

5. 講演内容

5.1. 月面探査用駆動機構における耐粉塵シール および評価技術

宇宙航空研究開発機構

研究開発技術部門

第二研究ユニット

柳瀬 恵一 氏



月面探査用駆動機構における 耐粉塵シールおよび評価技術

第17回 試験技術ワークショップ@筑波宇宙センター 2019年12月12日

松本康司, ○柳瀬恵一, 高田仁志, 横山 崇, 草部将吾
(宇宙航空研究開発機構研究開発部門)

辻村奈央, 中村智也
(NTN株式会社)

笠原英俊, 大田崇史
(イーグル工業株式会社)



出典：松本 他、「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回宇宙科学技術適合講演会、1F07、2019

1

発表内容



1. 月探査と耐粉塵シール
2. 主軸用シールとその評価
3. 軸受用シールとその評価



試験技術ワークショップ 2019/12/12

2

国際宇宙探査ロードマップ：ISECGミッションシナリオ(2013)

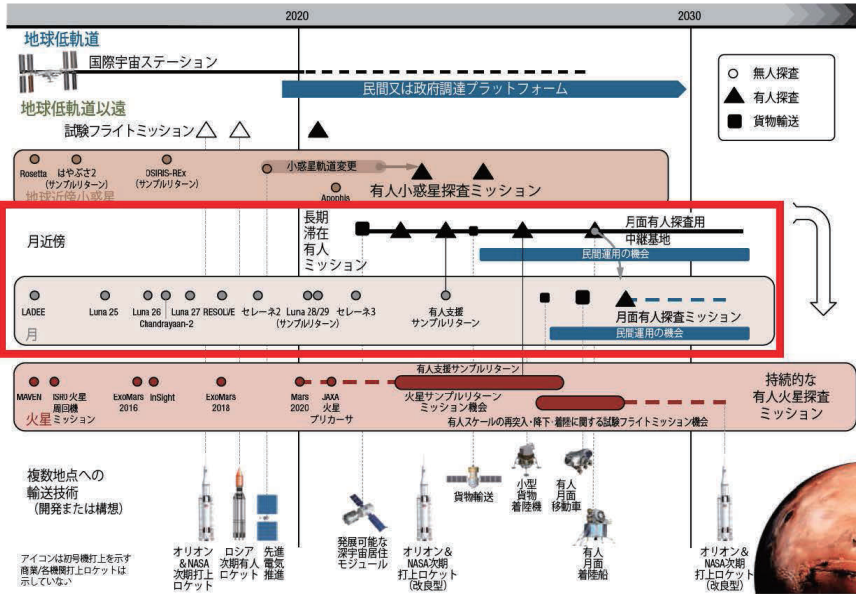


宇宙探査は世界規模で取り組む課題

ISECGミッション・シナリオ



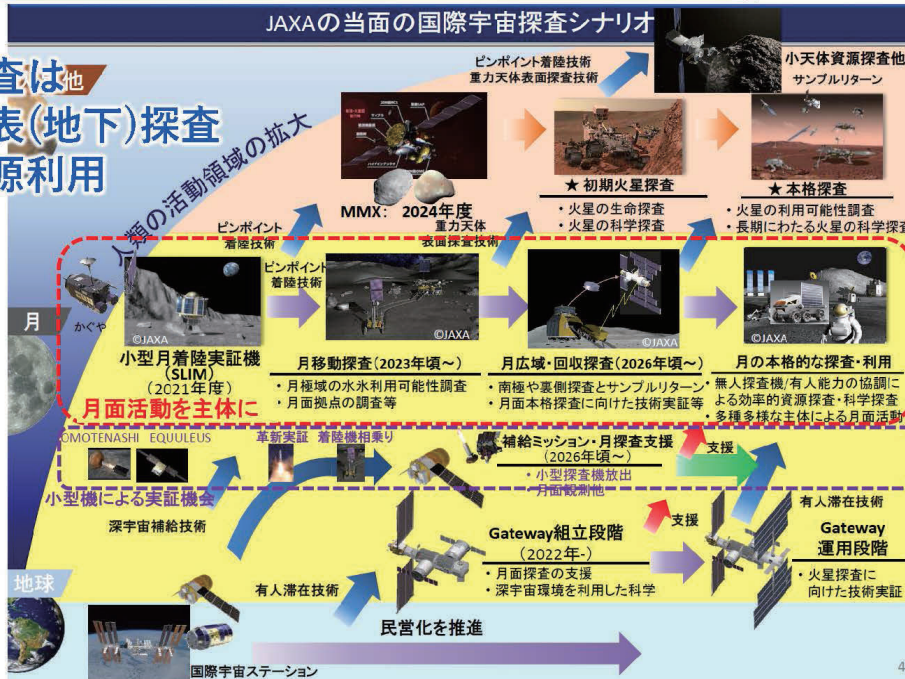
