摩擦の素過程と動的制御の物理

—理論的アプローチ—

川 口 高 明

山梨大学教育人間科学部 ☎ 400-8510 山梨県甲府市武田 4-4-37

(2007 年 7 月 3 日受理)

Elementary Processes and Dynamical Control of Friction and Lubrication at the Nanoscale —A Theoretical Approach—

Takaaki KAWAGUCHI

Department of Mathematics and Physics, University of Yamanashi
4-4-37 Takeda, Kofu, Yamanashi 400-8510

(Received July 3, 2007)

Nanoscale boundary lubrication and interfacial friction are studied using computer simulations based on extended Frenkel-Kontorova models. Several peculiar properties of static and kinetic frictional forces and the dynamics of lubrication are discussed. Some possible methods to control frictional forces and dynamics of lubrication are proposed and discussed in relation to the mechanism of nanomachines.

KEYWORDS : friction, lubrication, tribology, nanomachine, simulation

1. は じ め に

ナノスケールの摩擦・潤滑現象は、各種ナノプローブ技術の急速な進歩に影響されて、機械工学や表面物理等の表面・界面を対象とする様々な分野で注目されている^{1,2)}。物理学的には、摩擦の発生機構程および特性を明らかにすることが一つの大きな研究目的であり、現在、その面での研究が盛んに行われている。そして、ここ最近では、ナノスケール摩擦・潤滑の制御、そして、その応用・発展としてのナノマシンの物理という方向からの研究も盛んになっている³⁾。

ナノマシンの可能性については、ファインマンやドレクスラーら⁴⁾の構想が以前よりあるが、近年では、ナノ材料およびナノ測定装置の進歩によって、フラーレン、ナノチューブ、ナノプローブ装置などを用いて、マシンの基本機構のいくつかは実際に構築されつつあり、多様な本格的なナノマシンの実現は現実味を帯びてきたと言

える。

これまでに本学会誌等においても、トライボロジーやナノプローブ等に関連して摩擦・潤滑の話題が取り上げられている。そこで、ここではこれまでと多少異なる視点から、理論的にナノスケールの潤滑と摩擦を調べた研究結果をいくつか紹介する。これにより、摩擦・潤滑に対するシンプルな物理的見方・考え方を提示する。摩擦・潤滑の理論的研究には、大規模な分子動力学のシミュレーションから、系の本質的な部分のみに着目した比較的シンプルな格子モデルの解析に至るまでさまざまなアプローチがある^{2,5)}。本報告では、後者の方法を用いて、摩擦・潤滑に関するいくつかの格子モデルを主に数値シミュレーションの方法で調べた結果を解説する。ここで扱うモデルの性質上、以下はある程度定性的な現象の説明となっている。

まず、摩擦・潤滑を解析・シミュレーションするために基礎となる理論モデルをどのように選ぶかは、上述のようにバリエーションがあるが、ここでは、格子モデルの一つである Frenkel-Kontorova (FK) モデル^{6,7)}を基礎

にして、静摩擦および動摩擦の発生について説明する。これは界面をある程度単純化したモデルであるが、ナノスケール摩擦・潤滑のいくつかの本質的な性質を再現できる。その後、これらをもとに、表面上の原子層等の潤滑速度を制御する方法の一つを紹介する。そして、ナノマシンを想定して、その駆動方法として、ナノ界面において、表面上の原子層等に並進運動を発生させるための物理的基礎についても紹介する。

なお、以下は、著者と青山学院大学の松川宏教授との共同研究によって得られた研究結果を中心にして、関連する他の研究事例も交えた解説となっている。

2. ナノスケール摩擦・潤滑の基本的モデル： Frenkel-Kontorova モデル

まず、ここでの摩擦・潤滑現象を解析するために基本的なモデルとして、上述の FK モデル^{6,7)}を紹介する。この FK モデルは、元々は界面のミスフィットによる格子欠陥等の説明にも使われてきた歴史のある界面のモデルであるが、表面上で原子層などが並進運動を起こすような潤滑状態とその時の摩擦についての本質的かつ興味深い性質も記述できる。FK モデルには様々な拡張版があるが、Fig. 1 には基本となる FK モデルの概念図を示す。FK モデルは弾性変形可能な格子（線形ばねで連結された粒子系）と相互作用する基板（表面）で記述され、これが界面のモデルとなっている。Fig. 1 には格子と基板ポテンシャルを描いている。基板表面は三角関数型のポテンシャルで記述されることが多い。1 次元系での運動方程式は次式で与えられる。

