

## 民間宇宙輸送システムの開発動向と軸受技術研究の方向性

### Development Trends in Private Space Transportation Systems and the Way to Proceed in the Bearing Research

将来宇宙輸送システム、千葉工大（正）\*, \*\*庄山 直芳

Tadayoshi Shoyama\*, \*\*

\*Innovative Space Carrier, \*\*Chiba Institute of Technology

#### 1. はじめに

アメリカの SpaceX をはじめ、国内外の民間企業による宇宙輸送システム開発が活発化している。文部科学省が令和4年7月に公表した「革新的将来宇宙輸送システム実現に向けたロードマップ検討会取りまとめ」<sup>1)</sup>には、市場規模が大きく民間が関心を持つ二地点間高速輸送や宇宙旅行、低軌道衛星の打ち上げ等のミッションに対応する高頻度往還型宇宙輸送機を官民連携で開発することが明記されている。これに基づき内閣府が改訂した宇宙基本計画工程表<sup>2)</sup>では、今後10年間に、高性能・低コスト化のブレークスルー技術や、機体や推進系の高頻度な再使用化技術等のキー技術の開発を実施する計画となっている。そのゴールと開発プロセスは、国家主導の基幹ロケットとは異なる部分が多いため、ロケットエンジン、特にターボポンプ軸受に対する信頼性やコスト要求が質的に変化する可能性がある。このような背景を踏まえ、今後の軸受やトライボロジー分野の技術研究の方向性について考察する。

#### 2. 高頻度往還型宇宙輸送システム

宇宙基本計画工程表で述べられている革新的将来宇宙輸送システムの開発は、「革新的基幹ロケット発展型」と、民間主導で開発される「高頻度往還型」の2本立てとなっている。前者は現行の基幹ロケットであるH3ロケットやイプシロンロケットをベースとした国家主導のプロジェクトで、主にロケット機体の再使用化による衛星打上げ費用の低コスト化を目指す。一方、高頻度往還型は民間主導で開発され、衛星打上げサービスに限らず、有人宇宙旅行や、サブオービタル2地点間輸送(P2P)など、将来的に大きな成長が見込まれるマーケット需要に応えることを目指している。図1は高頻度往還型ミッションの例である。宇宙空間へ人工衛星を運ぶだけでなく、ペイロードや人を地上に降ろす技術と、それを高頻度に実施するための点検整備技術が必要になる。高頻度とは、同一機体が打上げた後に地上に帰還し、点検整備と推進剤充填を終えて再び打ち上げられる頻度が1日に数回というレベルを想定している。現時点の技術レベルでは、ロケットを発射し着陸させることができたとしても、翌日に再度発射することは不可能である。スペースシャトルは帰還から発射まで最短でも84日間を要した。最も再利用性の高いSpaceXのFalcon9でも、着陸した1段機体の再打ち上げまでには最低9日を要する仕様である。

このようなロケットシステムに使用される軸受に対する要求は、従来の使い捨てロケットの場合と質的に異なる。例えば、従来のロケットエンジンのターボポンプ用軸受は、運転時間が短いことを前提として設計されている。使い捨てロケットのエンジン燃焼時間は長くても10分程度であり、打上げ前に実施される燃焼試験を考慮しても、ターボポンプに必要な設計寿命は10時間に満たないが、高頻度往還型では100時間以上の耐久性が必要である。また、

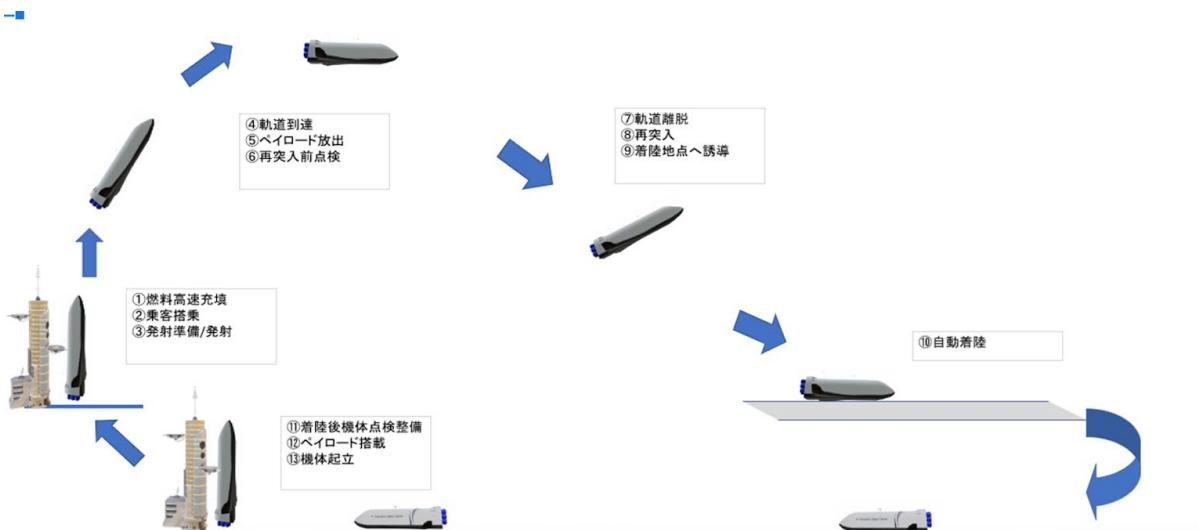


Fig. 1 Frequently reusable space transportation system.

