

超高真空中の潤滑システム



大 前 伸 夫*

Lubrication System in Ultra-high Vacuum

Nobuo OHMAE

1. は じ め に

超 LSI 製造技術の開発に伴い、超高真空中における駆動技術がその生産及び管理の重要なポイントの一つとなってきたが、このような環境下でいかに“潤滑”を効果的に活用してきたかという実績は現在もつと大きなシステムへとトランスファーされつつある。

宇宙空間でのトライボロジーである。

言うまでもなく、この分野の研究は NASA がリードしている。この理由は、米国の宇宙開発がナショナル・プレステージであるのに対し、ソ連を除く先進技術国では開発規模は米国に遠く及ばず、我が国などでは商業利用だけを考慮しているというのが根本的なコンセンサスの違いである。リスクやトラブルシューティングの面からとらえると、デバイス製造技術ではやり直しや変更は可能であるが、宇宙空間での場合はそうはいかない。1986 年 1 月のチャレンジャーの爆発事故以来中断していた NASA のスペースシャトル計画も再開が決定し、宇宙ステーションにおけるさまざまな実験が計画されている現在、宇宙空間で駆動する機器については今まで以上の信頼性と安定性が要求されている。

スペーストライボロジーの研究例は我が国では少なく¹⁾²⁾、むしろ油による潤滑が幅をきかせてきたトライボロジー界では、「宇宙開発に関係もない国が、超高真空中でトライボロジーの研究をやつても何になる？」という疑問の方が大勢を占めていた。しかしながら、古くは TABOR の功績³⁾や、NASA において優れた業績を納めた BUCKLEY の著⁴⁾を目の当たりにすると、固体表面の研究とトライボロジーというジョイントアプローチがあながち的はずれであつたとは考えられない。なぜなら、固体表面の研究には超高真空という雰囲気が必要不可欠の条件であるからである。さらに、スペースシャトルが商業衛星の打ち上げから撤退する方向にある現在、ESA、中国と共に人工衛星打ち上げ技術をもつ我が国でも宇宙空間におけるトライボロジーは今後ますます重要な位置

を占めてくるものと考えられる。21 世紀のビッグテクノロジープロジェクトとしてスペースコロニーも噂に高いが、本稿では超高真空中の潤滑とスペーストライボロジーについて考えてみたい。

2. 超高真空中で潤滑効果のある材料

超高真空中においては蒸気圧の低い材料を選択することが第 1 条件となる。例えば、通常大気中で用いられている潤滑油のほとんどは真空中では蒸発してしまつて、その効用を発揮することができない。PFPE、すなわち、6 ぶつ化プロピレンと酸素を低温で UV 重合させた高分子化合物を主成分とする潤滑油の中には 10^{-10} Pa (20°C) というごく低い蒸気圧をもつものまで開発が進み、その蒸発損失も極めて少ないとされている。使用される潤滑油が運動中の遠心力のために飛散したり、あるいは静止中に表面拡散して他の機器を汚染してしまう⁵⁾という危険性は最も避けなければならない事態である。従つて、シールのデザインが潤滑油を絶対に外へ漏らさない構造をとれるならば、松永の指摘⁶⁾のように、これらの潤滑油やグリースを使用すれば相当広範囲の潤滑システムへの応用が可能であろう。

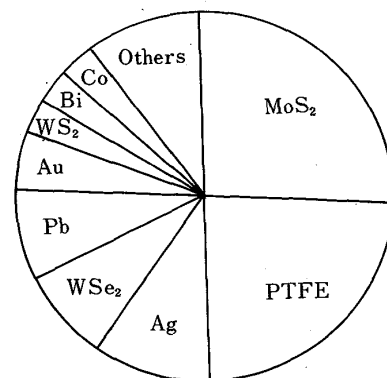


Fig. 1. Selected solid lubricants for rolling elements of spacecraft⁷⁾.

昭和 62 年 1 月 22 日受付 (Received Jan. 22, 1987) (依頼解説)

* 大阪大学工学部講師 工博 (Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka Suita 565)

Key words: vacuum; lubrication; aerospace; vapor pressure; friction; compound; metallic film; polymer; tribology.

