

摩擦の物理

松川 宏

青山学院大学理工学部物理学科
〒229-8558 神奈川県相模原市淵野辺5-10-1

摩擦の研究における最近の発展を、物理の視点から概観する。広い範囲で成り立つことが知られているアモンタークローンの法則の幾つかの説明を議論する。動摩擦に伴うエネルギー散逸の機構を解明しようとする実験についても議論する。最後に滑り面、または滑り面間の潤滑剤の振る舞いを直接、観察することを目指す幾つかの新しい実験的手法を紹介する。

Physics of Friction

Hiroshi MATSUKAWA

Department of Physics, Aoyama Gakuin University
5-10-1 Fuchinobe, Sagamihara 229-8558

Recent progress in the research area of friction is reviewed from physical point of view. We discuss some explanations of the mechanism of Amonton and Coulomb's law, which holds well in various systems. The study of energy dissipation process associated with dynamical friction is also discussed. New experimental techniques that aim to observe the sliding surfaces and lubricants between them are introduced.

1、はじめに

‘摩擦’は最も身近な物理現象の一つで、工学上も極めて重要な現象であるため、ピラミッドの昔から多くの研究がなされてきた。そして、その成果の一部は後述するクーロン-アモントンの法則として知られ、中学高校や大学教養課程程度の物理の講義でも決まって取り上げられる^(1, 2)。しかし、実はその法則の成り立つ機構についても未だに諸説有り、統一的な解明はなされていないのである。これには、摩擦は、物質、形状、表面状態、潤滑剤の有無等により、実に多様な様相を示す複雑な現象である事が原因の1つとして考えられよう。しかし、最近の様々な科学・技術の進歩に促され、摩擦の研究にも大きな発展が起こりつつある^(3~7)。それには、表面制御技術、超高真空技術や原子間力顕微鏡、摩擦力顕微鏡など、近年の様々な表面科学の実験技術の進歩が大きな役割を果たしている。それらの発展については本誌でもこれまで幾つかの解説がある^(8, 9)。本解説では特集「摩擦研究の最先端とその応用」の序論を兼ねて、これまで、および本特集号中の他の解説と相補的になるよう心がけながら、ミクロからマクロに至る摩擦研究の現状、最近の発展を物理の視点から概観したい。

2、クーロン-アモントンの法則

通常の固体間の滑り摩擦に対しては、クーロン-アモントンの法則と呼ばれる経験則が広い範囲で成り立つ事が良く知られている。これは古くはダ・ヴィンチによりその一部が明かにされ、現在のような形には18世紀フランスのアモントンやクーロンがまとめたもので、(i) 摩擦力は見かけ上の接触面積に依存しない、(ii) 摩擦力は垂直抗力に比例する、(iii) 動摩擦力は静摩擦力より小さく、速度に依存しない、というものである。つまり摩擦力を F 、垂直抗力を N とすると $F = \mu N$ と表すことが出来て、 μ は見掛け上の接触面積にも速度にも依らないというものである。この μ を摩擦係数と呼ぶ。この法則のうち静摩擦に関する部分はダ・ヴィンチが既に見つけていた。この法則は高校の物理の教科書にも登場するが、摩擦のような多様な現象において、このような経験則が広い範囲で成り立つのは不思議なことである。そして未だに、この法則の統一的な説明はなされていないのである。この話から始めよう。

摩擦力が見かけの接触面積に依らないということは一見、不思議に思えるかもしれないが、単位（見かけの）接触面積当たりの摩擦力が、“圧力”（垂直抗力/見かけの接触面積）に比例するならば当然の帰結である。では、なぜ単位（見かけの）接触面積当たりの摩擦力が、“圧力”に比例するのであろうか？これは、普通は次のように説明される⁽⁴⁾。以下、静摩擦力に注目し、単位（見かけの）接触面積当たりで考えることにする。通常の物体の表面は肉眼ではどんなにきれいに見えても実際は非常に凸凹している。そのような2つの表面が接すると、表面の凸凹のため突起部分だけが接

