

# 表面物性工学ハンドブック

## 第 1 3 章 表面力学物性

### 1 3. 3 トライボロジー

松川宏

2005 年 8 月 16 日

## 1 序論

トライボロジー (Tribology) とは摩擦 (Friction)、摩耗 (Wear)、潤滑 (Lubrication) というお互いに密接な関係にある問題を研究する学問の名称であり、ギリシャ語で擦るという意味をもつ *tribos* という言葉が語源である。この名称の起源は新しく 1966 年にイギリス教育科学省潤滑技術委員会の報告書において初めて用いられた。そこでのトライボロジーの定義は” 相対運動して相互に影響しあう 2 表面、ならびにそれに関連する諸問題と応用に関する科学と技術” というものである。このような問題は我々の日常生活にもなじみ深いものであり、人類が道具を使い出して以来、トライボロジーに関する何らかの工夫をし続けてきたといえるであろう。しかし、その基礎的機構に関しては今日でも未だに未解決の問題が多く残されている。その原因として、i) トライボロジー現象の起こる舞台が表面であり、その精密な制御は近年まで困難であったこと、ii) トライボロジー現象は 2 固体表面間で起こるため、現象が起こっているその場を観測するのが困難であること、iii) バルクの現象に比べ実験手段が極めて限られていたこと、iv) 動摩擦は非平衡現象であり、その研究は一般に平衡現象に比べ難しいこと、などが挙げられる。しかし、最近の物質制御技術、実験技術、非平衡系の科学、計算機科学の発展などにより、トライボロジーの研究も新しい段階に入りつつある。一方、環境、省エネルギー問題の解決や、ナノマシンの実現などのためには、これまでより高度のトライボロジー技術の確立が求められており、そのためには原子レベルからのトライボロジー機構の解明が急務となっている。その意味で現在は、トライボロジーの新展開への強い社会的要望があり、かつ、そのための準備が整いつつある段階にあるといえよう。以下、順をおってトライボロジーの諸問題を解説していく。

[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]

