

## 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

Visualization of friction-induced vibration using high-speed camera for elucidating a mechanism of noise generation in mechanical seal

イーグル工業（正）\*相澤 啓貴 （正）徳永 雄一郎

埼玉大（正）田所 千治 （正）長嶺 拓夫 横浜国大（正）中野 健

Hiroki Aizawa\*, Yuichiro Tokunaga\*, Chiharu Tadokoro\*\*, Takuo Nagamine\*\*, Ken Nakano\*\*\*

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

### 1. はじめに

機械要素と振動問題は極めて密接な関係にある。振動により故障や騒音などが発生することはかねてより問題視されてきた。メカニカルシールも振動の影響を受ける機械要素の1つである。メカニカルシールは基本的な構造として、しゅう動面の摩耗に追従してスプリングなどにより軸方向に動くことのできるしゅう動環と動かないしゅう動環から構成されており、相対的に回転する面により流体や気体の漏れを制限する装置である。メカニカルシールに現れる振動問題として、鳴きと呼ばれる異常音の発生がある<sup>1)</sup>。本研究では、異音発生時のメカニカルシールに起きた摩擦振動を高速度カメラで撮影し、さらに音と摩擦振動の同期計測を行い、異音と摩擦振動の関係を調査した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 実験装置

本実験で用いたメカニカルシールの構成図をFig. 1に示す。本実験で用いるメカニカルシールは回転環と固定環で構成されている。回転環はメイティングリング（SiC, 直径:36.3 mm, 以下 M/R）からなり、カップガスケット（ニトリルゴム）を介して、回転治具（以下、Collar）に圧入されている。また M/R にはスパイラルグループのテクスチャ加工が施されている。スパイラルグループは一方の回転方向にのみ圧力を発生させ、その逆回転時には負圧を発生させる。負圧によりしゅう動面が押し付けられ安定的に異音を発生させることを意図した。固定環はシールリング（SiC, 直径:38 mm, 以下 S/R）とスプリングにより構成されている。M/R, S/R, Collar の側面にはそれぞれ方眼紙（1 mm × 1 mm）を貼り付け、メカニカルシールの振動をより鮮明に撮影できるようにした。Figure 2に実験装置の概略図を示す。高速度カメラは図内 Z 方向と垂直となり、メカニカルシール側面がレンズ正面に来るよう設置した。また、撮影した動画はトラッキング解析を施し、Collarに対する M/R の  $\theta$  方向（ねじり方向）の相対変位を算出した。M/R の R 方向（半径方向）の振動を計測するためのレーザードップラー振動計は高速度カメラと 180° 対称となる位置に、そして異音の音圧を計測するためのマイクロフォンは M/R 外周から 50 mm の位置に設置した。レーザードップラー振動計とマイクロフォンは FFT アナライザに接続し計測を行った。レーザードップラー振動計は速度を計測するため、計測結果を積分し変位に変換し評価する。同期方法としては、高速度カメラから FFT アナライザにトリガ信号を出力することで同期計測を行った。得られた試験結果は、マイクロフォンの距離による遅れ、および FFT アナライザのデジタル信号処理による遅れについて同期のため時間補正をそれぞれ行った。