触し、その本当に接触している部分（真実接触点）の面積（真実接触面積）； A_r は見掛け上の接触面積よりも極めて小さい（図1）。真実接触点では分子間力による凝着が起こっているため、2つの物質にずれの力を加えて滑り運動を起こすにはその凝着を切らねばならず、単位（真実）接触面積当りの凝着を切るのに必要な力である剪断強さ τ_1 を用いて最大静摩擦力 F_m は $\tau_1 A_r$ で与えられる。この説明によれば、（剪断強さが一定なら）真実接触面積が荷重に比例すれば、最大静摩擦力が荷重に比例することになる。では次に、なぜ真実接触面積が荷重に比例するのかという問題が生じる。これについては、幾つかの実験的証拠があるようであるが、次のように説明されることが多い⁽⁴⁾。真実接触面積は見掛けの接触面積に比べ非常に小さいので、そこでの圧力は非常に高く、弾性限界を越え塑性流動領域に達し、圧力は塑性流動圧力 P_m となっている。これは一定である。従って、垂直抗力 N と A_r 、 P_m の間には、 $N=A_r P_m$ の関係が成り立ち、真実接触面積は荷重に比例し、摩擦力も荷重に比例する。このとき、最大静摩擦係数 $\mu_m=F_m/N$ は τ_1/P_m で与えられる。

しかし、塑性流動圧力に達するような塑性変形が常に真実接触点で起こっているのだろうか？特に通常の機械の中では滑り面は繰り返し滑りを起こす。ここでは、大きな凸凹は（慣らし運転のうちに）摩耗により消滅し、突起部分は弾性変形を繰り返し真実接触点を形成するという方が考えやすい。しかし、弾性変形ではヘルツ接触として良く知られるように、真実接触面積は荷重の2/3乗に比例し、摩擦力は荷重に比例しなくなってしまう。この矛盾は、表面の凸凹の分布を考えることにより、解決できる⁽⁴⁾。例えば、接触前の表面の凸凹がある自己相似的構造を持っていれば、弾性変形の範囲内でも、真実接触面積は荷重に比例する。クーロン-アモントンの法則が成り立つ全ての固体表面が自己相似的構造を持っているとは考えづらいが、実は自己相似的構造を持っていなくとも、接触前の表面の突起の高さ分布がガウス分布に従えば、真実接触面積が荷重に比例することを示すことができる。その結果、摩擦力も荷重に比例する。そして、現実の表面の接触前の突起の高さ分布はガウス分布でよく表されるようである⁽⁴⁾。

このように、真実接触点では塑性変形が重要だとしても、弾性変形しか起こっていないとしても、クーロン-アモントンの法則を説明することはできる。そして、それぞれの説と矛盾しない実験事実を探すことも可能である。ではどちらが本当なのだろうか？これには未だ明快な回答は得られていないようである。そのうえ、これらの説では当然とされている、真実接触点での分子間力による凝着にも、最近、懐疑が高まり、そしてその凝着を仮定しない全く新しいクーロン-アモントンの法則の説明まで現れた⁽¹⁰⁾。

まず簡単のため、各真実接触点表面は原子的なレベルで平らであり、乱れは無いとしよう。接する2つの真実接触点表面が同じ物質でできており、結晶方位もそろって

いれば問題は無い。しかし、一般には、物質も違えば結晶方位も違う。そして2つの表面の原子配列はインコメンシュレートとなる。そこで2つの表面の原子間相互作用を考えた場合、それは得する原子対もあれば、損する原子対もある。そして全体としては、それらが打ち消し合い、全体としてのエネルギーの利得は生じない、つまり凝着は生じない。従って（静）摩擦も生じない。これは清浄表面に関して最初、平野、新庄らによって提案された超潤滑の機構に他ならない⁽¹¹⁾。これについての詳細は本特集号中の平野の解説に譲るが、これは上下の原子間相互作用がある程度強ければ、起こらない。その相互作用を得するようにある種の表面再構成が起こり、局所的にはコメンシュレートな構造をもち、それらがミスフィットをはさんで繋がったディスコメンシュレート構造を作るからである⁽¹²⁾。インコメンシュレート構造をとるか、ディスコメンシュレート構造をとるかは上下の原子間相互作用の強さと同じ表面内の原子間相互作用の強さの比で決まり、2つの構造の間の相転移はAubry転移と呼ばれる。そして幾つかの計算では、現実的なパラメーター領域では、2つの表面の構造はインコメンシュレート構造のままであると主張されている^(10, 11)。

