小特集 / トライボロジーと表面処理

いまトライボロジーが面白い

森 誠 之*

Tribology — A World of Fun —

Shigeyuki MORI*

Key Words : Tribology, Boundary Lubrication, Lubricant, Thin Layer, Surface Treatment

本特集号のテーマにかかわるトライボロジーについて、表面との関わりおよび表面技術の重要性を入門的に解説する。

1. キーテクノロジーとしてのトライボロジー

トライボロジーとは

イギリスにおいて「トライボロジー」の言葉が生まれてから、30年になろうとしている。すでに広辞苑にも収録され日本語として定着してきている。日本潤滑学会は数年前に日本トライボロジー学会に名を改めた。トライボロジー (tribology) は、ギリシャ語の tribos (摩擦) + logy (学) を語源とし、摩擦・摩耗および潤滑に関する科学と技術の分野を指している。名を改めるにはそれなりの理由があった¹⁾。

トライボロジーの効果

第一には、トライボロジー技術の改善によって得られる、経済的波及効果の大きさであった。英日独米の各国で行われた試算では、トライボロジーによってGNPの0.5~2.6%の経費が節減できると報告された。摩擦係数を減らせば、エネルギーの無駄遣いを減らすことができる。たとえば、自動車エンジンの摩擦を10%減らすことができれば、その半分5%燃費を低減することができると言われている。摩擦対策で、電池の寿命を2倍に延ばしたテープレコーダーの例もある。

適正な潤滑で摩耗を減らすことができれば、機械の寿命を延ばすことができるので、その経済的效果は一層大きい。これが工場の機械になると、プロセスのメンテナンス経費を激減させることができる。機械加工の生産効率を高めるためにも、トライボロジー技術の進歩が望まれる。たとえば、生産量を2倍にするためには、工場を立て増すよりは生産速度を2倍にしたほうがよい。それには、加工速度を2倍にできるトライボロジー技術が必

要なのである。

また、鋼板やアルミ缶はそれぞれ圧延や絞り成形により作られるが、製品の表面仕上げ性は潤滑状態の善し悪しに強く依存している。このように、機械の信頼性と長寿命化、生産の効率化、プロセスの安定性など生産工程から自動車などの輸送機関に至るまで、基盤技術のあらゆるところでトライボロジーがそれらを支えている。

先端技術とトライボロジー

一方、先端技術と言われる分野でも、その開発の成否にはトライボロジーが深く関与している。たとえば、宇宙技術において、ロケットエンジンでは液体酸素と液体水素をタービンで燃焼室に送るため、マイナス250℃でも使用可能な潤滑剤を必要としている。人工衛星やスペースシャトルなどにも多数の可動部分があり、高真空下でのトライボロジー技術を必要としている。宇宙では重力が無視できるので荷重は問題にならないが、表面力や回転による遠心力が、より重要なトライボロジー因子としてクローズアップされる。宇宙での故障を防止するためにも適正なトライボロジーが必要である²⁾。

コンピュータにも動く部分がある。記憶装置としてのいわゆるハードディスクである。磁気記録密度を高めるために、ディスクにヘッドを近づかねばならず、ヘッド・ディスク間に適正な潤滑を必要としている³⁾。そのため、数10nmの炭素膜や数nmの潤滑油膜で表面を被覆している。さらに、マイクロマシンや、関節、バクテリアのべん毛モーター⁴⁾など生体におけるトライボロジーの問題など、その解決を待っている先端分野は枚挙にいとまがない。

宇宙技術の例でも明らかなように、トライボロジーに要求されているのは、より精密で過酷な条件下での高い耐久性・信頼性である。このように、大は宇宙技術から小はマイクロマシンや生物モーターまで、トライボロジー

* 岩手大学 工学部 (〒020 岩手県盛岡市上田4-3-5)
Fac. of Eng., Iwate Univ. (4-3-5, Ueda, Morioka-shi,
Iwate 020)

図1 流体潤滑(a)と境界潤滑(b)

