

表面テクスチャメカニカルシールにおける気液界面挙動の解析

Analysis of gas-liquid interface behavior in surface textured mechanical seals

イーグル工業（正）*内田 健太（正）王 岩（正）井村 忠繼（正）徳永 雄一郎

九工大（非）渕脇 正樹

Kenta Uchida*, Ou Iwa*, Tadatsugu Imura*, Yuichiro Tokunaga*,

Masaki Fuchiwaki**

*Eagle Industry Co., Ltd., **Kyushu Institute of Technology

1. 緒言

メカニカルシールは、ばねなどによって軸方向に動くことができるシールリング、および動かないメイティングリングから構成され、軸に垂直な相対的に回転するシール端面において流体の漏れを制限する密封装置である。メカニカルシールには、高い密封性能と潤滑性能が要求される。しかし、潤滑性を向上すべくメカニカルシールのしゅう動面間に流体膜を形成すれば、摩擦抵抗の低減が図れるが、隙間が生じ、流体が漏れやすくなる。一方、隙間を小さくすれば、漏れは少なくなるが、摩擦抵抗が増大する。この二律背反を解決するため、徳永らは表面テクスチャリング技術を用い、密封および潤滑機能を有する溝（以下、表面テクスチャ）を付与し、トルク低減と高密封性の両立を実現した^{1, 2)}。表面テクスチャリング技術における一例として、木村らは気液ハイブリッド潤滑型メカニカルシールを提案した³⁾。このメカニカルシールは、しゅう動面の密封側に配置されたレイリーステップにより、低速領域では液潤滑となる一方、漏れ側にスパイラル溝を配置することにより、高速領域では空気を吸い込み浮上し、気体潤滑となる。試験結果により、幅広い回転数域において低摩擦を示したことが報告されている。このようなメカニカルシールでは、回転数や荷重などの条件によってしゅう動面における気液界面の位置が変化するが、その挙動についてはまだ十分に解明されていない。本研究では、気液界面位置の推定を目的とした第一段階として、LIF（Laser Induced Fluorescence）法を用いた膜厚測定試験における膜厚と、流体潤滑計算によって推定される膜厚を比較した後に、しゅう動面の可視化試験結果とCFD（Computational Fluid Dynamics）における気液界面位置の整合性の確認を行った。

2. 表面テクスチャ形状

表面テクスチャ形状の概略図をFig. 1に示す。しゅう動面は内径19.0mm、外径27.4mmである。密封側の外周側にレイリーステップ、円環深溝および流体導入用の半径溝を配置し、漏れ側の内周側にスパイラル溝を配置した。

3. 評価試験

3.1 試験装置および試験条件

試験装置の概略をFig. 2に示す。表面テクスチャメカニカルシールの固定環が、ハウジング中央部に鉛直方向上向きに設置される。一方、光学ガラス基板（合成石英）が金属製シャフトの端面に固定されており、表面テクスチャメカニカルシールの固定環しゅう動面に対し任意の荷重で設置され、モータにより任意の回転数で駆動される。試験条件として、外周圧は0.05MPaGを与える、回転数は500rpm、1000rpm、1500rpm、2000rpmとした。荷重は15Nおよび25Nで試験を実施した。

3.2 膜厚測定試験方法

LIF法は、蛍光色素を溶解させた液膜にレーザ光（励起光）を照射し、放出される蛍光を利用した膜厚測定方法である。励起光源には、波長532nmの半導体レーザを使用した。レーザ光は、装置側面方向から入射され、ダイクロイックミラーにより鉛直方向下向きへ光学顕微鏡と同軸でしゅう動面へ入射される。流体は、0.05wt%の蛍光色素（Rhodamin6G）を溶解させたイオン交換水を用いた。レーザ光により励起された蛍光は、ダイクロイックミラーおよびバンドパスフィルタ（中心波長550nm、透過幅±10nm、透過率40%）により蛍光波長以外の成分を除去した上で、CMOSカメラで撮影した。回転試験前に、スパイラル溝部へレーザを照射し、スパイラル溝深さを得られた蛍光の光量値で除することで、単位光量あたりの膜厚値を求め、校正値とした。