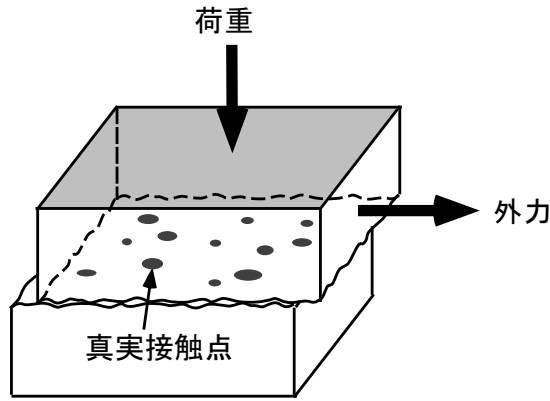


図1 真実接触点

## 2 摩擦

マクロな固体間の滑り摩擦に関してはアモン・クーロンの法則 (Amontons-Coulomb's laws) と呼ばれる以下のような経験則が極めて広い範囲で成り立つ。i) 摩擦力は見かけの接触面積に依存しない、ii) 摩擦力は2面間にかかる荷重に比例する、その比例係数を摩擦係数 (frictional coefficient) と呼ぶ、iii) 動摩擦力は静摩擦力より小さく、滑り速度によらない、というものである。このうち、i) と ii) はすでにレオナルド・ダ・ヴィンチ (Leonardo da Vinci) が明らかにしていたことが知られているが、彼の発見はその後、忘れ去られ、産業革命の時代になってアモン・クーロンによって再発見された。この法則の成り立つ機構についても、古くから多くの説が唱えられたが、それらは全て、巨視的なスケールでは平坦に見える表面も細かくみれば十分な荒さを持つ、という事実を出発点としている。一方の物体の上に、他方の物体を乗せ、後者を横に動かそうとした場合、その表面荒さによる凸凹を乗り越えるのに必要な力が摩擦力の起源であると考えるのが、摩擦の凸凹説である。この説でもアモン・クーロンの法則の i, ii) は説明できるが、そのときの摩擦係数は表面の凸凹が激しいほど大きくなる。これは、通常の機械表面などで、表面荒さが小さいほど摩擦係数が大きくなるという事実と反する。そのため、今日では、広く凝着説が摩擦の機構として信じられている。この説では、図1に示すように表面荒さのため2つの固体間で原子間力、または分子間力が作用しあう部分 (真実接触点) の面積 (真実接触面積)  $A_r$  は非常に小さい、と考える。固体表面に針を突き立てたときの復元力は、垂直応力がある程度、大きくなると降伏応力  $\tau_y$  に達し、一定値となってしまふ。各真実接触点では圧力は降伏応力に達しており、そのため真実接触面積  $A_r$  は  $L/\tau_y$  で与えられる。ここで  $L$  は荷重である。その真実接触点では原子間力、または分子間力による凝着が起これ、ここに外力を加えて一方の固体を動かすにはその凝着を切らねばならない、そのために必要な力が最大静摩擦力である。そのため最大静摩擦力  $F_{sf}^{max}$  に対応した摩擦係数  $\mu_s$  は、単位面積あたりの凝着を切るのに必要な力である剪断応力  $\tau_s$  を用いて、 $\mu_s = F_{sf}^{max}/L = \tau_s/\tau_y$  で与えられることになる。一定の摩擦係数が得られたのであるから上記のアモン・クーロンの法則は説明できたことになる。このように、表面を接した2固体間の真実接触面積が荷重に比例すること、ここでは凝着が起

こっていることは、さまざまな実験により確かめられている。しかし、この凝着説に対する反論が最近、提案されている。これについては後に述べる。また、一般には、荷重が0の極限でも有限の摩擦力が生じる。これはその場合でも存在する2つの表面間の凝着によるもので、凝着項と呼ばれる。しかし、多くのマクロな系ではこの凝着項は荷重と共に増大する項に比べ十分小さく無視でき、実際上、摩擦力は荷重に比例する。しかし、特に原子スケールの摩擦などでは、無視できない。

ここまでは主に静摩擦力に関する説明である。iii) の動摩擦力に関する法則はどう説明されるであろうか？動摩擦力は必ずエネルギー散逸を伴う。これは凝着説に従えば、真実接触点間の結合を切るとき、そのエネルギーが電子励起あるいはフォノン励起を起こすため生じると考えられる。2固体間の滑り摩擦を考えた場合、それぞれの固体の重心座標は等速で運動していても、各真実接触点は結合とその切断を繰り返している。そのため、各真実接触点は滑って止まる、滑って止まるを繰り返すスティックスリップ運動を局所的に起こしていると考えられる。そして、真実接触点にとっての運動の典型的時間スケールはこのスリップの時間であり、これは重心座標の運動の時間スケールに比べ、桁違いに速い。そしてそのスリップの時間スケールで、エネルギー散逸は起こっている。これが、基本的には動摩擦力が（重心の）滑り速度に依存しない理由である。

