

# 再使用型ロケットへの適用を目指した 動圧浮上型長寿命軸シールの研究開発

○横山 崇, 角銅 洋実, 荒谷 仁, 高田 仁志 (宇宙航空研究開発機構)  
井村 忠継, 徳永 雄一郎, 大田 崇史, 笠原 英俊 (イーグル工業株式会社)

Research and Development of Float Mechanical Seals with Dynamic Pressure  
for Reusable Rocket Engine Turbopumps;

Takashi Yokoyama, Hiromitsu Kakudo, Hitoshi Araya, Satoshi Takada (JAXA)  
Tadatsugu Imura, Yuuichiro Tokunaga, Takafumi Ota, Hidetoshi Kasahara (EKK)

Key Words : Mechanical Seals, Reusable Rocket Engine, Turbopump

## Abstract

The research and development of reusable rocket engine is in progress in JAXA and one of the technological issues which should be resolved is prolonging life span of mechanical seals for turbopumps. Since the sliding surfaces of the existing mechanical seals are in contact with each other, these have a great property of sealing but short life span due to wear. In recent study, development of the low-friction and zero-leakage mechanical seals is advancing. As this mechanical seal is textured on the one side surface, the sliding surface floats off because hydrodynamic lubrication film is formed between the sliding surfaces during rotation without increasing leakage, which can reduce wear and increase the rotation speed of turbopumps. In this paper, the results of the verification tests with liquid oxygen are reported.

## 1. 背景

日本の基幹ロケットの国際競争力強化を目指し、JAXA では 2015 年度よりロケット 1 段エンジン再使用による低コスト化を図る技術開発を進めている<sup>1)</sup>。同様の試みは米 SpaceX 社の Falcon9 や米 Blue Origin 社の New Glenn を始めとする欧米のロケットにおいても取り組まれており<sup>2)</sup>、商用ロケットの部分再使用化の動きが定着している<sup>3)</sup>。

一方で観測ロケットに関しては、JAXA は 1998 年より再使用ロケット実験機 RV-T にて複数回の離着陸に成功し<sup>3)</sup>、2010 年より再使用観測ロケット技術実証プログラム (RSR) にてエンジンの 100 回以上の繰り返し使用を実証しており<sup>4)</sup>、日本のロケットエンジン再使用化技術は海外のものと差別化を図っている。例えば、より高度な繰り返し運用、寿命管理、故障許容システム、空力制御誘導による帰還燃料の最小化などの実現を目指している<sup>5)</sup>。

エンジンの高頻度再使用において解決すべき技術課題の 1 つに、ターボポンプの軸封シールの高性能化・長寿命化がある。ターボポンプには主に表 1 に示す軸シールが用いられているが、その構造の違い

からシール性、寿命などの性能が異なる。シール性の観点ではセグメントシールやメカニカルシール等の接触式シールが優れ、フローティングリングシールやラビリンスシールといった隙間を有する非接触式シールは劣る。例えばメカニカルシールは図 1 のようにカーボンリングを回転するメイティングリングに押し付けてシールする構造であり、高いシール性を有している。

一方で寿命、高回転数化、高差圧化の観点では非接触式シールの方が有利である。接触式シールでは回転により摩耗が進行しやすく短寿命で、高回転数・高差圧に対応できない。現に、メカニカルシールは回転数が 20,000 から 25,000 rpm、差圧 1.0 MPa で使用されており、再使用観測ロケット技術実証 (RSR) の結果からメカニカルシールは 20~30 フライトにて寿命を迎えることがわかっている。

そこで、高いシール性と長寿命を実現しエンジンの高頻度再使用に対応するため、シール面にテクスチャパターンを施し、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実現を目指している。このような表面テクスチャによる動圧浮上型メカニカルシールは自動車や潮流発電機

表 1 ターボポンプに使用されている軸シール（ただし、動圧浮上型メカニカルシールに関しては推定）

	フローティング リングシール	ラビリンス シール	セグメント シール	メカニカル シール（従来）	動圧浮上型 メカニカルシール
シール性	×	×	○	○	○
寿命（再使用回数）	○	○	○	×	○
回転数（周速）	○	○	○	×	○
差圧	○	×	×	×	○
ロバスト性	○	○	×	×	○

等に既に適用されており<sup>6)</sup>，これを再使用ロケットのターボポンプに適用することができればシールのメンテナンス頻度を大幅に低減させることができる。

