

連携記事

宇宙開発を支えるシール技術

Sealing Technologies Supporting Space Development

笠原英俊 イーグル工業 (株)
Hidetoshi Kasahara 航空宇宙事業部 技術部
部長

1 はじめに

民間ロケットによる民間人の宇宙旅行、月面基地、火星探査など、世界中で宇宙に関わる話題は絶えない。日本でもインターステラテクノロジズ社の民間ロケットビジネスへの参入をはじめ多くの企業が参画し宇宙ビジネスを盛り上げている。日本の宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では、更なる宇宙利用のために再使用型ロケットの研究や月面社会に向けた各種研究開発が精力的に行われている。日本では1967年から航空宇宙研究所 (NAL) が中心となり液体ロケットターボポンプ (TP) 用軸シールの研究をスタートした。この先人たちの技術が現在の日本の基幹ロケットTP用軸シールに受け継がれている。

本稿では、液体ロケットエンジンに欠かせないターボポンプに使われる代表的なロケットTP用軸シールの紹介と、月面環境を想定した耐粉塵シールの紹介、さらにはそれらの評価を行う試験機について紹介する。

2 ロケットTP用軸シール

2.1 ロケットターボポンプ

液体ロケットに用いられる代表的な燃料は液体水素 (燃料) と液体酸素 (酸化剤) である。ターボポンプは、これら極低温燃料を高速に回転させ燃焼器まで送り、エネルギーを推力に変換する。ターボポンプは軸受、シールに代表されるトライボロジー要素の塊ともいえ、その要求も非常に厳しい。ロケットエンジンの高性能化や信頼性向上には、これらトライボロジー要素の信頼性向上がキーとなる。

液体水素ポンプ (液水TP、図1) を例にとると、密度が 0.07g/cm^3 ときわめて小さい液体水素を送り込むため、40,000rpm以上に高速回転させる必要がある。大推力を得る

ためにシール上流圧は高压となる傾向があり、メカニカルシールのような接触型端面シールでは負荷が増す。液体酸素ポンプ (液酸TP、図2) は、液水TPほど回転数は高くないが、しゅう動部での過剰な発熱が爆発燃焼を引き起こす危険がある。また、タービン駆動ガスに水素を用いるため、ポンプ内で酸素と水素を完全分離させるシールシステムが必要となる。

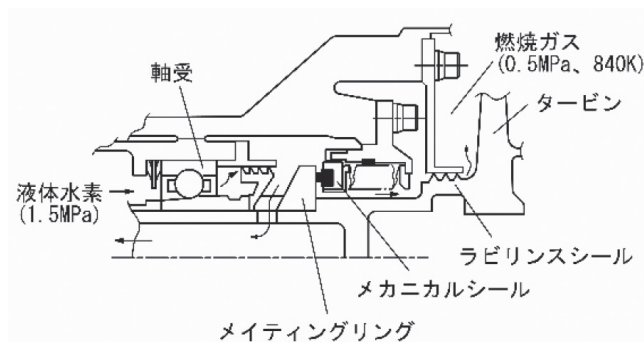


図1 液水T/P用軸シールシステム (LE-5B)¹⁾

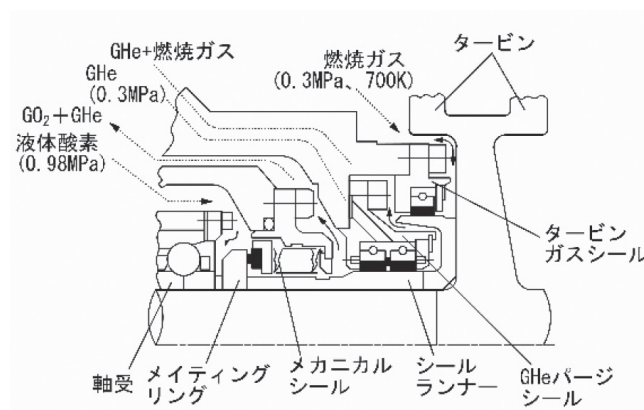


図2 液酸T/P用軸シールシステム (LE-5B)¹⁾

2.2 ロケットTP用軸シール

ロケットTPに用いられるメカニカルシールの構造を図3に示す。主な特徴は極低温流体のしゅう動に耐えるしゅう動材組合せと温度変化や圧力による変形を考慮した構造である。ロケットターボのような高速高压ポンプでは一瞬で摩耗が進行しポンプが機能不全に落ちいる。また、ラビリンスシールなどの非接触シールでは漏れが多くポンプ効率が悪くなる。軸シールの性能がポンプの性能と密接にかかわるため、ターボポンプ設計の初期段階で用途に応じたシールの選定とそのシールの性能評価が非常に重要になる。

