予稿集 2025 東京, D8