

メカニカルシールにおける摩擦振動計測技術の検討

Investigation of Measurement Methods for Friction-Induced Vibration in Mechanical Seals

イーグル工業・埼玉大（正）*相澤 啓貴 埼玉大（正）長嶺 拓夫

横浜国大（正）中野 健 埼玉大（正）田所 千治

Hiroki Aizawa**, Takuo Nagamine**, Ken Nakano***, Chiharu Tadokoro**

*Eagle Industry Co., Ltd., **Saitama University, ***Yokohama National University

1. はじめに

摩擦振動とは、摩擦力が作用することにより引き起こされる振動であり、機械の運動中に摩擦が生じる機械要素において発生が報告されている。代表的な例として、ブレーキ機構やワイパーなどがあげられる。摩擦振動が機械要素の性能を劣化させる原因となるだけでなく、振動が音としてユーザーに伝わることで騒音として問題となる場合があるため、摩擦振動のメカニズム解明や抑制手法の検討が取り組まれている。

メカニカルシールにおいても、特定の運転条件下で摩擦振動が発生する場合があります。これに起因する鳴きの発生も報告されている。摩擦振動によって引き起こされる騒音問題の発生メカニズムを明らかにするためには、メカニカルシールの振動状態を詳細に計測・解析することが重要である。本報では、メカニカルシールにおける摩擦振動計測の手法について、これまでに実施した内容を紹介する。

2. メカニカルシールに生じる摩擦振動

メカニカルシールは、機械の回転可動部において液体や気体の漏れを制限するための密封装置のひとつである。しゅう動面の摩耗に追従させるために与圧を印可させるスプリングなどを備えたシールリング（S/R）を、対向面のメーティングリング（M/R）に押し付け、面接触により高い密封性と相対的な回転運動の両立を可能としている。

先行研究よりメカニカルシールに生じる摩擦振動は、計測の観点から述べると、以下の特徴がある¹⁾。

- (1) しゅう動面間でスティックスリップが発生しており、それによってメカニカルシールはねじり振動を起こしている。
- (2) メカニカルシールの構造上、二つのリングから構成されており、S/R がねじれ振動を起こす場合と M/R がねじり振動を起こす場合がある。
- (3) 摩擦振動により生じる鳴きの周波数は、ねじり振動している部品のねじり方向の固有振動数と一致する。

上記のねじり振動は、1 個のセンサによる 1 方向からの計測では挙動を正確に捉えることができないため、2 個以上のセンサによる計測が必要となる。また、メカニカルシールは回転運動するリング（回転側リング）と回転運動しないリング（固定側リング）があり、ねじり振動する部分の場合によって異なるため、その状況に合わせた計測方法を構築する必要がある。そして、理想的なねじり振動は面内振動であり、空気を揺らさず音を発生させないため、ねじり振動のねじり変形が面内方向だけではなく面外方向にも生じていると推察される。よって、振動と音の関係解明には、面内振動と面外振動を同時計測し、両者の対応関係を調べる必要がある。これらの点を踏まえて実施した摩擦振動計測法について以下に詳細を示す。

3. 計測方法および実験結果

3.1 固定側リング（S/R）の振動に対する実験系

固定側リング（S/R）を対象とした実験系の構成を Fig. 1 に示す。S/R は、ハウジングに固定されており、回転運動を行わない。よって、有線のセンサによる計測が可能である。Figure 1 の左図において、メカニカルシールの左側には液槽があり、右側には回転系がある。S/R は液槽側にハウジングで固定されている。M/R は回転系側のシャフトに取り付け、シャフトはカップリングとトルクメータを介してモータに接続されている。S/R の振動と音の計測セットアップを Fig. 1 の右図に示す。この計測では、S/R に軽量の治具を付けて、3 軸の加速度センサ 2 個を対称な位置に取り付けることで、S/R の三次元的な挙動の計測を可能にしている。メカニカルシールの側方には指向性マイクロフォンを配置している。今回、摩擦振動を発生させやすくするため、ヘキサデカンでの潤滑を行った。メカニカルシールの回転しゅう動中に加速度センサとマイクロフォンから得られた加速度と音圧の時間軸波形を Fig. 2 に示す。Fig. 2 は、X 方向の加速度、Y 方向の加速度、Z 方向の加速度、音圧の時間軸波形を示している。実験時には摩擦振動が発生しており、鳴きの発生も認められた。Fig. 2 より摩擦振動発生時に X 方向に大きく振動しているのがわかるが、Y 方向と Z 方向にも周期的な振動が認められた。Fig. 3 は、2 個の各加速度センサより得られた加速度を積分して、変位を算出し、三次元グラフに加速度センサの挙動の軌跡を示したものである。これより、メカニカルシールの鳴き発生時にはねじり振動が生じていることが視覚的に確認できる。これは先行研究の傾向と一致している¹⁾。さらに、メカニカルシールに生じているねじり振動は、理想的な面内振動ではなく、Z 軸周りのねじり振動（面内）に加えて変形と Z 軸方向にも振動（面外）が生じていることがわかった。ねじり振動（面内）によって、どのように面外振動が引き起こされているか、メカ