では乱れがあるとどうなるのか？この場合も2つの表面の原子間相互作用を得する原子対もあれば損する原子対もあることに変わりはない。そこでは全体としての原子間相互作用の特分は揺らぎのオーダー、つまり原子対の総数の平方根のオーダーにしかならず、真実接触面積に比例した凝着力を与えることはできない。

では、何故この世界では、マクロな荷重に比例した摩擦力が現れるのだろうか？最近、M.H.Musser, M.Robbinsらのグループは2つの真実接触点の間の動ける介在分子が重要な役割を果たしているとして主張している⁽¹⁰⁾。通常の摩擦実験では、大気中の炭化水素、超高真空中でも、不純物や摩耗によって生じた分子クラスターがその介在分子となっていると考えられる。これらの介在分子は動けることが重要であり、そのためエネルギーを得する配置をとり、2つの真実接触点間にはこの介在分子を介した、常に得する相互作用が生じる。2つの表面間に滑りを生じさせるためには、この介在分子をよりエネルギーの高い状態に移さねばならず、摩擦力が生じる。この摩擦力は荷重に比例することがモデル計算で示されている。通常、介在分子は潤滑剤として摩擦を減らすものと考えられているが、この説では全く逆に、摩擦を生み出すものとなっているのである。

以上はM.H.Musser, M.Robbinsらの主張である。平野らのマイカ間の摩擦実験では、超高真空中で温度が高温環境下では、接する2つのマイカの結晶軸をそろえ表面間がコメンシュレートな条件にすると大きな摩擦力を生じるものの、一方のマイカを回転させ結晶軸の方向をずらしインコメンシュレートな条件にすると摩擦力は小さくなる、しかし大気圧で常温環境下ではインコメンシュレートな条件でも、摩擦力は大きくなるのである⁽¹³⁾。これは超高真空、高温環境下ではマイカ表面の介在分子が飛んでし

まい、インコメンシュレートな清浄表面の条件が実現されていたのが、大気圧、常温環境下では介在分子が存在するのだと考えれば、M.H.Musser, M.Robbinsらの主張と矛盾しない。マイカと同様の振る舞いは最近、Ni(100)面間の実験でも見つかった⁽¹⁴⁾。

しかし、彼らの主張には（少なくとも検証しなければならない）幾つかの問題点があると考えられる。介在物がなく清浄な表面の場合に、表面原子がディスコメンシュレート構造をとらず、インコメンシュレートな条件が実現されていることが彼らの理論の前提である。先に述べたようにこれを支持するモデル計算は幾つかあるが、それらの多くはある種の一体近似あるいは平均場近似といったものに基づいており、ディスコメンシュレート構造をとった場合に損する同じ物質内の変形エネルギーを不当に大きく評価している可能性がある。同様な近似は、介在分子がある場合に摩擦力が荷重に比例することを示しているモデル計算にも使われている。また、特に金属の場合、それらの計算に使われた2体原子間ポテンシャルの妥当性も検証が必要であろう。

このように、ダ・ヴィンチによって既に明かにされたクーロンーアモントンの法則にも、幾つかの説明があり、未だに確立した統一的な説明はない。場合により、この法則の成り立つ機構が違ふ可能性もある。この法則の正しい理解、機構の解明のためには、より一層の実験と理論の定量的で詳細な比較が必要なことはいまでもないが、クーロンーアモントンの法則の成立している領域内での比較だけではなく、法則の成立条件、条件外での摩擦の振る舞いまで含めて行う必要がある。これらの理論はどれも、その適用範囲に限界があり、それを越えると成り立たなくなる⁽⁴⁾。そこでは、クーロンーアモントンの法則は成立しなくなると期待されるのである。その適用範囲は各々の理論により決まる。また、適用範囲をはずれたときの振る舞いも予測可能である。一方、実験的にも、クーロンーアモントンの法則が成立しない場合も知られている。実験と理論の比較をクーロンーアモントンの法則の成立条件、条件の外での摩擦の振る舞いにまで拡げて行うことにより、始めてこの法則の正しい理解が得られると考える。それは摩擦のより深い理解を得るためにも不可欠であろう。