しかし、実は動摩擦力は速度に依存しないという iii) の法則は他の2つの比べ、これまで実験的証拠は少なかった。その理由の一つは、動摩擦力が静摩擦力より小さいため、低速度領域でいわば”負性抵抗”領域になり、重心運動としても一定速度での定常運動が不安定になり、スティックスリップ運動を起こしてしまうからである。これは駆動系あるいは滑り運動を起こす固体自体が必ず有限の剛性しかもたないためである。しかし、近年の駆動系を十分良く制御した定常運動状態の実験で、動摩擦力は速度依存性を示すことが明らかになった。[11, 12] だが、その依存性は弱く対数関数的である場合が多いため、通常は顕著にならない。この対数依存性は主に2つの要因により引き起こされる。運動に伴って真実接触点の組み替えが起こるが、ゆっくり運動するほど、各々の真実接触点の”寿命”が長くなる。すると、塑性変形により、各真実接触点の面積が増える、あるいはそこでの結合が強化される。そのため摩擦力が増大する。速度が増大する場合は逆のことが起こり、これが、動摩擦力に負の対数的速度依存性をもたらす。静摩擦力は2面間を接触させてから測定を行うまでの待ち時間と共に対数的に増大することも多くの物質で確認されている。[11, 12, 13] これは、上で述べた動摩擦の振る舞いと同一機構によるものである。実際、真実接触面積が待ち時間と共に対数関数的に増大することも一部の系で確認されている。[14, 15] もう一つの対数的速度依存性の要因は、ゆっくり動くほど、各真実接触点での凝着を切る際に熱揺らぎの助けを借りることができることからくる。[11] これは動摩擦力に正の対数的速度依存性をもたらす。一般には、この相反する効果をもたらす2つの要因の強弱により、動摩擦力の速度依存性の正負は決まる。地殻内の環境下の岩石間の摩擦では、この正負が深度により変わり、ある臨界深度より浅い部分では動摩擦力は速度弱化的傾向を示すが、深い部分では速度強化になる。速度弱化的領域では、上に述べた理由により一定速度の定常運動が不安定になり、スティックスリップ運動が起こる。地殻プレート間のスリップが地震であるが、実際、プレート間

地震には臨界深度があることが知られており、これは、岩石間の摩擦の速度依存性の正負が決められていると考えられている。[12]

このように、マクロな系の摩擦においては試料表面の凸凹が重要な役割を果たしており、真実接触面積が荷重に比例することがアモントン-クーロンの法則の成立原因であると考えられている。しかし、それは本当に上記のように各真実接触点での圧力が降伏応力に達しているからなのだろうか？多くの機械の固体間滑り面では多数回滑りが繰り返される。そして、いわゆる慣らし運転の間に、真実接触点を形成する突起とその近傍は塑性変形を繰り返し、その結果生じる磨耗のため表面荒さは小さくなり、また金属疲労の効果もあり、塑性変形を生じにくくなっていく。そして慣らし運転が終了したあとでは、ほとんどの真実接触点は弾性変形の領域にあると考えられる。そのときでも摩擦は荷重に比例する。そして、それは真実接触面積が荷重に比例するためであると考えられるが、この場合、その原因はどう考えればよいのであろうか？多くの固体表面では表面の凹凸の分布はある種の自己相似関数で極めて良く近似でき、それ以外の場合も、ガウス分布に従うことが知られている。弾性変形の範囲内でも、前者の場合は真実接触面積は荷重に厳密に比例することが示され、また後者の場合も、現実的なパラメータ領域では近似的に比例することを示すことができる。[2]

逆に、原子レベルで完全な表面の間ではどのような摩擦が働くのであろうか？これは現在のトライボロジー研究の最先端のテーマの一つである。例えば酸化膜を除いた金属で結晶表面および軸をそろえ清浄な2表面を超高真空中で接触させれば、金属結合を生じ一つの結晶となってしまう。このとき、摩擦係数は無限大となる。しかし、金属で結晶表面をそろえても、結晶軸をずらして2表面を接触させると同様な環境下でも有限の摩擦係数を得ることができる。[16] 一般の結晶の2つの完全表面の間の摩擦を考えよう。このとき、駆動外力の方向に対して、2表面の格子定数の比はほとんどの場合、無理数、すなわち不整合な関係になる。このため、表面原子の再構成がないとすれば、外力の方向に一方の結晶が一様にずれても、表面原子間の相互作用エネルギーを得する原子もあれば損する原子もあり、系全体のエネルギーは不変である。並進運動に対してエネルギーが不変なのであるから、静摩擦力は消えてしまう。これは平野らにより提案された”超潤滑”の機構である。[17] このとき注意すべきは2表面を引き離す方向に対して有限の凝着力が働いても表面に平行な運動に対する静摩擦力が消えることである。運動を始めれば、エネルギー散逸を防ぐ機構はないので、動摩擦力は有限となる。それは低速度領域では一般に速度に比例する。[18] このような超潤滑状態は、荷重を増大させるなどして、両者の表面原子間相互作用を強めれば、表面再構成が起り、非整合（ディスクメンシュレート）構造が現れ、静摩擦力が有限になると考えられる。つまり、荷重の制御により、静摩擦力が0の状態と有限の状態間の相転移が起こることが期待されるのである。[18] 実験では、超高真空中のタングステンとシリコンの清浄表面間において、駆動方向に対して両者の格子定数の比が有理数の場合、つまり、整合な関係の時には有限の摩擦力が観測されるものの、一方の結晶を回転させ不整合な場合には、精度の範囲内で摩擦力は現れない。ただし、荷重の制御による上記の相転移現象は実験的には確認されていない。[19]