$$m\ddot{u}_i + \gamma\dot{u}_i = K(u_{i+1} + u_{i-1} - 2u_i) + U\sin\left(\frac{2\pi}{c_s}u_i\right) + F \quad (1)$$

ここで右辺の第 1 項が隣接原子間に働く弾性力、第 2 項が基板ポテンシャルから受ける力、第 3 項は外力を表す。左辺の第 2 項では速度に比例する散逸を導入している。ここでは、このような散逸効果を考慮する。

通常、摩擦実験では、駆動される物質には外部から界面に垂直な荷重が加えられることが多い。その場合は、基板ポテンシャルは、荷重の効果も繰り込んで定まる有効ポテンシャルと考えられる。以下では、簡単なた

Fig. 1. Schematic diagram of the Frenkel-Kontorova (FK) model.

め 1 次元系で議論する。ここで格子の平均原子間距離と基板ポテンシャルの周期によって界面における整合性が定められる。

この FK モデルにおいて、摩擦に関して興味深い性質の一つは、不整合界面において静摩擦の発生と消失が相転移現象として現れることである。この相転移を摩擦転移と呼ぶ。これは、実際の界面摩擦を考える際にも重要となる現象であり、他の文献^{7,8)}でも詳しく議論されている。ここで、なぜこのような現象が発生するのかを簡単に説明しておく。そのために、まず、格子の原子座標 u_i を、 $u_i = ic + \alpha + h(ic + \alpha)$ のように定義する。ここで、 c は格子の平均原子間距離である。そして、 $h(x)$ は hull 関数と呼ばれ、周期性 $h(x) = h(x + c_s)$ をもつ。ここで c_s は基板ポテンシャルの周期である。この hull 関数は基板ポテンシャル上のすべての原子の格子点からの変位をポテンシャル 1 周期に還元したものとみなせる。モデルのパラメータの中で、ポテンシャル強度 U を変化させた場合の格子の最大静摩擦力の変化を Fig. 2 に示す。基板ポテンシャル強度 U には、静摩擦に関する臨界値 U_c が存在し、最大静摩擦力は $U < U_c$ ではゼロとなり、 $U \geq U_c$ では有限値をとる。

このときの hull 関数は最大静摩擦力がゼロとなる相では連続的であるが、有限となる相では不連続になり解析性を失う。この現象を物理的に見ると、次のようになる。界面の不整合性のために、ポテンシャルが弱い場合は、原子は基板ポテンシャルの至る所に配置分布する。その時の hull 関数は、三角関数型ポテンシャルの影響を受けて、同様の三角関数的に連続的になる。この時、原子分布の一様性から、格子が基板ポテンシャルから受ける力は全体として平均すると打ち消しあう。このため、格子全体が並進移動しようとした場合、力は打ち消しあったままで復元力が働かず、最大静摩擦力は消失す

Fig. 2. Maximum static frictional force of the FK model.

る。

一方、ポテンシャルが強くなると、hull 関数はポテンシャルの頂上部分等でギャップ（不連続性）を示すようになり、これは原子がポテンシャルの頂上部分等のギャップの存在する所には安定に存在できないことを意味する。そのため、格子の重心が基板ポテンシャル 1 周期分の並進移動しようとする、ギャップのある場所を不連続な非断熱的運動によって乗り越える必要が生じる。その場合、格子はピン止めされた位置から移動しようすると復元力が現れ、それが有限の静摩擦力として現れる。この状態は、ある種のピン止め状態とみなすこともできる。