すべり合う2固体の界面に、(a)では固体が潤滑油など流体層がある。(b)では、潤滑性の固体薄膜を介して固体が接触している。

はまさに先端技術の成否を分けるキーテクノロジーとしての役割を担っているのである。

トライボロジー技術は表面の技術でもある。トライボロジーと表面技術に関する具体的な事項については、それぞれの分野の第一人者によって以下に述べられている。ここでは、トライボロジー現象の機構を「流体潤滑」と「境界潤滑」とに大別し(図1)、表面技術との関わりを概観したい。

2. 表面技術との関わり

潤滑機構

「流体潤滑」とは2つの固体が潤滑油のような流体によって隔てられている場合であり(図1a)、摩擦・摩擦を低く抑えることができる。ベアリングなどの回転する軸受けなどで流体潤滑が実現されている。ベアリングのように大きな荷重がかかる場合、接触部では面圧が高くなるため固体が弾性変形するが、くさび効果によってその隙間に厚さサブミクロンの潤滑油膜が形成される。これを「弾性流体潤滑(elastohydrodynamic lubrication, EHL)」と呼んでいる⁵⁾。

流体潤滑条件下では、2固体に挟まれた潤滑油の性質たとえば粘度が主として潤滑特性に関与している。しかし、表面の役割も無視できない。たとえば、固体表面に粗さがある場合、油膜厚さ(h)と粗さ(a)の比($\lambda = h/a$)が小さいと、表面の突起(asperity)が油膜を突き破るため、摩擦・摩擦とも大きくなる。このような固体接触が起こるような状態を、「混合潤滑」と呼んでいる。また、表面のトポグラフィーもEHLの潤滑特性に影響を与える。たとえば、表面の溝が試片の円周方向に平行か直角かによって潤滑油膜の厚さが異なることが指摘されている⁶⁾。また、材料表面を反応膜が被うことによって、潤滑油の膜厚が増加することが指摘されている⁷⁾。

濡れ性

さらに、試片に対する潤滑油の濡れ性も、潤滑特性に関係している。すなわち、濡れ性が悪ければ潤滑油が隙

間に入りにくくなる。一方、濡れ性が良すぎると、試片に対する潤滑油の接触角が小さくなるため、空気が2固体の隙間に入りやすくなり油膜切れの原因となる。このように、流体潤滑条件下でも、表面の性質がトライボロジー挙動に関与している。したがって、表面状態を制御することで、より優れた流体潤滑状態を作り出すことができるのである。

マイクロトライボロジー

マイクロトライボロジーにおいては、表面力の影響はさらに重要になっている⁸⁾。たとえば、2つの固体が作る隙間に濡れ性の液体が入ると、表面張力により2面間に付着力が働く。具体的には、1ミクロン程度の隙間に水膜が凝縮すると2面間にはmN程度の付着力が作用する。部品が小さい場合、荷重よりも付着力が大きくなる。付着力の影響をなくすには表面の濡れ性を制御すればよい。表面張力(F_s)が長さ(L)に比例するのに対し、慣性力(F_i)は質量すなわち体積(L^3)に比例するので、その比は長さの2乗に逆比例する($F_s/F_i \propto 1/L^2$)。すなわち、マイクロマシンのようにサイズ(L)の小さな機械の場合、表面力が支配的になってくるので、マイクロトライボロジー特性は表面状態の制御にかかっていることがわかる。

境界潤滑

高荷重や低速度という条件下では、油膜が形成されないため、固体界面で滑りようになる。そのような潤滑を「境界潤滑」と呼んでいる(図1b)。機械加工時や往復運動など実用のトライボロジー挙動は境界潤滑条件下で起こることが多い。固体接触下の現象であることから、固体表面の性質が直接トライボロジー特性に関与することは明らかである。したがって、表面を制御することで目的に合ったトライボロジー特性を得ることができるようになる。次節で両者の関係を少し詳しく述べたい。