さて、油の使用がどうしても不可能となった場合は固体による潤滑がポイントとなる。実用されている超高真空中の潤滑剤は圧倒的にこの固体潤滑剤というカテゴリーに入るものが多い。NASA, Hughes, Lockheed, GE, Westinghouse など利用しているスペースクラフト用ころがり軸受の固体潤滑剤をまとめると Fig. 1 のようになる⁷⁾。MoS₂ を中心とした層状化合物がよく利用されているが、大別すると、

- 1) 層状化合物 ; MoS₂, WSe₂, WS₂, BN, C, ……
- 2) 金属薄膜 ; Au, Ag, Pb, Sn, Ga, In, ……
- 3) ポリマー ; PTFE, ナイロン, ポリイミド, ポリエチレン, ……

となっており、摩擦係数が低く、また蒸気圧も低いという条件に適合する材料はそれほど多くは存在しない。MoS₂ 等の場合には、層と層をくつつけているのが弱いファン・デル・ワールス力であるので、層間のすべりによつて低摩擦を与えると考えられており、超高真空中においても 0.1 より十分小さい摩擦係数となる。黒鉛も同様の構造をとつてはいるものの、この場合には層間に侵入した酸素等の助けを借りなければならぬと考えられており、結果的に超高真空中では大きな摩擦係数(≒0.5)を与えてしまうというのはよく知られた事実である⁸⁾。

金属薄膜による潤滑は硬い金属あるいはセラミックス等のサブストレートの上に軟らかい金属の薄膜を数十～数百 nm 程度コーティングした場合に非常に良好な潤滑特性を示す。摩擦過程ではせん断の項が支配的であると考えると、硬いサブストレートは垂直荷重をささえて接触面積を増大させない役割を、また、軟質薄膜は小さなせん断強さを与えるため、

$$[\text{摩擦力}] = [\text{せん断強さ}] \times [\text{接触面積}]$$

という関係の右辺の両項ともに小さくなるので摩擦を軽減するといわれている。もつとも、金属薄膜のコーティング法についても一考しておく必要があつて、実際にはイオンプレーティングやスパッタリングによる薄膜が利用されており、これらの方法の利点はサブストレート上に付着強度の高い薄膜を作成できることにある⁹⁾。低摩擦を得る金属薄膜の厚さには最適な範囲があることはすでに述べたが、薄すぎてすぐはく離してしまう場合、あるいは厚すぎて膜内の欠陥からすぐ破壊する場合は問題外であつて、約 0.1 μm 前後の膜厚を選ぶ。Cd 膜の空気中の実験結果ではあるものの、Suh らは転位のイメージフォースが作用する領域の影響で摩擦もデラミネーション摩耗も小さい膜厚があるとしている¹⁰⁾。しかしながら、この考え方にはかなりの疑問が残されており、実際、透過電子顕微鏡で摩擦変形組織を観察した場合、このようなデイスロケーション・フリーな領域は表面近傍には存在せず、むしろ表面の転位密度が最も高いのが事実である¹¹⁾¹²⁾。

3. トライボロジーが問題となる対象

Photo. 1 は本年の NASA カレンダーの一部である。スペースシャトルのカーゴベイから打ち出されようとしている通信衛星の写真である。このようなスピン安定型人工衛星ではドライブモーターアッセンブリー、また三軸制御衛星の場合には太陽電池パドル駆動及び展開の装置系等の心臓部に良好な潤滑を必要とする。また、宇宙空間でのロボットマニピュレーター技術についてもアクチュエータのモーターやギヤの潤滑がキーポイントとなる。将来の宇宙ステーションにおいては、材料製造専用