なお、この FK モデルに対して、基板ポテンシャルも弾性変形可能なように拡張したモデル⁹⁾では、そのピン止め状態は、非常に複雑な構造をもち、最大静摩擦力も界面の物性パラメータに対して自己相似的な特異な振る舞いを示すことが報告されている。2 次元界面で考えた場合は、平野と新上らによって詳細に解析されている^{10,11)}。2 次元では自由度が増えたことによって、格子の並進運動を妨げるような摩擦転移による不連続性の影響は弱くなると主張されている。

3. 拡張 FK モデルにおける摩擦と潤滑

上述の FK モデルを多層構造の系に拡張すると、より一般的な界面のモデルとなる。次に、そのような拡張された FK モデルがどのような摩擦・潤滑現象を示すかを説明する。

FK モデルは、表面と単原子層、もしくは 2 原子層構造のモデルと考えられる。ここでは、Fig. 3 のように、さらに 3 層構造に拡張する¹²⁾。ただし、簡単のため、1 次元系で考える。この拡張 FK モデルの最上層と中間層の運動方程式は、FK モデルと同様に考えればよいが、中間層については、相互作用する層が最上層と最下層の二つになる。ここで、層間の相互作用ポテンシャルによる原子間力は、近似的に FK モデルと同様の三角関数型となるようにしている。

この拡張 FK モデルは、ナノチューブのような多層の原子層構造の系として見なすこともできる。また、最上層と最下層を rigid に、それに対して中間層を elastic と

Fig. 3. Schematic diagram of an extended FK model.

なるように、格子の弾性パラメータ等を設定すると、rigid な二つの層はそれぞれ上下の二つの表面を表し、中間層はそれらの表面ではさまれた 1 原子層と見なせる。この 1 原子層は、固体表面間に存在する潤滑物質と見なすこともできる。原子およびナノスケールにおいて何を潤滑物質とみなすのかは、それを構成する原子・分子の性質や界面の状態等に依存して単純ではないが、このモデルは一般性を持っている。

このモデルで、最上層を一定外力で一様に駆動して、その時現れる最大静摩擦力と層間相互作用強度 U の関係を Fig. 4 に示す¹²⁾。ここでは、最上層と最下層は格子変形をせず、中間層のみ弾性変形ができると仮定している。そして、格子の平均原子間距離は隣接した層間では異なり、不整合にしている。このグラフを見ると、FK モデルの場合と異なり、相互作用が弱くても最大静摩擦力が消失することがなく、常に有限の値になっている。つまり、FK モデルで見られた静摩擦の消失という際立った特徴は、この結果からは観測できない。その代わりに、相互作用強度変化に対して、最大静摩擦力の振る舞いがべき則でスケーリングされ、その指数にクロスオーバーが見られる。

この振る舞いを理解するために、外力のない状態での自乗最低格子振動周波数を求めた。これは最上層と中間層に働くピン止め力（復元力）を表す量であり、その層間相互作用強度に対する変化のグラフを Fig. 4 に挿入している。これを見ると、最上層については、最大静摩擦力の場合と同様にスケーリングとクロスオーバーを示し、常に有限の復元力を示している。これは、最大静摩擦力の振る舞いと完全に対応している。これに対して、中間層は FK モデルと同様に、界面相互作用がある臨界値以下では復元力はゼロとなり、摩擦転移の発生を示している。これは最上層とは全く異なる振る舞いである。この系の摩擦力を摂動論に基づいて解析すると、この最上層の静摩擦力の発生原因は界面のピン止め効果によることが理解される。この系では最上層が最下層との間でピン止めされているが、そのピン止めが中間層を介して行われるところが特徴的である。層間相互作用が弱い場合、中間層では層間相互作用エネルギーよりも弾性エネルギー的に利得のあるように格子の状態が決まり、弾性エネルギーを大きくしないように弱い格子歪みが生じる。この状態では、相互作用強度の変化に対して、最大静摩擦力強度は非線形な振る舞いを示す。これに対して、層間相互作用が強くなると、格子の各原子は、上下の層のポテンシャルの底に強く束縛されるようになる。そこから抜け出して並進移動するためには、層間相互作用強度に比例した駆動外力が必要となり、その結果、最

Fig. 4. Squared lowest phonon frequency and maximum static frictional force of the extended FK model.