しかし、動圧浮上型メカニカルシールをターボポンプに適用する際には、その使用環境や制約などから様々な技術的課題がある。

特に、ターボポンプでは極低温流体をシールする必要がある。極低温下でのシールのひずみ、および摺動面での気液二相化が表面テクスチャの機能に与える影響を調べる必要がある。また、摺動面を浮上させ隙間を生じさせているため、従来の接触式メカニカルシールよりも漏れ量が増大する可能性がある。例えば再使用型観測ロケット実験機 RV-X（エキスパンダブリードサイクル）<sup>2)</sup>の液体酸素ターボポンプではメカニカルシールの下流側に He パージシールが設置されているが、メカニカルシールのシール性が低下して漏れ量が増大すれば He パージシールを破損する可能性がある。He パージシールは構造上逆圧に弱いため、メカニカルシール下流圧が He 供給圧を上回る程の漏れ量は許容されない。また、さらにシール性が低下して極低温流体が He パージシール下流に流れ込めば、シールを構成しているセグメントシールが破損する可能性もある。

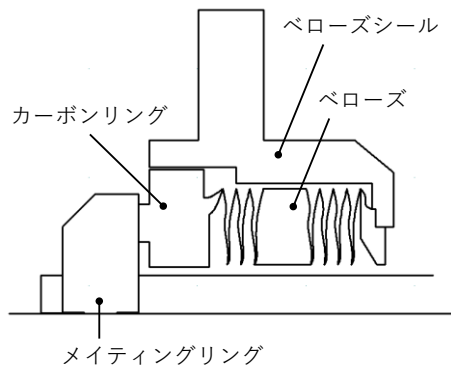


図 1 メカニカルシールの構造

このように、動圧浮上型メカニカルシールがターボポンプで使用可能であるか確認するとともに、従来のメカニカルシールよりも長寿命であることを実証する必要がある。

既報<sup>7)</sup>にて液体酸素により最大回転数 30,000 rpm、最大差圧 3.0 MPa にて回転試験を実施し、動圧浮上型メカニカルシールがターボポンプに適用可能であることを示した。また、起動停止 80 回繰返し試験により長寿命を実証した。

本稿では、ターボポンプへ適用可能であることを実証するために実施した液体酸素による試験の結果を報告する。

## 2. 試験

### 2.1 供試体

動圧浮上型メカニカルシールのメイティングリングを図 2 に示す。従来と同様、カーボンリングをメイティングリングに押し付ける構造であるが、メイティングリングの表面に同心円状 2 種類のテクスチャを施している。外周側（高圧側）のテクスチャ溝はスパイラル溝と呼び、回転により溝の中に流体が入り込み、その動圧によって摺動面を浮上させる。浮上によって摩擦が減少し、長寿命に寄与することが期待できるものの、漏れ量が増大する可能性がある。そこで内周側にポンピング溝と呼ばれるテクスチャを施し、内周側（低圧側）から流体を吸い込むことでシール性を高めている。

この表面テクスチャは数百 rpm で浮上し始めるよう設計されている。ゆえに数百 rpm 以下では摺動面が接触し摩擦が進行する可能性がある。

### 2.2 試験装置

試験は図 3 に示すタービン駆動回転試験機を用いて実施した。試験機本体中央より液体酸素を導入し、軸受を冷却した後にドレンラインへ流れ出る。

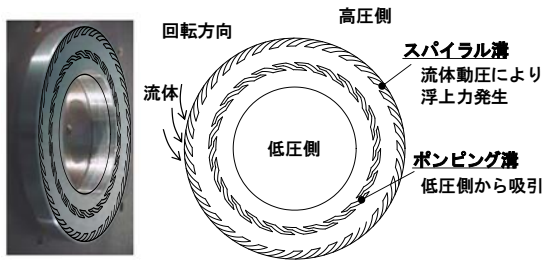


図 2 メイティングリングの表面テクスチャ

供試体は供試体単体による評価とシールシステム内における評価を同時に行えるよう、2つ設置した。図 3 左側の供試体は下流側にサーマルマス流量計を設置して漏れ量を計測した。図 3 右側の供試体は、実機と同様に He パージシール、タービンガスシールと共にシールシステムを構成しており、供試体下流には He パージシールから He が流入している。下流にはサーマルマス流量計を設置して漏れ量を計測した。