3, 動摩擦力

前章では、クーロンーアモントンの法則のうち静摩擦について議論した。それは動摩擦というものは本質的にエネルギー散逸を伴う非平衡現象であり、静摩擦とは質的に違った側面を持っているからである。ここでは、この動摩擦を考えてみる。

さて、流体中を運動するマクロな物体に働く摩擦力（抵抗）は速度と共に減少し、静止状態に向かって連続的に0となる。これはエネルギー散逸は運動によって初めて生じ、速度が小さくなれば散逸も小さくなると考えれば、当然の振る舞いである。しかし、固体間の乾燥滑り摩擦では、そうはならない。クーロンーアモントンの法則に依

れば、動摩擦力は速度に依らない。なぜ、このような違いが生じるのであろうか？これはスティックスリップ運動によると考えられている⁽⁴⁾。スティックスリップ運動とは立て付けの悪い障子などを動かす時に、スムーズに動かず、引っかかりと急激な滑りを繰り返す、あの運動である。マクロな摩擦の実験では、一見、滑らかな滑りが起きているように見えても、各真実接触点あるいは原子分子のスケールでみれば、ミクロなスティックスリップ運動を生じていると考えられている。そしてスリップの時の速度は、マクロな滑り速度とは基本的には関係が無く、真実接触点間の相互作用などによって決まり、マクロな滑り速度よりも極めて高速である。そしてこの高速運動時のエネルギー散逸が動摩擦力を決める。このように、マクロな滑り速度とは無関係な高速なエネルギー散逸過程が存在するので、動摩擦力は基本的には、系全体の滑り速度に依らないのである。実際、前章に述べたインコメンシュレートで静摩擦力が働かない状況では、運動の際、各原子が受ける力は連続的に変化し、スティックスリップ運動は生じない。そこでは動摩擦力は速度と共に減少し、静止状態に向かって連続的に0となる⁽¹²⁾。

最近の詳細な実験によれば、動摩擦力の速度依存性は一般には存在するようである⁽¹⁵⁾。ただ、その依存性が多くの場合、対数関数的で弱いため、顕在化することは多くない。しかし、運動の安定性などを決める上で決定的な役割を果たし、岩石の摩擦の速度依存性は地震と関係して精力的に研究されている⁽¹⁶⁾。

ではその動摩擦の際の散逸するエネルギーはどこにいくのであろうか？金属間の摩擦の場合、その行く先は伝導電子とフォノンが考えられる。ではどちらにどれだけ逃げていくのであろうか？これに答えを与えようとする実験がクリムらによって行われ⁽¹⁷⁾、その後、活発な議論が交わされている。

原子的なスケールで清浄な界面の摩擦を調べる方法として、乱れのない基板上に原子や分子を吸着させ人工的に原子数層からなるもう一つの物質を作ってしまうという方法がある。そうしてできた試料全体を振動させ、そのときの機械的応答から基板とその上の物質間の摩擦力を求める。基盤として水晶振動子上に凝着させた金属膜を使うので、これはクォーツクリスタルマイクロバランス(QCM)実験と呼ばれている。この方法はクリムらによって開発され、その後も、このグループによる独占的な状況が続いた⁽¹⁸⁾。そしてクリムらは、この方法によって鉛基板と窒素膜の間の摩擦力を測定し、動摩擦力が鉛の超伝導転移温度以下で、突然、約半分になってしまうという非常に興味深い結果を得た⁽¹⁷⁾。この結果によれば、常伝導状態では伝導電子とフォノンはそれぞれ同程度、動摩擦力によるエネルギー散逸に寄与していることになる。その後、この現象に関する理論も幾つか提案され、活発に議論されていた⁽¹⁹⁾。さらに同じグループによるより詳細な報告も行われた⁽²⁰⁾。しかし、最近の他のグループに

よる追試では、そのような超伝導転移に伴う動摩擦力の変化は全くみられないと報告されている⁽²¹⁾。現在、この問題の決着がどうつくのかは予断を許さないが、複数のグループによってこのような実験が行われるようになったことは、この分野の大きな進歩であろう。

