B31

相変化を伴う LN_2 環境下の動圧浮上型軸シールの密封性能に及ぼす軸方向加振の影響

The Effects of Axial Excitation on Hydrodynamic Shaft Seals in Cryogenic Nitrogen Environment with Phase Changes

宇宙航空研究開発機構（正）*上杉　宣司　（正）高田　仁志
イーグル工業（正）田澤　与生　（正）井村　忠継　（正）徳永　雄一郎　（非）笠原　英俊
Takashi Uesugi*, Satoshi Takada*
Ato Tazawa**, Tadatsugu Imura**, Yuichiro Tokunaga**, Hidetoshi Kasahara**
*Japan Aerospace Exploration Agency, **Eagle Industry Co., Ltd.

1.　背景

近年，打ち上げコストの削減・打ち上げの高頻度化を目的として再使用型ロケットの開発が行われている．その中でも，エンジン部品の長寿命化は重要な技術課題の一つである．ロケットエンジン用ターボポンプには，高回転で極低温流体を密封できる軸シールが使用されている．軸シールの一種であるメカニカルシールは，回転するメイティングリングにシールリングを押し付けて密封する構造となっている．メカニカルシールは，接触式のシールのため密封性能は高いがしゅう動面が摩耗しやすく，ターボポンプの構成要素の中で特に寿命が短い．つまり，メカニカルシールの長寿命化は，高性能なターボポンプの長寿命化に直結する．そこで，密封性能と長寿命の両立のために，動圧浮上型メカニカルシールが研究・開発されている [1]．ロケットエンジン用として検討が進められている動圧浮上型メカニカルシールは，微細な溝加工を施したメイティングリングが回転することによってしゅう動面間に動圧を発生させ，作動流体の薄膜を形成し非接触状態で作動することが可能な軸シールである．

田澤ら [2]によって，動圧浮上型メカニカルシールは，試験後のしゅう動面で摩耗がほとんどみられないことが報告されている．また，回転数の増加に伴い漏れ量が減少することが確認されており，せん断発熱量の増加によって，しゅう動面間の流体の一部が気化している可能性が示唆されている [3]．さらに，ターボポンプで発生する現象の一つとして軸方向振動が存在しており [4]，実機での使用を考慮すると動圧浮上型メカニカルシールの軸方向振動に対するロバスト性は確認すべき重要な課題である．

そこで本稿では，動圧浮上型メカニカルシールを用いて LN_2 中でシャフトを回転させながら軸方向に振動させた試験を行い，加振時の密封性能の変化としゅう動面内の現象に着目して評価・考察した結果を報告する．

2.　試験

2.1　供試体

動圧浮上型メカニカルシール供試体の模式図を Fig. 1 に示す [3]．メイティングリングしゅう動面に加工した表面テクスチャ形状の模式図を Fig. 2 に示す．高圧の外周側にスパイラル溝，低圧の内周側にポンピング溝が配置されている．スパイラル溝は回転中にしゅう動面を浮上させ摩耗を低減し，ポンピング溝は密封性流体の圧力を減じ，気化を促進することで漏れ量を減少させている．

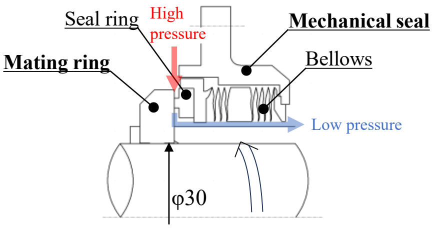

Fig. 1　Test seal

2.2　試験機

試験機の構造を Fig. 3 に示す．本試験機では，2 個の軸受でシャフトを支持し，両端に動圧浮上型メカニカルシールを配置した．供試体は反モータ側のメカニカルシールとし，供試体からの漏れ量をサーマルマス流量計で計測した．シャフトを軸方向に加振できるよう，シャフトとモータはスピンドルを介して接続した．また，軸方向に加振するピエゾアクチュエータは左右 2 か所（180°位相）に配置し，軸方向振動をシャフトに伝達した．アクチュエータの最大振幅は 50 μm であり，軸方向変位はシャフト先端に取付けている渦電流式変位計で測定した．

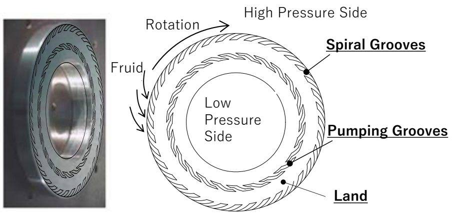

Fig. 2　Surface texture of mating ring [2]

2.3　試験条件

作動流体は LN_2 を使用し，軸受および軸シールの冷却流量は 0.3L/s 以上とした．試験条件は，シール差圧を 0.5 ~ 1.5 MPa，回転数を 5,000 ~ 14,000 rpm，アクチュエータの周波数を 1, 50, 1ω（回転同期） Hz とした．