### 2.3 試験内容・試験条件

動圧浮上型メカニカルシールが液体酸素中でも正常に作動し、ターボポンプ実機に適用可能であることを実証するため、表 2 に示す条件にて試験を実施した。

## 3. 試験結果・考察

### 3.1 回転中の漏洩特性

回転中の漏洩特性と摩耗を評価するため、図 4 に示す最大回転数 30,000 rpm、最大差圧 3.0 MPa の試験条件にて回転試験を実施した。これは再使用観測ロケット実験機 RV-X をはじめとするターボポンプの作動点を包絡し、さらにその高差圧領域にて作動可能であることを実証するものである。試験の結果、供試体は単体のもの、シールシステム内のもの共に正常に回転した。漏れ量は最大でも 65 NL/min 程度であり、供試体下流の圧力は 0.0 MPaG で He パージシールへの影響は認められなかった。

回転数と漏れ量の関係を図 5 に示す。回転中の漏れ量は主に回転数に依存して直線的に変化し。圧力にはさほど大きな影響を受けなかった。この傾向は LN2 による試験においても見られた。

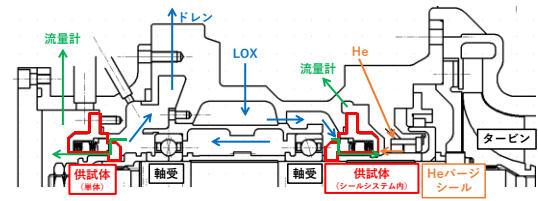


図 3 試験装置と供試体の位置

### 3.2 静止中の漏洩特性

予冷中を模擬し、回転停止時に試験室内に最大 3.0 MPaG の圧力を印加して漏れ量を評価する試験を実施した。その結果、漏れ量はサーマルマス流量計の下限以下であり、計測不能な程度であった。

### 3.3 摩耗

メカニカルシールの寿命を決定する摩耗を評価するため、試験後のカーボンリング表面を顕微鏡により観察し、表面高さプロファイルを触針式粗さ計により取得した。結果を図 6 に示した。

図のように、カーボンリング表面には摺動痕が見られるものの、シールシステム内の供試体では摩耗深さが計測不能な程度であり、2種のテクスチャ部との摺動面は試験前と外観が変化しておらず、直接接触せずに浮上していたことが見て取れる。

供試体単体の場合は外周側に摩耗が見られた。摺動相手面のテクスチャに微量に堆積した摩耗粉によるものと推測されるが、カーボン表面の摩耗は面荒れ程度といえる。また内周側は試験前と外観に変化が無く、摺動面が浮上していたと考えられる。

## 4. 考察

図 6 に示すように、供試体単体の場合とシールシステム内の場合とで摺動状態に差異があったことがわかる。供試体単体の場合、軸受室内を通る液体酸素によって供試体下流側は約-150°Cまで冷却されるが、シールシステム内では He パージシールに流入する常温の He によって供試体下流が-100°C程度となる。この温度環境の違いによって摺動面内の気液二相状態に変化が生じ、テクスチャにより発生する浮上力

表 2 試験条件

	回転数	回転加速度	シール差圧	冷却流量
回転中の漏洩特性取得	最大 30,000 rpm	7,500 rpm/s	最大 3.0 MPaG	0.3~0.5 L/s
静止時の漏洩特性取得	—	—	最大 3.0 MPaG	0.3~0.5 L/s

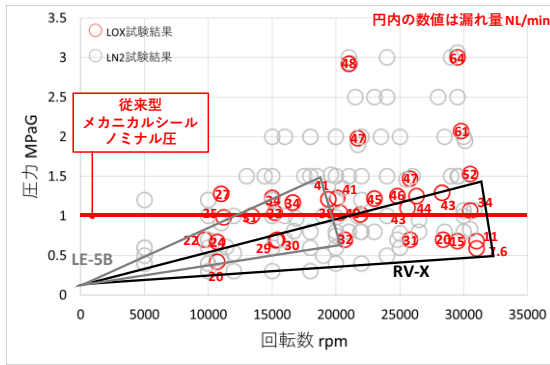


図 5 試験を実施した領域と供試体単体の場合の漏れ量の結果およびターボポンプ実機の作動領域 (灰色プロットは液体窒素による試験実施領域)