3.3 しゅう動面可視化試験方法

ハロゲン光源の白色光を、鉛直方向下向きへ光学顕微鏡と同軸でしゅう動面に照射し、ガラス上面からCMOSカメラ

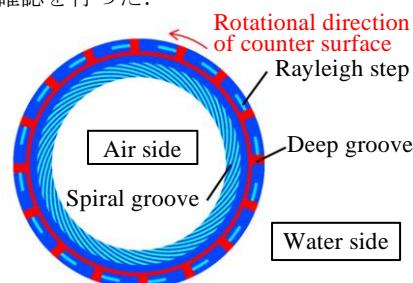


Fig. 1 Surface texturing shape

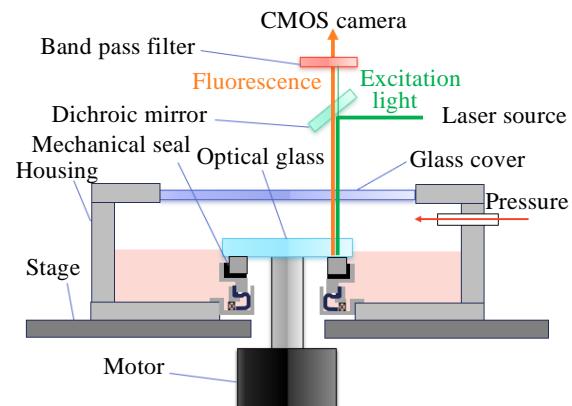


Fig. 2 Experimental rig

ラで撮影することで、しゅう動面における流体の挙動を観察した。

4. 数値解析条件

4.1 流体潤滑計算条件

表面テクスチャによる膜厚を評価するため、定常、定粘性、非圧縮のレイノルズ方程式を有限差分法により計算した。試験条件と同様に、しゅう動面外周側の境界条件を 0.05MPaG、内周側の境界条件を 0MPaG とした。流体は水(25°C)を用いた。キャビテーション領域の算出には Elrod のアルゴリズムを用い、キャビテーション圧力は-0.01MPaG とした。気液界面の移動により、スパイラル溝に液がない状態となることが予測されたため、Fig. 1 の形状に加えて、深溝より内周側をスパイラル溝のない平坦部とした形状の 2 種類で、計算を実施した。計算により求めた圧力分布をしゅう動面において積分し、押しつけ荷重と釣り合うまで膜厚収束計算を実施し、各試験条件における膜厚を求めた。

4.2 CFD 解析条件

ANSYS CFX 2022 R2 により CFD 解析を実施した。CFD における解析領域のモデルを Fig. 3 に示す。CFD 解析における膜厚は流体潤滑計算により求めた値を適用した。気液界面を評価するため、解析ドメインは円環溝より内周側のみとした。スパイラル溝 1 本分のみを抜き出して計算し、隣接箇所は周期境界条件とした。モデル外周部(円環溝内周部)は零圧気圧力と同じ 0.05MPaG の境界条件とした。解析流体は水と空気の二相流とし、外周側境界を水 100%、内周側境界を空気 100% と設定した。表面張力や気体の圧縮性は考慮していない。

5. 結果および考察

流体潤滑計算により求めた膜厚(スパイラル溝あり/なし)の結果を Fig. 4 に示す。また、膜厚測定試験で得られた結果を同図にプロットする。膜厚測定試験では、回転数を 500rpm から 2000rpm まで 500rpm ずつ段階的に変化させ、気液界面が安定した時の膜厚を測定値とした。しゅう動面が全て液で満たされている回転初期では、試験で計測された膜厚はスパイラル溝ありの計算結果と近い値となっている。一方、空気の吸い込みにより、しゅう動面に気液界面が形成された後は、膜厚の試験計測値が低下し、スパイラル溝なしの計算結果と近い値となっ