大静摩擦力は層間相互作用強度に比例して変化するようになる。これとはピン止め機構が異なるが、類似の最大静摩擦力のスケーリングとクロスオーバーは不純物のある界面においても確認されている¹³⁾。

ここで中間層を潤滑物質と見なせば、潤滑物質が仲介して離れた層同士をピン止めして、その結果、静摩擦を発生させている。これはマクロな系で考えるような潤滑物質の摩擦の低減するという性質とは相反するものである。界面および潤滑物質が原子スケールからマクロな巨視的スケールに変わるに従って、潤滑物質の摩擦への効果がどのように変化するかは、トライボロジーにおいて重要であるが、複雑な要因の入り交じった未解決の問題であり、現在、様々な研究が行われている。ここで紹介した結果は、格子モデルである拡張FKモデルをもとに、層状構造界面あるいは潤滑物質のある界面の摩擦の特異性を明らかにしたものである。これによって、静摩擦の有無に併せて、潤滑物質のある系での摩擦転移の特徴、および潤滑物質の状態、相互作用強度の影響等についても理解された。なお、潤滑物質的に表面間に存在する原子・分子等の存在が摩擦を低減しないことは、二つの表面間に介在物（潤滑物質）の分子を導入したモデルにおいて、Müserらによっても詳細に解析されている¹⁴⁾。彼らは潤滑物質が存在する場合にクーロン-アモントン則が成立することも示している。

上述の結果をもとに、さらに色々な可能性が考えられる。特に復元力の振る舞いから、このような系の潤滑の特異な性質が理解できる。つまり、多層の中の中間層だ

けを、外部からの操作もしくは外力によって駆動できるとすれば、最大静摩擦力は発生せずに無限小の外力で一つの層を並進運動（もしくは系の構造によっては回転運動等）をさせることが可能である。このような操作は、ナノプローブ装置を用いて可能となることが期待される。これを応用すれば、ナノベアリング的な動作が可能なナノマシンの機構の一つとして利用できるだろう。このことと深く関係のある最近の話題として、多層カーボンナノチューブの内部の層の引き抜き、押し戻し等の実験的観測があげられる¹⁵⁾。それによると、原子間力顕微鏡を用いて層の引き抜き等の操作を行った際の摩擦力は極めて低い値を示すことが報告されている。このようなナノチューブを使った摩擦・潤滑研究は今後大きく発展するものと思われる。

関連する話題をここで紹介しておく。上記と類似の系で最上層を駆動して潤滑状態となった状態を、Vanossiらが理論的に調べた¹⁶⁾。それによると、上部の固体を一定速度で駆動した際に、中間層（潤滑物質）の潤滑速度が量子化される現象を見出している。つまり、上部の固体を潤滑運動を行うと中間層も引きずられて運動を行うが、界面の整合性等の条件によっては、その速度がある決まった値に離散的に固定される。彼らはこの現象を速度量子化と呼んでいるが、本質的には後述のようなある種の同期効果によるものと考えられる。この速度量子化を実現するための実際の系として、多層カーボンナノチューブ等の可能性が指摘されている。

なお、界面に不純物のような乱れがなく、原子および

ナノスケールで清浄であれば静摩擦は発生しないという考えは、ナノスケールでは成り立たない。清浄界面では、その表面での原子間相互作用、界面の原子配列周期の整合性、潤滑物質の有無等に依存し、これらの要因を制御できて最大静摩擦力の制御が可能となる。そのため、これらの困難から、最大静摩擦力が完全に消失するという現象の確認は完全には未解決である。ただし、様々な系において、実験精度内で観測できない、又は極めて小さいというような例は多数報告されている。摩擦力が完全に消失した状態は超潤滑と呼ばれる。超潤滑は基礎と応用の両面で極めて重要である。潤滑速度が非常に小さい極限で超潤滑の実現¹⁰⁾等のいくつかの可能性が考えられており、新奇な潤滑状態として今後の大きな発展が期待される。