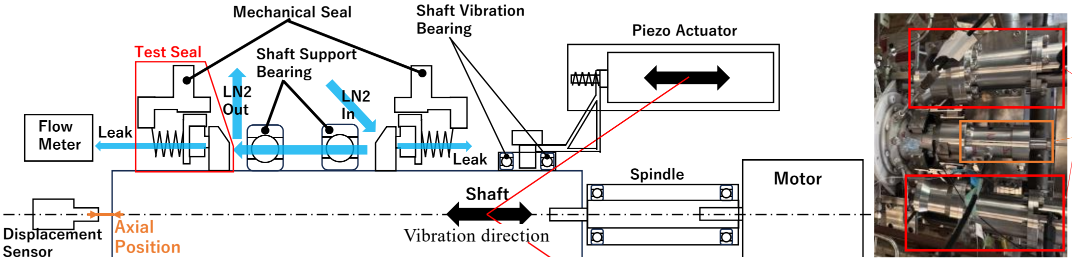

Fig. 3　Rotational Vibration Testing Machine

3.　試験結果・考察

軸方向変位と漏れ量を Fig. 4 に示す．軸方向変位は，メカニカルシールのセット長を基準（0 mm）とし，供試体のベローズを縮める方向（マイナス）に加振した．その結果，加振すると漏れ量が減少する傾向が見られた．各条件で加振前後の漏れ量を加振なしの時の漏れ量とし，加振中に変化した漏れ量（漏れ量が定常になった領域の平均値）との差を漏れ量差分とした（式 1）．Fig. 5 に試験結果と数値解析の結果を示す．実線は供試体の加振なしの時の実験値（左軸），破線は LN_2 が加振なしで相変化を伴わない漏れ量の数値解析値（左軸）である．プロットは，周波数 1 Hz の漏れ量差分の実験値（右軸）である．

$$\Delta Q \;=\; Q_V - Q_B \qquad (1)$$

ΔQ：漏れ量差分，　Q_B：加振なしの漏れ量，
Q_V：加振時の漏れ量

シール差圧 0.5 MPa では，回転数の増加に伴い加振時の漏れ量差分が減少する．シール差圧 1.0 MPa では回転数の増加に伴い加振時の漏れ量差分は増加したが，1.5 MPa では回転数 14,000 rpm 時に漏れ量差分は減少した．

以上の結果より，加振時の漏れ量の減少は，シール差圧が低い，または高回転数で発生すると考えられる．シール差圧が低い場合は，しゅう動面内の圧力が低くなり気体への相変化が発生しやすく，高回転数の場合は，せん断発熱による温度上昇により気化が促進され漏れ量が減少したと考えられる．先行研究からも，せん断発熱によって気化の促進が生じる可能性が示唆されている[3]．気体の割合が多いと，一般的にしゅう動面間距離が定常から変化した際に元の距離に戻そうとする力が弱くなり，しゅう動面間距離が比較的変化しやすい．つまり，加振時にベローズのばね力によりしゅう動面間距離が短くなり，漏れ量が減少したと考えられる．しかしながら，加振による漏れの変化量は，定常時の漏れ流量のわずか 4%以下であり，加振中も安定的に推移していることより，加振によるしゅう動面間距離の変化が極めて小さく，安定した流体膜を維持できていると推測できる．

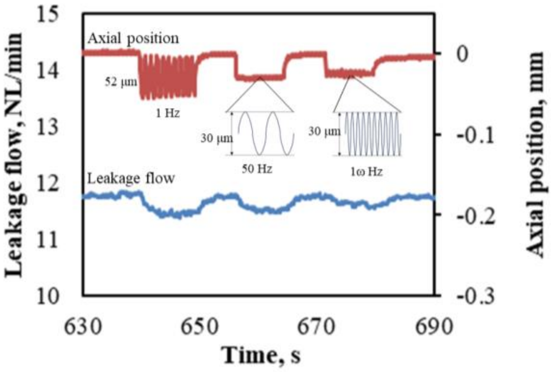

Fig. 4　Leakage flow and axial position with time

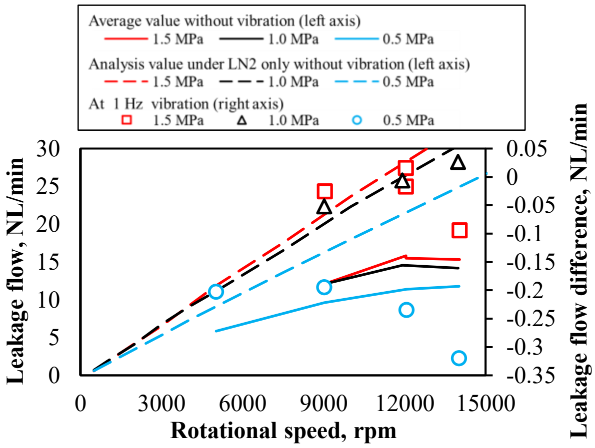

Fig. 5　Leakage flow difference with rotational speed when vibrating

4.　まとめ

動圧浮上型メカニカルシールを用いて，LN_2 中で回転加振試験を行った．その結果，シール差圧が低いまたは回転数が高い条件で，加振時に漏れ量が減少することがわかった．これらの条件では，しゅう動面内の気体の割合が多くなることでしゅう動面間距離が変動しやすい状態となるためメイティングリングとシールリング間の押付け荷重のわずかな変化でも漏れ量に影響を与える．しかしながら，加振による膜厚変化量および漏れの変化量は極めて小さく，加振によるシール性能に及ぼす影響は限定的であり，運転中も安定した流体膜を維持できていると推測できる．

文献

1) 井村ら：極低温流体向け動圧浮上型メカニカルシール技術の適用事例，トライボロジー会議 2021 秋 松江, (2021)
2) 田澤ら：再使用型ロケットへの適用を目指した動圧浮上型軸シールの研究開発（第 4 報）－LCH_4 環境下における実証―，日本航空宇宙学会北部支部 2022 年講演会，(2022)
3) 田澤ら：相変化を伴う極低温流体環境下における動圧浮上型軸シールの密封特性の評価，トライボロジー会議 2023 春 東京, (2023)
4) 長尾ら：ロケットターボポンプにおけるロータの軸方向動的不安定の抑制に関する実験的考察（第一報），ターボ機械, 48, 1 (2020) 193–200.