

摩擦・摩耗

接触と摩擦の理論

原稿受付 2000年7月14日

“トライボロジスト” 第45巻 第12号 (2000) 864~869

新田 勇

新潟大学 大学院自然科学研究科

(〒950-2181 新潟県新潟市五十嵐2の町8050)

加藤 康司

東北大学 大学院工学研究科

(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉01)

1. はじめに

接触と摩擦の理論を執筆するに当たり、接触論を新田が分担し、摩擦理論は加藤が分担した。

2. 接触論

2.1 接触面剛性

トライボロジーの分野で、接触といえば真実接触面積¹⁾が連想されるはずである。真実接触は、摩擦や摩耗、接触熱抵抗、接触電気抵抗などの問題の考察の基になる概念であるので重要である。接触について記述するに当たり、著者の専門分野が接触面剛性であるので、この分野より眺めた接触の話になることをお許し頂きたい。

さて、V. I. OSTROVSKII²⁾やR. H. THORNLEY³⁾らによって、接触面が存在すると剛性が著しく低下することが報告された。接触表面上の微小突起やうねりにより変形が引き起こされるので、それによって剛性が低下する。図1は、接触面に垂直方向の荷重を加えたときの接触面の変位の概要である。横軸の変位は接触面が存在するために引き起こされる変位を示す。したがって、接触面が存在しなければこの変位はない。垂直荷重を加えると、負荷曲線に沿って変位が増加する。この段階では、突起の塑性変形と弾性変形が混在している。ある荷重点 P_1 で除荷を行なうと除荷・再負荷曲線に沿って変位は減少する。荷重0の点で残った変位は突起の塑性変形のためである。再び、荷重を増加させると先程の除荷・再負荷曲線に沿って

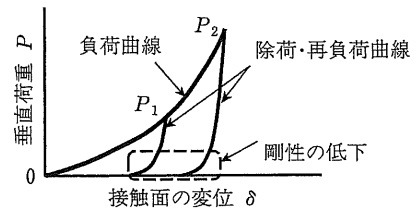
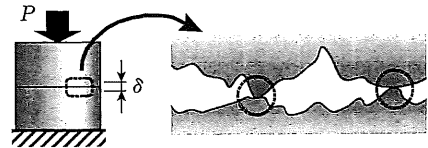


図1 粗面接触の変位挙動の概略

変位が増加し、 P_1 を過ぎると負荷曲線に沿って変位が増加する。 P_2 より除荷を行なうと、別の除荷・再負荷曲線が得られる。先の除荷・再負荷曲線を右へ平行移動させるとこの曲線(P_2 からの除荷曲線)とほぼ完全に重なることが知られている。

2.2 粗面接触の歴史

R. CONNOLLYらは、実験結果より荷重と変位の実験式を提案した⁴⁾。Z. M. LEVINAは、荷重と変位 δ の実験式 $\delta = C\sigma^m$ を用い、それらが構造物全体の剛性の低下に及ぼす影響を示した⁵⁾。1966年GREENWOODとWILLIAMSONがいわゆるGWモデルを発表した⁶⁾。現在、ほとんどのトライボロジーの教科書にはこの理論が掲載されており、粗面接触のイロハとなっている。これにより、粗面の接触の話は表面微小突起の変形特性と突起頂点の分布形が既知であれば解ける問題となった。

Theory of Contact and Friction

By Isami NITTA, Graduate School of Science and Technology, Niigata University (8050, Ikarashi 2-nochō, Niigata-shi, Niigata 950-2181) and Koji KATO, School of Mechanical Engineering, Tohoku University (Aramaki-Aza-Aoba 01, Sendai-shi, Miyagi 980-8579, E-mail: koji@tribo.mech.tohoku.ac.jp)

Key Words: surface contact, contact stiffness, roughness, waviness, fractal, friction, asperity, elastic, plastic, interface shear strength, surface film, system parameter, molecular dynamics

当時は、触針式粗さ計とコンピュータがAD変換器を介して接続され、大量の高さデータの解析が可能となってきたときである⁷⁾。日本では、久門や塚田により接触面剛性の問題が精力的に研究され、その時点における詳細な解説記事^{8,9)}が記されている。固体潤滑ハンドブック¹⁰⁾には、彼らの理論式や実験式が記述されている。それ以降、粗面の接触問題はポツポツ取り扱われているが、GWモデルの考え方からは抜け出ていない。たとえば、弾塑性変形を考慮したW. R. CHANGら¹¹⁾の研究がある。A. MAJUMDERらは、粗面の接触問題にフラクタルの考え方を導入した¹²⁾。粗面の接触問題を取り扱っている論文は最近でも散見するが、基本的な進展はないようである。