図2に示す水平着陸タイプの高頻度往還型ロケットの場合、着陸時の車輪、軌道から再突入時に空力操舵のために使用するフラップ機構など、使い捨てロケットには存在しない可動部品が必要となる。可動部を支える軸受やアクチュエータなどのトライボロジー要素は、宇宙空間の真空や再突入時の高温など、潤滑にとって厳しい環境で、かつ高頻度に作動することが要求される。

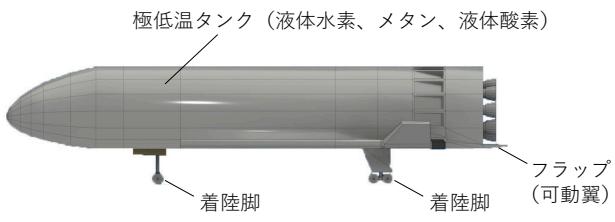


Fig. 2 Reusable space vehicle

### 3. 軸受技術研究の方向性

以上のような質的・要求変化を踏まえ、今後の軸受技術研究の方向性を提案する。一部、軸受以外のトライボロジーフィールドにも視野を広げ、研究が望まれる技術課題にも触れる。

#### 3.1 非接触化

高頻度使用時に摩耗を防ぐ方法として、固体同士の接触を避けることは第一に考えられる。ターボポンプ用の軸受は極低温推進剤で潤滑されるため流体潤滑効果が非常に低く非接触型の滑り軸受の実現が容易ではない。玉軸受でも金属同士が接触した際の摩擦による高温と、推進剤の極低温が共存した状態になるため、適切な固体潤滑剤の使用と冷却がポイントとなる<sup>3)</sup>。一方、流体膜のくさび効果に頼らない静圧型滑り軸受の研究はスペースシャトルの時代から行われており、筆者も電動ターボポンプ向けに開発し、液体窒素を使った高速回転試験に成功しているが、滑り面の詳細な現象把握に至っておらず、可視化試験などが望まれる。

#### 3.2 液体水素対応

液体水素の動粘度は酸素と同等だが、粘性係数は14分の1しかないため<sup>4)</sup>、スクイズフィルムダンパのように流体粘性を利用した減衰機構が使えない。液体水素で滑り軸受を実現するには、気体軸受の技術が参考になると思われる。液体窒素や液体酸素、液化メタンでは大気圧の飽和温度が-200°C以上であるのに対し、液体水素では-253°Cであり、断熱していない液体水素タンクの表面に空気が液化凝縮していく。複合材タンクに液体水素を繰り返し充填すると、周囲の空気が液化、膨張を繰り返すことで繊維が破断していく現象が問題となる。また、液体水素中にはわずかに混入した水分が微小で硬い氷粒として存在しており、バルブ故障の要因となる。バルブの開閉を数百回以上繰り返した場合、弁体の摩耗や損傷により漏洩が発生する可能性がある。

#### 3.3 電磁気の利用

機械的摩擦や接触を避ける方法として、渦電流ダンパ<sup>5)</sup>や、磁気軸受、ペアリングレスモータなど、極低温環境でも有効に作用する電磁気力を利用した技術は積極的に活用すべきである。また、極低温環境では超伝導状態を実現しやすいことから、ピン止め効果を利用したターボポンプ軸受<sup>6)</sup>も提案されているが、軸受剛性が低い課題がある。

#### 3.4 ヘルスモニタリング

軸受寿命を伸ばすことができたとしても無限ではないため、軸受周囲に設置したセンサのデータから損傷や摩耗の程度を高精度に推定する技術が必要である。これにより、軸受が不具合を起こす前に予兆検知し、遅過ぎない適切な時期に交換することは、高頻度往還型ロケットの実現に不可欠である。再使用宇宙輸送システムの研究<sup>7)</sup>では、ロケットエンジンからの水素漏洩検知や、インパリアント分析を用いたエンジンの故障予兆検知に関する取り組みが行われた。このような研究アプローチはAI技術が進化した現在、ますます注力されるべきである。

## 4. まとめ

高頻度、再使用、往還型という3つのキーワードに着目し、使い捨てロケットとは異なる軸受技術研究の方向性を提示した。トライボロジーフィールドはこれら全ての機能と密接に関係しており、高頻度往還型宇宙輸送システム実現の鍵を握っている。

## 文献

- 1) [https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chousa/kaihatu/024/toushin/mext\\_00001.html](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/kaihatu/024/toushin/mext_00001.html)
- 2) [https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei\\_fy04/kaitei\\_fy04.pdf](https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy04/kaitei_fy04.pdf)
- 3) 野坂・高田・吉田：ロケット用ターボポンプの極低温トライボロジーの研究開発、日本航空宇宙学会誌、58, 681 (2010) 303.
- 4) 上條：ロケットの液体水素ポンプ、水素エネルギーシステム、30, 2 (2005) 16.
- 5) 梅川・部矢・井上：ロケット用液体水素ターボポンプのための多自由度渦電流ダンパの基礎検討、第31回MAGDAコンファレンス講演論文集、31, (2005) 585.
- 6) J. Xu, C. Li, X. Miao, C. Zhang & X. Yuan: An Overview of Bearing Candidates for the Next Generation of Reusable Liquid Rocket Turbopumps, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 33, 26 (2020) 2.
- 7) 望月・坪井・辻岡・金子・尾場瀬・坂本：再使用型ロケット開発に向けた技術実証、三菱重工技報、54, 4(2017) 38.