た。前述を裏付ける結果として、可視化試験によるしゅう動面の可視化画像を Fig. 5 に示す。可視化試験においても、膜厚測定試験と同様に段階的に速度を変化した。気液界面が安定した状態での位置を、画像中に赤い点線で示す。回転数 500rpm の回転初期は、スパイラル溝を含むしゅう動面全体が液で満たされているが、時間の経過に伴いスパイラル溝が内周側の空気を吸い込み、気液界面を形成する様子が観察された。安定した気液界面が形成される条件下では、スパイラル溝の中は液のない状態となっている。そのため、スパイラル溝による動圧が低下した結果、Fig. 4 に示す膜厚の試験測定値は、スパイラル溝なしの計算値と近い値となったと考えられる。これらの結果から、CFD 解析における膜厚は、スパイラル溝なしの流体潤滑計算から得られた値を適用することが妥当であると確認された。

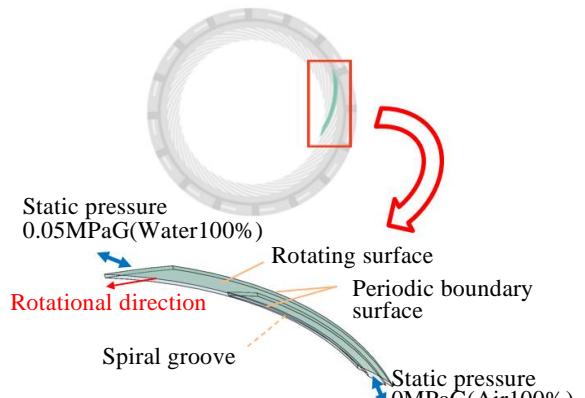


Fig. 3 CFD model and boundary conditions

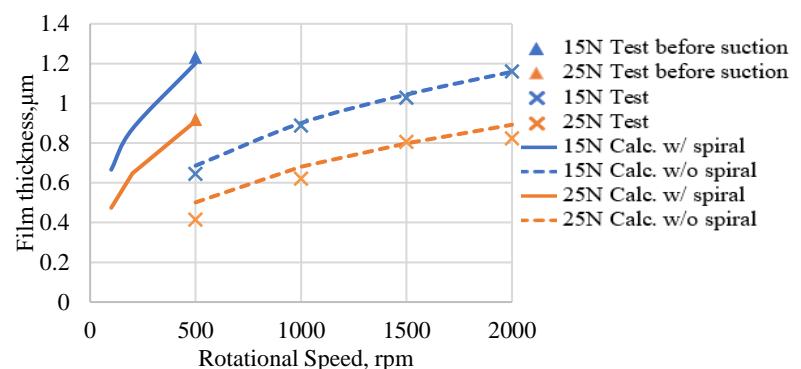


Fig. 4 Result of film thickness measuring test and Calculation.