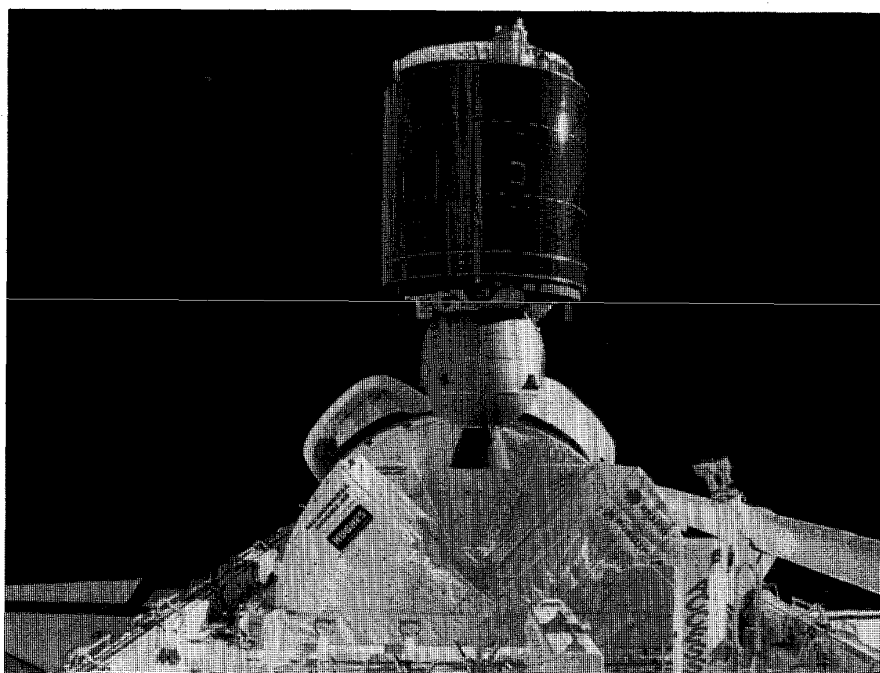


Photo. 1. A communication satellite being released from shuttle cargo bay, after NASA 1987 Calendar.

施設、伸展マスト、小型発電衛星、太陽発電衛星システム等の機器における宇宙潤滑技術は大きな問題である。このように、宇宙空間における多くの機種についてトライボロジーの問題がまとわりつくため、前述のような固体潤滑剤あるいは自己潤滑特性のある機械材料がそのすべりやころがりの運動機構あるいは運動の回数などに応じて設計されねばならない。そして、十分な安定性と安全性とが確保されなければならない。このうち、自己潤滑性の材料については McCONNELL と MECKLENBURG¹³⁾ の報告があり、MoS₂ と Ta 及び Fe のコンパクトを作成して長寿命の潤滑法を確立しており、AFSL (Air Force Solid Lubricant) -14, すなわち WS₂ (53%) + Co (12%) + Ag (35%) のコンパクトよりも優れた結果を得ている。

筆者は 1986 年 10 月 NASA-Lewis Research Center を訪問し、スペーストライボロジーを手掛けたメッカともいべきブランチを見学するとともに、筆者のトライボロジー研究に関するセミナーをもつたり、研究者たちと突っ込んだ議論をすることができた。超高真空中で動作する多くの表面分析機器（例えば、AES, LEED, XPS 等）と組み合わせて *in-situ* なトライボロジー研究が進行していることはもちろん、アポロ計画以来多大の成果を納めてきた RF スパッタリング等の薄膜作製技術についても積極的な研究が目立つた。

4. 凝 着

超高真空中において清浄な 2 表面をくつつけると、Adhesion, 凝着, が生じる。付着とか接着とか呼ばれることもまれにはあるが、よりシステムティックにトライボロジーを考えるには凝着と称する方が妥当であろう。金属の接触界面における凝着が超高真空中のトライボロジーにおいて最もベーシックでかつ重要な因子であることは Czichos¹⁴⁾ はか多くの研究者によつて指摘されている。換言すると、真空中で潤滑がない場合には、金属間の大きな凝着結合を打ち切つて運動を確保しなければならないという非常に苛酷な条件を満たさなければならない。このような事態が続けば、いわゆる焼付き (Seizure) に至り、機械要素としてのファンクションは全く失われてしまう。

例えば、大気中での凝着摩擦においても経験的に、

- 1) 同種金属（ともがね）は凝着しやすい、
 - 2) 同一結晶系のものは凝着しやすく、また同一結晶構造をもちしかも格子定数が接近したものはさらに凝着しやすい、
 - 3) 表面エネルギーの大きい組合せは凝着しやすい、
 - 4) かたさの比が 1 に近いものは凝着しやすい、
- などが知られている。筆者の MIT 時代の師 RABINOWICZ の提案する Compatibility ratings¹⁵⁾ も材料の組合せに関する一応の目安とはなるものの凝着そのもののメカニ

ズムを解明するには至っていない。

筆者らが FIM (電界イオン顕微鏡) 中で行った W と Au の凝着実験結果の一例を Fig. 2 に示す。先端の曲率半径を 27 nm に電解研磨した W のチップと金のプレートとを 0.43 μN の接触力で凝着接触させ、解離後 W に誘起された格子欠陥を原子レベルで解析したもので、(a) の白い正方形は (111) 面近傍の原子配列の乱