月探査の位置付



JAXAの宇宙探査シナリオ



月探査は他
→ 地表(地下)探査
→ 資源利用





表面(地下)探査に必要な機構

太陽電池パドル (太陽追尾)

カメラ懸架 (回転・チルト)

搬送 (アーム)

把持 (ハンド)

駆動部締結部

サンプル分析用搬送 (内部・コンベア等)

ステアリング

登坂用機構 (ロッカーボギー, クローラ角度調整等)

掘削 (アースオーガ等)

駆動輪 (車輪, 軟弱地盤: クローラ)

砂が降りかかる or 埋もれるような状態でも駆動する必要

試験技術ワークショップ 2019/12/12

©JAXA

5

月面活動における機構潤滑要素の課題



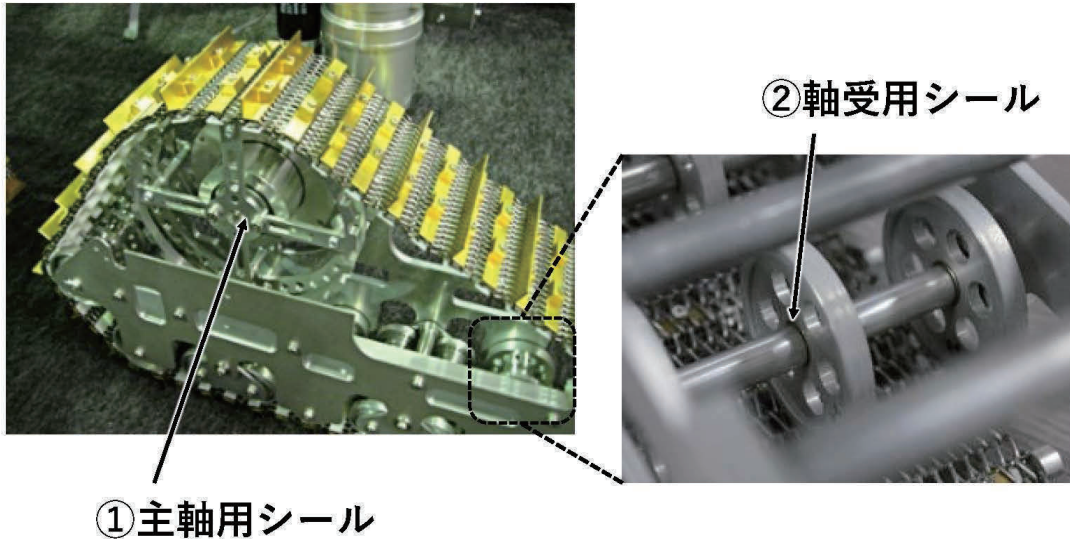
耐粉塵(レゴリス)対策

- 粉塵に対する耐摩耗性向上
 - 耐摩耗材料
 - コーティング技術
- 粉塵の侵入を防ぐ
 - シール技術

課題

- 材料劣化・ガス発生
 - 高真空, UV, 放射線
- 厳しい熱環境
 - 表面温度は-150~+100°C
 - 熱膨張差により摺動部の寸法維持困難
 - シール性悪化
 - 回転トルク上昇
- 電源確保困難(極域・竖穴)
 - できうる限り低トルク