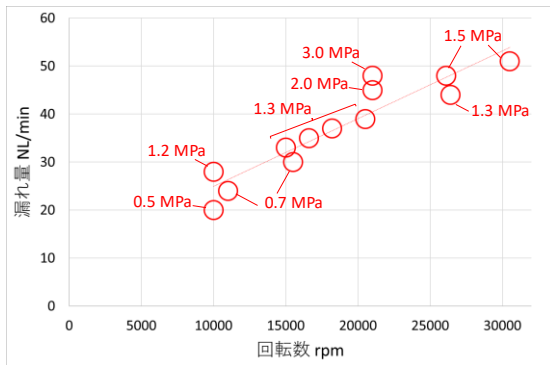


図 4 回転数に対する漏れ量の関係

が変化し、カーボンリングに与えられる力のバランスに差異が生じたことで、異なる摺動状態・摩耗状態となったと考えられる。

## 5. 結論

メイティングリングの表面に2種類のテクスチャを施すことで、シール性を維持しつつ回転中に摺動

<sup>1</sup> 石本真二, 齊藤靖博, 平岩徹夫, 伊藤岬: ロケット1段再使用に向けた飛行実験フェーズ2, 第62回宇宙科学技術連合講演会 2018年

<sup>2</sup> 橋本知之, 佐藤正喜, 木村俊哉, 尾場瀬公人, 中井元気, 川又善博, 瀧田純也, 金子敬郎: 再使用ロケット実験機 RV-X エンジンについて, 第62回宇宙科学技術連合講演会 2018年

<sup>3</sup> 今井良一: 研究開発ミッションの検討状況について 平成30年8月2日

<sup>4</sup> 中井元気, 金子敬郎, 瀧田純也, 尾場瀬公人, 紙田徹, 野中聡, 橋本知之, 佐藤正喜: 再使用ロケット実験機 RV-X における MHI の取り組みについて, 第62

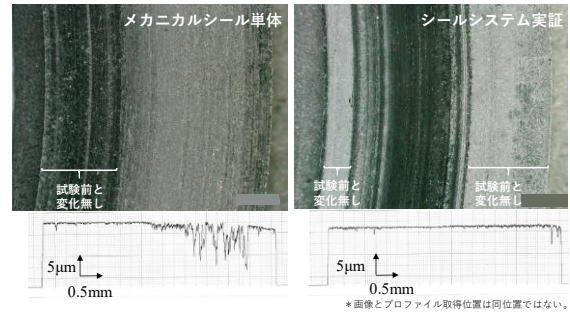


図 6 試験後のカーボンリング表面の顕微鏡画像および触針式粗さ計による表面高さプロファイル

面が浮上し摩耗を抑制する動圧浮上型メカニカルシールについて、液体酸素を用いてターボポンプ実機に適用可能であるか実証試験を行い、以下の結果を得た。

- ・供試体は最大 30,000 rpm, 最大 3.0 MPa の条件下で正常に回転し、シール性を発揮した。実機の使用環境を模擬したシールシステム内においても同様に正常に回転し、隣接している He パージシールに影響を及ぼすことは無かった。このことから、従来型メカニカルシールの作動領域 (ノミナル回転数 およそ 25,000 rpm, 差圧 1MPa) を拡大することが可能であることを示した。

- ・試験後の供試体検査より、シールシステム内では摩耗深さは計測不可能な程度であり、摺動面が浮上していることが確認できた。

使用可能な作動範囲を拡大できることから、このシールがターボポンプに使用されれば、長寿命化によるロケット再使用化、高速回転化による高推力化、軸受冷却流路の圧力上限緩和によるターボポンプ設計自由度の向上に寄与できると考える。

回宇宙科学技術連合講演会 2018年

<sup>5</sup> 野中聡, 伊藤隆, 中村隆宏, 紙田徹: 再使用ロケット実験機 RV-X の研究概要, 第62回宇宙科学技術連合講演会 2018年

<sup>6</sup> Tokunaga Y, Recent developments in zero-leakage and low-friction mechanical seals with textured surface, 17th EDF/Pprime Workshop, Paris Sclay, October 4, 2018

<sup>7</sup> 横山 崇, 角銅 洋実, 荒谷 仁, 高田 仁志, 井村 忠継, 徳永 雄一郎, 大田 崇史, 笠原 英俊: 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年