

スペーストライボロジーの現状と将来



技術解説

田川 雅人*, 大前 伸夫**

Present and Future of Spacetribology

Key Words : tribology, atomic oxygen, low earth orbit, satellite, space

はじめに

今世紀も終わりに近づいた1997年は国際宇宙ステーション(ISS)の軌道上への打ち上げが目前に迫り、いよいよ本格的な宇宙環境の利用プログラムが動き出した記念すべき年である。一方、目を地球以外に向けると、南極で発見された隕石から火星生命の痕跡が発見されたのを皮切りに、Mars Pathfinderの火星軟着陸の成功、Mars Global Surveyorの火星でのエアロブレーキング、木星の4大衛星の1つであるエウロパに大量の水の存在を発見したGalileoに

よる木星圏探査、土星探査を目指すCassiniの打ち上げなど、多くの宇宙探査計画が大きな成果を挙げた年でもあった。このように多くの成果を挙げた宇宙探査ではあるが、それを支えている要素技術には技術的に未解決の問題が多く残されている。

多くの場合、人工衛星のシステムは冗長系であり、バックアップの機構を備えているが、メカニカルな部分に関してはそのような冗長系を形成できない場合が多い。例を挙げれば太陽電池パドルや通信用アンテナの展開などである。これらの展開の失敗はミッションの成否に直接関わる大問題となるため、宇宙環境下での機械要素の運動は100%その成功を確実なものとしなければならない。

宇宙環境下での機械要素の運動を扱うスペーストライボロジーの分野では上述の様な観点から信頼性が最重要視されており、実績のある固体潤滑剤が繰り返し使用される場合が多い。これまで我国も多くの人工衛星を打ち上げており、スペーストライボロジーに関しても多くの地上実験データや宇宙での実績を蓄積してきた。しかしながら、国際共同宇宙ステーションを代表とするような低軌道(~500km)における宇宙環境はこれまで宇宙=真空と考えられてきた常識を覆し、原子状酸素のアタックという新たな問題を提起している。本稿ではこのような低地球軌道環境におけるスペーストライボロジーについてその現状と将来の方向性について概観する。

*Masahito TAGAWA
1962年3月4日生
1989年大阪大学大学院工学研究科、後期課程、精密工学専攻修了
現在、大阪大学大学院工学研究科、物質・生命工学専攻、学内講師、工学博士、表面工学、航空宇宙工学
TEL 06-879-7282
FAX 06-879-7282
E-Mail tagawa@prec.eng.osaka-u.ac.jp



**Nobuo OHMAE
1947年2月4日生
1974年大阪大学大学院工学研究科卒業
現在、大阪大学大学院工学研究科、物質・生命工学専攻、助教授、工学博士、トライボロジー
TEL 06-879-7281
FAX 06-879-7281
E-Mail ohmae@prec.eng.osaka-u.ac.jp



低地球軌道における宇宙環境

低地球軌道における宇宙環境要因としては多くの要因を挙げるができるが、重要なものとしては、紫外線、放射線、プラズマ(電子、イオン)、デブリ、そして中性ガス等がある。これらに関しては文献1)に詳述されているが簡単にまとめると以下ようになる。

紫外線は太陽から放射されるが、地上と異なり大気層を通過しないため、波長の短い真空紫外線の強度が高いのが大きな特徴である。海面上での太陽光スペクトルに対して、宇宙での太陽光スペクトルは200nm以下の短波長の成分が多く、紫外線強度は 0.1371 W/cm^2 程度となる。

放射線環境は軌道の高度に大きく依存する。特に1000km以上の高度域での放射線環境は非常に劣悪であり、人体にも大きな影響を及ぼすことから、ISSを500km以下の高度域に建設する理由の1つとなっている。

宇宙環境に存在するプラズマは太陽からの真空紫外線によるガス分子の光電離を一次的な原因としている。したがって、日中と夜間では電子密度やイオン密度に大きな差がある。また、地磁気の影響で軌道傾斜角にも大きく依存する。これ以外に人工衛星の表面が帯電するために衛星回りで局所的なプラズマが発生する。

デブリは微小隕石の様に元来自然界に存在するものと、過去の人工衛星の残骸などを源とする人工的なものがある。これらは人工衛星と相対速度 10 km/s 以上の超高速で衝突するために人工衛星の表面にクレーターを形成したり、大きいデブリは与圧壁を貫通するなど、その驚異がクローズアップされつつある。

中性ガス環境としては原子状酸素が大きな問題である。原子状酸素は酸素分子が太陽紫外線によって解離することによって生じ、高度200kmから500kmにおける主要な高層大気組成である。原子状酸素はきわめて活性な酸化種であり、多くの材料と反応し、ガス化によるエッチング、酸化物の形成など材料の表面特性を大幅に変化させてしまう。特に、材料の表面物性はその機能に大きな影響を及ぼすトライボロジー