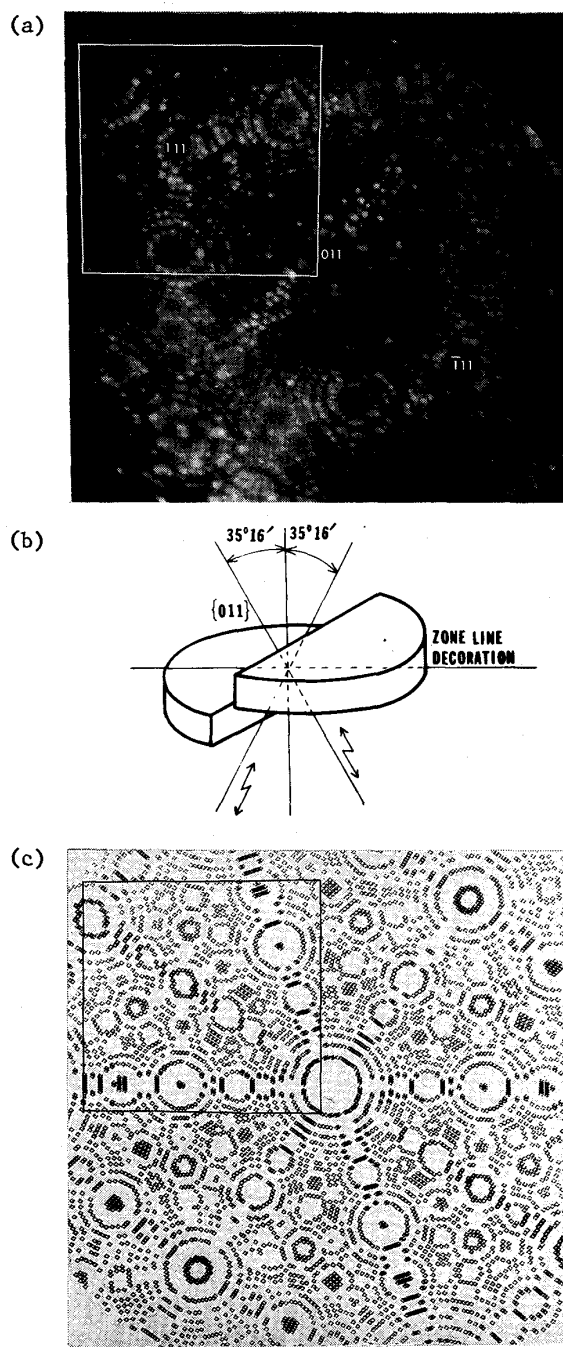


Fig. 2. He-ion image of W tip after adhesion contact with Au in UHV (a), the model of slip on the (011) plane (b), and the computer-simulated FIM pattern (c).

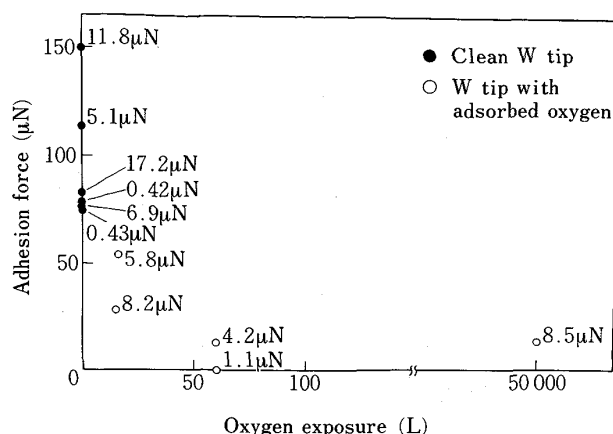


Fig. 3. Influence of oxygen adsorption on adhesion of W to Au. The small numerals with the unit of μN designate applied forces.