4、滑り面、滑り面間を見る

さて、1章で説明したように、摩擦の基礎的機構はまだまだ解明されていない。これについてはいろいろ理由があろうが、実験の立場から見た場合、摩擦を起こしている正にその現場を見ることができない、ということが大きなネックの一つになっていると考えられる。通常の表面科学の問題であれば、表面は真空中なり、ある雰囲気中に露出しており、様々な実験手段を用いて、その表面の構造を調べることが可能である。もし、その構造を見ることができなかつたら、今日の表面科学の進歩は無かつたであろう。しかし乾燥摩擦の問題の場合、固体表面はもう一つの固体表面と接しており、その正に接しているところで摩擦は起きている。そして、接しているが故に、その場所の構造を見ることが困難なのである。摩擦の問題として、2つの固体表面間に潤滑剤が存在する場合も大きな問題である。通常の機械内の滑り面間では摩擦、摩耗の軽減のため、液体潤滑剤を導入する。この場合、摩擦は固体表面と潤滑剤界面、潤滑剤内で起こる。

そして、その潤滑剤の構造、振る舞いが大きな問題となるが、これも直接、観測することはこれまで困難であった。しかし最近、これらの問題にも発展が起りつつある。

機械が精密化するに伴い、滑り面間の距離も縮まり、そこに含まれる潤滑剤の厚さも薄くなる。そして、滑り面間の潤滑剤が数十分子層以下になると、バルクの潤滑剤とは違った様々な興味深い現象が現れる。そのような状況は、通常の流体潤滑を意図された機械の滑り面間でも、滑り速度が遅くなった場合などに現れる境界潤滑と呼ばれる領域で起こっていると考えられる。それらの現象の実験で多く用いられるのが、イスラエルアチビリらによって開発された表面力測定装置と呼ばれるものである

⁽²²⁾。この装置では、2枚の半円筒上のマイカを軸を直交させ凸面同士を近づける。マイカ間には様々な”潤滑剤”を配置し、このマイカを互いに滑らせることにより、摩擦実験を行う。2枚のマイカ間の間隔は光学的な干渉効果を利用することにより精密に測定することができる。この装置を用いた実験により、潤滑剤が十分子層以下になると層の厚さが”量子化”されること、さらに薄くなると低速度で駆動されたとき系はスティックスリップ運動を示すこと、等の現象が報告されている⁽²²⁾。そしてこれらの現象は、対応する計算機実験の結果をも用いて、十分子層以下で潤滑剤が層状構造を作り、さらに薄くなると潤滑剤がバルクのガラス転移温度や融点より高温でも、ガラス化、固化を起こし最大静摩擦力が現れスティックし、ここに応力が加わると解

けてスリップを起こすためである、と考えられている。最近このような数分子層の潤滑剤を閉じ込めた系で潤滑剤の構造を放射光X線を用いて測定するという実験が行われた⁽²³⁾。実験ではOMCTSという球状の高分子を平らなシリコン基板間にはさみ、確かにこれまで言われてきたような層状構造を観測した。この実験では実際に応力を加えて滑らせてはいない。一方、イスラエルアチビリらは表面力測定装置と通常のX線散乱実験装置を組み合わせ、液晶をマイカ間にはさみ、応力を掛け滑らせることにより液晶の構造が変化することを観測した⁽²⁴⁾。彼らはそこで用いた装置をX線表面力測定装置と呼んでいるが、ここではX線の散乱強度を稼ぐため、液晶の層厚は800 μ m程度と厚くしており、この装置の適用はそのような厚さでも現れる現象に限られるようである。一方、グラニックらは表面力測定装置のマイカ間にはさんだ数分子層のOMCTSの拡散をレーザー光を用いて、空間分解能サブミクロンスケールで測定し、拡散係数が端から中央部に向けて指数関数的に減少することを報告した⁽²⁵⁾。表面力測定装置はその構造上、圧力が場所に依って違うが、それについてまじめに議論されたことは無かった。Granickらの実験はその効果を一部明らかにしたもので、これまでの表面力測定装置を用いた実験の解釈にも再考を促すものである。これらの実験はどれも、滑り面間の潤滑剤の振る舞いを直接、観測することを目指すもので、興味深い。今後の発展が期待される。

