

## 粒子追跡法によるテクスチャメカニカルシールにおける流れの可視化

Flow Visualization of Surface Textured Mechanical Seals by Particle Tracking Velocimetry

イーグル工業 (正) \*巻島 創 (正) 徳永 雄一郎 (正) 王 岩

九大 (正) 八木 和行

So MAKISHIMA\*, Yuichiro TOKUNAGA\*, Iwa OU\*, 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、しゅう動面の高圧側に潤滑機構としてレイリーステップを、低圧側にキャビテーションを利用した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の実現を可能にした<sup>1,2)</sup>。

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  $\mu\text{m}$  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。キャビテーション圧力は、流体の種類や環境、しゅう動条件等に依存すると言われており<sup>3,4)</sup>、逆レイリーステップにおいては、キャビテーション後端が半径深溝に到達し、流体の流れによってキャビテーション気泡が分離・排出され、キャビテーション圧力に影響を与えている可能性が示唆されている<sup>5)</sup>。

このように深溝は表面テクスチャメカニカルシールにおいて重要な役割を果たしている一方で、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<sup>1)</sup>、深溝の深さや形状の差異が表面テクスチャメカニカルシールにどのような影響を与えるかの検討は少ない<sup>6,7)</sup>。

深溝の生成においては、付与したい深溝の深さや形状に合わせてプラスト加工や切削加工・レーザ加工などが選択でき、設計の自由度があるが、溝深さ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。そこで本報では、様々な深溝深さについて、表面テクスチャメカニカルシールを用いた可視化試験及び数値解析を行い、粒子追跡法（PTV, Particle Tracking Velocimetry）を用いて溝形状と流体の流れおよび速度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  $1.6 \text{ mm}$ 、荷重は  $23 \text{ N}$  に設定した。

テクスチャ形状は既報<sup>1)</sup>の理論に基づき使用するメカニカルシールやしゅう動条件に合わせて設計した既報形状<sup>6)</sup>とした。概略図を Figure 1 に示す。外周側に潤滑機構として幅  $0.3 \text{ mm}$ 、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  $0.5 \text{ mm}$ 、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。半径深溝は最外周で幅  $0.54 \text{ mm}$  であり、8 等配のうち 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。円環深溝の溝幅は  $0.1 \text{ mm}$  である。円環深溝および半径深溝は  $50 \mu\text{m}$  を基準に  $1/2$  倍、 $2$  倍、 $4$  倍の  $25$ ,  $50$ ,  $100$ ,  $200 \mu\text{m}$  の 4 通りの深さで付与した。

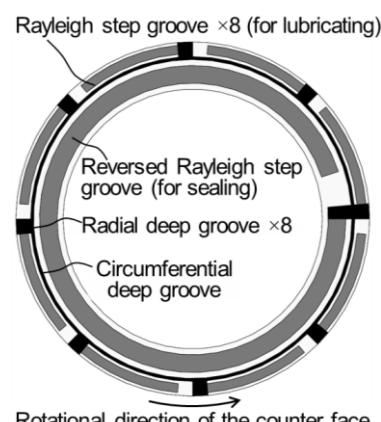


Fig. 1 Structure of the sliding surface

#### 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、固定環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  $3 \mu\text{m}$  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  $60 \mu\text{m}$ ）の可視化が知られている<sup>8)</sup>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 600 rpm(0.6 m/s), 1500 rpm(1.5 m/s)の 2通り、しゅう動面外周側圧力はゲージ圧力で 0 MPa とした。

### 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 を用い、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 Model<sup>9)</sup>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

