

摩擦の性質

新上 和正 (ATR 光電波通信研究所)^a

平野 元久 (NTT 境界領域研究所)^b

摩擦の静的及び動的性質と、摩擦ゼロの超潤滑から摩擦の異方性を利用して摩擦の制御を行い、また、摩擦の機能を引き出すための仕掛けである非対称運動を議論しよう。

1. 始めに

‘普通’に見られる摩擦は、¹⁾ 摩擦や破壊や掘起こしや電氣的或いは化学反応に起因していたりする。摩擦や破壊などを伴わない摩擦もある。また、摩擦は接触する境界に何があるか、例えば、油などにも影響される。更に、(理由は定かではないが) 大気中の湿度などでも影響される。寧ろ摩擦は観察者を離れてある(幻想であるが)のではなく、観察者の関心が対象となる摩擦を決めている。摩擦は滑り(対象に注目する物としない物とに分割するという境界線を入れている)に対して現れる抗力であるという定義はどの摩擦にも当てはまることである。しかしその定義は実に素っ気なくそれから話しを進めようとすると摩擦は実に千差万別となる(実際に摩擦は研究者だけ摩擦種があり実に多彩なのである)。バラバラの個々の摩擦を繋ぎ止める際に現れる神は‘見掛けの効用’と‘摩擦という共通項’になっているのが現状である。観察者が対象を規定する対象だから「モデル→対象」から「構成論的对象→モデル」というサイクルを経由する。他の所で言われている構成論的方法とは違い、ここで‘構成する’とは通常の場合と逆の意味でモデルを自然系によってシミュレートという自然計算機的内容を包含しており過去無力だった状況からこれをサポートする fabrication 技術が早急に発展しつつあるという時代的背景がある。

この研究会報告の他の場所で松川氏が、摩擦の物理的な側面に付いて私達の研究^{2),3)}に付いても或る程度触れるのではないかと想像される。従ってここでは彼が書くと思える内容⁴⁾の complement になる(その subset である, contradict する個所も有る といえ subset にもなっていない)だろうことを書くつもりである。実際の私達の講演内容はその線に沿ったものであった。しかし書こうとする内容は講演とは必ずしも一致していないことをお断りします。

以下話す内容は:

2. 静摩擦
3. 動摩擦
4. 超潤滑

(4.1) 構成論的骨格

^ae-mail: shinjo@atr-rd.atr.co.jp

^be-mail: hirano@aela.ntt.jp

(4.2) 主な適用分野

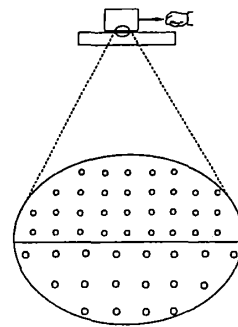
5. 摩擦制御
6. 非対称運動

私達が出発したのは「種々の複合的要因を取り除いた後に残る摩擦は?」であった。この摩擦は、‘清浄平坦な固体面間の乾燥摩擦’として摩擦のテキストなどで‘典型的’な摩擦として現れる。だがそれが物理学/摩擦学(tribology)レベルでどれほどの意味を持ち得るのかについては心許ないがここから出発した(他方で意味を獲得して行くという生成プロセスがあり、その後の研究はこの線に沿っている)。

2. 静摩擦²⁾

接触面の高次元性が重要だということがこの節の主張である。

接触した二つの固体の一方(下固体)を固定し、他方(上固体)を非常にゆっくりと引っ張る場合に起こる粒子運動を考えよう。静摩擦は上固体をゆっくりと引っ張り始める時に現れる



最大の抗力である。静摩擦は弾性エネルギーを蓄える過程が存在すれば現れる。この状況をシミュレートする一つのモデルは、上固体をバネで繋がれた粒子群と下固体から上固体への影響(凝着力)

図1. 摩擦の原子論的モデルを三角関数で表した一次元 FK(Frenkel-Kontrova) モデルである。 i 番目の粒子の平衡配置 q_i を決める方程式はエネルギーを各粒子座標で微分することで得られ($p_i \equiv q_{i+1} - q_i, \theta_i \equiv q_i \bmod(1)$) とれば、

$$p_{i+1} = p_i + \pi \lambda \sin(2\pi \theta_i), \quad \theta_{i+1} = \theta_i + p_{i+1}$$