3. 境界潤滑における表面の役割

摩擦の本質

金属同士あるいは金属とセラミックスを摩擦すると、表面を洗浄した後0.5~1摩擦係数が得られる(図2の白印)。これは表面を被覆している金属酸化物質層および有機汚染物質層が潤滑剤として働いているためである。試みに、超高真空中で金属表面同士を摩擦すると、摩擦係数は数10になる。超高真空中でイオンスパッタすることにより表面の皮膜を除去し、清浄なままの金属とセラミックス(BN)の摩擦係数を測定した結果が図2の黒丸である⁹⁾。図の横軸は遷移金属のパーセントd特性であり、値が小さいほど化学活性が高い。明らかに右下がりの傾向があることから、金属の活性が高いほど摩擦係数が大きいことがわかる。これは、摩擦の本質が固体界面における化学結合力に由来することを示している。こ

図2 遷移金属とセラミックス (BN) の超高真空中における摩擦係数⁹⁾

横軸のパーセントd特性は遷移金属の化学活性を表わすパラメーターで、小さいほど活性が高い。

図3 鉄表面の酸化皮膜の潤滑性¹³⁾

膜厚10nm以上でその潤滑効果が顕著である。

のような界面の原子間あるいは分子間の相互作用に関する問題は、原子間力顕微鏡などいわゆるSPMやSFAを用いた研究で明らかにされつつある^{10)~12)}。

表面膜の役割

金属表面を各種の皮膜で被うことにより、摩擦係数を低下させることができる。たとえば、図3は超高真空中で準備した鉄の清浄な表面に酸素を化学吸着させ、酸化皮膜の厚さをオージェ電子分光法で測定したものである¹³⁾。酸化皮膜の厚さが10nm以上になると、十分な潤滑効果が得られることがわかる。また、有機物の吸着層も摩擦低減効果がある。図4は超高真空中で準備した銅の清浄面にアルコールを吸着させ、その摩擦係数を測定したものである¹⁴⁾。アルコールの末端は摩擦低減を計るため、 CF_3 になっている。アルコールの被覆率が単分子層を越えたところで安定な潤滑効果が得られている。

図4 銅清浄面のアルコール皮膜の潤滑性¹⁴⁾

単分子層以上で潤滑効果が顕著である。
アルコール分子： $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$

図5 ダイヤモンド薄膜の潤滑性¹⁷⁾

表面に C^+ イオンを打ち込むことにより潤滑性が向上した。

単分子層膜による潤滑はラングミュアプロジェクト (L-B) 膜でも得られているが、耐久性のためにはより厚い表面膜が必要である。このように、吸着することにより表面を被覆し潤滑効果を得る添加剤を、トライボロジーでは「油性剤」と呼んでいる¹⁵⁾。

摩擦係数を低減するためには、一般に硬い固体表面に柔らかい薄膜をコーティングする方法がとられる¹⁶⁾。硬い下地で荷重を支え、柔らかい薄膜で摩擦係数を低減するのである。柔らかい材料として、有機物皮膜やグラファイト、二硫化モリブデンのような層状の固体がしばしば用いられている。最近、ダイヤモンド膜に炭素イオンを打ち込み、表面をアモルファス化することによって優れた摩擦材が得られることが報告されている¹⁷⁾ (図5)。

このように、目的とする摩擦係数や耐久性を得るために、新しい表面設計が期待されている。トライボロジー特性に影響する因子としては、表面のトポロジー、表面の結晶構造や層構造、表面組成、表面の結合状態さらに

は表面を被覆している分子の構造と配列状態などをあげることができる。

4. 変化する表面状態

摩擦と反応

固体接触を起こしたまま、2固体が相対運動をすれば物理的な表面の破壊すなわち摩擦が起こる。これは機械部品の、ひいては装置の信頼性や耐久性にかかわる重大な問題である。また、摩擦によって表面のトポグラフィや構造、成分も変わるので摩擦係数にも影響を与える。

