

相変化を伴う極低温水素環境下における動圧浮上型軸シールの性能評価

Performance Evaluation of Hydrodynamic Shaft Seals in Cryogenic Hydrogen Environment 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. はじめに

近年、水素利用に関わる様々な研究開発が進められている一方、ロケット分野における水素利用の歴史は長い。宇宙開発が活発化した1960年代から現代に至るまで、水素はロケットエンジン用推進剤として利用され続けている。液体水素と液体酸素を推進剤とするロケットエンジンは、これまで実用化されてきた推進剤の組み合わせの中でも非常に優れた比推力を発揮する。そのため、水素は今後もロケットエンジン用推進剤として利用されることが予想される。

推進剤を加圧して燃焼室に供給するターボポンプは、ロケットエンジンの性能を左右する重要なコンポーネントである。とりわけ、メカニカルシールはターボポンプを構成する主要な要素の一つといえる。メカニカルシールは、しゅう動材が摩耗してしまうが密封性能に優れるため、極低温推進剤を封止する軸シールとして採用されることが多い。液体水素ターボポンプ（以下、FTP）は、液体水素の密度が非常に小さいため、高い吐出圧力を得るために高速回転が要求される。よって、FTP用メカニカルシールは高差圧かつ高周速の厳しい作動条件で使用されている。加えて、近年は推重比や比推力等のエンジン性能向上のため、幅広い作動範囲（差圧、周速）への対応が必要となっている。その一方、打ち上げ頻度増加やコスト低減を狙ったロケット再使用化の潮流があるため、メカニカルシールを含むしゅう動部品の長寿命化が求められている。これらの要求に応えるため、ターボポンプ用メカニカルシールの潤滑性能の向上が必要である。

メカニカルシールの高い密封性能を維持しつつ潤滑性能を向上させるため、しゅう動面に表面テクスチャと呼ばれる微細な溝を施し、回転による流体力を利用してしゅう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行われている。近年の研究で、動圧浮上型メカニカルシールを用いて様々な極低温流体にて回転試験を行い、従来型メカニカルシールと比較して同程度の密封性能を持ち、更にしゅう動材の摩耗が少ないことが報告されている¹⁾²⁾³⁾。また、動圧浮上型メカニカルシールからの漏れ量が、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⁴⁾。

本稿では、動圧浮上型メカニカルシール供試体を用いて液体水素環境下にて回転試験を行い、その密封性能と潤滑性能について評価を行った結果を報告する。

2. 試験供試体及び試験条件

本試験で使用した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。メイティングリングの内径は $\Phi 45$ mmとした。また、メイティングリングしゅう動面に施工した表面テクスチャ形状の模式図をFig.2に示す。スパイラル溝は回転による流体力を利用してしゅう動面を浮上させ、摩耗を低減する機能を持つ表面テクスチャである。

Table 1に、回転試験の試験条件を示す。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。また、全ての試験で、供試体上流は常に液相である。

3. 試験結果・考察

3.1 密封特性評価試験

Fig.3に、液体水素中における回転数と漏れ量の関係を示す。なお、図中の線は密封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。漏れ量が回転数に応じて変化していることから、表面テクスチャは浮上効果を発揮し、運転中はしゅう動面が浮上していたと考えられる。また、供試体の密封性能は安定しており、漏れ量は液体漏れの解析値よりも低い値となった。密封流体が単相である場合、回転上昇に伴い浮上力が増加し、液膜が厚くなるため漏れ量は増加する。しかし、試験では、差圧約

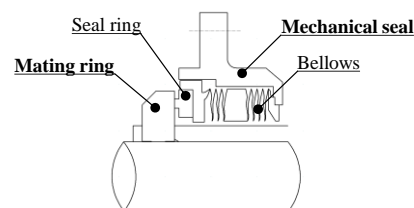


Fig. 1 Test seal of rotational test

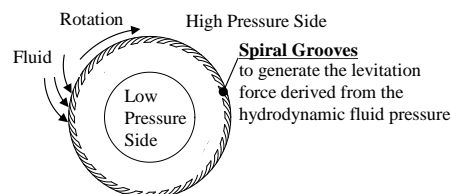


Fig. 2 Surface texture of mating ring

Table 1 Test conditions of rotational test

Sealing fluid	LH2
Rotational speed, rpm	35,000 MAX
Differential pressure, MPa	2.0 MAX
Temperature, K	23-30

1.0, 1.5, 2.0 MPa 時において、回転数の上昇に伴い漏れ量が減少し、解析値から乖離する傾向が見られた。これは密封流体の相変化に起因すると考えられる。密封流体の相変化によって漏れ量が減少する要因は、流体の見掛けの粘性が低下することによって浮上力が低下し、液膜が薄くなって流量が減少することと、しゅう動面間の下流側が気液二相流となり、密度低下に伴って流量が減少することが考えられる。高速回転条件および低差圧条件においては、密封流体の相変化が発生しやすいため、漏れ量の解析値との乖離が大きくなっていると考えられる。

