

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

Evaluation of sealing characteristics of hydrodynamic shaft seals in cryogenic fluid environments with phase changes

宇宙航空研究開発機構（正）*田澤 与生 （正）角銅 洋実 （正）高田 仁志

イーグル工業（正）井村 忠継 （正）徳永 雄一郎 （非）笠原 英俊

Ato Tazawa*, Hiromitsu Kakudo*, Satoshi Takada*

Tadatsugu Imura**, Yuichiro Tokunaga**, Hidetoshi Kasahara**

*Japan Aerospace Exploration Agency, **Eagle Industry Co., Ltd.

1. 背景

近年，世界中で打ち上げコスト削減を目的としたロケットエンジン再使用化の試みが行われている．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では，極低温流体環境下にてメカニカルシールが使用されている．メカニカルシールは接触式シールであり，高い密封性能を持つ反面，運転中に摺動材が摩耗するという特徴を持つ．エンジン部品の中でとりわけ寿命が短いメカニカルシールを長寿命化することは，ロケットエンジン再使用化に大きく寄与すると考えられる．

高い密封性能と長寿命を両立するため，摺動面にテクスチャと呼ばれる微細な溝を施し，回転中に流体力によって摺動面を浮上させる動圧浮上型メカニカルシールの研究が進められている．横山，荒谷らは，動圧浮上型メカニカルシール供試体を用いて LN2，LOX，LH2 中で回転試験を行い，従来型メカニカルシールと比較して摺動材の摩耗が少なくないにも関わらず良好な密封特性が得られたことを報告している¹⁾²⁾³⁾．また，極低温流体環境下における漏れ量が，回転数の増加とともに流体の相変化の影響を受けて変化することが報告されている．

摺動面間の微小隙間において，流体の一部が気化して気液二相化すると，粘性低下による浮上力の低下，密度低下による漏れ質量の減少を引き起こし，密封特性に大きな影響を与える．そのため，流体が気化しやすい極低温流体環境下にて使用される動圧浮上型メカニカルシールの密封特性に対して，流体の相変化が与える影響について解明することは重要であると考えられる．そこで本稿では，動圧浮上型メカニカルシール供試体を用いて LN2，LOX，LH2 中で回転試験を行い，その密封特性について相変化の影響に着目して評価・考察を行う．

2. 試験供試体及び試験条件

本試験で使用する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．メカニカルシールの二次シール部には金属溶接ベローズを用い，極低温に対応可能となっている．メイティングリング摺動面の外周側には，動圧を発生させるためのテクスチャを配置した（Fig. 2 のスパイラル溝）．スパイラル溝は回転中に流体力によって摺動面を浮上させ，摩耗を低減する機能を持つ．近年の研究で，徳永らは内周側にポンピング溝と呼ばれるテクスチャを更に配置することにより，密封流体の圧力を減じ，気化を促進することで漏れ質量の減少を狙った形状に関する，一連の試験結果を紹介している⁴⁾．本研究では流体の相変化に関する事象を単純化するため，スパイラル溝のみを配置することとした．

Table 1 に，各流体における回転試験の試験条件を示す．図中の温度は試験を通しての供試体上流温度を表している．回転数，供試体上流圧力，供給流量を段階的に変え，試験条件が安定したときの供試体からの漏れ量を計測した．

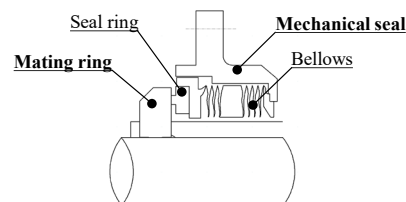


Fig. 1 Test piece of rotational tests

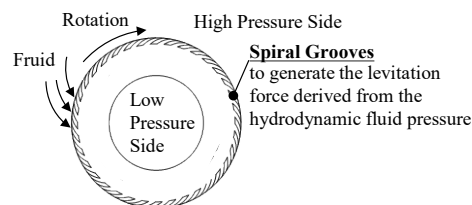


Fig. 2 Surface texture of mating ring

Table 1 Test conditions of rotational tests

| Sealing fluid | LN2 | LOX | LH2 |
|----------------------------|------------|------------|------------|
| Rotational speed, rpm | 26,000 MAX | 20,000 MAX | 35,000 MAX |
| Differential pressure, MPa | 2.0 MAX | 2.0 MAX | 2.0 MAX |
| Temperature, K | 80-100 | 95-110 | 25-40 |

3. 試験結果・考察

Figure 3 に，各流体の差圧 1.0 MPa 時における回転数と漏れ量の関係を示す．図中のプロットは回転試験によって得られた実験値である．また，図中の線は各流体が相変化を伴わずに漏れた際の漏れ量の解析値である．

流体が単相である場合、回転数の上昇に伴い浮上力が増加するため、漏れ量は単調増加する。しかし、すべての流体において、回転数の上昇に伴い漏れ量が減少している部分が見られる。このことは、すべての流体において気化が進み、気液二相化していることを示していると考えられる。また、LH2 において 25,000 rpm 以上で再び漏れ量が増加しているのは、流体が気体単相の状態に近くなったことによるものと考えられる。

