

論文の内容の要旨

論文題目 宇宙環境要素が二硫化モリブデン系固体潤滑膜のトライボロジー性能に及ぼす影響に関する研究

氏 名 有田 正司

現在、米国、欧州、日本、ロシアなどの国際協力により、高度 300~500 km の比較的高度の低地球周回軌道 (LEO: Low Earth Orbit) 上に宇宙ステーションを打ち上げ、極微小重力環境下の材料実験、ライフサイエンス実験など多様な研究を長期間に亘って行う計画が推進されており、2008 年 1 月に宇宙ステーションが完成する予定である。この中で日本は主に極微小重力環境下での科学実験を行うために用いられる日本実験モジュール (JEM: Japanese Experiment Module) 「きぼう」を開発し、建設する。JEM には、マニピュレータ、実験用ペイロードなどを脱着、固定するラッチ機構など LEO 空間に直接晒される可動機構部を有する各種の機器が搭載されている。

宇宙用機器は一旦宇宙に打ち上げられた後は保修作業が極めて困難なため、メンテナンスフリーで長期間の稼働を保證する信頼性設計が重要である。中でも摺動部、接触部を有する可動機構の信頼性を左右するのはトライボ設計であり、具体的には摩擦面、接触面の形状決定、摩擦面材料の選定の他、使用する潤滑剤の選定がある。従来、宇宙空間の特徴的な環境要素としてまず挙げられるのは高真空であり、高真空用潤滑剤としては二硫化モリブデン (MoS_2) 系固体潤滑剤が多用されてきた。しかし、宇宙ステーションが周回飛行する LEO 環境要素は高真空だけではない。1980 年代初頭に LEO を周回するスペースシャトルの運用が開始されると、LEO 実環境の大気主成分である原子状酸素がスペースシャトルの飛行速度に等しい相対速度約 8 km/秒で材料表面に衝突し、表面近傍の原子が原子状酸素と反応し、酸化が起こること、および高速の原子状酸素が衝突することによるスパッタリング作用により材料が徐々に失われることが判明した。

このため宇宙ステーションに使用される材料、潤滑剤も、原子状酸素をはじめとする LEO

実環境要素の影響を考慮して選定する必要性が生じた。LEO実環境に直接曝露される部位に用いられる潤滑剤は、高真空環境下で蒸発しない、原子状酸素によるトライボロジー性能の劣化が少ないなどの性能が要求される。

原子状酸素が MoS₂ 系固体潤滑剤の摩擦係数、寿命などに与える影響については、Cross、山口、Lifshitz、大前および Tagawa らなど多くの研究者が研究しており、一般的傾向として摺動初期の摩擦係数は高くなること、MoS₂ は MoO₃ などの Mo 酸化物に変化することが報告されているが、照射後の摩擦係数変化などトライボロジー性能変化の原因については十分に解明されていない。また、LEO実環境に MoS₂ 系固体潤滑剤を曝露し、回収した後、トライボロジー性能を評価した研究は、本研究と Matsumoto らの研究のみである。しかしながら、Matsumoto らの研究では MoS₂ の酸化程度を詳細に解析しておらず、トライボロジー性能変化の原因を解明していない。

そこで本研究では、LEO実環境に直接曝露される宇宙ステーション曝露部のラッチ機構部の潤滑剤として、真空環境用の固体潤滑剤として実績のある MoS₂ 系固体潤滑膜の使用を考え、原子状酸素や紫外線などのLEO環境要素が MoS₂ 系固体潤滑膜の摩擦係数、寿命にどのような変化をもたらすか、またその原因はどこにあるのかを実験的に解明して、多種ある MoS₂ 系固体潤滑膜の中から最適の潤滑膜を選定する方針を提示した。

まず、チタン合金ディスク表面に焼成した MoS₂ 系固体潤滑膜（スパッタ膜、無機バインダ塗布焼成膜、有機バインダ塗布焼成膜）に、地上で人工的に作り出した真空環境中で原子状酸素あるいは紫外線を照射するか、実際に宇宙空間に打ち上げてLEOで一定期間曝露後に回収し、LEOと同等の真空環境（10⁻⁵~10⁻⁶ Pa）でピン・オン・ディスク摩擦試験を行って、摩擦係数と寿命の変化を測定した。