ここで、話題を通常の乱れのある固体表面間の滑り摩擦の発生機構に戻す。先に、真実接触点の

形成とそこでの分子間力・原子間力による結合、運動によるその切断を基礎とする摩擦の凝着説について説明した。しかし、これについて以下のような反論と、新しいマクロ摩擦発生機構が提案されている。[8, 20] 真実接触点を成す2つの固体表面は原子的スケールで清浄に近く、かつ、一般的に両者は不整合だと考えられる。そして多くのモデル計算は、そこでは表面再構成は起こらないことを示している。従って、各真実接触点で静摩擦力は生じなくなり、その結果、全体としても静摩擦力は消えてしまう。では、乱れのある場合はどうなるのであろうか？この場合、不整合の場合と同様に、2つの表面間のある対の原子間の相互作用は得をしても、他の対の相互作用は損をしてしまう。このため、真実接触面積に比例した摩擦力を生むことができない。では、どうしてアモントン-クーロンの法則は成り立つのであろうか？一般に、大気中の実験でも、高真空中の実験でも、2つの表面間に挟まれ何らかの介在分子が存在していると考えられる。Müser, Robbins らのグループはこれら介在分子が重要な役割を果たしていると主張している。重要な点は、これらは比較的自由に動くことができる点であり、そのため、安定状態では2つの面との相互作用を常に得する配置に存在する。一方の面を横にずらすためには、これらをその安定な状態から動かさねばならず、そのため、真実接触面積に比例した摩擦力を生じる。これまでに行われた計算機実験は、この理論を支持しているが、未だ問題点も多く、今後の一層の研究が期待される。

さて、近年のトライボロジー研究の最も大きな進展の一つは、原子、分子スケールのトライボロジーが実験的に調べられるようになったことである。そこでは摩擦力顕微鏡 (Frictional Force Microscope, FFM)、表面力測定装置 (Surface Force Apparatus, SFA)、水晶結晶マイクロバランス実験装置 (Quartz Crystal Microbalance, QCM) など、新たな実験装置が中心的役割を果たしている。このうち FFM は原子スケールの摩擦力分解能を有し、その果たしている役割は特に大きなものがあるが、これについてはそちらの項目を参考にされたい。SFA については次節で述べることとし、ここでは QCM について少し振りたい。[7, 21] QCM は水晶の自励発振を利用したものである。水晶表面に清浄基盤を蒸着し、その上に希ガスなどの吸着膜を作る。水晶を振動させたとき、吸着膜が共に動けば、振動子の質量の増加となり、共鳴振動数が減少する。一方、吸着膜が基盤上でずれば、散逸を生じこれは Q 値の増加として観測される。このようにして吸着膜と基盤間の摩擦力を測定するのが QCM である。この装置は吸着膜に対する駆動力として慣性力を利用しているので、基盤と化学結合するような吸着膜は動かすことができず、そのため、測定対象はもっぱら希ガスのような、金属基盤と物理結合する物質となる。この装置を用いてもさまざまな研究が行われているが、その一つとして、吸着膜が液体層にある場合のほうが、固体相を作っている場合より摩擦力が大きくなるという実験がある。[22] これは対応する計算機実験の結果とともに、固体層では基盤との間に不整合構造ができるため、摩擦力が液体状態より小さくなるのだと考えられている。[23] もう一つの注目すべき実験例として、エネルギー散逸の機構に関するものがある。この系では吸着膜の自由度は、基盤に比べ小さく、吸着膜が滑ったとき生じるエネルギーは最終的には基盤の伝導電子、または格子振動へ散逸していくと考えられる。一般に、金属間の摩擦でも同様の散逸が起こっていると考えられるが、各々のチャンネルの寄与がどの程度かという点は不明であった。Krim らのグループは鉛基盤上に窒素ガス膜を吸着