マクロな系の乾燥摩擦でも、滑り面の振る舞いを直接見ようと言う努力がなされてきた。前述したようにマクロ系の摩擦では真実接触点が重要な役割を果たしている。この真実接触点の直径は10 μ mのスケールだと考えられている。この個々の真実接触点を見る試みは、過去に、河野ら⁽²⁶⁾、ダイエトリッヒら⁽²⁷⁾によって行われ、真実接触面積の待機時間依存性などが明かにされてきた。しかし、そのような研究は多くはない。最近、このようなマクロ系の摩擦での真実接触点の振る舞いについて興味深い報告がバウムバーガーらによって行われた⁽²⁸⁾。彼らはガラス上でゲルを滑らせ、その滑り面をガラス側から光学的に同時観測するとともに、ゲルに横方向から光を当て、光弾性効果を用いて、ゲル内の応力分布までを可視化して示した。この系では、駆動速度が遅い場合、系全体としてスティックスリップ運動を示す。彼らはこのスリップが滑り面全体で一様に起こるのではなく、試料の一部の真実接触点（ゲルの場合、通常の真実接触点とはちょっと違うが）が滑り、これがスリップパルスとなって伝わることにより、系全体がスリップする、スリップした領域はその後、近傍の応力が緩和し再びガラスと接触するという現象を発見している。これは、通常の固体での塑性変形が転位線の伝搬によって起こるのと極めて似ている。この現象がゲルに特有のものなのか、より広い範囲で現れるものなのか、興味は尽きない。

5, 最後に

これまでに紹介した以外にも、最近、多くの進歩が摩擦研究に起こっている。マクロ系の摩擦に関しては、1章でも触れた超高真空中でのNi(100)面間の摩擦の異方性の観測がある⁽¹⁴⁾。つまり、摩擦係数が2つの表面の結晶軸の相対角度に依存するのである。これは一辺1cm程度の単結晶試料間で行われたもので荷重は数10mNの程度である。通常金属表面は周知のように極めて汚く、制御が困難である。それにもかかわらず、明確な摩擦の異方性が見えたことは、この分野の実験技術の進歩を物語るものであろう。2つの表面がコメンシュレートおよびインコメンシュレートな場合の摩擦力の荷重依存性などが明らかになれば、金属の摩擦機構の解明について大きな情報を与えてくれると期待される。

摩擦力顕微鏡を用いた原子分子スケールの摩擦実験に関してはこれまでほとんど触れなかった。ここで、摩擦力顕微鏡の針を駆動装置として用いた最近の三浦らの実験について紹介しよう。原子的なスケールで乱れない表面間でどのような摩擦が働くかは、1章で述べた問題との関連はもちろんのこと、マイクロ/ナノマシーンへの応用を考える上でも興味深い。そこでは摩擦力顕微鏡の針先よりも大きなスケールの表面と基板間の摩擦を調べる必要があるが、それが可能な制御された実験装置はこれまで余り無かった。三浦らはグラファイトやMoS₂等の層状物質のmmスケールのフレークを同じ物質の基板上に置き、フレークを摩擦力顕微鏡の針で駆動することにより、清浄なグラファイト間、MoS₂間の摩擦を測定することに成功した^(29, 30)。実際に滑りがフレーク-基板間で起こっていることは摩擦力像の解析から確認されている。これまで層状物質の摩擦力顕微鏡実験においては、実験中に試料表面からフレークが剥離し、実際にはフレーク-基板間の摩擦力が測られているのではないかといわれてきた。三浦らの実験はこの問題にも光を与えるものである。実際、彼らがグラファイトフレーク-グラファイト基板間の摩擦実験で得た摩擦力像は、これまでグラファイト上の摩擦力顕微鏡実験で得られたものと同じであった。これに対応した計算機実験も行われ、グラファイト上の摩擦力顕微鏡実験で得られた摩擦係数を定量的に説明することに成功している⁽³¹⁾。しかし、摩擦力の荷重依存性など幾つかの問題が残されており、今後の発展が期待される。また三浦らは、フレーク-基板間にC₆₀分子層を置きフレークを摩擦力顕微鏡で駆動する実験により、一層のC₆₀は極めて良い分子ベアリングとなることも示している⁽³⁰⁾。