駆動輪における耐粉塵対策としてシール技術



JAXAとメーカーが共同で研究開発を進めている







試験技術ワークショップ 2019/12/12

7

①主軸用シール



コンタクトシールの比較

| | ラジアルシール | | | フェイスシール | | |
|----------|--|--|---|---|--|---|
| | リップシール | バリシール | ブラシシール | バリシール | フローティングフェイスシール | メカニカルシール |
| 特徴 | Rotating oil seal  | Static seal for high pressure  | Gas turbine seal  | Valve  | Crawler  | Water pump  |
| シール性能 | ◎ | ◎ | △ | ○ | ◎ | ◎ |
| トルク | △ | × | ◎ | △ | × | △ |
| 温度の影響 | × | △ | △ | △ | ○ | ◎ |
| フレキシビリティ | △ | △ | ○ | × | △ | ◎ |

試験技術ワークショップ 2019/12/12

8



①主軸用シール

ベローズ型メカニカルシール



特徴

- シール性能が良い
- 温度変化時のトルク変化が小さい
- 外部から力や衝撃を受けた際にも、シール面の接触荷重を維持できる

課題

- 極低温・高真空環境で使用可能な摺動面材料の選定
- 粉塵環境化でのベローズ部の挙動に問題がないか
- 適切な押し当て力とトルクの関係性を明らかにしたい

①主軸用シール



材料選定：真空中リング-オン-リング 摩擦試験

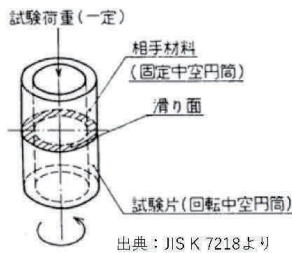
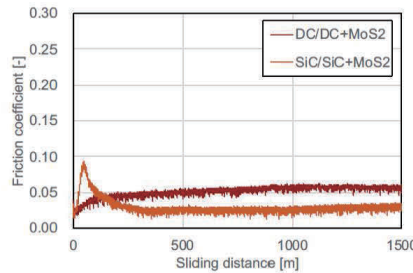
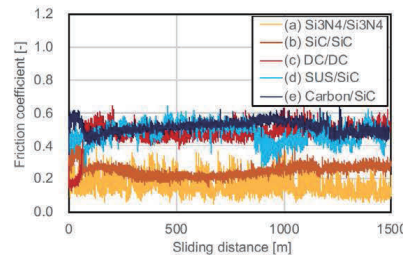


表 1 摩擦試験条件

| | |
|-------|---------------------------|
| 接触面圧 | 0.125 MPa |
| すべり速度 | 0.1 m/s |
| 総合距離 | 1,500 m |
| 試験雰囲気 | 真空中 10 ⁻⁴ Pa 台 |

表 2 試験材料と組み合わせ

| No. | 静止リング | 回転リング |
|-----|--------------------------------|--------------------------------|
| (a) | Si ₃ N ₄ | Si ₃ N ₄ |
| (b) | SiC | SiC |
| (c) | SiCにダイヤモンド被膜 | SiCにダイヤモンド被膜 |
| (d) | SUS420J2 | SiC |
| (e) | フッ素含浸セラフィット | SiC |