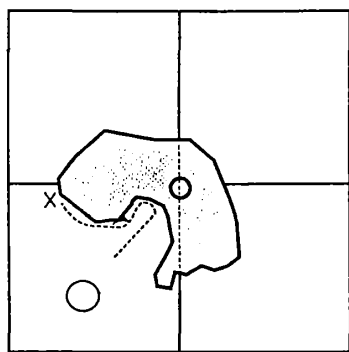
(λ : 凝着力の強さを与える), 或は、粒子番号 i を時間と読み違えることを通して

$$\begin{pmatrix} p_{i+1} \\ q_{i+1} \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} p_i \\ q_i \end{pmatrix} \quad (T: \text{保測写像})$$

という良く知られた標準写像(standard map)という力学系に帰結される。粒子配置はこの力学系の描く一つの軌道に相当する。この手続きを通して、力学系で期待される多くの現象が現れ、例えば解析性の破れ⁵⁾(Aubry 転移と呼ばれる - KAM torus の崩壊)が起こる。

しかし、接触面での粒子運動は本来一次元ではなく三次元的である。この次元性の上昇によって FK モデルでの「力学系への帰着」とい

う都合良さを失い、相互作用する多粒子系をそのまま扱うというになる。しかし、好運(?)にも金属摩擦系の相互作用をある程度忠実にシミュレートする Morse 型ポテンシャルに対して(滑り過程で上固体の粒子の平衡状態での位置座票として許されない)不安定領域の形が複雑にならないために問題が簡単になった。一次元 FK モデルではこのような不安定領域は Aubry 転移



の結果として現れる。図2は本来三次元であるが接触面に沿って見た不安定領域を与えてある。中央の○は下地の表面原子である。これに上固体の原子(左下の○)が近付くと強いと反発が生じるために、下原子の周りに斜線部のような不安定領域が広がる。上固体の原子はこの不安定領域を避けて通過するが、図に示された破線に沿って進めないために何処かで不安定領域を飛び越す。この飛び越しが Morse 型相互作用では無かった為に(計算を行った限りでは)問題が複雑にならなくて済んだ。

接触面の高次元性(FK=1, 通常の摩擦=3)に基づく重要な効果は、接触界面で生じる粒子の適応配置である。適応配置とは、粒子が図2のような不安定領域をフレキシブルに避けながら不安定領域の周囲を迂回する運動のことである。これは弾性エネルギーの溜りを小さくし、且つ一次元 FK で生じる Aubry 転移を起し難くしている。三次元系での金属摩擦系(Pb, Al, Ag, Cu, Ni, Fe, Cr, Mo など)では van der Waals 力に比べ強い相互作用する。それにも拘わらず Aubry 転移に類似した(摩擦力がゼロから有限になる)摩擦転移は起こらない。摩擦転移を三次元系で起こすには自然をシミュレートする相互作用ポテンシャルの強さに比べ数倍の大きさを仮定する必要がある。⁶⁾ Aubry 転移と摩擦転移は似ているが正確には違う。摩擦転移では摩擦に関係して全エネルギーの粒子の位置座票に関する2回の微係数が不連続となることを指す。これに対し Aubry 転移での解析性の破れは、ある高次の微係数から不連続となる。従って Aubry 転移より摩擦転移はより強い条件になっている。言い換えれば Aubry 転移を示す摩擦系でも摩擦転移を起こしていない系がある。

3. 動摩擦^{2),7)}

動摩擦では、一定の滑り速度を保つため加えた外力に釣り合う抗力が如何にして発生するかが問題とする。或は重心の与えた運動エネ

ルギーが内部運動エネルギーにどのように転化するかが問題となる。摩擦発生を原子運動と関係づけたのはトムリンソンが最初である。彼は、二原子からなる摩擦系を使って前節の少し触れた不安定領域を飛び越える原子運動が動摩擦の原因であろうと考えた。しかし、彼の摩擦系は余りにも小さいので飛び越えによって生ずるエネルギーがどう散逸するかについては、素早く他の原子の運動エネルギーにバラ蒔かれるという仮定を置かなければならないのが欠陥である。

