

マニピュレータ飛行実証試験が成功裏に終了し、宇宙ステーションに搭載されるマニピュレータシステム (JEMRMS) の操作信頼性が実証された。JEMRMS の潤滑には固体潤滑技術が駆使されており、その信頼性のますますの向上に向けて研究を続けている。宇宙用ブレーキには従来の複合樹脂材に代えてセラミックスを適用し、地上/宇宙環境を問わず安定した制動特性を得ることに成功した。また、宇宙用歯車の寿命設計基準を拡充し、片当たりの可能性がある条件でも寿命予測が可能となった。宇宙用転がり軸受は真空中に比べると大気中で寿命が短く、機器の地上試験などにおいて制約となっている。この制約の解消に向け、真空中/大気中で潤滑メカニズムについて研究中であり、リテーナに含まれる強化材料が大気中潤滑性能の低下に関与していることを明らかにした。宇宙潤滑技術の信頼性向上に向け、実証的データの蓄積と並行して、基礎的潤滑メカニズムの研究を進めている。

The manipulator flight demonstration (MFD) project was successfully completed in 1997, and this verified the reliability of the mechanism of the Japanese Experiment Module Remote Manipulator System (JEMRMS) and its lubrication. We are continuing the development of even more reliable solid lubrication technology for JEMRMS following the MFD project.

Among the items we have developed are a ceramic-coated brake pad that provides stable high friction, and a life prediction method for space gears under misalignment condition. We are also studying the basic mechanisms of solid lubrication, particularly for the development of a ball bearing which has long life both in air and in a vacuum.

1 まえがき

当社は、宇宙ステーションの日本実験モジュール (JEM) の主要設備の一つである JEMRMS のシステム担当メーカーであり、その潤滑技術についても早くから開発を行ってきた。

1997年8月7日、当社がシステム担当として開発したマニピュレータ飛行実証試験 (MFD: Manipulator Flight Demonstration) システムがスペースシャトルにより打ち上げられ、模擬軌道上交換装置の脱着、ドア開閉などの軌道上実験に成功した⁽¹⁾。これは JEMRMS の子アーム (精細作業用小型アーム) の操作性の軌道上実証を目的としたものである。ロボットは地上での長期保管や打上げの振動に耐え、軌道上で正常に動作することが確認され、当社 JEMRMS 潤滑技術の信頼性が実証された。

JEMRMS の潤滑は宇宙空間という特殊環境に加え、通常の人工衛星にはない大きな負荷を取り扱う技術が必要である。また、10年を超えるミッションが予定されていて、潤滑剤の劣化、減量にも注意を払う必要がある。これらを踏まえ、JEMRMS には固体潤滑技術を適用している。

ここでは、MFD に適用された技術にさらに高い信頼性を与えるべく研究開発を進めてきた、当社の最近の宇宙用固体潤滑技術について述べる。

2 宇宙用ブレーキの開発

JEMRMS の関節部にはブレーキが組み込まれる。宇宙用ブレーキには温度や動作頻度などの使用条件によらず一定の摩擦トルクを発生し、また地上での試験などに備えて大気中でも真空中と同等の性能を示すことが要求される。従来、宇宙用ブレーキの摩擦材にはポリイミドなどの高分子材料が検討されてきたが、摩擦特性が温度や雰囲気の影響を受けやすく、安定した性能を得ることが難しいため、新たにセラミックスを摩擦材とした宇宙用ブレーキを開発した⁽²⁾。図1に開発したブレーキパッドの外観を示す。

セラミックスは種々の材質を検討した結果、最終的にブレーキ材として適度な摩擦係数が期待できる酸化クロムを採用した。ブレーキパッドへの適用形態としては溶射膜と塗布膜 (TOSRIC_{TM}コーティング) を検討した。両者とも真空中で0.7~0.8の摩擦係数をもつが、溶射膜は大気中では摩擦係数が下がり、また真空中でも動作間隔が長くなると摩擦係数の低下が認められた。これは溶射膜中に存在する気孔から放出される気体が影響しているものと思われる。塗布膜は緻密な構造をもつため、大気中も、真空中でもほとんど摩擦特性が変化せず、動作間隔の影響もなく非常に安定した性能を示すことがわかり、宇宙用ブレーキには酸化クロム塗布膜を採用した。

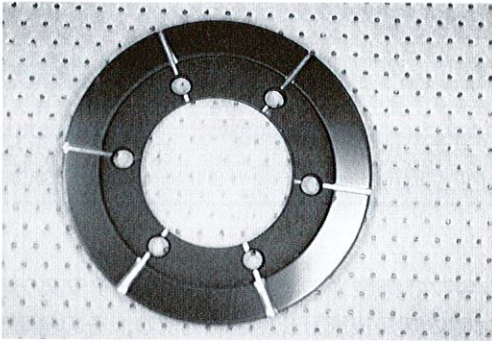


図1. 宇宙用セラミックブレーキパッド 従来の複合樹脂製パッドに比べ、格段に安定した高摩擦トルクを発生する。外径 50 mm。
Ceramic brake pad for space use