近年注目を集めている再使用型ロケットやスペースプレーン（往還機）のような次世代輸送システムでは桁違いの耐久性と信頼性の高いロケットエンジンが求められている。このようなロケットエンジンには高性能・高信頼のターボポンプが必須となる。当然、ターボポンプの性能を支える軸シールへの要求も厳しくなる。この軸シールに対する厳しい要求を

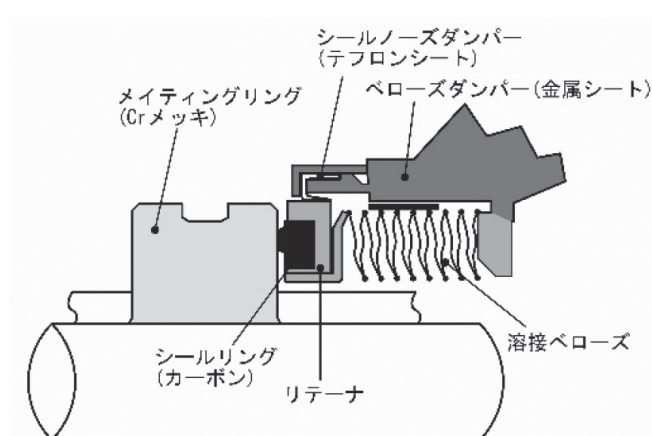


図3 TP用メカニカルシール構造¹⁾

クリアするため、回転時の動力を使ってシールしゅう動面の負荷を低減する動圧浮上型メカニカルシール（図4）の研究が行われている²⁾。

動圧浮上型メカニカルシールは、無回転時は従来のメカニカルシールと同等のシール特性であるが、回転開始と同時に外周側のスパイラル溝により流体力を発生させることでしゅう動面を浮上させる。さらに、内周のポンピング溝で漏れ量を抑制する。

この動圧浮上溝により回転中の負荷を大幅に低減することが出来き、長寿命が期待できる他、今までメカニカルシールでは使用できなかった高PV（P：差圧、V：周速）領域での対応も可能になる。この結果、従来よりも自由なポンプデザインが可能になり信頼性も格段に上げることができる。

2.3 ロケットTP用軸シール試験機

極低温流体用軸シール試験機を図5に示す。シール近傍には極低温流体環境で高速回転できる軸受と高速のスピンドル（駆動系）を有する。駆動には長い間エアタービンが使われて

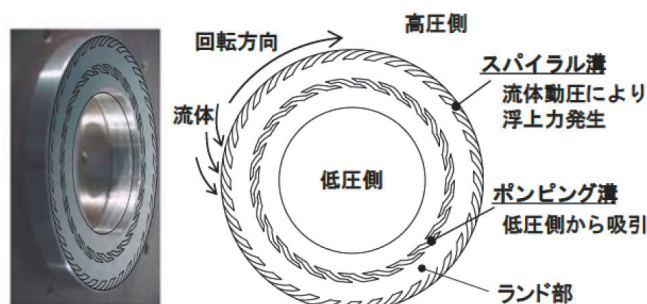


図4 動圧浮上型メカニカルシール²⁾ (Online version in color.)

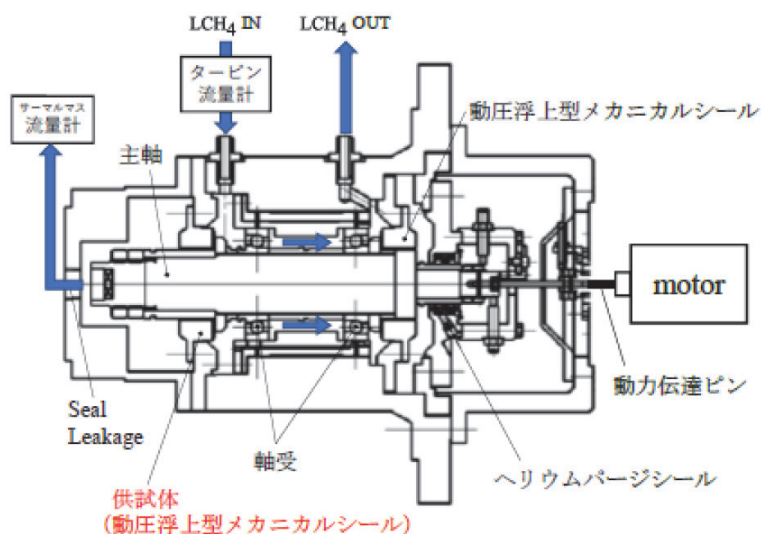


図5 メカニカルシール試験装置²⁾ (Online version in color.)

