

メカニカルシールにおけるキャビテーション圧力に及ぼす密封液種および溶存気体の影響 Effect of Sealing Liquid Type and Dissolved Gases on Cavitation Pressure in Mechanical Seals

イーグル工業株式会社（正）板谷 壮敏 （正）*巻島 創 （正）上村 訓右

九州大学（正）杉村 丈一

Masatoshi ITADANI*, So MAKISHIMA*, Norio UEMURA*, Joichi SUGIMURA**

*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^{1,2)}を提案しており、密封と潤滑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。これらの密封機構部では、拡がり隙間部において発生する負圧の影響により生じるキャビテーションを利用している。このキャビテーションの領域と圧力がメカニカルシールの密封性能を決定するため、その正確な見積りは設計において非常に重要である。

キャビテーションは、溶存空気量の違いにより、密封流体が水の場合は蒸気性キャビテーションが、油の場合は気体性キャビテーションが主体になるとされている³⁾が、その圧力は、流体の種類、温度、表面張力、負圧溝の形状、しゅう動速度、液膜厚さ等のしゅう動条件に依存すると言われており^{4,5)}、推定は非常に困難である。筆者らは、これまでに、逆レイリーステップを配置したメカニカルシールを用いて実験を行い、蒸留水中においてキャビテーションの圧力が逆レイリーステップの溝形状やしゅう動速度の影響を受けること⁶⁾、キャビテーションの圧力が最も低下した場合は蒸留水の蒸気圧に一致する一方、流体の種類によってこの特性が異なることを明らかにした⁷⁾。

本報では動粘度の近い4種類の密封流体を用いてしゅう動実験を行い、液種や溶存空気量がキャビテーション圧力に及ぼす影響について調査したので報告する。

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、粗さ $Ra0.005 \mu m$ の光学ガラス基板（合成石英）を用い、固定環には、粗さ $Ra0.01 \mu m$ の炭化ケイ素（SiC, silicon carbide）を用いた。しゅう動面内径は $\phi 32.4mm$ 、面幅 $3.6mm$ に設定した。テクスチャ形状の概略図を Fig. 1 に示す。しゅう動面の外径側に潤滑機構として、幅 $1.5mm$ 、深さ $6.0 \mu m$ のレイリーステップを4等配、流体導入のため幅 $300 \mu m$ 、深さ $200 \mu m$ のV字深溝を4等配、しゅう動面の内周側に密封機構として、幅 $1.4mm$ 、深さ $5.5 \mu m$ 、周方向長さ 74° の逆レイリーステップを4等配、レーザー加工により固定環側しゅう動面にそれぞれ付与した。

固定環はゴム製ガスケットを介して金属ケースで支えられ、ばねにより荷重 $47N$ で回転環に押し付けられる。逆レイリーステップ溝には、Fig. 2 に示す直径 $\phi 0.26mm$ のしゅう動面にほぼ垂直な圧力測定用穴を、溝始端から 8° の位置に1か所設け、その直下に測定レンジ $350kPa$ 、直径 $\phi 3.8mm$ のダイアフラム型圧力センサを配置した。また、しゅう動面近傍の温度を測定するため、圧力センサの軸対称位置に K 熱電対を配置した。

2.2 実験装置

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キャビテーションを観察し、同時にキャビテーション圧力を測定した。実験装置の概略図を Fig. 3 に示す。回転環は軸に固定され回転しゅう動する。通常、メカニカルシールの内側は空気であるが、この場合、内側の空気を吸い込むことでしゅう動面に剥離キャビテーションが生じ、キ