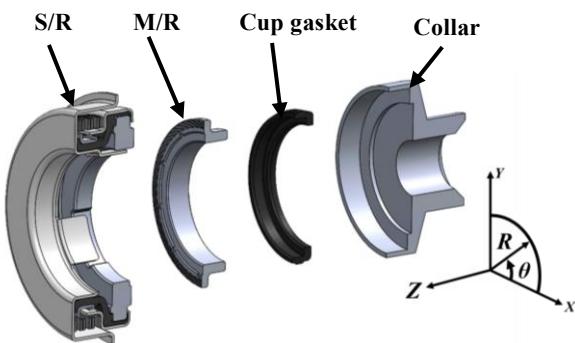


Fig. 1 Configuration of experimental specimen

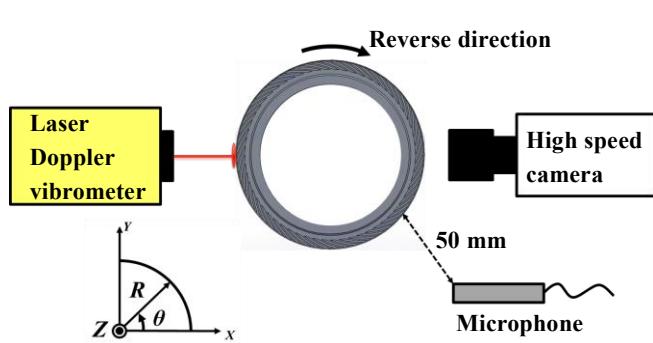


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

#### 2.2 実験条件

実験条件は実使用条件下を想定して、シール流体を LLC(G40, 濃度 50 %), 温度 65 °C, 差圧 0.15 MPa で行い、回転数は 50 rpm とした。高速度カメラのフレームレートは 89,000 fps, 解像度は 512×384（空間分解能：0.05 mm/pixel），マイクロフォンとレーザードップラー振動計のサンプリング周波数は 51.2 kHz で計測を行った。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 高速度カメラ撮影

Figure 3 に高速度カメラ撮影像を示す。左から、S/R, M/R, Collar の順となっている。M/R と Collar の部分が回転をする部分であり、S/R は非回転部分である。まず実験中に「キー」という異音が観測された。異音の周波数を確認すると、基本周波数は 1000 Hz であった。高速度カメラによる撮影より、異音発生時は Fig. 3 右側の Collar はスムーズに回転するのに対して Fig. 3 中央の M/R の部分は S/R に固着とすべりを繰り返すように、カクカクと振動しながら回転する様子を確認した。

#### 3.2 同期試験結果

Figure 4 に計測結果を示す。Figure 4 の横軸は全て時間、(a), (b) および (c) の縦軸はそれぞれ  $\theta$  方向変位、 $R$  方向変位、音圧を示している。 $\theta$  方向の変位がノコギリ波形状をしていることが確認できる (Fig. 4 (a))。ノコギリ波はスティックスリップの特徴の一つ<sup>2)</sup>であり、3.1節の高速度カメラの撮影像から確認しても本試験では異音発生時にしゅう動面間でスティックスリップがおきていることがわかる。また、その振動数は 957 Hz であり、異音の周波数と近い値の振動が起きている。また、異音発生時は  $R$  方向にも振動が起きており、 $\theta$  方向の振動より振幅が 1/10 程小さな振動が起きていることが確認できる (Fig. 4 (b))。

$\theta$  方向がスリップ時に  $R$  方向も大きく振動するような変位の動きが起きているのがわかる。この  $R$  方向変位の周波数は 940 Hz であり、 $\theta$  方向と同様に、異音と近い周波数であった。グラフ (c) より、異音は常に振動しているが、 $\theta$ ,  $R$  方向の変位が大きく落下した直後に音圧の上昇が見られた。これらのことから、メカニカルシールから異音が発生しているとき、 $\theta$  方向変位、 $R$  方向変位の同期した振動が生じていることがわかった。本研究における  $\theta$  方向（ねじり方向）振動は、ねじり振動ととらえることができ、いわゆる面内振動である。面内振動は空気を振動させづらいため、音を発するに至らないと言われている<sup>3)</sup>。よって、今回の異音の原因の一つとして  $R$  方向の振動によるものと推察できる。 $R$  方向の振動は、いわゆる面外振動であり、空気を振動させることが可能である。したがって、今回の現象の主振動は摩擦方向であるねじり方向の面内振動であるが、ねじり方向の振動によって、半径方向にも振動が生じ、その面外振動が音として伝わっていると考えられる。