次に、AES(オージェ電子分光)、XPS(X線光電子分光)、FT-IR(フーリエ変換赤外分光)を適用して、潤滑膜を構成する各原子の潤滑膜深さ方向分布と化学結合状態、バインダである高分子材料の分子構造を解明した。これらの実験と分析により、LEOの大気主成分である原子状酸素が秒速 8km の相対速度で曝露部の潤滑剤被膜に衝突すると、潤滑膜の表面から一定の深さまで MoS₂ が酸化されて摩擦係数の高い Mo 酸化物が生成することがわかった。MoS₂ 系固体潤滑膜が低摩擦であるのは、MoS₂ がせん断抵抗の小さいグラファイトのような層状構造をもつからである。この MoS₂ の量が酸化により減少するため、摩擦係数が増加することがわかった。原子状酸素との衝突が長期間続けば摩擦係数の増加も大きくなる。これらの影響が最も小さい MoS₂ 系固体潤滑剤はバインダにポリアミドイミドを使用する有機バインダ MoS₂ 塗布焼成膜であることが判明した。

また、太陽光線に含まれる紫外線と宇宙線は、有機バインダである高分子材料の分子鎖の架橋を促進して潤滑膜を強化するので、潤滑膜の寿命が延伸することが判明した。しかし、架橋部を切断して強度を低下させるという効果も併せもつので、有機バインダ MoS₂ 塗布焼成膜を

調製するに際して、焼成する温度と焼成時間を加減し、バインダの架橋が過度に進行しないようにすることが重要であることがわかった。またこのようにすると、焼成に際して MoS₂ の酸化の程度が抑制され、低摩擦係数の維持に効果がある。

このように、最新の分析手法を適用することによってLEO環境要素が MoS₂ 系固体潤滑膜のトライボロジー性能に与える影響が実際に解明され、宇宙ステーション曝露部の機構において使用可能な MoS₂ 系固体潤滑膜をどのように調製すべきかについての有用な知見が得られた。

本論文は第1章の序論から第5章の結論および AES、XPS、FT-IR 分析の原理などについて述べた付録から構成されている。各章の記述内容は以下の通りである。

第1章は序論であり、本研究の背景、宇宙用潤滑剤として多用されている MoS₂ 系固体潤滑剤の基本的性質、LEOの環境条件、宇宙ステーションが飛行するLEO実環境において原子状酸素と紫外線が材料および潤滑剤に与える影響の重要性、本研究に先行する研究の紹介と検討、本研究の目的と研究遂行の方針について述べている。

第2章では、本研究で用いた原子状酸素照射装置の性能と照射条件、この装置により人工的に原子状酸素を照射した3種類の MoS₂ 系潤滑膜の摩擦係数と摩擦寿命をLEO実環境の真空度にほぼ等しい 10⁻⁵~10⁻⁶ Pa の真空度で測定した結果について述べる。また各種表面分析法を用いて潤滑膜表面が原子状酸素から受けた変化を調べ、原子状酸素との反応がトライボロジー性能に与える影響を明らかにし、有機材料であるポリアミドイミドをバインダとする MoS₂ 塗布焼成膜の受けた影響が最も軽微であることを述べる。

第3章では、その有機バインダ MoS₂ 塗布焼成膜に対して紫外線照射装置を用いて紫外線を人工的に照射し、第2章と同じようにLEO実環境の真空度にほぼ等しい真空環境下で摩擦係数、摩擦寿命を計測して、紫外線照射の影響を調べる。また、FT-IR分析を用いてバインダのポリアミドイミドが紫外線から受ける影響について調べ、紫外線がトライボロジー性能を変化させるメカニズムを調べる。

第4章では、第2章、第3章と同じポリアミドイミドをバインダとする有機バインダ MoS₂ 塗布焼成膜を付けた金属ディスクを宇宙空間に打ち上げてLEO実環境に曝露した後、回収し、地上で摩擦係数と摩擦寿命を計測する。次に各種表面分析法および FT-IR 分析を用いて潤滑膜に生じた変化を調べ、LEO環境要素がこの固体潤滑膜に与えた影響とその性能変化との関係を明らかにする。また、第2章、第3章で述べた原子状酸素と紫外線の人工的な照射による性能変化と比較、検討し、人工照射実験結果とLEO実環境曝露実験結果との差異の原因を考察する。

第5章では、本研究の結論を述べる。

付録として、AESによる元素分析の原理、XPSによる化学結合状態分析の原理、FT-IRによる有機材料の化学構造分析の原理およびこれらの装置の仕様、性能を最後に載せる。

以上