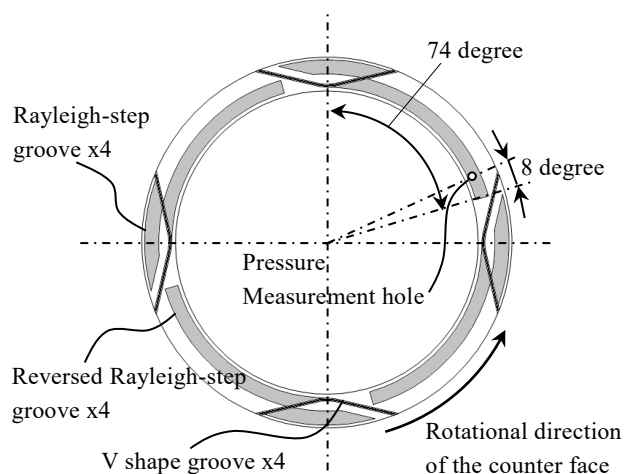


Fig. 1 Structure of the sliding surface

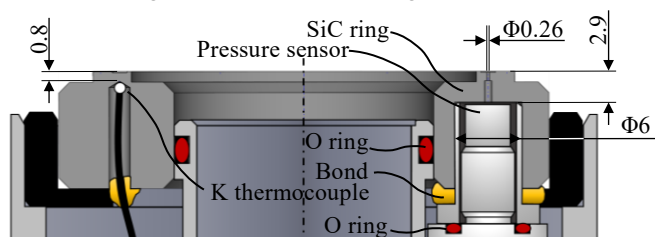


Fig. 2 Hole and sensors for pressure measurement

キャビテーション圧力に影響を及ぼす可能性があることを前報で報告した⁷⁾。そこで、本研究では剥離キャビテーションが生じないように、金属ケース側面には貫通穴を設け、固定環の内外を密封流体で満たした。なお、固定環の内周側にはリップシールとOリングを取り付けて密封した。固定環のしゅう動面はガラス越しにCMOSカメラで撮影した。圧力センサは雰囲気温度25℃～100℃、0.03kPa(abs.)と101kPa(abs.)の二点でキャリブレーションを行った。また、実験中の密封流体の溶存酸素量を酸素濃度計で測定し、ヘンリー則から溶存空気量に換算した。

2.3 実験条件

密封流体にはポリアルファオレフィン (PAO)、ジメチルシリコンオイル (PDMS)、ポリオールエステル (POE)、ポリアルキレングリコール (PAG) の4種を用いた。各密封流体の特性をTable 1に示す。なお、溶存空気量は測定によって得られた値とした。圧力は大気圧とし、液温は35～45℃の範囲で管理した。

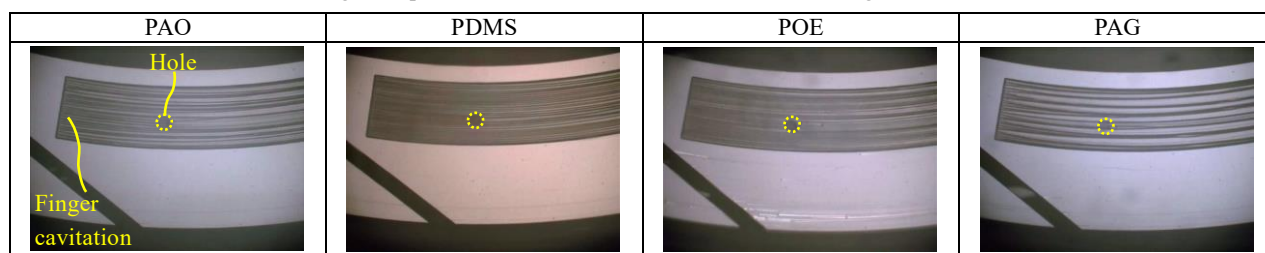
まず、実験1として、エアーポンプにより空気を30min密封流体に送り込みバブリングし、12h以上静置して空気飽和させた密封流体を用い、軸回転数を500～1500rpm（しゅう動速度0.94～2.8m/s）の範囲で変化させ、キャビテーション圧力および溶存酸素量の測定を行った。

次に、実験2として、実験装置をカバーで密封し、真空ポンプにより1kPa(abs.)に減圧して密封流体の脱気を12h以上行った後、カバーを外して大気圧下とし、軸回転数1500rpm（しゅう動速度2.8m/s）にてキャビテーション圧力および溶存酸素量の測定を行った。

2.4 実験結果と考察

いずれの実験においても、しゅう動開始直後より逆レイリーステップ溝部にフィンガーキャビテーションが発生し、圧力測定穴を超えて溝全体に広がり、キャビテーション領域で満たされた。実験1と2（溶存空気量の違い）、密封流体の種類によるキャビテーション形態の違いはほとんど認められなかった。Fig.4に、実験1、しゅう動速度2.8m/s、開始5min以上経過後における各密封流体のキャビテーションの観察像を示す。