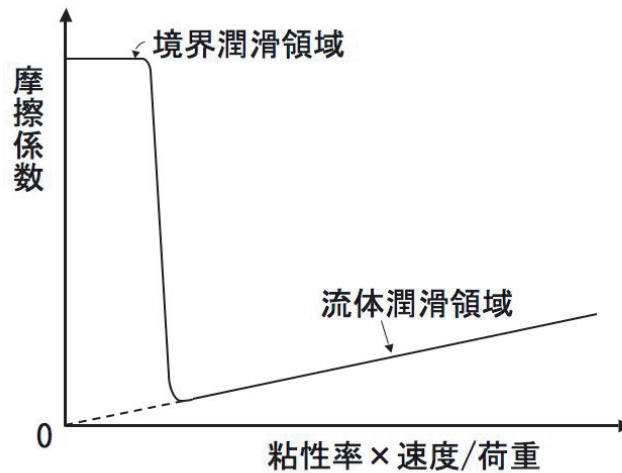


図2 ストライベック曲線

させ両者の間の摩擦力の温度依存性を測定した。そして、鉛の超伝導転移とともに両者の間の摩擦力が約 1/2 に減少することを発見した。[24] 超伝導状態では伝導電子の励起にギャップが生じる。したがって、この結果は常伝導状態では、伝導電子へのエネルギー散逸と格子振動へのそれがちょうど同程度であることを示している。他のグループによる追試ではそのような結果は再現されず、活発な議論が続いている。[25]

### 3 潤滑

通常、機械内の滑り面（摺動面）では、固体同士の直接接触を避けるため、液体潤滑剤が導入され、これにより、摩擦、摩耗を低減する。このときの摩擦力と滑り面間の相対速度の関係は図2のようになる。この曲線はストライベック（Stribeck）曲線と呼ばれる。[1, 2, 5, 6] 横軸は粘性  $\times$  速度 / 荷重とすることが多い。このような量を変数にとると摩擦力の振る舞いが普遍的に表される、というわけでは無く、滑り面の形状などに依存する。一般的にある程度、高速の領域ではいわゆる流体潤滑状態が実現され、そこでは高速で運動する滑り面によって、2つの面間に流体潤滑剤が導入され、それにより両面間には高圧力が発生して、大きな荷重をも支える。この領域では流体の粘性が摩擦に主に寄与するので、滑り速度あるいは液体の粘性の増大と共に摩擦係数も増大する。横軸が荷重で割ってあるのは、摩擦係数（摩擦力 / 荷重）を縦軸にとっているからである。この流体潤滑の機構は流体力学を用いてよく説明される。しかし、発生する面間の圧力が高くなるとそれによる面自身の変形を考慮に入れる必要が生じる。これを取り入れた理論は弾性流体潤滑理論（Elasto Hydrodynamic Lubrication, EHL）と呼ばれ、実用上、用いられている。また、ハードディスク内の磁気ディスクと磁気ヘッドの場合には空気が流体潤滑剤となって、磁気ヘッドを支えるが、現在のハードディスク内の磁気ディスクと磁気ヘッド間の間隔は記憶密度を上げるため、10nm 程度まで狭くなっている。これは通常的环境下の空気分子の平均自由行程を下回るため、流体力学を用いることができず、よりマイクロなモデルに基づく計算機実験が設計

に使われる。[3, 9]