きたが、近年はモータ駆動での高速回転が可能となった。このことにより、回転制御が安定し各回転域でのシール性能の把握が容易になった。試験に使用する極低温流体は軸受を冷やしつつシール上流に充填される。主な計測ポイントは、上下流温度、上流圧力、漏洩量であり、漏洩量はシール下流に配置した流量計とシール下流温度を計測することでモニタする。

2.4 シール試験機 (微小トルク試験機)

動圧浮上型メカニカルシールのような流体力を利用したシールの基本特性を正確に把握するためには、温度変化が少ない安定した環境で試験を行うことが重要である。さらに、動圧浮上型メカニカルシールは回転時に発生するトルクが非常に小さいため、一般的な回転試験機では他の機械要素部品からのノイズに埋もれ真のシール特性を把握することが難しい。図6にシールから発生する微小トルクを正確に計測できる試験機を示す。この試験機は、回転中のシール以外から発生するメカロスをも最小にするため、軸受には空気軸受を採用した。また、シールのトルクはシールから伸びたアームに加わる荷重をロードセルで計測し、トルクに換算する。この試験機により、回転開始から定格運転時の動圧浮上型メカニカルシールのトルクを正確に計測することが可能となる。

3 耐粉塵シール

3.1 月面環境

月面は、「重力が地球の1/6」、「昼夜の温度差が200℃以上」、「X線や粒子線などの宇宙放射線」、「極高真空」、「レゴリス」といったキーワードに代表される。このキーワードを並べただけでも地球とは大きく違う過酷な環境であることがわかる。特に、レゴリスという月の粉塵は、非常に硬く・細かく、トゲ状の鋭利な粉塵である。

3.2 耐粉塵シール

月面環境では、真空極低温環境でレゴリスのような粉塵から機器を守るシールが必要となる。特にしゅう動をともしながら箇所をシールは、真空無潤滑環境でしゅう動しながら粉塵をシールという特殊な性能が求められる。また、月面環境に暴露される耐粉塵シールは、真空極低温環境や宇宙線の影響を考慮した難しい材料選定が必要となる。

シール形態は軸を周方向からシールするラジアルシールと、端面などを軸方向からシールするフェイスシールに大別される。ラジアルシールは、リップシールに代表されPTFEなどの高分子材料が用いられることが多い。耐粉塵ラジアルシール(図7)³⁾は大気中や真空中に関わらず粉塵に対するシール性は優れているものの回転トルクが大きいことが問題として挙げられる。また、軸材料との熱膨張率の違いから、温度が大きく変化した際には、シール性の低下やトルクの上昇が懸念される。耐粉塵ラジアルシールの中にはブラシシール⁴⁾やラビリンスシールなど低いトルクを有するシールもあるが、そのシール性は十分に高いとは言えない。しかし、ラジアルシールはシールサイズがコンパクトで扱いやすいという面もある。

一方、フェイスシール⁵⁾は、軸方向に常に押しつけられる構造のため、回転中の面開きを抑えることができ粉塵の侵入を防ぐ。フェイスシールの一つであるメカニカルシールの大気中や真空中での粉塵に対するシール性は優れており安定した回転トルクが得られている。また、その性能は温度依存性が低く月面のような温度変化の大きい環境には有利である。

ドライブシャフトなどは、その後ろにあるモータや減速機、電子機器を粉塵から守るため、確実なシール性が求められる。このような高信頼性が求められる箇所にはフェイスシールが適しているといえる。

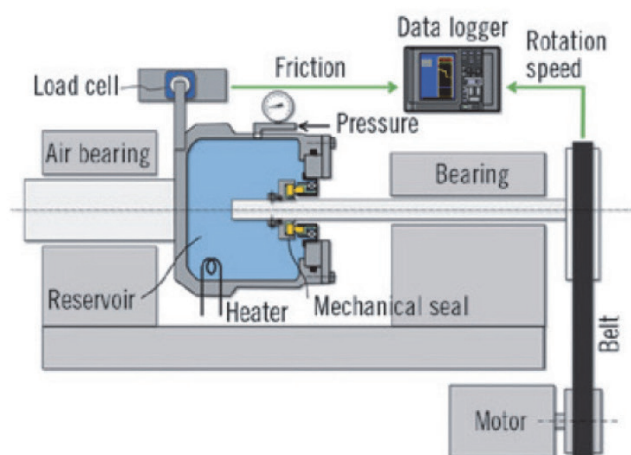


図6 微小トルク試験機 (Online version in color.)