Fig. 4 Experimental observation results of cavitation region at 2.8m/s



実験1について、いずれの実験においても、キャビテーション圧力はしゅう動開始後、時間経過とともに指数関数的に低下し、数分後には一定値に安定した。Fig. 5に安定後のキャビテーション圧力としゅう動速度の関係を示す。しゅう動速度の増加に応じてキャビテーション圧力が低下した。各しゅう動速度に対するキャビテーション圧力は、密封流体の種類によって若干異なり、PAG>PDMS>PAO>POEとなった。なお、測定したしゅう動面近傍温度は、全ての実験において41～50℃の範囲内であり、しゅう動発熱の影響はほとんどない。本実験における密封流体の飽和蒸気圧はいずれの条件においても1kPa以下であることから、本実験において生じたキャビテーションは気体性キャビテーションが主体であると考えられる。

キャビテーション気泡中の気体量は、気泡の周囲の密封流体から絶えず放散され時間経過とともに増加し、キャビテーション圧力はいずれ密封液体の圧力に等しくなるはずである。しかし、本実験結果においては、それよりも低い圧力で安定した。本研究のモデルでは、逆レイリーステップ溝始端か

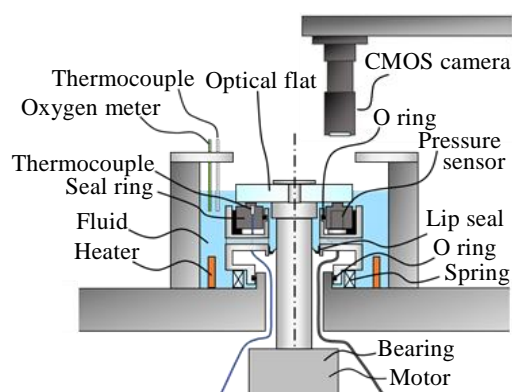


Fig. 3 Experimental rig

Table 1 Characteristics of test fluids

| Fluid | Kinematic Viscosity (mm ² /s) | Vapor pressure (kPa) | Air dissolution (mg/L) | Polarity |
|-------|--|----------------------|------------------------|-----------|
| PAO | 19.0 @ 40°C | < 0.002 @ 100°C | 115 @ 23°C | Non-polar |
| PDMS | 15.6 @ 40°C | < 0.013 @ 220°C | 185 @ 23°C | Non-polar |
| POE | 19.0 @ 40°C | < 0.013 @ 20°C | 151 @ 23°C | Polar |
| PAG | 18.8 @ 40°C | — | 93 @ 23°C | Polar |

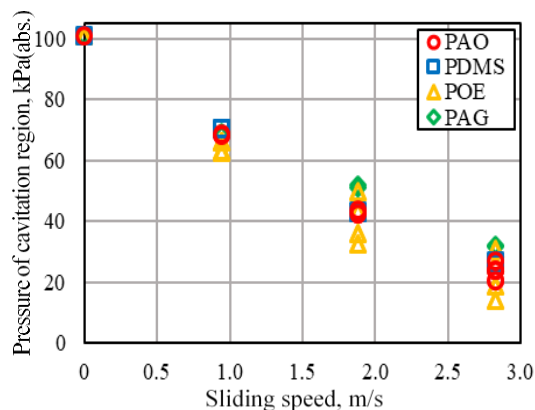


Fig. 5 Pressure measurement result

ら気体が放散されると同時に、キャビテーション気泡の後端の V 字深溝で、気泡から気体が分離し排出されていると考えられる。しゅう動速度が、この放散と分離排出のバランスに影響を及ぼし、キャビテーション圧力が変化したものと考えられる。

実験 2 について、Fig. 6 に、脱気した PAO を密封流体に用いて軸回転数 1500rpm (2.8m/s) で 18 分間回転しゅう動させた時の、キャビテーション圧力、しゅう動面近傍温度、溶存空気量の時間変化を示す。実験 1 と同様に、キャビテーション圧力はしゅう動開始直後、時間経過とともに指数関数的に低下した。しかし、最小値約 9kPa(abs.)を示した後は緩やかな上昇に転じ、圧力は約 21kPa(abs.)で安定した。また、溶存空気量については、しゅう動開始後しばらくは 20mg/L 程度で安定していたが、その後上昇を始め、14min 以降は約 75mg/L で安定した。上昇を始めたのは回転環の回転により密封流体が外部の大気と攪拌されたためと考えられる。キャビテーション圧力と溶存空気量は、ほぼ連動するように上昇していることから、溶存空気量がキャビテーション圧力に影響を及ぼしていると考えられる。すなわち、本実験において生じたキャビテーションは気体性キャビテーションが主体であると考えられる。また、PAO 以外の流体においても同様の結果が得られた。なお、本実験条件の範囲内において、キャビテーション圧力が各密封流体の飽和蒸気圧近傍まで低下することはなかった。