さて、このような摩擦研究の目標の一つは原子分子のレベルからマクロ系の摩擦を理解することであろう。原子分子レベルの摩擦研究の近年の発達は著しいものがある。一方、マクロ系の摩擦研究もここで触れた以外にも、多くの進歩がある。しかし、両者を繋ぐことは、現状ではまだ難しい。それを行うためには、マクロ摩擦の実験をより制御された条件化で行うことはもちろんのこと、両者を繋ぐスケールの人工的に制

御された摩擦系を作製し研究することが必要であると考え。そして必要とあれば複数の段階・スケールの制御された摩擦系の研究をつなげることにより、原子分子のレベルからのマクロ摩擦の解明が初めて達せられると期待している。それは基礎科学と工学の両方の問題に大きな寄与を与えよう。

界面での摩擦現象は超伝導体中の磁束格子や、低次元導体中の電荷・スピン密度波の運動など様々な固体内摩擦現象とも密接な関係がある。それについては文献を参考にされたい⁽³⁾。

参考文献

- (1) 曾田範宗、摩擦のはなし、岩波新書；角田和雄、摩擦の世界、岩波新書。
- (2) 摩擦の研究の歴史についてはD. Dowson: "History of Tribology", Longman(1979) (抄訳「トライボロジーの歴史」、工業調査会(1997)) に詳しい。
- (3) 松川宏、川端和重；固体物理2000年6月号
- (4) B. N. J. Persson: "Sliding Friction-Physical Principles and Applications-, 2nd Edition" (Springer, 2000).
- (5) B. Bhushan: "Introduction to Tribology" (John Wiley & Sons, Inc. 2002).
- (6) B. Bhushan ed.: "Handbook of Micro/Nanotribology" (CRC1999).
- (7) I. L. Singer and H. M. Pollock, eds. "Fundamentals of Friction", (Kluwer, 1992); B. N. J. Persson and E. Tosatti, eds. "Physics of Sliding Friction (Kluwer 1996); B. Bhushan ed. "Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap Between the Macro- and Micro/Nanoscales" (Kluwer 2001)
- (8) 日本表面科学会誌 第19巻 第6号 特集” マイクロトライボロジーの最近の発展”
- (9) 日本表面科学会誌 第20巻 第5号 特集” SPMを用いた研究の現状と展開”
- (10) G. He, M. H. Musser and M. O. Robbins: Science **284**, 50 (1999); M. H. Musser, L. Wenning and M. O. Robbins: Phys. Rev. Lett. **86**, 1295 (2001).
- (11) M. Hirano and K. Shinjo: Phys. Rev. **B 41** 17 (1990) 11837.
- (12) H. Matsukawa and H. Fukuyama: Phys. Rev. **B49**, 17286 (1994), T. Kawaguchi and H. Matsukawa: Phys. Rev. **B56**, 13932 (1997), **B58**, 15866 (1998).
- (13) M. Hirano, K. Shinjo, R. Kaneko and Y. Murata, Phys. Rev. Lett. **67** (1992), 2642.
- (14) J. S. Ko and A. J. Gellman: Langmuir **16**, 8343 (2000)
- (15) F. Heslot, T. Baumberger, B. PERRIN, B. Caroli and C. Caroli, Phys. Rev. **E49**, 4973 (1994).
- (16) 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)).
- (17) A. Dayo, W. Alnasrallah and J. Krim: Phys. Rev. Lett. **80**, 1690 (1998).
- (18) J. クリム：日経サイエンス1997年1月号52；J. Krim and A. Widom: Phys.