3 偏荷重下の歯車寿命設計技術

JEMRMS の歯車は設計上数百 MPa の接触面圧で使用されるが、軸のたわみや軸受のガタなどにより歯面の接触部が偏り、局所的に GPa オーダの面圧が発生し、寿命が設計値より低下することがある。歯車には、二硫化モリブデンを主成分とし、熱硬化性樹脂をマトリックスとする固体潤滑被膜を用いているが、このような局所的な高面圧下での潤滑寿命は不明であった。このため、“片当たり”状態での寿

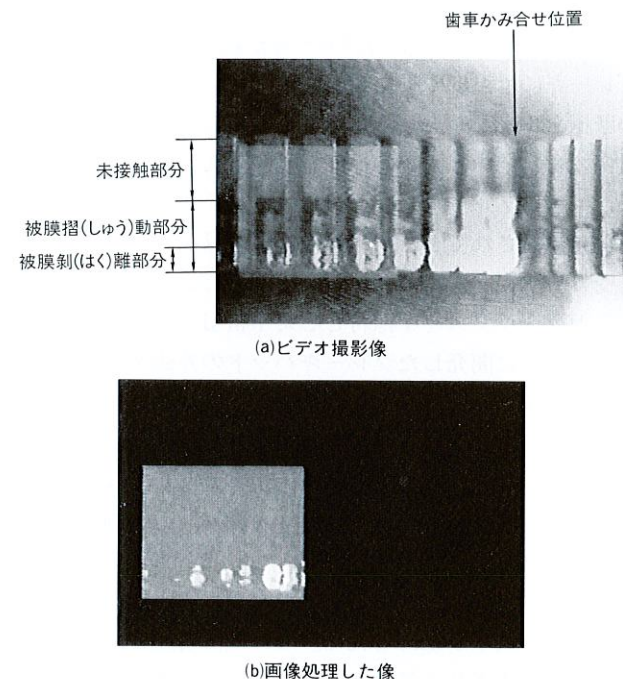


図2. 歯車片当たり試験中の歯車歯面 回転同期して撮影されたビデオ画像(a)は二値化され(b)の像となる。(b)の白い部分が被膜の剥(はく)離した部分を示す。

Gear tooth surface images in gear life test under misalignment condition

命予測法を開発した⁽³⁾。この片当たり状態での寿命が予測できれば、逆に許容片当たり量が求められ、各はめ合い部の許容すき間、軸の必要剛性など、関係する設計基準を得ることができる。

寿命予測法の開発では、まず任意の傾きを与えて歯車をかみ合わせることができる真空中歯車試験機を開発し、各種の片当たり状況を与えて歯車の寿命を調べた。摩擦トルクの変化などからでは寿命を検知することが困難なため、歯面の潤滑被膜を回転する歯車に同期させてビデオ撮影し、画像処理を行って被膜の破損時点を特定した。図2に実験中の歯車歯面のビデオ撮影画像を示す。次にそれぞれの片当たり時の歯面接触面圧を解析により求めた。図3に接触面圧分布解析値を示す。このようにして求めた接触面圧と寿命のデータを基に、偏荷重下の宇宙用歯車寿命設計基準を作成した。この設計基準はJEMRMS 機構設計に反映されている。

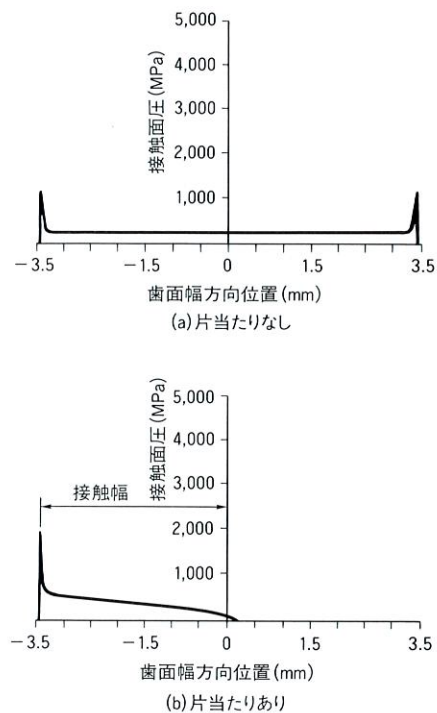


図3. 歯車歯面接触面圧分布解析値 片当たりにより最大面圧は大きく上昇する。

Contact stress distributions on gear tooth

4 宇宙用潤滑剤の大気中での寿命向上研究

JEMRMS を含む宇宙機器の多くは地上で数々の試験を受け、性能が確認されてから打ち上げられるため、地上での潤滑性能も軌道上に劣らず重要である。しかし、一般に固

体潤滑剤は雰囲気によって大きく性能が変化し、例えば真空中で良好な潤滑剤は大気中では性能が劣化することが多い。主要な宇宙用固体潤滑剤である二硫化モリブデンもこの例に漏れず、大気中では真空中より摩擦が数倍大きく、寿命が二けた小さくなることもある。