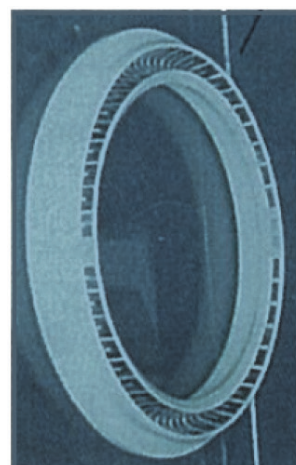


図7 耐粉塵ラジアルシール³⁾ (Online version in color.)

3.3 耐粉塵フェイスシール試験機

耐粉塵フェイスシール試験機を図9、図10に示す。横置き試験機(図9)は、回転中のしゅう動部およびベローズ部に粉塵として用いたレゴリスシュミラント(月面模擬土)を振り注いだ際のシール性能を評価する。縦置き試験機(図10)は、シール全体が粉塵に埋もれた状態で回転させた際のシール性能を評価する。どちらも実際の使用環境から考えるとかなり過酷な環境であるが、最悪な環境においても十分なシール性を有していることを評価している。

4 スタティックシール

宇宙空間に暴露される部位やロケットエンジンで用いられるスタティックシールは、一般的なゴム製Oリングの使用温度範囲を遥かに超えた温度域で使用されるため、広い温度域で安定したばね性を有する金属製のものが用いられる。さらに自己増圧(流体の圧力を自らのシール面圧に加える構造)機能を有するシール(図11)は追従性(シール面の変化に追随する性能)向上に寄与する。しかし、追従性を高めたシール



図8 フェイスシール (Online version in color.)

ルであっても、温度・圧力の繰り返しはシール面(フランジとの接触面)の相対的なズレによる蓄積がシール性能の劣化につながる。

C-SEAL (ACTISEAL®-C) は表面にメッキを施すことで高

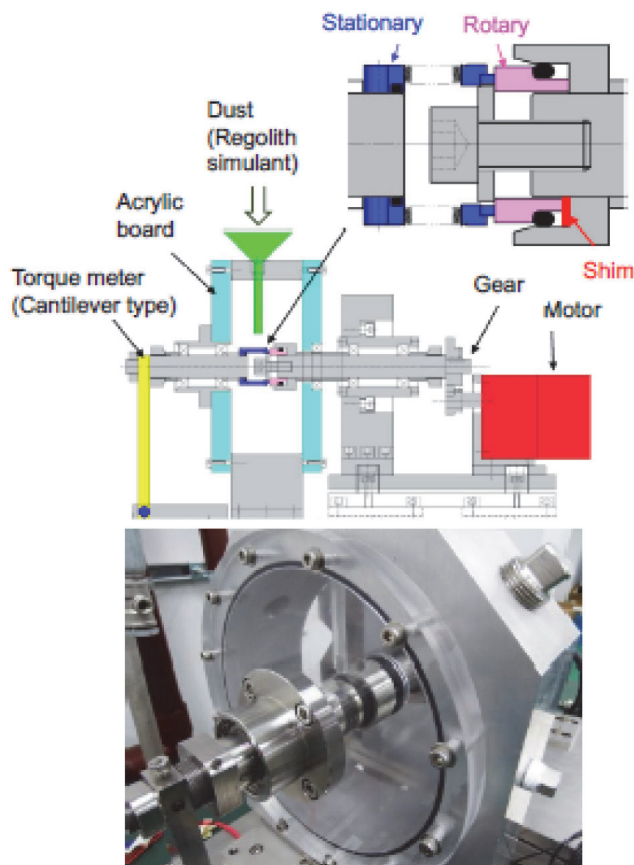


図9 耐粉塵シール試験機(横置き)⁶⁾ (Online version in color.)