摩擦条件下で周囲の成分と化学反応を起こすことにより、表面の成分、構造などが変化し、トライボロジー特性にも影響を与える。潤滑油添加剤の中には反応しやすい元素たとえばイオウやリンを含む有機化合物があり、摩擦面で反応することにより潤滑性の柔らかい表面膜を作る。これは「極圧添加剤 (extreme pressure additive, EP 剤)」と呼ばれている¹⁹⁾。適度に反応すれば良いが、反応性が高いと反応生成物が摩擦するので摩擦が促進される。これを化学摩擦と呼んでいる。

摩擦面の特異性

このように、摩擦により固体表面は物理的にも化学的にもダイナミックに変化しているのである。その原因は固体接触にあるが、条件によっては接触部の圧力が1 GPa、温度が1000℃にも達する。固体が破壊されると、余った結合いわゆる dangling bond が生成するので、化学的には高い活性が発現すると予想される¹⁹⁾。また、摩擦面からは電子やイオンなどが検出されており、これらいわゆる「エキソエミッション」も化学的な活性種になると考えられている¹⁹⁾。このようなダイナミックな摩擦面では特異な反応が起こることが報告されている。たとえば、金は化学的に安定な金属として知られているが、摩擦により生成した「新生面」は、ベンゼンをはじめとする有機化合物が分解するほど高い活性を持つことが知られている²⁰⁾。このような分野はトライボロジー現象の理解と技術開発上重要であることが指摘され、トライボケミストリーとして研究が盛んになってきた²¹⁾。

特異環境の利用

各種の潤滑添加剤とくに極圧添加剤は、このような特殊な場を利用した「反応性の潤滑剤」と言うことができる。同様な考え方をすれば、トライボ過程を巧みに利用して、表面の改質法に利用することができる。さらに化学反応により化学摩擦が促進されることを述べたが、摩擦を目的とする研磨には逆に化学摩擦研磨法が考えられる。たとえば、硬質のサファイアを軟質の酸化鉄や酸化ケイ素で(砥粒として)研磨すると、トライボ化学反応により柔らかい複合酸化物が生成する²²⁾。このメカノケミカル研磨法により、研磨効率がよく表面仕上げ性の良い結果が得られている。

5. なぜ面白いのか

トライボロジー現象は複雑である。それは2固体の相対運動というダイナミックな条件下で表面現象が起こるからである。摩擦・摩擦といったトライボロジー特性は、これまで見てきたように表面の状態に敏感に依存している。一方、表面状態も摩擦という機械作用によってダイナミックに変化する。つまり、原因と結果が相互に関係しており、トライボロジーはいわば生きた表面現象なのである。生きた現象は生きたまま解析すべきであり、そのような研究から新しい事実が見出されつつある。ダイナミックな現象を基礎的に理解すること、またその成果を利用してトライボロジーのための新しい表面改質技術を展開することは、まさにフロンティアの仕事と言えるであろう。

トライボロジーは、あらゆる技術に不可欠であり、摩擦・摩擦を制御することは永遠の課題である。先にも述べたように、トライボロジー技術の改善は省エネルギー・省資源とも深く関わっており、21世紀を制御する科学・技術分野である。トライボロジーの研究によって、その研究投資額の60倍から800倍の額のエネルギー節減が可能との試算がある。トライボロジー技術の発展は、表面制御技術に強く依存している。本特集が、まさに境界領域としてのトライボロジーと表面技術との接点になり、両分野の相互交流と発展につながるきっかけになることを期待している。

(1996-1-11 受理)