現在は地上での許容動作回数規準を定め、軌道上での寿命を保証しているが、将来的な宇宙と地上の往還などを考えると、雰囲気に依存しない固体潤滑法の開発が望まれる。このため、まず宇宙用転がり軸受を対象として、潤滑機能の雰囲気依存メカニズムの検討を行った⁽⁴⁾。

宇宙用転がり軸受の構造を図4に示す。固体潤滑の宇宙用転がり軸受は、ボールとレースに二硫化モリブデンスパッタリング膜処理を施し、初期の潤滑をこれにより行い、回転とともにポリテトラフルオロエチレン (PTFE) 複合樹脂製のリテーナからボールに移着する PTFE が潤滑を担うようになる。

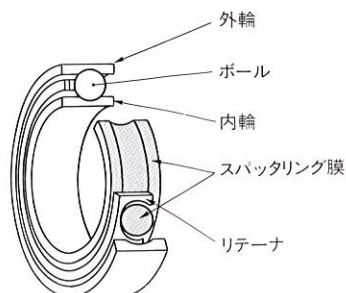


図4. 宇宙用転がり軸受
二硫化モリブデンスパッタリング膜とリテーナからのPTFE 移着膜で潤滑する。
Solid lubricated ball bearing for space use

大気中でこの転がり軸受は真空中より寿命が1けた以上低下する。この原因は二硫化モリブデンスパッタリング膜の大気中寿命低下よりは、むしろ大気中ではリテーナからボールへの PTFE の移着が良好に行われなためであることがわかった。この移着特性が雰囲気により異なる理由を調べるため、真空中と大気中でピンオンディスク型摩擦摩耗試験機を用いて PTFE 移着膜を作成し、分析を行った。

リテーナ材は、PTFE に強化のためガラス繊維が配合されているが、X線光電子分光法などで行った移着膜の分析によると、大気中で試験したのものにはこのガラスの成分である Si や Ca が含まれていることがわかった。ガラス単体の摩擦摩耗試験などを行ってさらに調べた結果、大気中では雰囲気中の水分によりこのリテーナ中のガラス繊維の強

度が小さくなり、細かく砕かれて PTFE 移着膜中に取り込まれ、移着膜の潤滑性能を低下させていることが明らかになった。

これにより、リテーナの強化材を適切なものに置き換えることなど、性能の雰囲気依存性が小さい固体潤滑転がり軸受開発の方向が得られた。このような基礎的な試験や分析を行うことにより、潤滑メカニズムの解明を進め、宇宙機器潤滑の性能、信頼性向上に努めている。

5 あとがき

宇宙機器は信頼性が最大の課題であり、新しい技術の導入に際しても十分な信頼性の保証が必要である。当社は機器としての信頼性データを積み上げていくと同時に、基礎的な潤滑メカニズムの研究により、宇宙機器が遭遇するあらゆる状況下で性能を発揮する潤滑技術の開発を進めていく予定である。

文献

- 長友正徳, 他. "MFD システムの開発と運用結果". マニピュレータ飛行実証試験 (MFD) シンポジウム前刷集. 東京, 1998-03, 1998, p.42-51.
- Hiraoka, N., et al. "Frictional Properties of Cr₂O₃ Coated Brakes in Vacuum". International Tribology Conference Synopses. Yokohama, 1995-10, p.183.
- Yoshii, Y., et al. "The Influence of Misalignment on the Durability of Solid-Lubricated Spur Gears". Proceedings of the International Tribology Conference. Yokohama, 1995-10, p.1591-1596.
- 吉井保夫, 他. "宇宙用転がり軸受の保持器材の雰囲気の影響". トライボロジー会議予稿集. 北九州, 1996-10, p.289-290.



平岡 尚文 HIRAOKA Naofumi

研究開発センター 機械システム研究所研究主務。
トライボロジー関連の研究・開発に従事。日本機械学会、
日本トライボロジー学会会員。
Mechanical Systems Research Labs.



吉井 保夫 YOSHII Yasuo

研究開発センター 機械システム研究所研究主務。
宇宙機器など特殊環境のトライボロジー技術の開発に従事。
日本機械学会、日本トライボロジー学会会員。
Mechanical Systems Research Labs.



佐々木 彰 SASAKI Akira

小向工場 宇宙メカトロニクス技術部主務。
宇宙用機構部品、アクチュエータの開発に従事。日本機械学会、
日本トライボロジー学会、日本航空宇宙学会会員。
Komukai Works