れを、(b) は (a) の解析から考えられる (01 $\bar{1}$) 面においてパーガースペクトル $\frac{1}{2}a$ [111] (または逆符号) の転位がすべり活動をしたモデル、(c) は (b) に基づいて行つたコンピューターシミュレーションパターンである。(a) と (c) の原子配列の乱れがよく類似していることから、凝着によつて中央の (011) 面に垂直な (01 $\bar{1}$) 面でのすべりが生じたことは明らかであり、電界蒸発のテクニックを用いて欠陥の深さ方向の分布を調べたところ、約 20 原子層に及ぶことがわかつた¹⁶⁾。

Fig. 3 は W-Au 凝着実験の結果と酸素吸着の影響をまとめたもので、清浄な W-チップを用いた場合には 75~150 μN の非常に大きな凝着力が発生したのに対し、酸素を吸着させた場合にはかなり凝着を低下させていることがわかる。仕事関数の測定と AES による O-KLL と W-NOO のピーク比の較正から、Fig. 3 の実験では約 200 L[†] の酸素露出量で被覆率が 1 近くになることが明らかになり、凝着力がほぼ零になる酸素露出量と一致する。16 L (被覆率 ≈ 0.58) や 60 L (被覆率 ≈ 0.87) の場合には酸素が全面を覆っていないために、金属間凝着と金属-酸素の凝着の遷移的な特徴を示すことになる。また、清浄面間の凝着接触において同定されたすべり面のすべては中央の (011) 面に垂直な結晶面であつて、その変形の特異性がうかがえる。凝着力が 150 μN の場合、接触領域が直径 100 nm の円として計算すると界面に作用する応力は 19 GPa となり、純 W のせん断応力の理論値である 26 GPa に近くなる。他方、接触応力はこれよりも 2 オーダー以上も小さい。すなわち、表面近傍の苛酷な応力状態の下で凝着結合を切るためには (011) 面に垂直な面ですべりを生じざるを得ないという結果になつてしまつてゐる¹⁷⁾。Table 1 は Fig. 3 の実験結果を詳述したもので、吸着酸素がない場合には 75~150 μN の大きな凝着力を生じ、欠陥も 20~50 原子層の深

Table 1. Summarization of the effect of oxygen exposures on adhesion forces and the depth of induced lattice defects.

Oxygen exposure (L)	Applied force (μN)	Adhesion force (μN)	Field evaporation for re-obtaining perfect surface (Atomic layers on the (011))
0	0.43~6.9	75~150	20~50
16	5.8	54	15
60	1.1~42	0~12	4~13
Over 200	1.1~8.5	≈ 0	≈ 0

さにまで及ぶのに対し、200 L 以上酸素を吸着させると凝着力がほぼ零、そして欠陥の深さ方向への分布もほぼ零となり、吸着酸素が金属間凝着を低減させることが明確にわかる。

さて、もう少しミクロに立ち入ると、凝着の本質的メカニズムはどうも接触界面での電子状態によつて決定されるように思える¹⁸⁾。事実、FERRANTE らはジェリウム・モデルを応用して単純金属の接触界面のポテンシャルエネルギーを計算し、凝着実験結果とよく対応することを示している¹⁹⁾。固体の電子論という立場から、界面の凝着を擬似凝集モデルとして考えたのが Fig. 4 である。すなわち、接触界面で生じたポテンシャルと電子との間には相互作用が働いて界面にも擬似的な凝集状態 (Cohesion) が生じるが、この凝集は両金属表面の電子特性に依存しており、両母材の凝集とは同一ではないことから擬似凝集と称している²⁰⁾。このモデルに基づいて界面の凝着を考えてみると、

1) Fig. 4-1 (b) のように同種金属で結晶方位も同じである場合には、界面で再生されるポテンシャルは接触前において表面緩和によつて生じていた乱れを完全に修復できないとしても、その内部のポテンシャルによく似たものとなる。従つて、この場合には非常に大きな凝着が生じる。

2) Fig. 4-2 (b) のように電子特性が全く異なるような金属表面が接触する場合には、フェルミレベルの高い方から低い方へと電子が移動してエネルギー安定の状態を作り出そうとする。このとき、フェルミレベルの低い金属の界面では電子密度が増加するためポテンシャルはスクリーンされて小さくなり、一方フェルミレベルの高い金属の界面でも電子の移動を容易にするためにポテンシャルは小さくなる。従つて、このような場合には両金属の凝集構造に依存するような凝着特性 (おそらくは凝着力の弱い方の) が界面で生ずる。