上述のように粗面の接触問題は基本的に突起の変形特性と突起頂点の分布の問題に集約される。そこで、以下に突起の変形特性と突起の分布について記述する。

2.3 表面突起の変形

突起の弾性変形を考慮するために、HERTZの弾性接触論が使えれば変形の取扱いが簡単になり非常に便利である。このような事情から、突起は球や回転だ円体に仮定されることが多い。半無限平面の弾性解を使用する場合もある¹³⁾。塑性変形については、表面のビッカース硬さを塑性流動圧力として、垂直荷重を除くことで真実接触面積や変形量が計算されるのが普通である。くさび形表面突起を仮定し、すべり線場理論を用いて、頂角の形状の効果を考慮する場合もある。表面層は切削・研削加工の際に受けた塑性ひずみにより加工硬化しているので、表面の塑性流動圧力はビッカース硬さよりは硬くなっていると思われる。材料の結晶粒の大きさの影響を示した研究もあり、それによると突起の大きさが結晶粒と同じ程度になると塑性流動圧力は突起の頂角の影響を受けにくくなる¹⁴⁾。さらには、材料の加工硬化を考慮したすべり線場理論がある¹⁵⁾。頂角が100~160°の間における実験値は、理論値と比較的良く一致した。SUS 304などの加工硬化が激しい材料を除けば、塑性流動圧力はほぼビッカース硬さに等しい値が得られることが示された¹⁶⁾。

2.4 表面突起頂点の高さ分布

突起頂点の高さ方向の分布についていえば、研削面やポリシング面では、正規分布とされることが多い。突起の頂点は、粗さ計により測定された断面曲線より求められるが、現実にはその頂点(peak)は、表面の突起頂点(summit)と一致しない。断面曲線上のpeakは、ほとんどの場合summitの斜面の部分である。1971年にP. R. NAYAKが、表面をランダム変動するものとして、中心極限定理を基に断面曲線からsummitの高さ分布を理論的に求める方法を示した¹⁷⁾。A. W. BUSHらは、NAYAKの理論にだ円突起を仮定して接触問題を解析した¹⁸⁾。J. I. McCoolはNAYAKの等方性表面の理論計算に必要な三つのモーメントを複数の方法で求め比較検討した¹⁹⁾。H. Soらは、研削面等の方向性のある面に対してNAYAKの理論を用いて真実接触面積を理論的に求めた²⁰⁾。しかしながら、サンドブラストなどの等方性表面に対してすらNAYAKの理論を実験的に検証した例は非常に少ない²¹⁾。著者らは、方向性のない表面を含む種々の機械加工面で突起頂点の高さ分布の実測値と理論値を比較検討した。その結果、方向性のあるなしでは、突起の存在確率密度関数にはあまり相違が見られなかった²²⁾。表面はフラクタル構造¹²⁾をもつということが指摘され、フラクタル理論によりGWモデルが再構築された。これについては、杉村が解説を書いている²³⁾。ただし、フラクタル理論に基づいた接触理論が妥当なものかは、実験的な検証が少なく不明である。

2.5 粗面接触の直接解析

コンピュータの発達により、測定された断面曲線から直接に接触問題を解く方法が可能になった。解析手法は、有限要素法によるものや半無限平面の弾性解を使用するもの等があるが、基本的には影響係数法といわれるものである。解析の規模が大きくなると、多量のメモリや解析時間が必要となる。このため、影響係数を保存するメモリをいかに少なくするかには注意が払われる²⁴⁾。また、マルチレベルマルチインテグレーション法(MLMI法)がEHLの弾性接触の変位の計算に使用され、計算時間の短縮に効果を上げている²⁵⁾。

微細な領域では分子動力学を用いて、原子のレベルの接触が計算できるようになった²⁶⁾。マイクロマシンなどの微細な領域では、計算機による直接シミュレーションが有力な武器になる²⁷⁾。しかしながら、これらの手法は接触面剛性のようなマクロレベルの問題に適用することは、計算機の容量が足りず不可能と考えられる。ミクロとマクロを橋渡しするモデルが必要となろう。