4. 摩擦・潤滑の制御とナノマシンの関係

次に、摩擦・潤滑の動的性質に着目し、その制御方法について考察する。界面の摩擦・潤滑に関する現象において制御対象となる物理量および特性等には、次のようなものが考えられる。潤滑の形態、潤滑速度、摩擦力（最大静摩擦力および動摩擦力）の強度、動摩擦力の潤滑速度依存性などである。これらについて、それぞれ色々な方法が実験的および理論的に提案されている。マクロな系のマシンでも同様であるが、ナノマシンを考えた場合も、マシンの安定性、耐久性、制御性などを問題とする場合には、上記のような潤滑や摩擦の制御は非常に重要となる。

ここでは、まず動摩擦の簡単なコメントをした後に、潤滑速度の制御と関係した現象とその制御方法について説明する。動摩擦力の発生には、様々な物理機構が関係するが、上記のFKモデルで考慮するのは、潤滑によって格子振動が励起され、並進運動エネルギーの一部が振動のエネルギーに移り、熱として散逸するような過程である¹⁷⁾。通常、摩擦のない時のナノスケールの潤滑状態では、この格子振動励起によるエネルギー散逸が動摩擦に対する最も重要な機構の一つと考えられる。その他にも、電子系へのエネルギー散逸も考えられおり、実際に電子系の関与した動摩擦は、水晶マイクロバランス(QCM)実験で議論されている^{18,19)}。

これまでに様々なナノスケールでの摩擦と潤滑に関する制御方法が報告されているが、ここでは基板振動による潤滑速度の制御²⁰⁾、そして、ナノマシンと関連して、潤滑運動を発生させて制御する物理機構^{21~23)}について解説する。

まず、基板振動効果を利用した動摩擦と潤滑速度の制御について考察する²⁰⁾。そのためのモデルとして、上

記の静摩擦の解析に用いた拡張FKモデルをここでも取り上げる。ここで、動的な方法の一つとして、系に強制的な振動を加えることによるダイナミカルな効果を利用する方法に着目する。上記拡張FKモデルにおいて、外部から力を印加して強制振動させるものとして、通常は最上層と最下層の二つが考えられる。ここでは、最上層を一定(DC)外力で駆動して、最下層の重心位置を時間的に振動させる場合について考察する。最下層は中間層以上にとっては基板にあたり、基板の振動効果を利用するという点ではQCMによる摩擦実験の方法と共通している。

最上層と最下層の運動方程式は、前述の拡張FKモデルと同じであり、最下層の重心座標 U_{sub} は、角周波数 ω で一定振幅の調和振動させて、 $U_{\text{sub}} = U_{\text{ac}} \sin(\omega t)$ とする。最上層が一定外力で駆動され、最大静摩擦力以上の外力では潤滑が起こる。この場合、潤滑は中間層も引きずって起こり得る。Fig. 5 は、DC 外力 (F_{dc}) と最上層と中間層のそれぞれの時間平均した重心速度 (V_s , V_l) を調べた結果である。ここで、 F_{dc} をゼロからある臨界値までは V_s , V_l ともにゼロであるが、この臨界外力が最大静摩擦力に対応する。基板としての最下層が振動していても、上述の中間層を介したピン止め作用が最上層に働いていることを意味する。そして、外力 F_{dc} を臨界値を超えて大きくすると、潤滑状態となる。この時、 F_{dc} と共に速度が増大する領域と共に、速度は一定値に留まってプラトー状態となる領域が大きく現れる。このプラトー状態では、 F_{dc} が変化しても速度は一定に保たれている。基本となるプラトーの速度は、最下層の角振動数 ω を用いて、 $V_{\text{ML}} = nc\omega/2\pi$ で与えられる。この速度プラトーは、モードロッキングと呼ばれるある種の同期現象によってもたらされる。このロッキング領域では、外力が多少変動してもロバストに一定速度を維持できる。モードロッキング状態では、動摩擦力が動的かつ自己組織的に調整されていると言える。そこで、このモードロッキングのもつ性質を潤滑速度の制御として利用することが考えられる。