動摩擦の発生機構には摩擦系の次元数に応じて二種類ある。(清浄平坦固体表面のインコメンシユレート接触を前提)

表 1

凝着力	弱い	→	強い
1 次元	ゼロ		有限
2 次元 (薄膜)	ゼロ		有限
3 次元 (bulk)	有限($\propto v_s$)		有限

1, 2次元の弱い凝着力の場合 凝着力(二固体の相互作用)が弱ければ、上固体の格子振動でフォノン描像が成り立ち波数ベクトル(運動量に相当)が意味ある量となる。この時上固体の全運動エネルギーが固体の内部運動(格子振動)に変換するならば摩擦が生じることになる。これ起こる為にはエネルギーの保存則の他運動量に対しても保存則を満足しなければならない。これら二つの保存則を同時に満たすフォノン・モードが無いために摩擦ゼロとなる。

1, 2, 3次元の強い凝着力の場合 一方凝着力が強くなるとフォノン描像が破れて運動量保存則を満たす必要がなくなる。その結果有限の摩擦が生じる。上固体内の原子の格子振動の集団運動は破綻し、むしろ原子の‘個別運動’に運動エネルギーが散逸する。この場合の散逸は固体内部の色々な運動が複雑に絡り合う混合性(mixing)から生じる。

3次元の弱い凝着力の場合 フォノン描像は成り立っているが、接触面に垂直方向に沿った原子の振動から摩擦力が現れる。この時摩擦力は滑り速度 v_s に比例する。(計算の詳細⁸⁾は省略する)

凝着の弱い場合と強い場合とでの摩擦発生機構は異なる。その間にある種の‘転移’があると思われる。1, 2次元の弱い凝着力の場合の結果は、松川氏が一次元 FK モデルを用いて計算して得た有限の摩擦力となる結果⁹⁾と異なる。これはモデルの違いに拠るものと思われる。彼は格子振動に有限の緩和項(life time/damping)を入れ、これに比べ慣性項が小さい仮定を置いている。私達のモデルでは慣性項を入れているが緩和項を入っていない。(緩和項を入れた計算を行うとその大きさによって摩擦力が異なるという tentative な結果を得ている)

4. 超潤滑^{3),7)}

(4.1) 構成論的骨格

滑り速度がゼロになる極限で摩擦(静摩擦)がゼロになるものを超潤滑と呼ぼう。摩擦ゼロの条件は、上の固体が下の固体から受ける力が完全に打ち消し合ってゼロになっていればよい。これは高校の物理を勉強した者なら誰でも知っている釣り合いの原理の一例となっている。ある物体に外から作用する力のベクトルが閉じた多角形を作るなら物体は釣り合った状態にある。つまり物体の全体の運動(上固体の重心運動)は(下固体から上固体に作用する)外力と無関係に決まる。斯くして、超潤滑はそのような状態を如何に創り出すかという構成論的問題となる。超潤滑の一例は、接触面が(1)清浄平坦で(2)インコメンシユレートな構成である。⁶⁾この構成で静摩擦や動摩擦は表1の通りとなる。

リオン工科大学の実験グループは MoS_2 に荷重を掛けることによって層状に剥離した層の間で上の構成条件が整うことによって超潤滑を観測したことを報告している。¹⁰⁾

(4.2) 主な適用分野

超潤滑で目指す応用は一口に言えば摩擦の制御とオイルレス・ベアリング¹¹⁾であろう。期待される主な適用技術領域は次の三つである：

- 微小領域の潤滑：マイク・ロマシン、大容量磁気記録密度の集積化、
- 過酷な環境下の潤滑：通信衛星(宇宙空間)・真空機器内での摺動部、
- 生体内での潤滑：人工臓器、関節(心臓の弁、肘の関節)、筋肉収縮。