次に、せん断発熱によって摺動面間の流体の一部に気化が発生する回転数の推定を行う。Table 2 に差圧 1.0 MPa 時における供試体上流圧力、供試体上流圧力における沸点、供試体上流温度、供試体上流温度における比熱を示す。

まず、せん断応力 τ は、流体の粘度 η 、周速 U 、面間隙間 h を用いて次式で表される。

$$\tau = \eta \frac{U}{h} \quad (1)$$

せん断トルク T は、せん断応力 τ と径方向距離 r の位置にある微小区間面積 dA を用いて次式で表される。

$$T = \int \tau \cdot r \cdot dA \quad (2)$$

せん断発熱量 Q は、せん断トルク T と回転数 N を用いて次式で表される。

$$Q = \frac{2\pi}{60} TN \quad (3)$$

単位時間あたりに摺動面間を通過する流体の質量を m 、比熱を c とすると、流体温度の上昇量 ΔT は次式で表される。

$$\Delta T = \frac{Q}{mc} \quad (4)$$

なお、流体温度の上昇量を求める際、以下の仮定を行った。

- ・流体に与えられる全熱量はせん断発熱に由来するものとする。
- ・摺動面間の流体の圧力は供試体上流圧力に等しいものとする。
- ・比熱の温度依存性は無視する。
- ・摺動面は完全に平滑であることとする。

以上の計算によって得られた、各流体の回転数と流体温度の関係を Fig. 4 に示す。流体の一部に気化が発生するのは、供試体上

流から摺動面間に流れ込んだ流体がせん断発熱によって昇温され、沸点に達したときであると考えられる。これより、本試験条件においては、すべての流体において 5,000 rpm 以下の回転数で既に摺動面間の流体が気液二相化していると推定される。

4. まとめ

動圧浮上型メカニカルシール供試体を用いて LN2, LOX, LH2 中で回転試験を行い、その密封特性について相変化が与える影響に着目して評価・考察を行った。すべての流体において、回転数の上昇とともに漏れ量が減少する部分が見られたが、これはせん断発熱量の増加によって摺動面間の流体の一部が気化し、気液二相化したことによるものと分かった。せん断発熱量を算出し、流体温度の上昇量を求めることで流体の一部に気化が発生する回転数の推定を行った。その結果、本試験条件においては、すべての流体において 5,000 rpm 以下の回転数で既に流体が気液二相化していることが推定された。

文献

- 1) 横山ら：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1報）、第63回宇宙科学技術連合講演会、(2019)
- 2) 横山ら：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2報）—LOX 実証—、日本航空宇宙学会北部支部 2020 年講演会、(2020)
- 3) 荒谷ら：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3報）—LH₂ 実証—、日本航空宇宙学会北部支部 2021 年講演会ならびに第2回再使用型宇宙輸送系シンポジウム、(2021)
- 4) 徳永ら：Recent developments in high speed mechanical seal applications with textured surface for e-motor shaft seals and cryogenic turbopumps, 21st Tribo-PPRIME Workshop 2022, (2022)

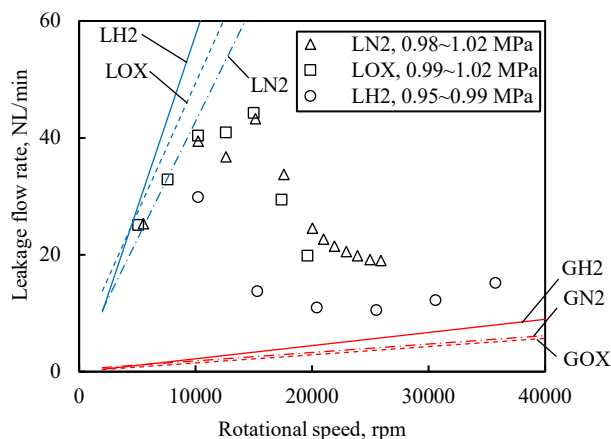


Fig. 3 Leakage measurement of rotational test

Table 2 Physical properties of cryogenic fluids

| Sealing fluid | LN2 | LOX | LH2 |
|------------------------|-------|-------|-------|
| Pressure, MPaG | 1.00 | 1.01 | 1.00 |
| Boiling point, K | 102.2 | 119.6 | 31.4 |
| Temperature, K | 85.8 | 96.6 | 24.1 |
| Specific heat, kJ/kg·K | 2.08 | 1.72 | 11.61 |

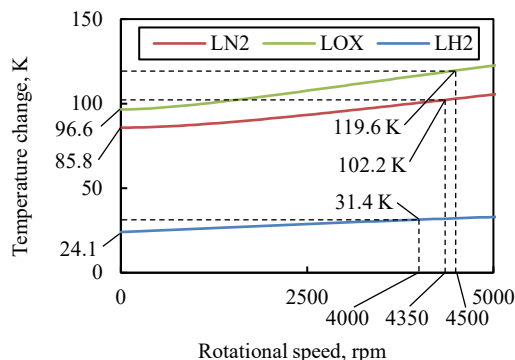


Fig. 4 Increase in fluid temperature with rotational speed