このモードロッキング現象は層状構造で得られたものであり、多層構造を持つナノ材料・ナノマシン等で実現できる可能性がある。その場合、ナノマシンにおける機構の潤滑速度制御として考えると、このプラトーの速度を制御することになる。これには、まずは、上述のモードロッキング条件式に従って振動周波数を制御する必要がある。ただし、モードロッキングの発生のためには、系に依存した他にも考慮すべき詳細な条件が考えられ、より詳しい理論的な解析と考察が必要である。

上記の方法は外力で駆動する必要があるが、次に、こ

Fig. 5. Velocity-force characteristics of the extended FK model with an oscillating substrate potential.

れに対して外力を必要としない自発的な潤滑を発生させる方法²¹⁻²³⁾について考察する。これは、ナノプローブのような外部から操作する駆動装置を用いずに、外部からの何らかのエネルギー供給によって、表面に特定の方向に自発的な並進運動を行わせて潤滑させることを目的としている。ナノマシンとしては、このような自発的な運動は潤滑のために直接的な外部駆動装置を必要としないために有益である。

ここでは、簡単のため、2層構造で最下層を基板とするFKモデルを用いて解析する。そして、自発的な並進運動を発生させる具体的方法として、ここでは最もわかりやすい動的な格子変調の効果を利用するものを紹介する。これは、FKモデルでは、格子の平均原子間距離 a を、 $a = a_0 + b \sin(kx - \omega t + \phi)$ のように、時間・空間的に変調することである。ここで右辺第1項の a_0 は変調前の平均原子間隔、第2項は変調項を表す。FKモデルでは、格子が静止している場合、基板との相互作用のために相互作用ポテンシャルの周期や振幅を反映した格子変形が生じるが、さらにこれに加えて格子に変調波を進行させることになる。基板ポテンシャルの影響下にある格子が、このような平均原子間距離の時間・空間的変調を受けて、方向性のある並進運動を起こすかどうかは自明ではない。

そこで、このモデルで平均原子間距離のいくつかの変調パラメータを変化させて、外力が存在しない状態で格子の重心座標と速度を調べた。その結果、ある条件化で

Fig. 6. Time evolution of the position and velocity of the center of gravity of the extended FK model with spatial and temporal modulation of mean atomic spacing.

は、方向性のある並進運動が発生することがわかった。その運動の時間発展の例を Fig. 6 に示す。しかし、パラメータに依存して、運動方向および重心速度は複雑に変動することが確認された。その複雑な振る舞いの中で、この系で見られる代表的な重心速度 V の値は、 $V = \pm nc \frac{\omega}{2\pi}$ として与えられる。ここで c は基板ポテンシャルの周期、 n は正整数を表す。これは、変調の時間1周期 $2\pi/\omega$ の間に基板ポテンシャルの周期の整数倍だけ格子の重心位置が移動することを示している。直感的には、変調に同期して格子が尺取虫的な運動をしながら

一方向に進んでいるように例えられる。

このような方法での自発的並進運動を発生させる物理機構に関して、Popov は FK モデルをさらに単純化したモデルをもとに解析して、速度 V の符号および整数 n の値を決める要因を議論した²²⁾。これによると、変調によって、格子のすべての原子間距離がある特別な関係を満たしながらそれぞれ変化する場合に、格子に方向性のある並進運動が起こる可能性がある。この時、原子間距離および変調の振幅や角振動数等のパラメータに依存して、重心速度の式で符号および n の値が変わる。これをもとに考えると、格子の進行方向は変調波の進行方向のみで決定されるわけではない。この解析では、速度式は上記のように $c\frac{\omega}{2\pi}$ の整数 n 倍に固定されるが、FK モデルでの並進運動速度はさらに複雑である。Popov の考察したモデルは格子の弾性項を考慮せず、非常に小さな有限長の系で考察されたので、FK モデル等の弾性変位や多体効果などは考慮していない部分もある。このように格子の自発的並進運動を発生させることは、ナノマシンとの関係からも重要な問題であり、物理機構解明と運動制御等の基礎的部分の研究進展が必要である。