3.2 起動停止サイクル試験

動圧浮上型メカニカルシールにおいて、静止時からの起動、あるいは回転時からの停止という過渡時におけるしゅう動面への損傷が懸念される。そこで、Fig.4 に示すように差圧約 0.5 MPa において、「静止状態からの起動⇒回転停止」を繰り返す起動停止サイクル試験を実施した。19 回の起動停止を実施した結果、供試体からの漏れ量は 10 NL/min 以下と密封性能は良好であった。このことから、起動停止サイクルは密封性能を損なうほどの損傷を与えないことが分かった。

3.3 試験後しゅう動面観察

密封特性評価試験と起動停止サイクル試験を連続して実施した後のシールリングしゅう動面の顕微鏡画像および表面形状を Fig.5 に示す。表面テクスチャ未加工部とのしゅう動部には摩耗痕が見られ、その摩耗深さは約 2 μm であった。これは、起動時において、しゅう動面間に流体が介在せず、しゅう動面が直接接触した状態から回転する際に、面間が浮上し始めるまでの間に発生したものだと考えられる。一方、停止時において、回転数の低下に伴って浮上力が低下し、液膜が薄くなっていく過程で、流体膜が介在する二面が接近することで、スクイーズ膜効果が作用し、しゅう動面間を支持する力が働くため、起動時と比較して摩耗は発生しにくいと考えられる。

4. まとめ

動圧浮上型メカニカルシール供試体を用いて、液体水素中で回転試験を行い、以下の結果を得た。

- ・ 密封特性評価試験の結果、漏れ量と回転数に相関があったことから、表面テクスチャの浮上効果は正常に機能していたことが確認された。また、供試体の漏れ量は従来型メカニカルシールと比較して遜色なく、密封性能は良好であった。
- ・ 起動停止サイクル試験の結果、密封性能を維持したことから、供試体の起動停止への耐久性が確認できた。
- ・ 試験後のシールリングしゅう動面には、表面テクスチャ未加工部とのしゅう動部に摩耗が見られたものの、それ以外にはほとんど摩耗は見られず、従来型メカニカルシールと比較して潤滑性能の向上が見られた。

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) 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

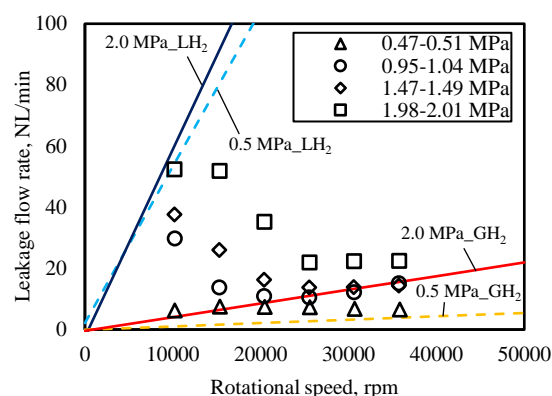


Fig. 3 Leakage measurement of rotational test

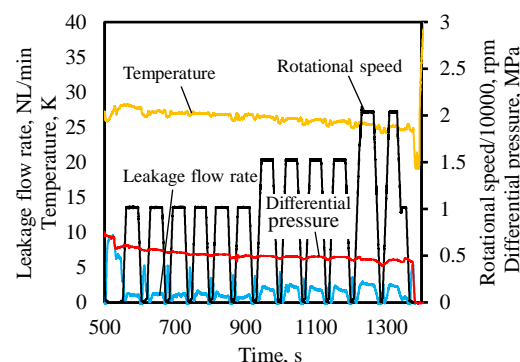


Fig. 4 Start-stop cycle test

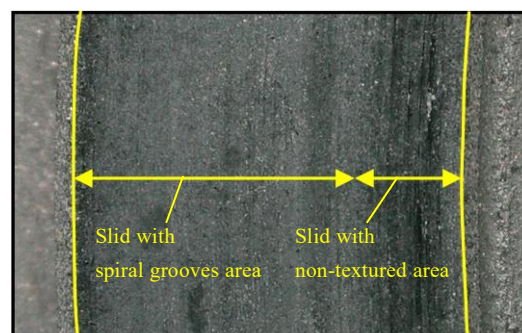
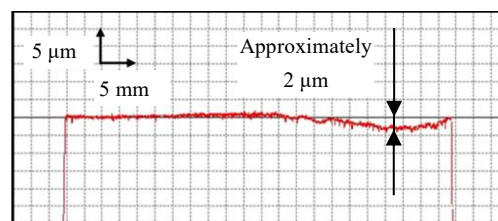


Fig. 5(a) Observation of seal surface



※The position of the microscopic image and the profile acquisition is not the same.

Fig. 5(b) Profile inspection of seal surface