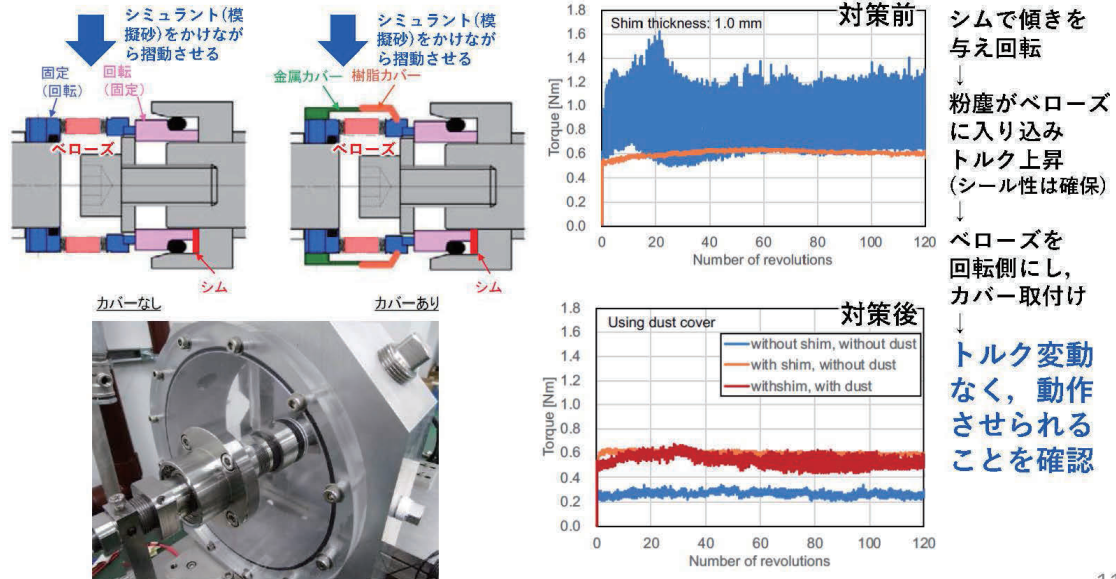


SiC/SiC, DC/DC
が良好な結果
↓
MoS₂焼成膜を施し、
追加試験
↓
SiC/SiCが最初高い
摩擦係数だが、
その後安定して低い
↓
SiC/SiC + MoS₂
を選定

①主軸用シール



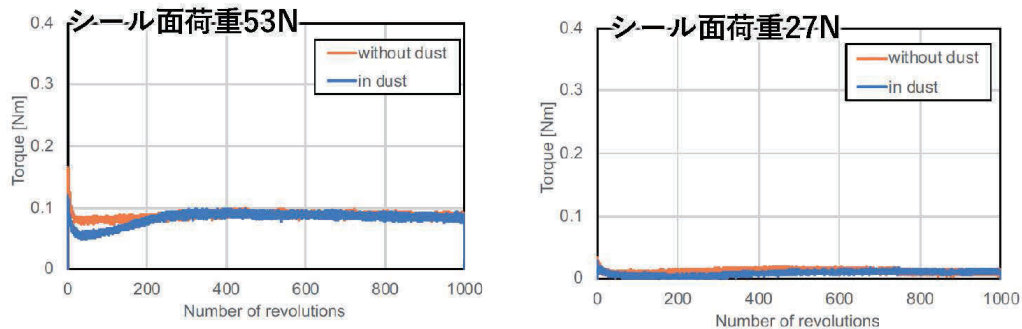
ベローズ挙動評価：大気中摩擦試験



①主軸用シール



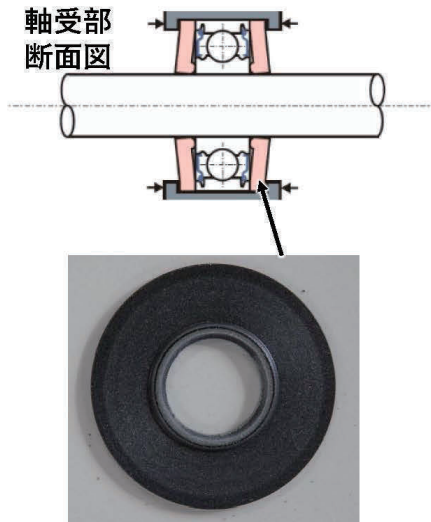
実環境試験：粉塵埋没真空中摩擦試験



- シール面を粉塵中に埋没させた状態での回転試験(10rpm)を実施
- トルクは粉塵の有無によらず一定
- シール面荷重を適度に低下させることで、シール性と低トルクを両立
- 月面での適用性は高いと考えられる
- ※ 極低温での試験準備中