なお、上記の方法で自発的な並進運動を発生させるためには、原子間距離等の制御を変調前後でそれぞれ行えることが必要である。格子に変調を発生させるためには、photochormic 材料又は圧電物質を用いて物質内部の周期の時間的・空間的変調を行う方法などが提案されている^{21, 22)}。

この自発的な潤滑状態の特徴として、運動している格子は、自身以外の他の物体を牽引する力があることも重要である。この牽引力を利用すれば、ナノスケールの物体を運搬するナノトラックが実現すると考えられる。また、不純物的な表面の乱れが存在しても、弱い乱れでは牽引力はある程度有効に働く。

5. ま と め

本報告では、物性基礎的なモデルと計算機シミュレーションの方法を用いて、ナノスケールの潤滑と摩擦に関する研究例を紹介した。ナノスケールにおけるいくつかの特異な性質および可能性を示した。さらに、摩擦・潤滑の制御の方法とそのナノマシンの機構への応用についても議論した。なお、ここで紹介したようなナノスケール摩擦・潤滑およびナノマシン機構の解明は、ナノ界面物性とナノトライボロジーが融合した比較的新しい研究テーマと言える。今後、理論と実験の両面での大きな発

展が期待される。

謝 辞

本報告は、青山学院大学の松川宏教授との共同研究の結果をもとに、ナノスケール摩擦・潤滑に関する概論と研究動向および私見を加えてまとめたものである。松川教授との共同研究における議論に感謝する。なお、本研究は、住友財団の基礎科学研究助成を受けて行われた。

文 献

- 1) 松川 宏：表面科学 **24**, 328 (2003).
- 2) B.N.J. Persson : "Sliding Friction", 2nd edition (Springer, Berlin, 2000).
- 3) "Nanotribology and Nanomechanics", ed. by B. Bhushan (Springer, Berlin, 2005).
- 4) K.E. Drexler : "Nanosystems" (John Wiley & Sons, New York, 1992).
- 5) O.M. Braun and A.G. Naumovets : Surf. Sci. Rep. **60**, 79 (2006).
- 6) Y.I. Frenkel and T. Kontorova : Zh. Eksp. Teor. Fiz. **8**, 1340 (1938).
- 7) O.M. Braun and Y.S. Kivshar : "The Frenkel-Kontorova Model" (Springer, Berlin, 2004).
- 8) S. Aubry : J. Phys. (Paris) **44**, 147 (1983).
- 9) T. Kawaguchi and H. Matsukawa : Phys. Rev. B **58**, 15866 (1998).
- 10) M. Hirano and K. Shinjo : Phys. Rev. B **41**, 11837 (1990).
- 11) M. Hirano : Surf. Sci. Rep. **60**, 159 (2006).
- 12) T. Kawaguchi and H. Matsukawa : Surf. Rev. Lett. **13**, 235 (2006).
- 13) T. Kawaguchi and H. Matsukawa : Phys. Rev. B **56**, 4261 (1997).
- 14) M.H. Müser, L. Wenning and M.O. Robbins : Phys. Rev. Lett. **86**, 1295 (2001).
- 15) J. Cumings and A. Zettl : Science **289**, 602 (2000).
- 16) A. Vanossi, N. Manini, G. Divitini, G.E. Santoro and E. Tosatti : Phys. Rev. Lett. **97**, 056101 (2006).
- 17) T. Kawaguchi and H. Matsukawa : Phys. Rev. B **56**, 13932 (1997).
- 18) A. Dayo, W. Alnasrallah and J. Krim : Phys. Rev. Lett. **80**, 1690 (1998).
- 19) M. Highland and J. Krim : Phys. Rev. Lett. **96**, 226107 (2006).
- 20) T. Kawaguchi and H. Matsukawa : Mat. Sci. Eng. A **423**, 204 (2006).
- 21) M. Porto, M. Urbakh and J. Klafer : Phys. Rev. Lett. **84**, 6058 (2000).
- 22) V.L. Popov : Phys. Rev. E **68**, 026608 (2003).
- 23) T. Kawaguchi and H. Matsukawa : to be published.