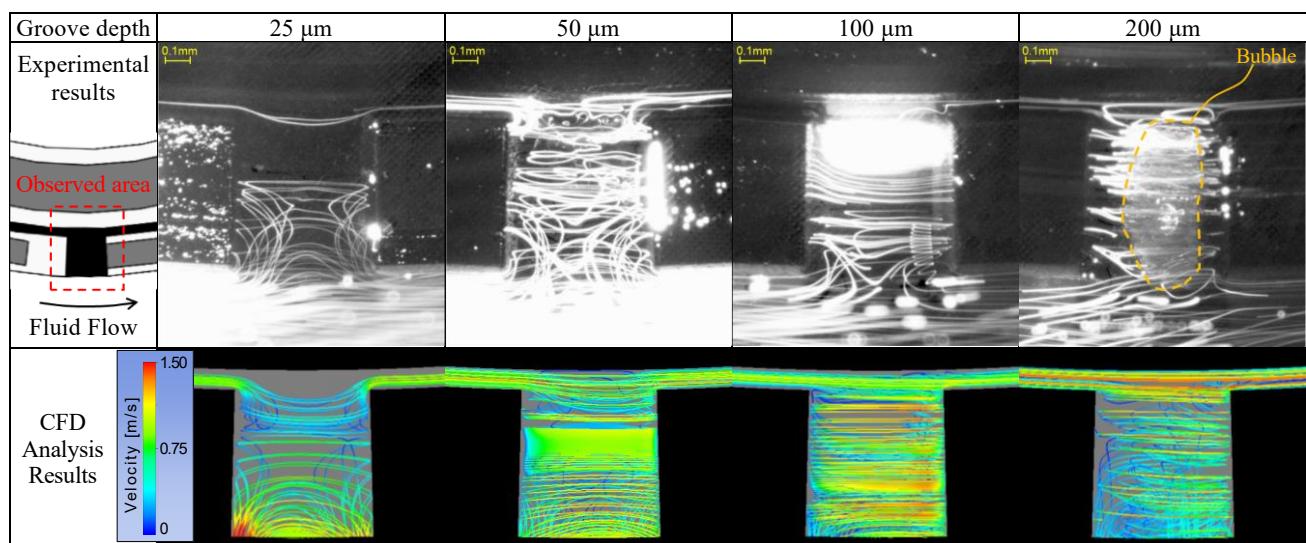
円環深溝まで連通した半径深溝について、軸回転数 1500 rpm(1.5 m/s)における実験結果を Table 1 に示す。実験結果について、しゅう動面上部から溝底に向けて 100 fps と遅いフレームレートで撮影することで、トレーサ粒子の流れを流線のように撮影した。

実験結果から、すべての溝深さにおいて相手面回転方向と同じ向きの流れが生じることが確認された。溝深さ 25 μm では、内周側に入り込む流れが生じたものの、最内周である円環溝まで到達するトレーサ粒子はわずかであった。溝深さ 50, 100, 200 μm では、相手面回転方向と逆方向への流れや、外部から円環溝へのトレーサ粒子の流入や円環溝から外部への流出が確認された。溝深さ 50, 100 μm と深くなるにつれて、溝内で周方向に平行に渦を描いて滞留する流れが顕著になり、溝深さ 200 μm では渦の中心に気泡とみられる領域が現れた。この気泡はしゅう動している間安定して溝内部に存在し続けた。

### 3.2 数値解析結果

円環深溝まで連通した半径深溝について、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。流線とともに流速を色で表した。赤色は流速が速く青色は流速が遅いことを示している。すべての溝深さにおいて、半径深溝の上面 (相手面近傍) 領域に相手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相手面回転方向と逆方向へ生じる流れが溝深さ 50, 100, 200 μm で顕著に確認された一方、溝深さ 25 μm ではわずかに認められるのみであった。

Table 1 Experimental observation results and analysis results



### 3.3 実験結果 (逆レイリーステップ部まで連通した半径深溝の場合)

逆レイリーステップまで連通した深さ 50 μm の半径深溝について、軸回転数 600 rpm(0.6 m/s), 1500 rpm(1.5 m/s)における実験結果を Table 2 に示す。3.1 節と同様に、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。