の分野においては、その影響が最も懸念されているものの1つである。

低地球軌道環境とスペーストライボロジー

これまで、スペーストライボロジーと真空中でのトライボロジーはニアリーイコールで結ばれてきたが、低地球軌道環境においては前述のように原子状酸素等の影響を考慮する必要がある。スペーストライボロジーに限らず、グラウンドテストで宇宙用材料の原子状酸素に対するデュラビリティーを検証するためのテストは技術的な問題を抱えている。最も大きな問題は宇宙環境をシミュレートするための原子状酸素を地上で発生させることの困難さである。宇宙環境をシミュレートするためには 8 km/s の並進速度を有する原子状酸素を $10^{15}\text{ atoms/cm}^2\text{ s}$ 以上発生させる必要がある。このような条件を満たす原子状酸素発生装置は現在のところ高出力赤外線レーザーを用いたレーザーブレイクダウン法のみと考えられるが、本方式も動作が安定しない面があり、実験室レベルにおいてもその運用は困難を伴う。原子状酸素はきわめて活性であることから単独でも多くの材料表面にドラスティックな変化を生じさせるが、さらに現実の宇宙環境では原子状酸素以外に紫外線などが同時に照射される事による複合効果も指摘されている²⁾。このようにグラウンドテストで宇宙材料の耐環境性を精度よく実験することは現在のレベルではかなり困難であると言わざるを得ない。

材料の静的な特性が宇宙環境下でどのように変化するかを地上で評価することにも問題を抱えている現在、トライボロジーの様な動的な特性を評価する事はさらに困難である。これまで行われてきたトライボロジーへの原子状酸素の影響に関する研究は、原子状酸素を照射した後に試料を大気中に取り出して摩擦試験を行うというシーケンシャルな試験が一般的であった。このようなシーケンシャルな試験方法でこれまでに得られた代表的な結果を図1に示す³⁾。原子状酸素の照射によって二硫化モリブデン系潤滑剤表面は酸化され、そのトライボロジー特性は失われてしまう。しかしながら、 10 N 程度

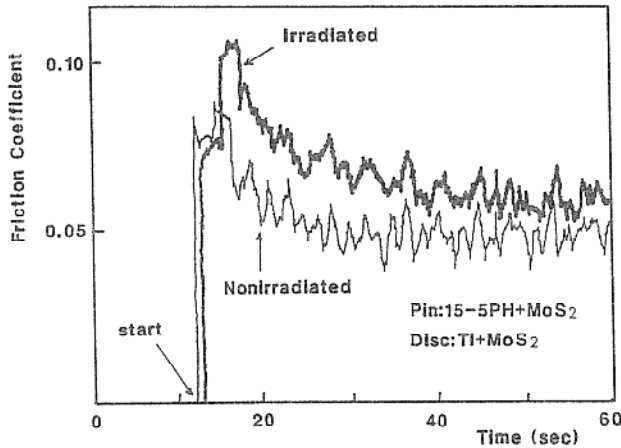


図1 原子状酸素照射前後での二硫化モリブデンスパッタ膜の摩擦係数の変化. 原子状酸素照射終了後に摩擦係数を測定すると摩擦初期には摩擦係数の増大が見られるが、60秒程度で回復する。

の荷重で数回摩擦することによってそのような酸化層は除去され、本来の潤滑剤としての機能を取り戻すことがわかる。このような結果を受けて、得られた結論は“原子状酸素の照射によって潤滑剤表面には酸化膜が形成されるが、数回の摩擦によってその酸化膜は除去されるため、そのシステム全体への影響は少ないであろう”と言うものである。これに対して、原子状酸素を照射しながら同時に摩擦試験を行い、いわゆる *in-situ* な試験方法での予備実験の結果を図2に示す⁴⁾。原子状酸素発生装置としては筆者らによって開発された赤外線レーザーによるガスブレイクダウンを用いたもので、 10^{12} atoms/

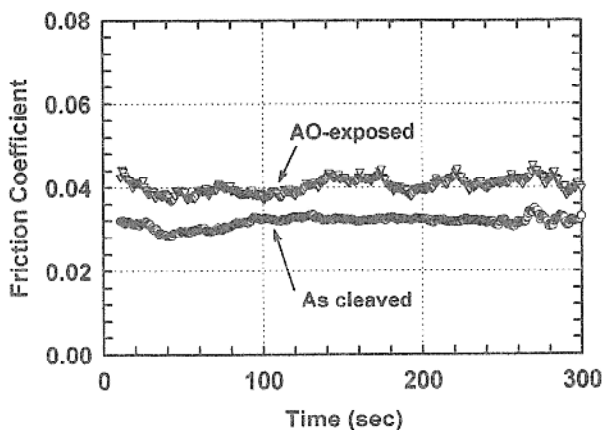


図2 原子状酸素照射中に測定した二硫化モリブデン単結晶(0001)面上での摩擦係数. 図1とは異なり300秒後にも摩擦係数は完全には回復しない。

cm^2s の原子状酸素フラックスを実現できる。また摩擦試験機は一般的な *pin-on-disk* 型のものである。In-situ 摩擦試験の結果は摩擦後にも酸化膜が形成されるか、あるいは荷重が小さい場合には酸化膜の除去が十分には行われず、潤滑剤の特性は回復しない事があり得るを示している。これらの点に関しては今後更に研究を進める必要がある。