これらは将来的に発展が期待されるが従来の潤滑技術が不得手である領域である。しかし、これらの領域では超潤滑の清浄で平坦な面接触という条件を比較的得やすい舞台を得易いと考えられる。マイクロマシンは、接触面の装置に占める割合が相対的に増大し、それによって生じる摩擦を軽減することが主要な課題と考えられている。¹²⁾しかし、反対に接触面積は小さくなることから接触面でのトポグラフィーを制御し易く超潤滑条件を創り易くなっている。また、宇宙空間は通信衛星や地上観測システムの動作環境として今後益々重要になる。このような環境では潤滑油が使えないばかりか、一寸した機械動作の故障で一つの通信衛星が使えなくなることが起こる。しかし、このような環境下でこそ一旦清浄表面が作られてしまえばその状態が長く保たれるという超潤滑に都合のよい環境でもある。生体内ではナノスケールで分子接触が生じておりそれが筋肉収縮の機構と超潤滑と関連しているのではないかと考えられる。

5. 摩擦の制御

二固体の接触角度に依存した摩擦がダイア

モンド,¹³⁾ コバルト,¹⁴⁾ 銅,¹⁵⁾ セラミック¹⁶⁾などで観測される。これら摩擦係数の異方性は精々数十パーセントであるが白雲母では約4倍程度の摩擦異方性を示す。¹⁷⁾このことから接触角度を摩擦を決める外部条件と見なすことによって摩擦を摩擦系の属性としてではなく変化し得る‘状態’として捉えることが出来るようになる。この認識から摩擦の制御の考えが得られる。この時に接触角度が摩擦力の制御変数となる。摩擦は従来ではどちらかという制御しようというより摩擦系の固有の属性として考えられてきたように思われる。白雲母の場合には摩擦係数を0.16から0.63の範囲で制御可能である。これは摩擦係数の変化であり荷重の変化による摩擦力の制御ではない。

(mica/mica)

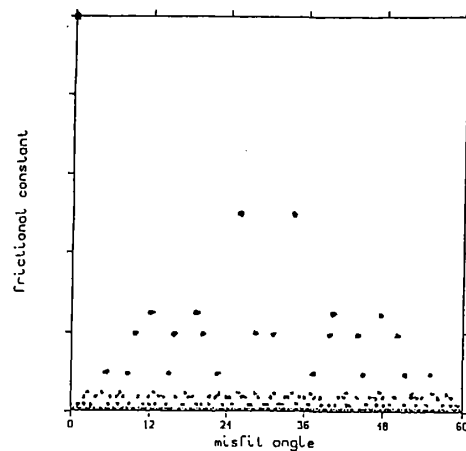


図3. 摩擦異方性。殆ど全ての角度 θ で摩擦ゼロ。 $\theta \in \{30 \pm \arccos(x\sqrt{3}/2) \mid \text{有理数 } x(1 \leq x \leq \sqrt{3})\}^C$

完全結晶の場合の白雲母同士の摩擦の接触角度による摩擦力は図3のようになる。

摩擦異方性を使った機能例が図4に示さ

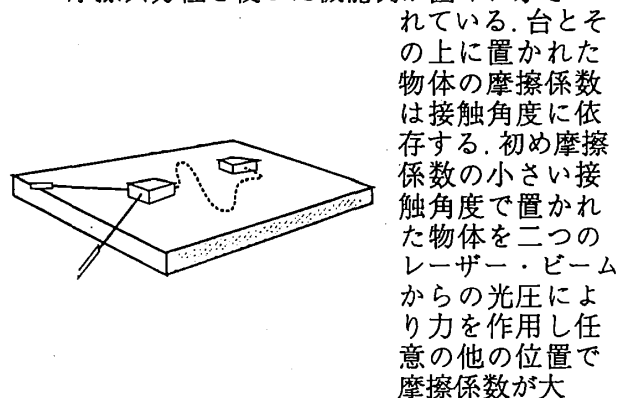


図4. 物体の非接触移動と固定。大きくなる接触角度で移動固定する。この例は非接触で物体の移動と固定が出来るという利点がある。

6. 非対称運動 (Asymmetric Motion)