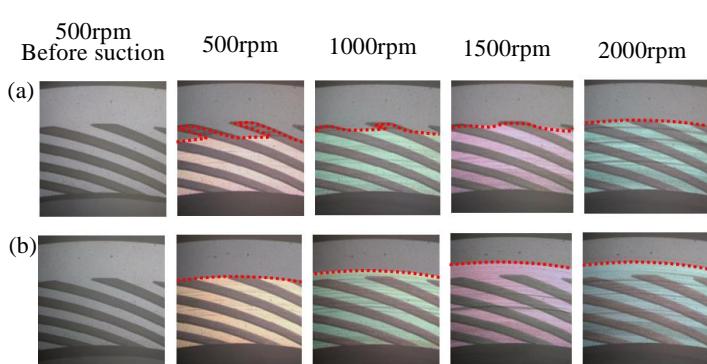


Fig. 5 Result of visualized sliding test (a)15N, (b)25N

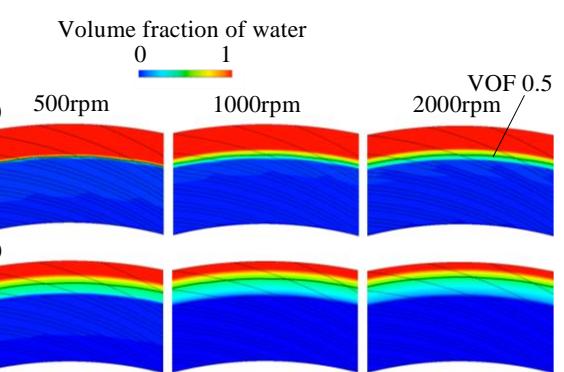


Fig. 6 Distribution of water volume fraction calculated by CFD (a)15N, (b)25N

しゅう動面に形成される液膜の中間面における水の体積分率の分布（以下、気液分布）を Fig. 6 に示す。図中の赤い領域が水が多い領域であり、青い領域が空気が多い領域である。Figure 5 の可視化試験で観察された気液界面位置と、Fig. 6 の CFD で求めた気液分布を比較すると、回転数の増加に伴って気液界面が外周側にシフトする傾向や、荷重が大きい方が気液界面が外周側に位置するという傾向が定性的に一致している。しゅう動面幅に対する気液界面の位置の割合（しゅう動面内径を 0%，円環溝内径を 100% とする）について、可視化試験および CFD の結果を Fig. 7 に示す。CFD における気液界面位置は、Fig. 6 の体積分率が 0.5 となる位置と仮定した。

CFD の気液界面位置は、試験結果と比較してしゅう動面幅比で約 6~14% 外周側に位置している。CFD における気液界面位置の推定精度を高めるためには、本解析では考慮していない表面張力などの影響を加味する必要がある。

6. 結言

表面テクスチャメカニカルシールのしゅう動面における気液界面位置の推定を目的とした第一段階として、流体潤滑計算と膜厚測定試験における膜厚値を比較した後に、CFD と可視化試験において気液界面位置の比較を行った。結果から、気液界面がしゅう動面内に形成されている場合における膜厚測定値は、スパイラル溝なしで実施した流体潤滑計算の膜厚と定量的に一致していることが分かった。また、流体潤滑計算の膜厚値を適用した CFD によって得られた気液分布と可視化試験での気液界面位置は、回転数の増加や荷重の増加に伴って、気液界面が外周側に移動するという点において定性的に一致した。

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-, トライボロジスト第 58 卷 第 2 号(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-, トライボロジスト第 60 卷第 5 号(2015) 332.
- 3) W. KIMURA, H. KATORI, R. DIRCKS & Y. TAKIGAHIRA : Realization of Ultra-High Speed, Zero-Leakage and Low-Friction Textured Mechanical Seals by Combining Liquid and Gas Lubrications – Gas Liquid Hybrid Face, Proc. 20th International Sealing Conference Stuttgart (2018) A6.

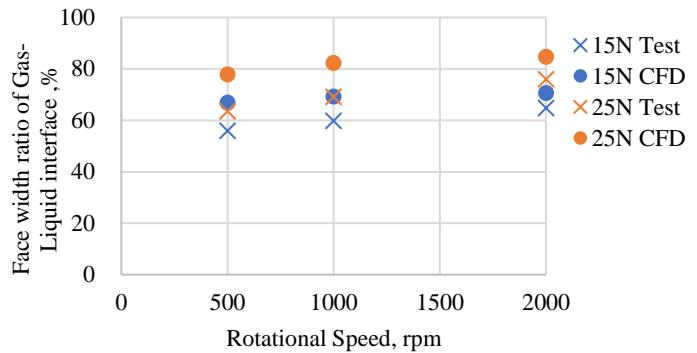


Fig. 7 Face width ratio of gas-liquid interface