文 献

- 1) 角田和雄; 摩擦の世界, p. 164 (岩波書店, 1994)
- 2) 木村好次; トライボロジスト, 40, 889 (1995)
- 3) 森 誠之; 日本応用磁気学会誌, 19, 915 (1995)
- 4) 工藤成史, 曲山幸生, 杉山 滋; トライボロジスト, 40, 488 (1994)
- 5) 木村好次, 岡部平八郎; トライボロジー概論, p. 83 (養賢堂, 1982)
- 6) L. Chang, A. Jackson and M. N. Webster; *Tribology Trans.*, 37, 435 (1994)
- 7) P. M. Cann and H. A. Spikes; *Tribology Trans.*, 34, 248 (1991)
- 8) 井上陽一; トライボロジスト, 39, 201 (1994)
- 9) D. H. Buckley; *Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication*, Tribology Series, Vol. 15 (Elsevier, 1981)
- 10) 金子礼三; ゼロ摩擦への挑戦 (マイクロトライボロジーの世界) (オーム社, 1995)
- 11) 森田清三; 走査型プローブ顕微鏡のすべて (工業調査会, 1992)
- 12) J. N. Israelachvili; 分子間力と表面力 (近藤 保, 大島広行訳) (マグロウヒル, 1991)
- 13) D. M. DeKoven and P. L. Hagans; *J. Vac. Sci. Technol.*, A 8, 2393 (1990)
- 14) C. F. McFadden and A. J. Gellman; *Langmuir*, 11,

- 273 (1995)
 15) 桜井俊男; 潤滑の物理化学 (幸書房, 1978)
 16) 榎本祐嗣, 三宅正二郎; 薄膜トライボロジー (東京大学出版会, 1994)
 17) K. Miyoshi; NASA TM-106759 (1995)
 18) G. Heinicke; Tribochemistry (Carl Hanser, 1984)
 19) 大前伸夫, 中山景次, 森 誠之; トライボロジスト, 40,
 363 (1995)
 20) S. Mori and Y. Shitara; *Appl. Surface Sci.*, 78, 269 (1994)
 21) 日本トライボロジー学会編; ITC Satellite Symposium on Tribochemistry (1995)
 22) 精密工学会編; ナノメータスケール加工技術, p.108 (1993)

◆ 刊行物 ◆

(財)日本規格協会発行/日本語訳版 (対訳)

「MIL-金属表面処理関係規格集」会員特別扱いについて

このほど(財)日本規格協会から、「MIL-金属表面処理関係規格集」(日本語訳版)が発行されました。この規格集は、金属表面処理に関して通常よく利用されているMIL規格及び連邦政府規格(FED)を厳選・収録したものです。A4版のハンディーな一冊の製本された日本語訳としてまとめられており、表面の不動態化、防食管理、被覆、化成処理、陽極処理皮膜、めっきなどの基本的な規格が収録されております。

さてこの度、本協会と(財)日本規格協会との協議の結果、標記資料について、本協会経由の一括申し込みに関し、特別価格(1割引)が適用されることになりましたのでお知らせ致します。

ご希望の方は右記様式にて必要事項をご記入のうえ、本協会MIL規格集係にて郵送またはFax.にてお申込みください

体 裁 : A4版 558ページ, 15規格収録
 特 価 : 36,600円 (消費税込み・送料サービス)

* 定価 40,685円 (消費税込み)

収録規格 : (1) 耐食鋼部品, 表面の不動態化の試料採取, 検査及び試験, (2) 清浄度レベル及びコンタミネーション・コントロール計画, (3) 防食管理のための材料・工程, (4) 兵器システムの金属表面処理, 無機被覆, (5) Al及びAl合金の化成処理皮膜,

(6) Al及びAl陽極酸化処理皮膜, (7) 金属部品のショットピーニング, (8) 銅めっき, (9) Mg合金の陽極処理, (10) 金めっき, (11) ステンレス鋼の不動態化処理, (12) Niめっき, (13) Crめっき, (14) Agめっきとその一般要求事項, (15) Cdめっき

[申込様式] (B5判横書き)

MIL-金属表面処理関係(規格集) 申込書	
所在地(〒)	
社 名	電話() -
部課名	氏名
MIL-金属表面処理関係規格集	冊 計 円
代金は 月 日 現金書留・郵便振替・銀行振込で送金しました。	

郵便振替口座 00130-2-123987

銀行振込口座 三和銀行 室町支店 普通預金
 No. 360637