非対称運動とはマックスウェルの悪魔に似

た性質を持つ運動である。この悪魔は一世紀以上昔に物理学者マックスウェルによって考え出された。¹⁸⁾ その悪魔は、真ん中に壁のある箱の中に閉じ込められた様々な速度を持つ原子が壁に衝突する際に箱の右側にある速い速度のみ原子は左に通過し左側にある遅い速度の原子のみが右側に通過するという不思議な壁に相当する。悪魔は熱力学第二法則に反してエントロピを減少させ、高温と低温を自然に作り、この間で熱機関を働かすことで永久に仕事を取り出すことを可能にする。現代物理学はこの悪魔を閉じた形で得ることに成功してはいない。(可能かどうかすら分からない) マクロスケールでは類似したものは幾らでもある。例えば、静脈の血液の逆流を防ぐ弁、釣りの魚籠などある方向には進み易いという性質をもつ。

しかし、'閉じた形'や'永久に'という修辭に拘らなければ可能である。多粒子系の'閉じた'運動に'永久には続かない'非対称運動が現れる。¹⁹⁾ 更に応用上はマックスウェルの'似非'悪魔を創ることで充分に有用となる(マックスウェルの悪魔と呼べないが)。この例を図5に

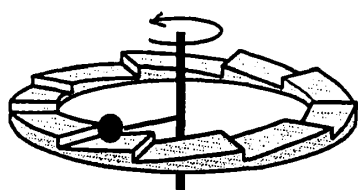


図5. 熱揺らぎ回転モータの例を図5に与えてある。これは熱揺らぎを軸の回転運動として取り出すマイクロ・マシンのモータである。全体が気体や液体中にある。モータのサイズは歯形の上にある球に周囲の熱により作用する力が空間的に平均化されない程充分小さければ良いであろう。中心部を周囲の温度に比べて冷却して置く必要がある。このような環境の下では、熱により作用する反時計向きの力がある一定以上なら球は下の歯形から来る抗力に打ち勝って左回転を行う。しかし、時計向きに作用する力は球の右回転に寄与しないであろう。軸の冷却は左回転した時に球の運動エネルギーは上昇するがこれを取り去るためである。これにより左向きの回転が永続して発生することになる。

参考文献

- 1) Bowden F.K. and Tabor D: Friction and Lubrication of solids, Vol. II (Clarendon Press, Oxford, 1964); 曾田範宗訳: 固体の摩擦と潤滑 (丸善, 1961).
- 2) 新上和正: 数理科学 10 月号 (1993)17.
- 3) 平野元久: 数理科学 10 月号 (1993)23.
- 4) 松川広: パリティ 8 月号 (1994)18.
- 5) Aubry S.: J. Phys. (Paris), 44(1983)147.

- 6) Hirano M. and Shinjo K.: Phys. Rev. B41,(1990)11837.
- 7) Shinjo K. and Hirano M.: Surf. Sci. 283(1993)473.
- 8) Sokoloff J. B.: Phys. Rev. B.42(1990)760.
- 9) Matsukawa H. and Fukuyama H.: Phys. Rev. B49(1994)21.
- 10) Martin J. M., Donnet C., and Monge Th. Le.: Phys. Rev. B48(1993)10583.
- 11) 川崎景民: オイルレスベアリング (アグネ, 1980).
- 12) G. ステイックス: 日経サイエンス 1 月号 (1993)10.
- 13) Y.Enomoto and D.Tabor: Proc.R.Soc.London A373(1981)405.
- 14) Buckley D. H.: ASLE Trans. 11(1968)89.
- 15) Takagi R. and Tsuya Y.: Wear 4, (1961)216; Tsuya Y.: Wear 14(1969)309.
- 16) Buckley D. H., and Miyoshi K.: in Structural Ceramics, ed. by Watchman J. B., Jr. (Academic, San Diego, CA, 1989) Vol.29, p300.
- 17) M.Hirano, K.Shinjo, R.Kaneko, and Y.Murata: Phys.Rev.Lett.67(1991)2642.
- 18) 戸田盛和: エントロピーのめがね, 岩波書店,(1989)pp97.
- 19) 新上和正: 物性研究 12 月号 (1992)269.