AES 中の超高真空中 (10^{-8}Pa) で Cu (100), (110) (111) 単結晶を用いた凝着実験結果から、界面の擬似凝集エネルギーと凝着力とはよく対応することが明らかとなり、このことは金属接触界面で生じる凝着現象は界面に垂直方向の電子構造が重要な因子となつてゐることを示唆している。また、Cu (100) と Al (100) の凝着力は Al (100) どの凝着力にほぼ等しいこと、Al (100), (110),

[†] ラングミュア: 10^{-6} Torr (1.33×10^{-4} Pa) で 1 s の露出量

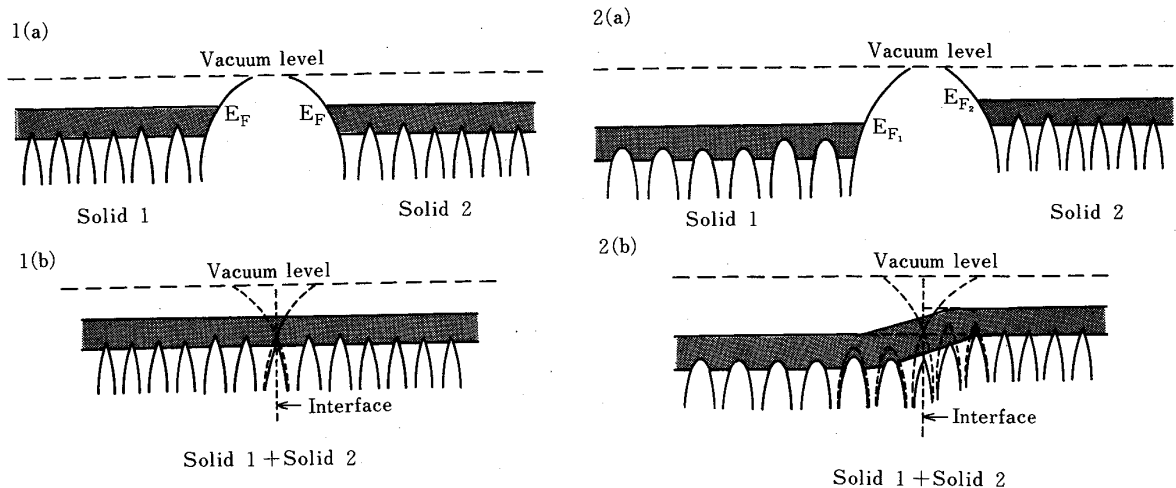


Fig. 4. Schematics of the pseudocoherence of interfacial metallic adhesion; electronic structure of identical metal pairs before contact (1(a)) and after contact (1(b)), and electronic structure of dissimilar pairs before contact (2(a)) and after contact (2(b)).

(111) の組合せによる実験では凝集エネルギーの小さい方の結晶方位の凝着特性が支配的であることも確かめられ²¹⁾、今後電子特性に立脚した凝着機構の解明が必要となつている。

さて、スペースでよく使用される固体潤滑剤は MoS_2 に代表される層状化合物であることは前に述べたが、層状物質²²⁾を大別すると、

1) グラファイトや BN は平面の六角環構造をもち、強い共有結合力が面内構造を構成する。グラファイトの六角環は $s\text{-}p^2$ 混成軌道、層に垂直方向には p 軌道からなっており、半金属的な性質をもつものに対し、BN は B と N の 2 原子構成のため対称性が下がって結合 π 及び反結合 π^* の縮退が解けて禁制帯の幅が大きい絶縁体となる。

2) 遷移金属カルコゲナイトは 2 枚のカルコゲン原子層と 1 枚の遷移金属原子層が基本単位となつて積層する。このような化合物では S とか Se の s 及び p 軌道による幅の広い伝導体及び価電子帯の間に遷移金属の狭い d バンドが存在する。このため、遷移金属が 4 価の場合 (ZrS_2 , ZrSe_2 , HfS_2 , HfSe_2 など) は絶縁体、5 価 (VS_2 , NbSe_2 , NbS_2 , TaS_2) では金属、固体潤滑剤として有効な 6 価 (MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , WSe_2) では半導体となる。

3) III-VI 族化合物で、 GaSe , GaS 等があり、禁制帯をもつ異方性の大きな半導体となる。

4) イオン結合性の強い PbI_2 などで、構造の異方性が小さい。

結晶のすべりやすさ、 c/a の比などは明らかに電子状態に起因している。Fig. 4 の 2 固体表面間にこのような層状物質をはさんで潤滑を試みる時、両表面との接触界面では表面の保護のため比較的強い凝着結合を、また層