滑り面間の相対速度が低下すると共に、その間に導入される潤滑剤も減少し、面間距離も狭まる。そのときでも、流体潤滑状態が実現されれば、摩擦力は破線のように振る舞うはずだが、現実には固体表面の凹凸が効いてきて、摩擦力は急激に上昇し、境界潤滑状態が実現する。[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] 固体表面間の間隔が狭くなっても、面間の液体潤滑剤を排除するにはその粘性のため、有限の時間が必要であり、ある程度の滑り速度では完全には排除されない。したがって流体潤滑領域を広げるためには、潤滑剤にはある程度の粘度も必要であり、また、固体表面をぬらしやすい（界面自由エネルギーの小さい）性質を持ったものが有利である。境界潤滑状態でも、固体の真の表面間の接触が起こることはまれである。金属滑り面に対する潤滑剤中には、一端に極性基を持った鎖状分子が導入されるのが普通であり、極性基は強く金属面と結合し、金属表面を保護し、薄い潤滑剤の層を形成していると考えられる。また、2つの滑り面間の間隔が元来、極めて狭く設計される超精密機械中でも潤滑剤の層は極めて薄くなる。境界潤滑領域や超精密機械中で、固体間に挟まれた極めて薄い潤滑剤層はどのように振る舞うのであろうか？このような問題を調べるのに良く用いられるのが表面力測定装置 (Surface Force Apparatus, SFA) である。[1, 2, 3, 7, 26] この装置では半円筒形をし、原子的なスケールで乱れない2枚の雲母板を円筒の軸を直交させ、側面を接触させる。このとき、雲母間にはさまざまな分子を導入することができる。雲母板表面の間隔は2枚の雲母表面からの反射光の間の干渉により極めて精度良く測定できる。そして、一方の雲母板に駆動バネをとりつけ往復運動させることにより、雲母板間の摩擦を測定する。

この装置を用いた実験により多くのことが明らかになったが、その一つとして、雲母板間に閉じこめられた球状の潤滑剤分子が10分子層以下になると、層状構造を作るという結果がある。[27, 29] さらに、5分子層程度以下になると、潤滑剤のバルクの融点より高温でも、有限の静摩擦力が現れ低速度領域では周期的スティックスリップ運動を起こす。これは、面間の潤滑剤が固化していることを示している。滑り速度がある臨界値を超えると、ある種の”相転移”を起こしてスムーズな運動に移る。[28] この現象は次のように解釈されている。低速度領域では両側の結晶表面の作る周期ポテンシャルと狭い領域に閉じこめられた効果により潤滑剤はバルクの融点より高温でも固化する。そのため静摩擦力が現れる。ここに、駆動バネによる応力が加わると、系はスティックし、応力が蓄積する。これがある大きさに達したところで、この応力により固化した潤滑剤が融解し、それにより滑りが生じ、スリップする。すると応力が緩和し、再び、潤滑剤は固化しスティックを起こす。これを繰り返すことにより周期的スティックスリップ運動が現れる。一方、滑り速度がある臨界値を超えると、スリップの後、再び固化するまでに必要な緩和時間の間に一方の結晶表面が速く動いてしまったり、スリップにより発生したエネルギーが十分緩和できなくなってしまう。そのため、潤滑剤は再び固化できずスムーズな運動を示す。これが一般的解釈であるが、他の説も存在する。

同様の低速度領域での周期的スティックスリップ運動と高速領域でのスムーズな運動への遷移は、鎖状高分子を両側の結晶表面に吸着させた場合にも生じる。[28] この場合、両側の結晶表面から伸びた鎖状高分子がお互いに入れ子状態になることにより、静摩擦力が生じる。そして、駆