ニカルシールの詳細な挙動の調査が可能となった。

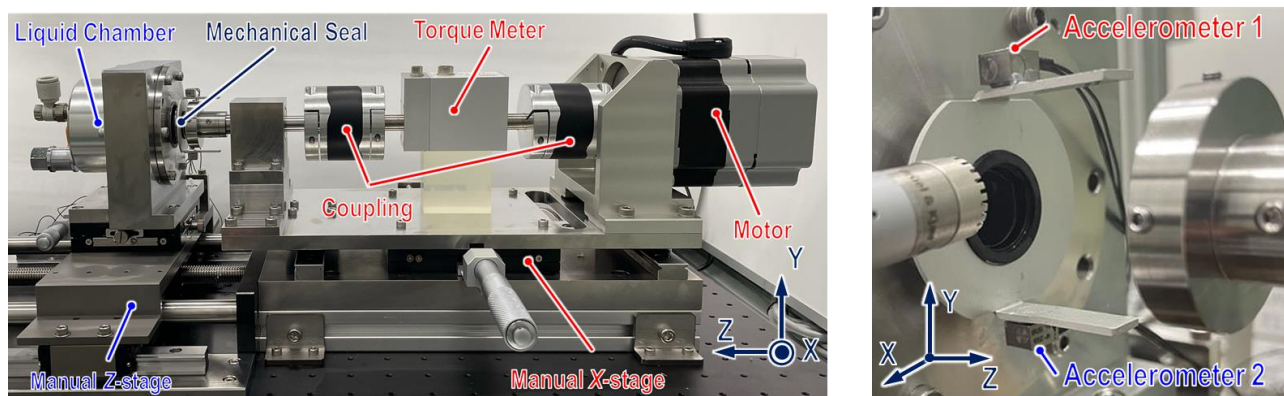


Fig. 1 Experimental setup for the S/R vibrated

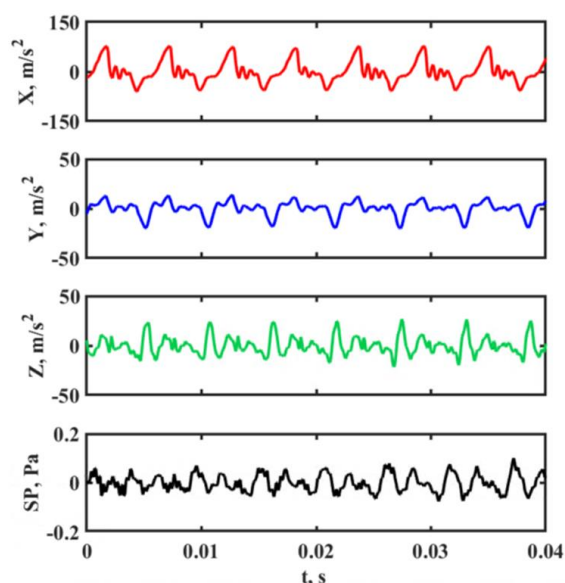


Fig. 2 Temporal change in tri-axis acceleration and sound pressure

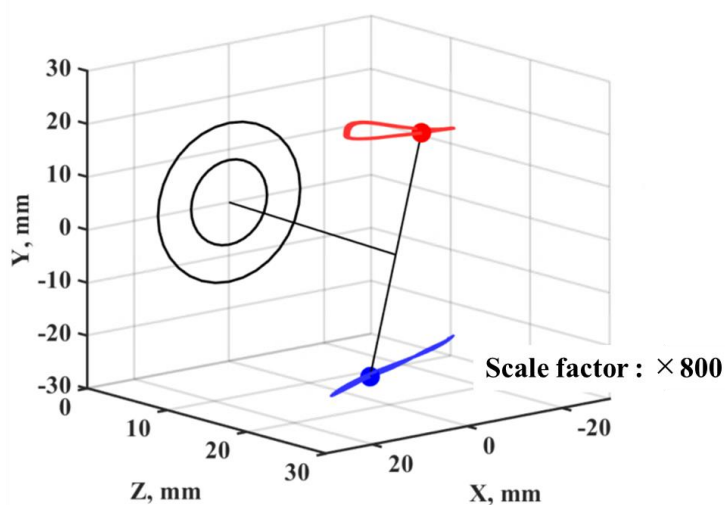


Fig. 3 Trajectory of two accelerometers

3.2 回転側リング(M/R)の振動に対する実験系²⁾

回転側リング(M/R)の振動計測は、回転運動を伴うため有線のセンサによる計測は難しいため、非接触での計測を行った。M/Rの振動を対象とした実験系をFig. 4に示す。Figure 4の左側には、実験で使用したメカニカルシールを示している。M/Rはゴム部品を介して、シャフトに接続するハウジング(Collar)に組み込まれている。Figure 4の右側には計測セットアップを示している。振動と音の詳細な計測を非接触で行うため、高速度カメラ、レーザードップラー振動計、マイクロフォンを用いた同期計測を行った。Figure 5に示すように、メカニカルシールに取り付けた方眼紙を高速度カメラにより撮影し、方眼紙をトラッキング解析することにより円周方向(θ 方向)の変位を計測した。