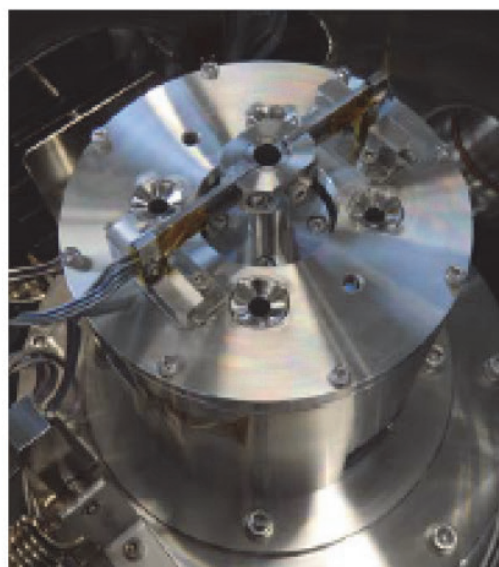
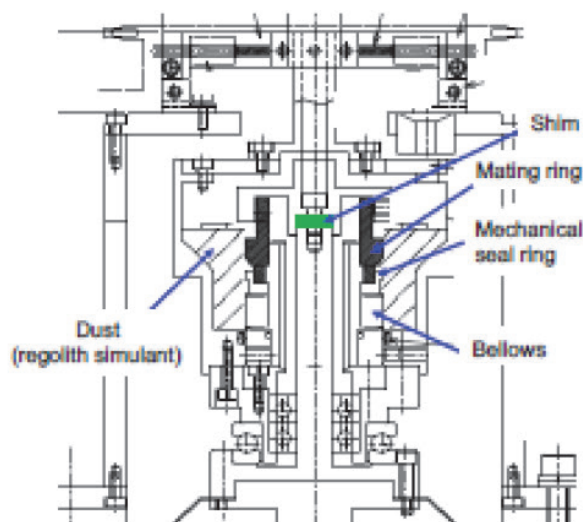


図10 耐粉塵シール試験機(縦置き)⁶⁾ (Online version in color.)

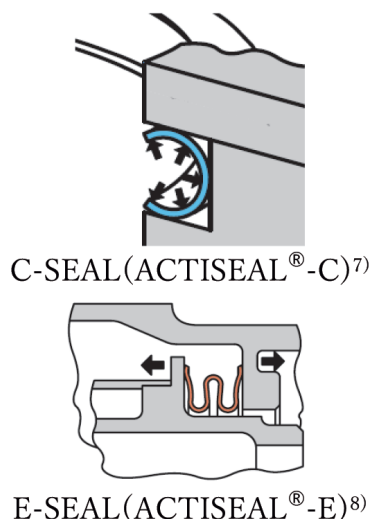


図11 スタティックシール^{7,8)} (Online version in color.)

密封が期待でき、極低温流体から燃焼ガスラインの様々な部位で使用されている。

5 おわりに

宇宙開発から宇宙利用へと活動の幅を広げるためには、今回紹介した極低温流体、燃焼ガス、粉塵などさまざまな流体のシールが必要不可欠となる。これまでのシール技術を活用し今後の宇宙開発、宇宙利用に貢献していきたい。

今回紹介した「動圧浮上型メカニカルシール」および「耐粉塵フェイスシール」は、JAXAとイーグル工業株式会社との共同研究プログラムの一環として実施された一部である。

参考文献

- 1) 野坂正隆, 尾池守: トライボロジスト, 35 (1990) 4, 233.
- 2) 田澤与生, 角銅洋実, 高田仁志, 井村忠継, 徳永雄一郎, 笠原英俊: 動圧浮上型軸シールの研究開発 (第4報), 第66回宇宙科学技術連合講演会, (2022).
- 3) 松本康司, 鈴木峰男, 西田信一郎, 若林幸子: 月面用粉塵シールに関する研究-大気中における特性評価-, 第52回宇宙科学技術連合講演会, (2008).
- 4) 鈴木峰男, 松本康司, 西田信一郎, 若林幸子, 星野健: 月面粉塵用の小型ブラシ型シールの真空中における性能, 第55回宇宙科学技術連合講演会, (2011).
- 5) 松本康司, 柳瀬恵一, 草部将吾, 高田仁志, 横山崇, 辻村奈央, 中村智也, 笠原英俊, 大田崇史: 月面探査用駆動機構における耐粉塵シール技術の研究開発, 第63回宇宙科学技術連合講演会, (2019).
- 6) K.Matsumoto, S.Takada, H.Kakudo, T.Yokoyama, H.Kasahara, T.Ota, J.Okado and M.Oka: Development of Mechanical Seal against Dust for Lunar Exploration, ISTS-International Symposium on Space Technology and Science, (2019).
- 7) イーグル工業 (株) カタログ, ACTISEAL-C, CAT No.067-07132.
- 8) イーグル工業 (株) カタログ, ACTISEAL-E, CAT No.068-07132.

(2022年12月9日受付)