- Rev. **B38**, 12184 (1988).
- (19) V. L. Popov: JETP Lett. **69**, 559 (1999); T. Novotny and B. Velicky: Phys. Rev. Lett. **83**, 4112(1999); J. B. Sokoloff, M. S. Tomassone and A. Widom: Phys. Rev. Lett. **84**, 515 (2000); B. N. J. Persson: Solid State Commun. **115**, 145 (2000).
- (20) B.L.Mason, S. M. Winder and J. Krim: Tribology Letters **10**, 59 (2001).
- (21) R. L. Renner, P. Taborek and J. E. Rutledge: Phys. Rev. **B63**, 233405 (2001).
- (22) J. N. Israelachvili: Surf.Sci.Rpt., **14**, 109 (1992); H. Yoshizawa, J. N. Israelachvili: J. Phys. Chem. **97**, 11300 (1993).
- (23) O. H. Seeck, H. Kim, D. R. Lee, D. H. Shu, I. D. Kaendler, J. K. Basu and S. K. Sinha: Europhys. Lett., **60**, 376 (2002).
- (24) Y. Golan, A. Martin-Herranz, Y. Li, C. R. Safinya and J. Israelachvili: Phys. Rev. Lett., **86** 1263 (2001).
- (25) A. Mukhopadhyay, J. Zhao, S. C. Bae and S. Granick: Phys. Rev. Lett. **89**, 136103 (2002).
- (26) 河野彰夫、日本物理学会誌 **43** (1988) 579.
- (27) J. H. Dieterich and B. D. Kilgore: Pure and Applied Geophysics **143**, 283 (1994).
- (28) T. Baumberger, C. Caroli and O. Ronsin: Phys. Rev. Lett. **88**, 075509 (2002).
- (29) K. Miura and S. Kamiya: Europhys. Lett., **58**, 610 (2002).
- (30) K. Miura, S. Kamiya, and N. Sasaki Phys. Rev. Lett., **90**, 055509 (2003).
- (31) 松下勝義 : 大阪大学大学院理学研究科 2003 年博士論文 ; K. Matsusita, H. Matsukawa and N.Sasaki: in preparation.

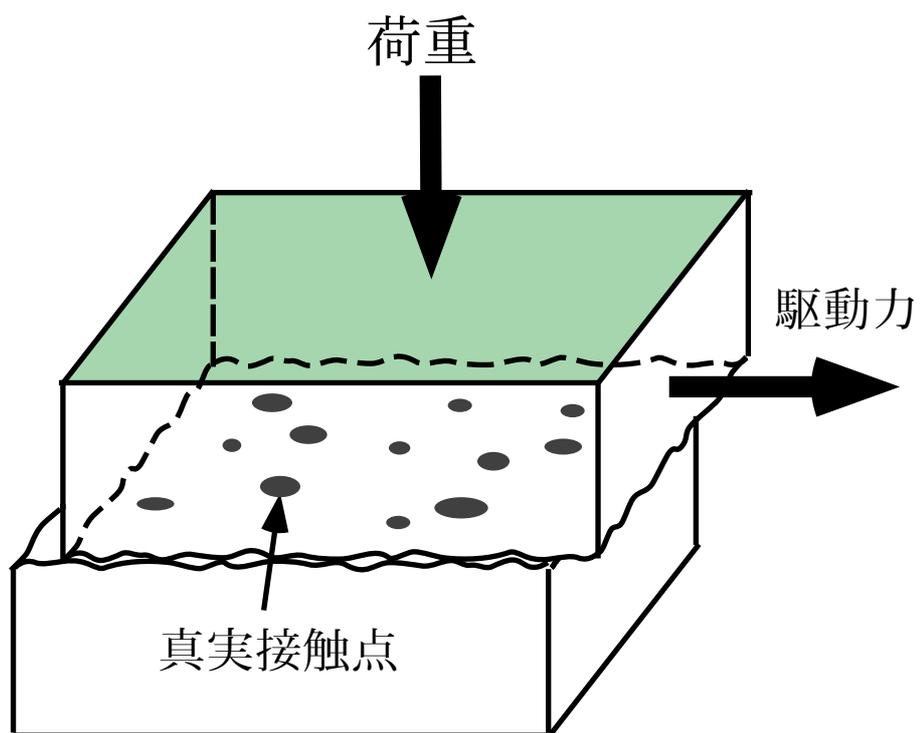


図1, 固体表面と真実接触点の模式図。
典型的な真実接触点の大きさは $10\mu\text{m}$ のスケール程度と
考えられている。