また、レーザードップラー振動計により、半径方向(R 方向)の速度を計測した。レーザードップラー振動計とマイクロフォンはFFTアナライザにより計測し、高速度カメラからトリガー信号をFFTアナライザに送ることで三つの計測機器の時間同期を図った。

本実験系で得られた各時間軸波形をFig. 6に示す。上から順に、高速度カメラの動画をトラッキング解析し得られたM/Rの θ 方向の変位、レーザードップラー振動計により得られたM/Rの R 方向の速度、マイクロフォンより得られた音圧の時間軸波形である。音圧の計測結果に対しては、マイクの距離による時間遅れの補正を行っている。この結果より、本実験系では高速度カメラとレーザードップラー振動計を用い得ることで、非接触でも、高周波かつ μm オーダーの振動を捉えることができ、音圧の時間変化との関係を調べることができた。摩擦振動の発生時には、 θ 方向に1,000 Hzの鋸歯波状の振動が発生しており、しゅう動面間で固着とすべりを繰り返していることが推測される。M/Rが摩擦振動を起こす場合も、ねじり方向の振動の振幅が大きく主な振動と言えるが、 R 方向にも θ 方向に連動した振動が発生しているのがわかる。鳴きの周波数のピークは1,000 Hzと2,800 Hzであり、 R 方向振動の周波数のピークと一致する。回転側リングについても鳴きと面内・面外振動の関係をこのような実験系により確認できた。