スペースマイクロトライボロジー

これからの人工衛星や探査機は打ち上げコストを削減するために小型化が進むことは疑問を挟む余地はない。NASA/USAFの Brilliant Pebbles などの計画によって、これまでの衛星に比べて高機能かつ小型の衛星が次々と開発されつつある^{5,6)}。マイクロサテライト、ナノサテライトというような数キロあるいは数百グラムの衛星を実現する可能性が真剣に議論され、試作の段階に入りつつある。このようなナノサテライトは半導体の分野で培われてきたシリコンのマイクロファブリケーション技術を応用した、宇宙用のマイクロマシンとでも言うべきものである。このようなマイクロサテライトにおいてはアンテナやフライホイール等の可動部品も現在よりも格段に小型化され、その質量も小さいものになることが予想される。

これまで、宇宙空間においては荷重の小さい状態での摩擦は高荷重の場合よりも摩擦条件としては穏やかなものと考えられており、スペーストライボロジーに関する地上試験でも、高荷重、高滑り速度という厳しい条件での試験が行われてきた。低地球軌道上での原子状酸素の曝露によるトライボロジー特性の変化を調べる場合でも、このような高荷重、高滑り速度での試験が前項でも述べたように *ex-situ* に行われており、一般的な試験結果は原子状酸素による酸化によって生じる高い初期摩擦を除けば影響は少ないというものである。

しかしながら、低地球軌道におけるマイクロトライボロジーではマイクロトライボロジーが目指しているゼロ摩耗あるいは極低摩耗という条件が逆に災いする可能性がある。すなわち、低摩耗の条件下では原子状酸素によって酸化さ

れた表面が消失しないために、一旦潤滑剤の表面が酸化されると常に高い摩擦係数の表面で滑り運動が生じることになる。筆者らの予備的な実験結果によると原子状酸素を照射した表面では、照射前に比べて微小荷重における凝着力が極端に大きくなることが示されており⁷⁾、アブレーションが生じない様なマイクロトライボロジー環境では極めて大きな問題となる可能性がある。したがって、マイクロサテライトでは宇宙環境に直接曝露される部位に使用される潤滑剤には原子状酸素と反応性のない材料を選択する必要があるものと思われ、現在以上に宇宙環境に対して注意を払う必要があることは間違いない。

お わ り に

本稿では宇宙環境と今後のスペーストライボロジーのあり方について概観した。前項でも述べたように宇宙用の機器も小型化が進み、将来はマイクロマシンに近いものになってくると予想される。マイクロマシンの動作を保証するためには宇宙用の用途に限らず、その環境に応じた適切な潤滑方法を選択する必要がある。たとえば水蒸気の影響への吸着などはマイクロマシンの動作特性に大きな影響を与えることは研究の結果が示すところでもある⁸⁾。低地球軌道における宇宙環境もマイクロマシンの動作環境としては理想的なものではなく、そのような劣悪な環境においてもマイクロサテライトの動作を確実なものとするためには、さらに多くの研究を積み重ねて行く必要がある。

謝 辞

本稿で紹介した研究の一部は科学技術庁科学技術振興調整費、および文部省科学研究費補助金の援助を受けて行われた。ここに記して感謝する。

参 考 文 献

- 1) B.J.Anderson ed., "Natural Orbital Environment Guidelines for Use in Aerospace Vehicle Development", NASA TM-4527, MSFC, (1994).
- 2) M.Tagawa et al., Proc. 6th Int. Symp. on Mater. in a Space Environ., Noordwijk, The Netherlands, (1994) pp 189.
- 3) M.Arita et al., Proc. 4th Eur. Symp. on Space Mechanisms and Tribol., Cannes, France (1989) pp 67.
- 4) M.Tagawa et al., Proc. Int. Tribol. Conf., Yokohama, Japan (1995) pp 1865.
- 5) E.Y.Robinson et al., Aerospace America, October (1996) pp 38.
- 6) 斉藤宏文, "アメリカの小型衛星開発の動向", 日本ロケット協会(1996), pp 1.
- 7) 池田順一 他, 日本航空宇宙学会 関西中部支部合同講演会予稿集, (1997)印刷中.
- 8) N.Ohmae, "Micro/Nonotribology and Its Applications", B.Bushan ed., Kluwer, The Netherlands (1997) pp 67.