②軸受用簡易シール

樹脂製カラーシール



特徴

- 原理的には簡易で軽量
- 材料自体が潤滑性を持つ

課題

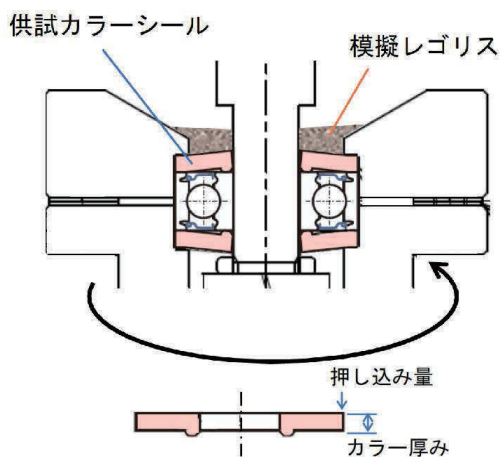
- 適切な材料・寸法の選定
- 設置位置や与圧方法の検討

試験技術ワークショップ 2019/12/12

13

②軸受用簡易シール

粉塵埋没真空中摩擦試験



樹脂カラーの厚みと押し込み量
で摺動部の面圧を調整する

表3 シール試験条件

| | |
|--------|---|
| 荷重 | 0 → 50 N |
| 回転速度 | 10 rpm |
| 試験回転数 | 1,000 (粉塵無し) + 14,000 (粉塵あり) |
| 雰囲気気圧力 | 10 ⁻⁵ Pa 以下 |
| 温度 | 常温 |
| 粉塵量 | 2 g |
| 軸受仕様 | 深溝玉軸受, SUS440C 内径 8 mm, 外径 22 mm, 幅 7 mm |
| カラー形状等 | 厚み: 1, 2 mm 押し込み量: 0.1, 0.3, 0.5 mm |

表4 試験材料と添加剤

| No. | ベース材料 | 主な強化剤, 添加剤 |
|-----|-------|------------------------|
| A | PTFE | ガラス繊維, Mo |
| B | PTFE | 炭素繊維, MoS ₂ |
| C | PEEK | 炭素繊維, PTFE |

試験技術ワークショップ 2019/12/12

14

②軸受用簡易シール



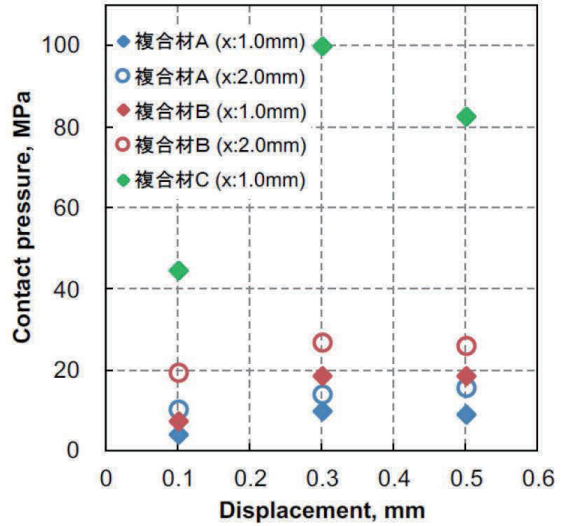
粉塵埋没真空中摩擦試験

表5 シール性の可否

| 複合材 No. | カラー 厚み | 押し込み量 | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0.1 mm | 0.3 mm | 0.5 mm |
| A | 1 mm | × | × | × |
| | 2 mm | × | × | ○ |
| B | 1 mm | × | × | × |
| | 2 mm | ○ | ○ | ○ |
| C | 1 mm | × | ○ | ○ |
| | 2 mm | | | ○ |

- 押し込み量をきちんと設定すれば A, B, Cの全種類が使用可能
- 複合材CはABと比して硬度が高く 薄い材料でもシール性を確保可能

※右図は構造数学モデルを用いた 面圧の解析結果

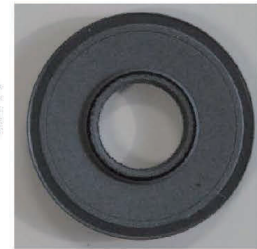
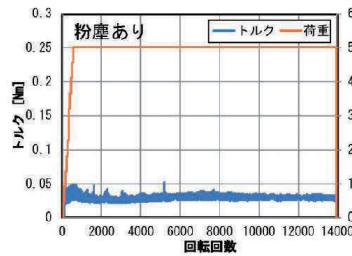
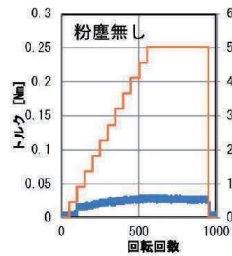


②軸受用簡易シール

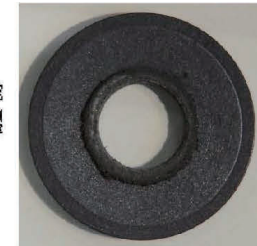
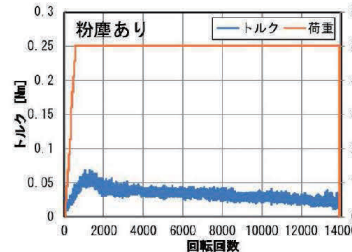
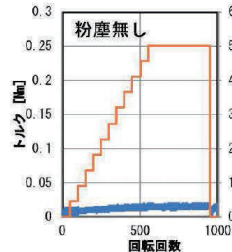