Figure 7 に軸回転数 1500rpm (2.8m/s) における、空気飽和させた密封流体におけるキャビテーション圧力の安定値と、脱気させた密封流体におけるキャビテーション圧力の最小値を示す。いずれの密封流体においてもキャビテーション圧力は飽和後よりも脱気後の方が小さくなった。ただし、その圧力差は密封流体によって異なり、Table 1 に示した各流体の溶存空気量とも相関が見られないことから、キャビテーション圧力に溶存空気量が及ぼす影響度は、密封流体の種類によって異なる。

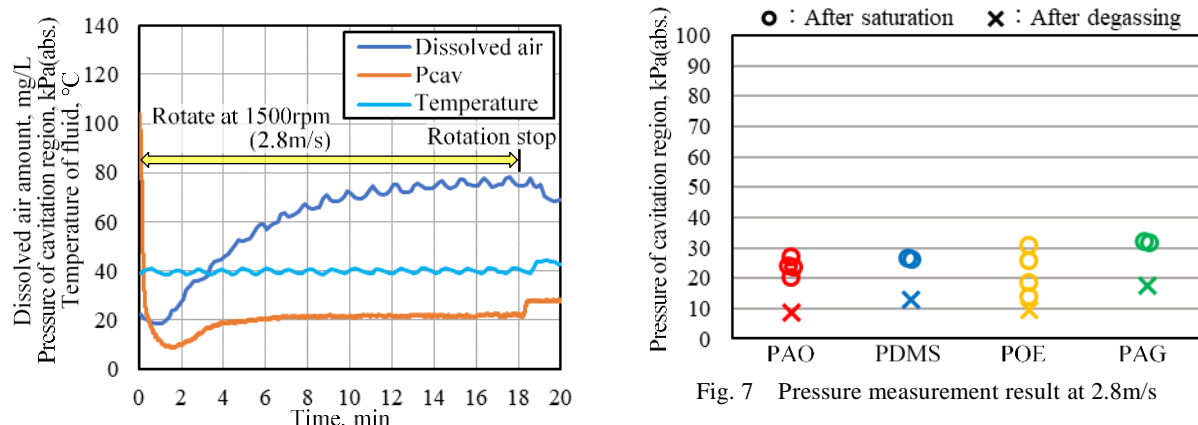


Fig. 6 Pressure measurement result in Degassed PAO at 1500rpm

Fig. 7 Pressure measurement result at 2.8m/s

3. 結論

逆レイリーステップを配置したメカニカルシールを用いて 4 種類の密封流体におけるしゅう動実験を行い、キャビテーションの圧力としゅう動速度、密封流体中の溶存空気量の関係を調査した。その結果、次の事項を明らかにした。

- (1) 空気飽和させた各密封流体におけるキャビテーションの圧力は、しゅう動速度が速くなるほど低下し、しゅう動速度に対するキャビテーション圧力は、密封流体の種類によって若干異なり、 $PAG > PDMS > PAO > POE$ となった。
- (2) いずれの密封流体においても、溶存空気量の低下に応じてキャビテーション圧力が低下することが明らかとなり、密封流体の種類によってその影響度が異なることがわかった。
- (3) 本実験条件の範囲内において、キャビテーションの圧力が密封流体の飽和蒸気圧近傍まで低下することはなかった。このことから、本実験に用いた密封流体におけるキャビテーションは、気体性キャビテーションが主体である。

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-, トライボロジスト第 58 巻 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 巻 第 5 号(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) I. Etsion and L. P. Ludwig : Observation of Pressure Variation in the Cavitation Region of Submerged Journal Bearings, Transaction of ASME, Journal of Lubrication Technology, 104, 1982, 157-163.
- 6) 板谷・上村・杉村：トライボロジー会議予稿集 2021 東京
- 7) 板谷・上村・杉村：トライボロジー会議予稿集 2020 別府