2.6 真実接触面積の測定

真実接触面積は、接触の基本であるから接触面剛性を測定するうえでぜひとも必要な情報である。しかし、その測定方法は意外に少ない。真実接触面積の測定は、F. P. BOWDEN らが接触電気抵抗法で行なったのが始まりである²⁸⁾。

W. DREYHAUPT は接触面顕微鏡により直接に真実接触面積を観察した²⁹⁾。その他、染色液を流し込む方法や、超音波探傷法およびすす等を付ける方法や、表面の粗さの変化を利用する方法などがある。それぞれに一長一短がある。最近、接触面剛性の研究の一環として高分子薄膜を使用して広範囲の見掛けの接触面積の真実接触面積が測定された³⁰⁾。そして、粗さを無視してもうねりを考慮すれば、除荷・再負荷過程の曲線を第一近似的に計算することが可能であることが示された。

2.7 接触面剛性の今後の展開

粗面接触の問題に、確率論を導入することは、一見正しいように思える。しかし、次のように実際の現象をゆがめてしまう可能性がある。1個の表面うねりの変形は、微小突起のものよりもかなり大きい。確率論を持ち込むと、うねりの存在確率は非常に小さいので、うねりの変形量は過小評価されてしまう。固体の接触論が確率の泥沼から抜け出なければ、いつまでも突起の分布をこね回すだけに終始してしまうだろう。たとえば、うねりのような粗面接触を支配している要因があるはずで、今後そのようなブレークスルーに挑戦するトライボロジストが現われることに期待する。

3. 摩擦理論

3.1 凝着と凹凸

接触面のせん断強度を τ_i とし平均接触圧力を \bar{p} とする。接触面に加わっている垂直荷重を W

とし、 W により生じている接触面積を A とすれば、平均接触圧 \bar{p} は $\bar{p} = W/A$ で与えられる。 \bar{p} が働いている状態での接触面のせん断強度を τ_i とすれば、接触面が水平と考えられる場合の摩擦力 F は $F = A\tau_i$ で与えられる。よって摩擦力と荷重の比として定義される摩擦係数 μ_0 は、水平な接触面に対して

$$\mu_0 = F/W = \tau_i / \bar{p} \quad (1)$$

で与えられる。四角ねじのねじ面のように、もしも接触面が摩擦方向に対して θ の角度の傾きを有していれば、接触面を考慮した摩擦係数 μ は

$$\mu = \frac{\mu_0 + \tan \theta}{1 - \mu_0 \tan \theta} \quad (2)$$

で表わされる。摩擦機構を理論的に考えることはこれらの式(1)と式(2)に含まれるパラメータの意味を考えることを意味する。

接触面積 A は垂直荷重 W によっていかに形成されるか。この問題を最も基本的に捉えたのが、F. B. POWDER と D. TABOR³¹⁾ の真実接触面積と見掛けの接触面積の考え方である。彼らの接触領域の直接観察と接触電気抵抗の測定により、真実接触面積は見掛けの接触面積よりはるかに小さいことが確認され表面の微小突起の接触と変形概念が導入された。この認識は二つの考察の流れを生んだ。

一つは微小接触点の群を扱う考え方である。粗面上の突起の形をすべて等しいと仮定したうえで突起の高さ方向分布を確率統計的に扱う接触論は J. GREENWOOD and J. WILLAMSON により導入され plasticity index ψ のパラメータを生んだ³⁾。しかし、この ψ が摩擦係数 μ をより良く説明するわけではない。接触点の数や接触面の分布を考慮に入れた摩擦の確率論的扱いの例としては T. KAYABA and K. KATO の研究がある³²⁾。しかし、その考え方は初期の表面粗さ分布からスタートするものではなく、変形結果としての接触面の分布を確率的に取り扱うに留まっている。したがって摩擦係数に及ぼす初期の表面粗さの影響を適確に表わす表示式はまだないといえる。