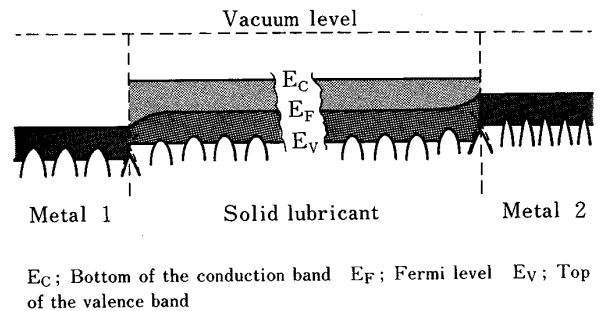


Fig. 5. A schematic drawing of the metal-lubricant-metal interfaces, as it is based upon Fig. 4.

状物質そのものは限られた厚さのなかでイントリンシックな周期構造を広範囲にわたって回復し、層間のすべりを容易に行えるよう工夫するべきであろう。両表面に層状物質をコーティングする場合、あるいは相手面からの移着膜で潤滑する場合は Fig. 5 のようなポテンシャルが目標となる。三宅の最近の報告によれば、スパッタ MoS_2 薄膜にイオンビームミキシングを施すことによつてその結晶性を格段に向上させることができるとされている²³⁾。このように考えてくると、層状化合物薄膜はスペース用の固体潤滑剤としてますます有望であることがわかる。

5. 原子状酸素

高度 800 km で圧力は約 10^{-8} Pa となるため、高度が 1 万 km 以上の軌道をとる通信衛星等を対象とした超高真空中のトライボロジーに関心が集まってきたわけであるが、スペースシャトルは約 300 km、スペースステーションは約 500 km の高度あたりで活動する²⁵⁾²⁶⁾。Fig. 6 に示したように²⁴⁾、このような高度範囲においては原子状酸素の濃度が高く、化学的活性度が高いこともあつてその固体表面への影響が懸念されている。

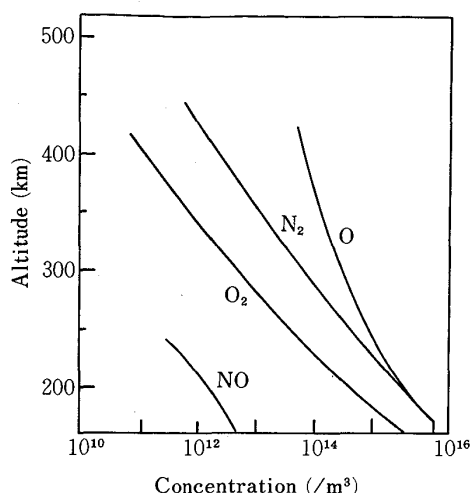


Fig 6. Concentration of NO, O₂, N₂ and O with respect to altitude²⁴⁾.

NASA-Lewis においても、原子状酸素とトライボロジーの問題は装置を打ち上げて実験的に解決するしかないかも知れないとの意見もあつて、地上でシミュレーションを行うには非常に大がかりな装置を必要とするかも知れない。固体潤滑剤としての PTFE 等ポリマーの劣化、CFRP 等のマトリックスポリマーの劣化、金属表面の化学反応等が好ましからざる影響であろうと思われる反面、原子状酸素の存在は超高真空中では有望視されていなかったグラファイトやカーボンファイバーの自己潤滑特性を引き出すのに役立つかも知れない。ともあれ、このような研究結果は今のところ見当たらないようである。

6. お わ り に

NASA-Lewis では Au のイオンプレーティング薄膜がスペースでの潤滑にはオールマイティに近いとする意見があつたり、また GE 等では油潤滑を採用して可動部をシールし、N₂ 等のガスで加圧しておくなどの方針もあつて、スペーストライボロジーは一見簡単のように思われるかも知れない。しかし、UHV-SEM 中で Nb のフィールドエミッション特性を調べた NIEDERMANN らの研究²⁷⁾では、装置内の可動部に用いた MoS₂ の Mo さえも Nb へ拡散していることを AES によつて確かめた例もあつて、このような拡散やダストの影響なども考えておかねばならない。また、PTFE は超高真空中での使用にはいささか蒸気圧が高いかも知れない。スペーストライボロジーについてはまだまだ問題が残っており、本稿で触れたように凝着の機構さえもはつきりと解明されていないのが現状である。