動バネによる応力がある大きさに達したときに入れ子状態がはずれ滑りが起こりスリップする。すると応力が緩和し、再び高分子間の入れ子状態が生じ、スティックが起こる。高分子が入れ子状態になるためにはある有限の緩和時間が必要である。そのため、ある臨界値以上の速度では、高分子は入れ子状態を作らず、スムーズな滑り運動が起こる。どちらの場合にも、スティックスリップ運動からスムーズな滑り運動への遷移の臨界速度は駆動系のバネ定数などに依存する。固体潤滑剤も宇宙空間など液体潤滑剤が使えない環境下などさまざまな場面で用いられる。これらは固体表面にコーティングされたり、またある場合には液体潤滑剤に添加したりして使用される。代表的なものとしてはグラファイトや  $\text{MoS}_2$  のような層状物質がある。基本的には層間の弱い相互作用により層間の滑りに対する摩擦係数が小さいことを利用するものであるが、グラファイトの場合にはその面内の蜂の巣格子の構造も重要な役割を果たしている。[30] テフロンの名で知られる PTFE (Polytetrafluoroethylene,  $[\text{CF}_2 - \text{CF}_2]_n$ ) も固体潤滑剤として使われる。この物質はフッ素を側鎖に持つ鎖状高分子であり、鎖間の弱い結合力のため、良い固体潤滑剤となる。この物質は、他の多くの物質との間の界面エネルギーも極めて小さいため、ほとんどの物質との間でも小さな摩擦係数を示す。これは我々が日常生活でも経験していることである。また、最近では  $\text{C}_{60}$  をインターカレートしたグラファイトで実験精度内で摩擦が 0 となることが三浦らにより観測されており、新しい固体潤滑剤として注目されている。[31]

## 4 摩耗

摩耗は上記の摩擦、潤滑と密接な関係を持つ。ある場合には摩耗の発生が摩擦の主要因となることもある。しかし、ここまでは、話を複雑にすることを防ぐため、あえて摩耗には触れず、それが無視できる状況下での問題を主に議論してきた。しかし先に、機械の慣らし運転時における金属表面の凹凸の減少について述べたが、そこでは当然、摩耗が生じている。また、境界潤滑領域でも、厳しい環境下では摩耗がおこる。ここではその摩耗について簡単に触れる。[1, 5]

摩耗は大きく分けて 4 種類の機構により起こる。

1. アブレシブ摩耗 一方の硬い固体の表面の突起が他方のより柔らかい固体を削っていく場合の摩耗である。単位荷重、単位摩擦距離あたりの摩耗体積を比摩耗量と呼ぶが、この場合、比摩耗量は柔らかい物質の硬さに反比例する。これは突起の押し込み量が硬さに反比例するからである。
2. 凝着摩耗 摩擦の凝着説で述べたように滑り面間では真実接触点が形成され、そこでは分子間力、原子間力による凝着が起こり、滑りに伴いそれが切断される。そのときに、それまで接触点を形成していた物質の一部が引きちぎられるのが凝着摩耗である。一般に大気中で表面処理を終えただけの 2 つの金属表面を擦った場合、初期の比摩耗量は非常に多く、シビア摩耗と呼ばれる。その後、比摩耗量は桁違いに減少し、一定値となる。後者をマイルド摩耗と呼ぶ。シビア摩耗の間は、 $10 \sim 100 \mu\text{m}$  程度のスケールの摩耗粉が発生し、これが摩擦面に十分固着すると、マイルド摩耗に移行すると考えられる。実際、シビア摩耗で発生した摩耗粉を除去すると、マイルド摩耗には移らない。このシビアマイルド



ド摩耗間の遷移は雰囲気や、金属の組み合わせに強く依存する。

3. 腐食摩耗 真実接触点間の凝着が切れたとき、その表面はエネルギー的に不安定であり、雰囲気中の水、酸などと反応しやすい。その結果生じた反応生成物の層が摩擦力により、除去されるのが腐食摩耗である。
4. 疲れ摩耗 真実接触点近傍では、塑性変形を繰り返し、これにより固体疲労を起こし、内部にクラックが生じることがある。そしてここから試料表面がはがれるのが、疲れ摩耗である。