一方で個々の微小接触点の変形特性は、接触点の形の影響を考慮することにより、contact mechanics として研究されてきた。突起の形状

は多くの場合半球と仮定され、弾性変形域に対する HERTZ の解が与えられた³³⁾。このような弾性変形状態における球状突起の平均接触圧力 \bar{p} は、

$$\bar{p} = \left(\frac{16E^*W}{9\pi^3r^2} \right)^{1/3} \quad (3)$$

で表わされる。ここに r は突起先端半径であり E^* は等価ヤング率である。このとき式(1)の μ_0 は

$$\mu_0 = \tau_i \left(\frac{16E^*W}{9\pi^3r^2} \right)^{-1/3} \quad (4)$$

で表わされる。弾塑性変形状態に対しては K. L. JOHNSON³⁴⁾ らが詳細な解析と実験を行ない、繰返し摩擦過程における塑性ひずみの蓄積過程の計算予測を可能にした。このような弾塑性接触状態の解析結果が転がり摩擦抵抗の発生の機構を説明するものとなっている³⁵⁾。しかし、弾塑性変形状態における平均接触圧力 \bar{p} を荷重 W と初期の突起形状で簡単に表わすことは困難である。

3.2 Junction-Growth

接触領域全体が十分に塑性変形状態にあれば一定荷重下の接触圧力は接触点の変形の進展とともに変化することになる。このとき、接触面における平均接触圧力 \bar{p} と平均せん断応力 \bar{s} の間には実験的に

$$\bar{p}^2 + \alpha \bar{s}^2 = p_0^2 \quad (5)$$

の関係が成立する³⁶⁾。

式(5)に基づけば、式(1)は次のように表わされる。

$$\mu = \frac{f}{\{\alpha(1-f^2)\}^{1/2}} \quad (6)$$

ここに $f = \tau_i/k = \bar{s}/k$ 、 k ：軟かい方の材料のせん断強度、 α ：軟かい方の材料の加工硬化特性により決定される実験定数、 p_0 ：軟かい方の材料の硬さ値に近い実験定数。

かくして、摩擦機構を考えることは α 、 p_0 と f を考えることに帰する。近似的に α と p_0 は材料特性値とする。 k が塑性変形分野で考えられているように、圧力に無関係で一定と考えられるとすれば、それはせん断試験で求める値となり、結局最後の議論はせん断強度 τ_i がいかにして決まるか、ということになる。Aの面積の接触面に十分な厚さの潤滑膜（または反応膜）が存在すれ

ば、 τ_i はその膜の粘性に対してのせん断強度になる。そのとき τ_i は一般に

$$\tau_i = \tau_0 + \beta \cdot P \quad (7)$$

と表わされ、接触圧力の関係となる³⁷⁾。

3.3 潤滑膜（第3物質）

接触面における高圧力下の油膜の単分子から数分子膜の τ_i の値を明らかにすることは伝統的に高度な実験課題であり、EHLの極限状態における油膜の物性値を求める課題である³⁸⁻⁴⁰⁾。この研究課題は1990年代に入り、分子動力学 (Molecular Dynamics, MD) の手法により τ_i の値を数分子膜から単分子膜厚さの領域まで求める計算がなされるようになってきている⁴¹⁾。

意図的に潤滑膜を与えずとも、接触面には上下面物質の他に意図せぬ種々の第3物質が存在する。O₂、N₂、He、H₂Oなどの吸着膜や酸化膜および nm オーダの微粒子などである。これらの第3物質は τ_i の値を大きく左右する。摩擦に及ぼすそれらの影響の大きさを実験的に明確に初めて示したのが BOWDEN らの真空中摩擦実験であった⁴²⁾。そこでは Ni の表面への O₂ の吸着が摩擦係数を約6から約1へ減少させた。一般に金属表面への吸着物としては O₂ が最も強い影響力を摩擦に与える。CO、CO₂、NH₃ 等も吸着することにより摩擦抵抗を下げる。Ar や He 等の影響は小さい。このような認識は摩擦する材料が金属からセラミックスに変わっても基本的には変わらない。DLC 膜の表面に H を吸着させヘッドとの摩擦と摩耗を減らす最近の試みも、吸着ガスによる摩擦の低下効果を用いたものである⁴³⁾。

摩擦に及ぼす吸着ガスの効果はこのように実験的によく認識され利用されるようになったが、摩擦低下の機構は明らかでない。酸化膜ができると凝着しなくなり摩擦係数が減る、といった程度である。それを原子と分子レベルの動きを追って明らかにしようとする試みが分子動力学 MD を用いてなされている。たとえばダイヤモンド表面に吸着した H、NH₃、等の分子の動きを MD シミュレーションで追いつながら τ_i が吸着ガスによりいかに、どのように変化するかを明らかにしている⁴⁴⁾。しかし、吸着物と接触面のせん断強度の関係を MD により明らかにする試みは未だ非常に