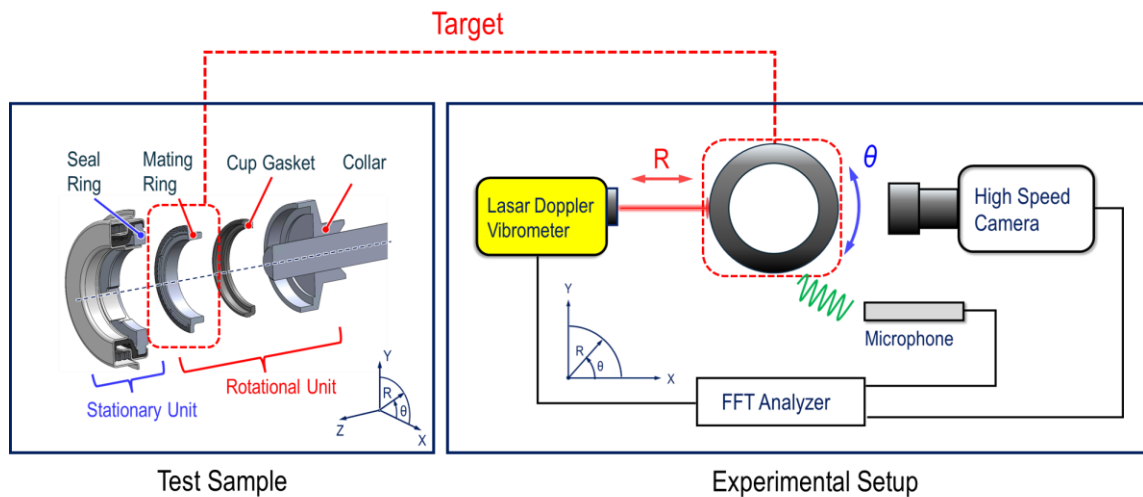


Fig. 4 Experimental setup for the M/R vibrated

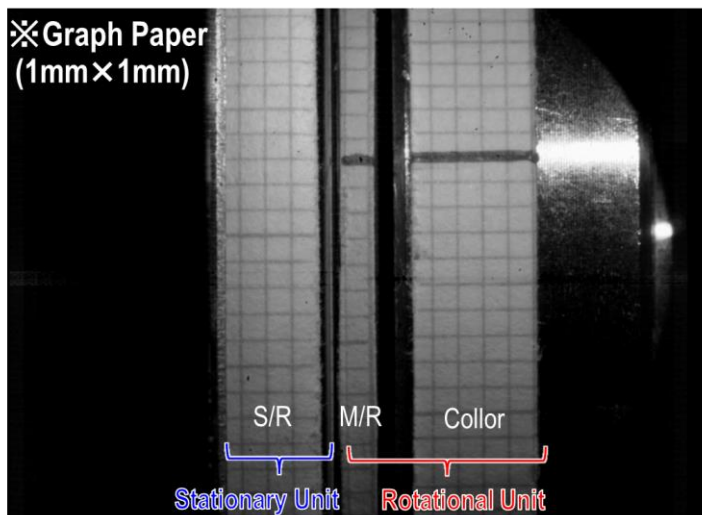


Fig. 5 Snapshot of high speed camera

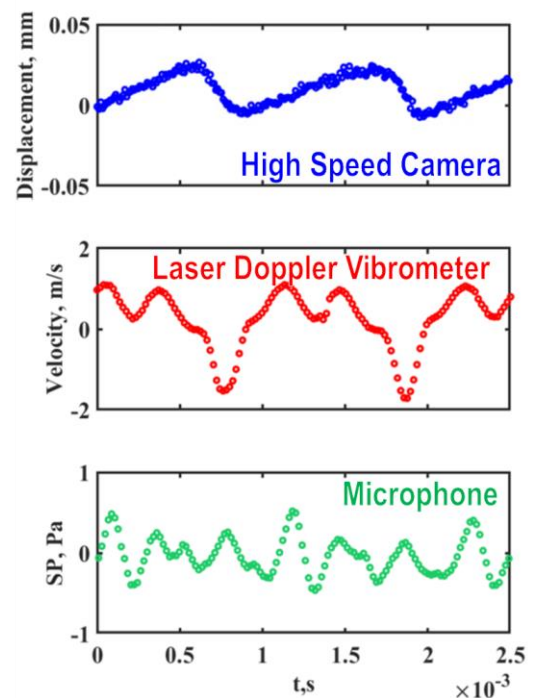


Fig. 6 Experimental results of simultaneous measurement

4. おわりに

摩擦振動によって引き起こされる鳴きの発生メカニズムを明らかにすることを目的とし、これまでの計測手法の検討を行ってきた結果、鳴き発生時のメカニカルシールの挙動を可視化できるようになった。固定側リングの計測系において、加速度センサとマイクを用いて振動・鳴きを計測した。摩擦振動発生時に回転軸周りのねじり振動が最も大きく現れていた。さらに加速度センサの軌跡より、面内振動だけでなく面外振動も引き起こしていることがわかった。回転側リングの計測系では、非接触における振動計測を行った。回転側リング (M/R) の振動を高速度カメラとレーザードップラーにより非接触・同期計測し、ねじりと半径方向の振動、鳴きの関連性を確認した。

また、これらの計測技術は、摩擦振動だけではなく、メカニカルシールの様々な状態変化の検知などへの応用が期待される。メカニカルシールの高性能化・高信頼性化に資するために、今後も新たな計測技術について検討していく。

文献

- 1) Kiryu, K. Yanai, T. Matsumoto, S. and Koga, T., An Analysis of “Ringing” Phenomena on a Water Pump Mechanical Seal (Part III), ASLE Transactions, Vol.31, No.2 (1987), pp269-275.
- 2) 相澤・徳永・田所・長嶺・中野：メカニカルシールにおける異音発生メカニズム解明に向けた高速度カメラによる摩擦振動の可視化，トライボロジー会議予稿集 2022 福井, A5 (2022).