実験結果から半径深溝領域にて気泡の存在が確認され、しゅう動速度の違いによって気泡の挙動が異なった。軸回

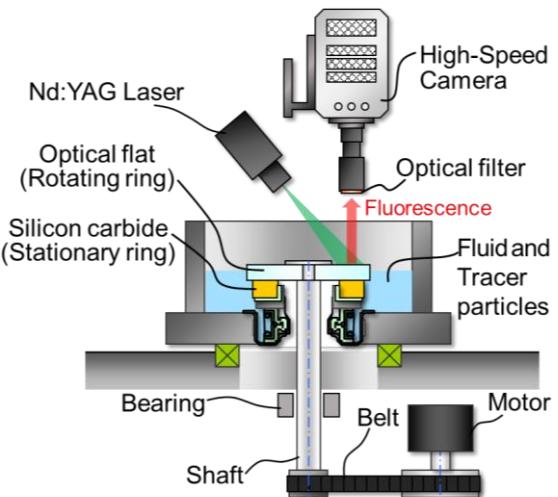


Fig. 2 Experimental rig

軸回転数 600 rpm(0.6 m/s)では逆レイリーステップ終端部から下流端まで水が連通している、半径深溝内周側にて小さな気泡が断続的に発生し、水と共に周方向に渦を描きながら、円環深溝下流や半径深溝外部へと排出される様子が断続的に確認された。軸回転数 1500 rpm(1.5 m/s)では半径深溝の内周から外周にかけて大きな気泡が発生し、円環深溝や半径深溝外部へ気泡がちぎれて排出される様子が断続的に確認された。どちらのしゅう動速度においても、円環深溝上流より気泡が流れてくる様子は確認されなかった。

#### 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。溝深さ 25, 50, 100  $\mu\text{m}$  の実験結果および CFD 解析結果において、Table 1 よ

り試験機上側から観察した深溝内の流れは定性的に一致することが確認された。実験で使用したレンズの被写界深度は絞り開放時でも深溝深さを上回ってしまうため、実験の様子から高さ方向の流れの位置関係を把握することは困難であるが、上から観察した流れが一致していることから、高さ方向の流れも CFD 解析結果と定性的に一致していると判断できる。溝深さ 200  $\mu\text{m}$ において実験と CFD 解析の結果が一致しなかった要因は、実験で半径方向深溝内に生じた気泡によるものと考えられる。CFD 解析において溝内に生じた、周方向に平行に渦を描いて滞留する流れは、上面領域の流れは流速が速く底面領域の流れは流速が遅かった。これは上面の流れは相手面の回転によって順方向に生じた流れのためで、底面の流れは逆方向であったためと考えられる。

逆レイリーステップまで連通した半径深溝における流れについて考える。円環深溝下流や半径深溝外部へ断続的に排出され続けたにも関わらず、半径深溝内に気泡は存在し続けた。このことから、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。円環深溝上流より気泡が流れてくる様子は確認されなかったため、しゅう動面内周側もしくは逆レイリーステップ部のキャビテーション領域から円環深溝へ気泡が流入している可能性が考えられる。

実験より深溝の深さによっては溝内に気泡が発生す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、気泡が生じることは流体の導入を妨げる懸念があり、表面テクスチャメカニカルシールの設計の上では気泡の発生しにくい条件にすることが望ましいと考えられる。

#### 5. 結論

表面テクスチャメカニカルシールについて、4種類の深さの深溝において流体の流れの可視化試験を行い、溝深さ、しゅう動速度、圧力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) 表面テクスチャメカニカルシールにおいて、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。
- (2) 表面テクスチャメカニカルシールにおいて、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した。また、溝深さによっては深溝内に気泡が生じ、安定して深溝内に存在し続けた。
- (3) 逆レイリーステップ後端の深溝において、逆レイリーステップもしくは内周側から気泡が侵入している可能性が示唆された。また、侵入した気泡がしゅう動面外周や円環深溝へ排出される様子が観察された。

#### 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) 中原：流体油膜の挙動 —キャビテーション—, 潤滑, 26, 3, (1981) 146.
- 4) 大津：潤滑におけるキャビテーション —キャビテーションの成長現象—, トライボロジスト 58, 6 (2013) 373.
- 5) S. Makishima, M. Itadani, Y. Tokunaga & J. Sugimura: Variation of Cavitation Pressure with Liquid and Operating Conditions in Mechanical Seals, Tribology Online, 18, 6 (2023) 436-443.
- 6) 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
- 7) 板谷・福原・徳永・上村：トライボロジー会議予稿集 2016 新潟, D31
- 8) 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
- 9) F. R. Menter: Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, AIAA Journal, 32, 8 (1994) 1598-1605.

Table 2 Experimental observation results