粉塵埋没真空中摩擦試験

複合材 A
厚み: 2 mm
押し込み: 0.5 mm



複合材 B
厚み: 2 mm
押し込み: 0.1 mm

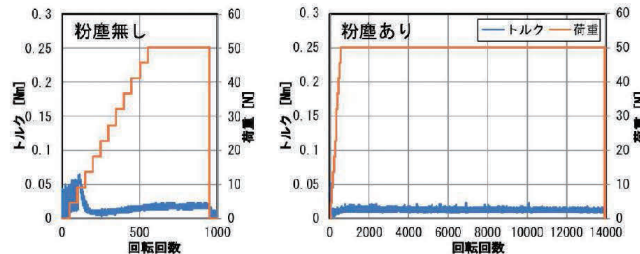


②軸受用簡易シール



粉塵埋没真空中摩擦試験

複合材 C
厚み：1 mm
押し込み：0.3 mm



- PTFE をベースとする複合材 A, B では、粉塵の有無によらず低トルク安定
- PEEKベースの複合材 C では、試験開始直後にトルクが増大するものの、その後は低下・安定 ⇒ 移着膜が形成されれば安定する
- 内輪端面とすべらせた方が、外輪端面とすべらせた場合より低トルク ⇒ いずれも内輪滑りで評価している
- 特に複合材 C では、0.2Nm以下の低トルクを達成
- ※ 極低温での試験を準備中
(材料単体のローラー-オン-プレート極低温試験は実施済)

試験技術ワークショップ 2019/12/12

17

まとめ



- 月面で使用する駆動機器を粉塵（レゴリス）から守るため、メカニカルシールをはじめとフェイスシールについて、真空粉塵環境でそのシール性とトルクを評価し、さらなる性能向上に向けた取り組みを行った。
- ドライブシャフト等の主軸用シールとして、溶接ベローズを用いたメカニカルシールの評価を実施した。摺動材料としてSiC/SiCの組み合わせを採用し、二硫化モリブデン焼成膜で潤滑した結果、粉塵に対する優れたシール性と約0.02 Nmの低トルクを得ることができた。
- 粉塵に接する箇所を使用する軸受用の簡易シールとして、カラーシールの真空粉塵環境下での評価を実施した。軸受内輪の端面をシール面として摺動させる方式で、材料の選択、カラーの厚みや押し込み量の調整により低トルクで耐久性を有するシールの実現に成功した。
- 今後、シール機構全体としての極低温試験を実施し、極低温環境化での有効性を検証する。

試験技術ワークショップ 2019/12/12

18

質疑応答

質問者①

ご講演ありがとうございました。極低温環境で検証をされるということについての質問です。極低温環境では熱収縮など様々な課題があると思いますが、一番課題と認識されているものについてお聞かせください。

発表者

フェイスシールは、径が変化したとしても、接触面自体が当たっていれば、大きな問題ではないです。それよりも、冷たくなり樹脂が固くなることによって、面圧が変化し、トルクが大きくなることや潤滑状態が変わって摩耗が大きくなるのが課題として挙げられます。発表中で登場した3種類の材料については、単体の極低温摩擦試験を実施しており、試験結果から上手くいくという見積は得られています。ただし、砂との干渉がある状態での動作の検証は行っていないので、今後実施していく予定です。

質問者②

まず、試験で用いられた模擬砂の粒度等の情報をお聞かせください。また、固定された軸を回して試験を実施されたと思いますが、実際の使用環境では軸に振動が発生すると思います。これらの差異についてご認識をお聞かせください。

発表者

一つ目の質問に関して、模擬砂は市販のものを購入しています。平均粒形は70ミクロンです。月の砂は、月の海と陸で厳密には粒度分布が違いますが、用いた砂は、より細かいと考えられる海を想定した模擬砂を採用しています。二つ目の質問については、軸にラジアル方向の荷重をかけて試験を実施していますが、軸の振動はさせていません。振動による荷重はシールの押しあて力よりも十分に小さいと予想はしておりますが、詳細な計算を行っているわけではなく、今後の課題でして、いずれその結果も共有できればと思っております。