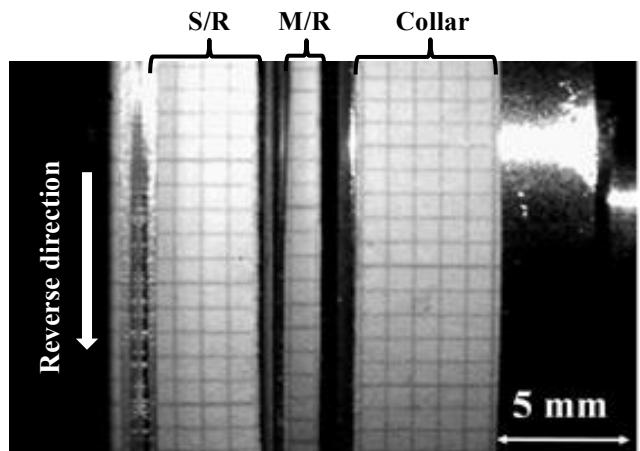


Fig. 3 Snapshot of high speed camera

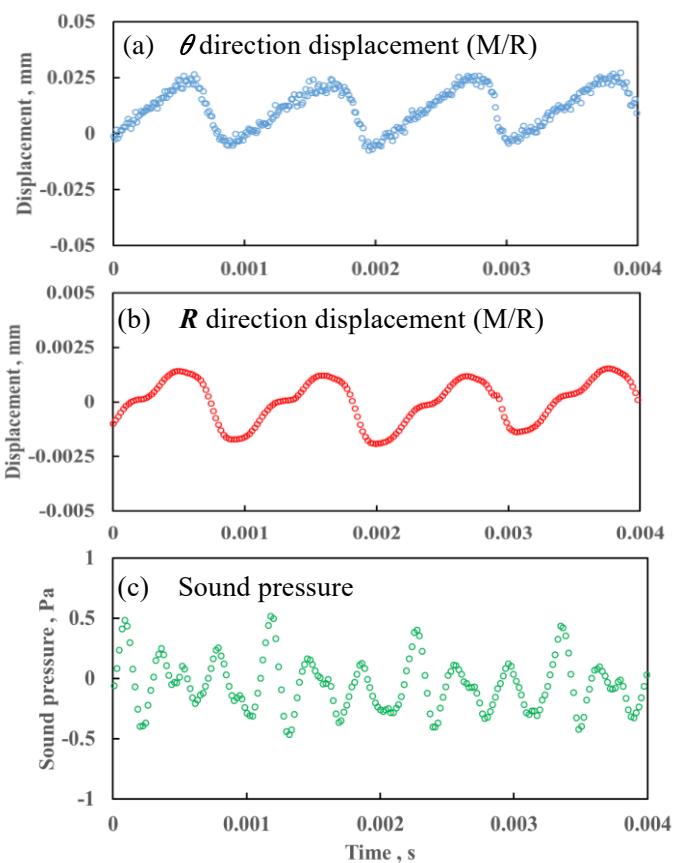


Fig. 4 Experimental results of simultaneous measurement

### まとめ

本研究では、メカニカルシールの異音発生時に高速度カメラによる撮影を行い、それに加えて半径方向の振動と異音の音圧の同期計測を行い、メカニカルシールに起こる摩擦振動と異音との関係を調査した。そのなかで、メカニカルシールがねじり方向に摩擦振動が生じているときに、同様に半径方向にも振動が生じていることが確認できた。さらには半径方向の振動が異音に関係していることがわかり、摩擦振動と異音の関係を確認することができた。

### 参考文献

- 1) 吉柳 健二：メカニカルシールの鳴き現象とその防止に関する研究, PhD Thesis 九州大学, (1990).
- 2) 中野・田所・前川・角：すべり摩擦に現れる振動の対策, トライボロジスト, 61, 7 (2016), 416~422.
- 3) 金本・栗田・大浦・田中・西澤・青木・兼平：ディスクブレーキにおけるディスク面内方向の固有振動と鳴きの発生, 日本機械学会, Dynamic and Design Conference 2016, 104.