少ない。

仮に接触面に第 3 物質が存在せず、同じ材料同士との接触であるとしても τ_i の値は容易に k の値に等しくならない。接触面を介して結晶方位が異なるからである。その影響は結晶粒界の強度が粒界における結晶方位の値で非常に異なることからわかる⁴⁵⁾。

3.4 接触面せん断強度

しかし、そのような粒界のせん断強度も理論的にあるいは MD によって予測されるには至っていない。 τ_i に関する特殊解を求める研究としては、接触する両面の結晶方位の組合せによって τ_i が 0 になる条件を論じる例がある⁴⁵⁻⁴⁸⁾。しかしその確かさについては議論の余地がある。要するに接触面のせん断強度 τ_i を種々の条件下で的確に予測することは現在困難である。

一方で τ_i を実験的に測定することも困難である。今までに用いられたいかなる測定手法も接触面のひずみと応力を直接測定することに成功していない。間接的には、見掛けの摩擦力を測定し、それを摩擦力の塑性変形の理論解に適用することにより τ_i を算出する方法がある。たとえば、CHALLEN and OXLEY⁴⁹⁾ は接触点の変形状態を cutting mode, wedge mode, ploughing mode と分けることにより、それぞれの mode における摩擦係数を $f (= \tau_i/k)$ の関数として導いている。しかし、このような方法によって摩擦係数を求め f を算出しても、その値に対応する接触面の物理化学的状态がわかるわけではない。かようにして摩擦抵抗を発生させる根元的存在としての f の値の決定の方法と発生機構の理解は混沌として定まっていない。

3.5 荷重の影響

摩擦を左右する別な因子として荷重がある。一般に摩擦力は荷重に摩擦係数をかけたものとして与えられる。このような定義のもとで、もしも荷重が μN レベルにまで小さくなると、近づいた両表面の原子間力⁵⁰⁾ や吸着水によるメニスカス力⁵¹⁾ が付加的垂直力を生じさせる。これらの力は結果として摩擦力を増加させる方向に働く。このように μN の荷重レベルでは表面間力が無視できなくなる。MEMS (Micro - Electro -

Mechanical-Systems) に関心が寄せられている昨今、この問題は重要になってきている。

3.6 摩擦振動

摩擦は不可避免的に摩擦音を発生させる。ということは摩擦には不可避免的に振動が伴う。この振動の発生機構として、すべり速度の増加に伴う摩擦抵抗の減少がある。これはすべり系の自励振動を引き起こす⁵²⁾。一方で静止摩擦係数と動摩擦係数との差が引き起こす stick-slip による振動がある⁵³⁾。これらはよく知られた摩擦力の変動と摩擦系の振動の問題である。これらに加えて、最近の分子動力学の解析は原子レベルでの相互作用力の周期性に起因する摩擦力の変動を明らかにしている⁵⁴⁾。このように摩擦系には摩擦力が一定でないことに起因する振動が原子レベルから機械要素の大きさにまで存在することが明らかになっている。これらの振動を押さえる最も有効な方法は stick-slip の発生を押さえ、速度に対し摩擦係数が正のこう配をもつようにして自励振動を押さえることであるが、それは流体潤滑によって最も効果的に可能となる。混合潤滑、境界潤滑、固体潤滑および無潤滑の状態に置いて stick-slip を押さえ、速度に対して摩擦係数の正のこう配を確保することは今もって非常に困難なことである。

3.7 摩擦理論のまとめ

摩擦の機構に関する理解は未だ非常に未整備で混沌としている。1 個の接触点に関する式(1)~(7)の理解は進んでおり、実験値も多数出されている。しかし、それらの理解を多点接触の場合に広げ、かつ、摩擦過程における摩耗を考慮して時々刻々の接触点の変化をモデル化した摩擦理論を構築するには至っていない。

それでは摩擦に関して 20 世紀までに確立された最大の知見は何であろうか。一言にまとめるならば、「摩擦係数は材料定数ではない。それはシステム依存関数である。」ということであろう。そして 21 世紀の課題はと問うならば、それは「摩擦を表わすシステム関数を構築すること」である、といえるであろう。

文 献

- 1) R. HOLM: Electric Contacts, Springer-Verlag (1967)