宇宙ステーションにおける設備、実験装置の打ち上げにはグラム当たり 1000 円前後が必要といわれる。従つて、当然のことながら軽量の CFRP や Ti 合金、Al 合金などがよく用いられているわけである。比重 7.86 と

いう壁を乗り越えて、鋼が宇宙構造用材料として用いられるならば、その需要はおびただしいものとなるはずである。固体潤滑剤をコーティングするサブストレートとして必要な硬度等の機械的特性、あるいは相手材を考慮した冶金学的な性質を作り出すことは現在の鉄鋼製造技術をもつてすれば比較的簡単であろう。また、イオン窒化の後、TiN 等のコーティングを施したステンレス鋼薄板をハニカムサンドウィッチ構造として軽量化し、宇宙ステーションの構造材料等に用いることも夢ではないかも知れない。宇宙への夢を乗せた“イカロスの鉄の翼”が飛ぶことが望まれ、トライボロジーはその一つの Key technology となつていることを結言としたい。

文 献

- 1) 宇宙空間における潤滑問題小研究会予稿 (1977 年 12 月) 東京大学宇宙航空研究所
- 2) スペーストライボロジー研究会予稿 (1978 年 12 月) 東京大学宇宙航空研究所
- 3) F. P. BOWDEN and D. TABOR: The Friction and Lubrication of Solids (1950) [Oxford University Press]
- 4) D. H. BUCKLEY: Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear, and Lubrication (1981) [Elsevier]
- 5) A. A. FOTE, L. M. DORMANT and S. FEUERSTEIN: Lubric. Eng., **32** (1976), p. 542
- 6) 松永正久: 潤滑, **26** (1981), p. 721
- 7) R. I. CHRISTY: Tribology Internl., **15** (1982), p. 265
- 8) D. H. BUCKLEY: 文献 4), p. 574
- 9) N. OHMAE: J. Vac. Sci. Technol., **13** (1976), p. 82
- 10) E. P. ABRAHAMSON, II, S. JAHANMIR, N. P. SUH and D. A. COLLING: Proc. Internl. Conf. on Production Eng. (1974), p. 408
- 11) N. OHMAE, T. TSUKIZOE and F. AKIYAMA: Phil. Mag., **A-40** (1979), p. 803
- 12) N. OHMAE: Fundamentals of Tribology, ed. by N. P. SUH and N. SAKA (1980), p. 201 [MIT Press]
- 13) B. D. MCCONNELL and K. R. MECKLENBURG: Lubric. Eng., **33** (1977), p. 544
- 14) H. CZICHOS: Tribology (1978), p. 307 [Elsevier]
- 15) E. RABINOWICZ: Tribology II (1983), p. 2.2, [MIT Press]
- 16) T. TSUKIZOE, S. TANAKA, K. NISHIZAKI and N. OHMAE: Proc. JSLE Internl. Tribology Conf. (1985), p. 121
- 17) N. OHMAE, M. UMEMO and K. TSUBOUCHI: Proc. ASME/ASLE Tribology Conf. (1986), ASLE Paper No.86-TS-6C-1
- 18) N. OHMAE, T. OKUYAMA and T. TSUKIZOE: Tribology Internl., **13** (1980), p. 177
- 19) J. FERRANTE and J. R. SMITH: Solid State Commu., **21** (1976), p. 1059
- 20) 大前伸夫: 潤滑, **30** (1985), p. 300
- 21) 奥山環: 大阪大学修士論文 (1980)
- 22) 壽栄松宏仁: フィジクス, **7** (1986), p. 145 [海洋出版]
- 23) 三宅正二郎: 清浄気体中の駆動技術 (精密工学会編) (1986), p. 100 [理工企画]
- 24) Sir H. S. W. MASSEY 著, 小山慶太訳: 原子・分子の衝突 (1981), p. 294 [共立出版]
- 25) A. COHEN: J. Vac. Sci. Technol., **A4** (1986), p. 263
- 26) R. A. BRECKENRIDGE and R. A. RUSSELL: J. Vac. Sci. Technol., **A4** (1986), p. 281
- 27) Ph. NIEDERMANN, N. SANKARRAMAN, R. NOER and O. FISHER: J. Appl. Phys., **59** (1986), p. 892