## 参考文献

- [1] B. Bhushan: *Introduction to Tribology* (John Wiley & Sons, Inc., 2002).
- [2] B. N. J. Persson: *Sliding Friction, Physical Principles and Applications, Second Edition* (Springer, 2000).
- [3] *Handbook of Micro/Nano Tribology, Second Edition*, ed. by B. Bhushan (CRC Press 1999).
- [4] N. Ohmae, J. E. Martin and S. Mori: *Micro and Nanotribology* (American Society of Mechanical Engineers, 2005)
- [5] 木村好次、岡部平八郎：トライボロジー概論 (養賢堂、1982)。
- [6] 加藤孝久、益子正文：トライボロジーの基礎 (培風館、2004)
- [7] J. Krim: *Am. J. Phys.* **70** (2002) 890.
- [8] J. Ringlein and M. O. Robbins: *Am. J. Phys.* **72** (2004) 884.
- [9] 表面科学、**19** 特集” マイクロトライボロジーの最近の発展”
- [10] 松川宏：表面科学、**24** (2003) 328.
- [11] F. Heslot, T. Baumberger, B. PERRIN, B. Caroli and C. Caroli : *Phys. Rev.* **E49** (1994), 4973.
- [12] C. C. Scholz: *The Mechanics of Earthquake and Faulting*, (Cambridge Univ Press 1990) (邦訳 地震と断層の力学 (古今書院 1993)) .
- [13] T. Baumberger: *Solid State Commun.* **102** (1997) 175.
- [14] 河野彰夫: *日本物理学会誌* **53** (1988) 579.
- [15] J. H. Dieterich and B. D. Kilgore: *Pure and Applied Geophysics* **143** (1994) 283, *Tectonophysics* **256** (1996) 219.
- [16] J. S. Ko and A. J. Gellman: *Langmuir* **16** (2000) 8343.
- [17] M. Hirano and K. Shinjo: *Phys. Rev.* **B41** (1990) 11837.
- [18] H. Matsukawa and H. Fukuyama: *Phys.Rev.* **B49** (1994) 17286; T. Kawaguchian and H. Matsukawa: *Phys. Rev.* **B56** (1997) 13932, **B58** (1998) 15866.
- [19] M. Hirano. K. Shinjo, R. Kaneko and Y. Murata: *Phys. Rev. Lett.* **78** (1997) 1448.
- [20] G. He, M. H. Müsser and M. O. Robbins: *Science* **284** (1999) 50; M. H. Müsser , L.

- Wenning and M. O. Robbins: Phys. Rev. Lett. **86** (2001) 1295.
- [21] J. Krim and A. Widom: Phys. Rev. **B38** (1988) 12184.
- [22] C. Mak and J. Krim: Phys. Rev. **B58** (1998) 5157.
- [23] E. D. Smith, M. O. Robbins and M Cieplak: Phys. Rev. **B54** (1996) 8252.
- [24] A. Dayo, W. Alnasrallah and J. Krim: Phys. Rev. Lett. **80** (1998) 1690.
- [25] R. L. Renner, P. Taborek and J. E. Rutledge: Phys. Rev. **B63** (2001) 233405.
- [26] J. N. Israelachvili: Surf. Sci. Rpt. **14** (1992) 109.
- [27] M. L. Gee, P. M. McGuiggan and J. N. Israelachvili: J. Chem. Phys. **93** (1990) 1895.
- [28] H. Yoshizawa, P. McGuiggan and J. Israelachvili: Science **259** (1993) 1305; H. Yoshizawa, Y.-L. Chen and J. Israelachvili: J. Chem. Phys. **97** (1993) 4128; H. Yoshizawa and J. Israelachvili: J. Chem. Phys. **97** (1993) 11300.
- [29] H. Matsuoka and T. Kato: ASME J. Tribology **118** (1996) 832.
- [30] K. Matsushita, H. Matsukawa and N Sasaki: Solid State Commun. **136** (2005) 51.
- [31] K. Miura, D. Tsuda and N Sasaki: e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3** (2005) 21.