

研究室訪問③

摩擦世界を探る

笹田研究室

生産機械工学科

“摩擦とは一体何なのか、そして何故起こるのか。”その究極に挑み、トライボロジーと呼ばれる分野の研究をしているのが、笹田研究室である。

摩擦はそもそも解らない。

北棟にある研究室を訪れると、笹田先生は笑顔で話され始めた。

「機械工学において、“わかっている”ということは、ニュートン力学に代表される力学体系にのっていることを言うんです。そういった意味で『摩擦・摩耗』といった現象は、そもそもそれが何なのか、そもそも解らないのです。全く解らないというのではなく、ぼんやりとしか解らないんですがね。」先生が、“そもそも”という部分を首をかしげながら強調されたように、この分野は実際、未知の部分が非常に多い。しかし最近50年間で、ようやく先生がこれから話されるようなことが言える程度になってきた。

さて、我々の身の回りに目を向けてみよう。摩擦は実に頻繁に身の回りで起っており、重要な役割を果し

ているのに気付くであろうか。その様な生活を送っている中で、摩擦の無い世界が想像できるであろうか。

摩擦が無ければ、まずあらゆる物体が静止できず、一番低い所に滑って行ってしまふ。そして我々は皆な裸になってしまう。それは、衣服というものが繊維の摩擦で織り合わさっているのだから、その繊維が抜け落ちてしまふからだ。家は崩れてしまふ。何故なら、大半の構造物は釘やねじ、ボルトの締めつけ、組み込みという摩擦の利用に依っているからだ。そして山が崩れる。土砂の粒子はある一定の摩擦角を持って静止しているからだ。ということは、地球の表面が真っ平になってしまひ、地球上全てが海になってしまうということだ。

こんな世界の終りを想像し難いように、摩擦はあまりにも身の回りで

頻繁に起こる為、特に気に止めていなくても、実はかなり重要な役割を果たしているのだ。

では、このことを昔の科学者達はどうか考えていたのであろうか。

摩擦探究の歴史

最初に摩擦に目を付けたのは、あの『モナリザ』や『最後の晩餐』等の名画を残し、万能人であったレオナルド・ダ・ビンチであった。彼は摩擦というのがどうして起こるのかに目を向け、最大摩擦係数や動摩擦係数一定というようなことを書き著している。しかし、まだ力学体系の固まっていない時代であったので、天才ダ・ビンチの提言も、彼一代の

ものとして残念ながら後には続かなかったのである。

その後、17～18世紀にアモントンやクーロンが登場し、いよいよ本格的に研究されるようになって、物体の重さ及び形には無関係で、一定である摩擦係数というものが経験的に解ってきたのである。

しかし、それが何故一定なのか、ということは解らなかった。今の我

我にも、その事実以外は解らないのである。当時はこの原因が“物体の表面の凹凸にある”という考えが主流だった。しかし、摩擦の原因は表面の凹凸だけではない。それを示す事実として、例えば、温度や湿度が変わると、摩擦や摩擦現象の表れ方も全く変わるということがある。

今度は、この原因について考えてみよう。

摩擦の原因

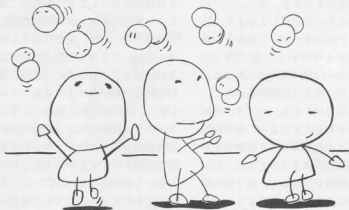
摩擦の原因の一つとして考えられるものに、二物体を構成する物質と物質の親和力といったことが挙げられる。でも、これだけでは説明できない。更に「物と物、例えば、物体Aと物体Bの関わり合いを考える時、即ち自然界からそれを切り出して考える時、AとBだけを考えていたのではダメなんです。Cという第三の物体、雰囲気のことを考えなくてはいけないのです。雰囲気は空気が主ですが、ガスや油からもしません」ということを先生は言われた。

これが、大変重要なことなのである。単にこすり合わせて摩擦を調べるにしても、直接、接触している物体だけを見るのは、不自然である。そこに空気があれば、空気とのからみ合いを考えなくてはいけないのだ。実際、例えば真空中（と言っても、完全な真空は作り出せない。電子顕微鏡中でも 10^{-6} mmHg程度）だとびったりくっついて動かなくなってしまう。真空中での研究は先生のimageの原点で、これをお餅にたとえて説明された。「もし、雰囲気が無ければ、物と物とはお餅のようにびった

りとくっついて、離れなくなってしまう。だから我々は、お餅を扱う時に取り粉をまいて、くっつかないようにするのです」

つまり、雰囲気にあたる取り粉が滑りを促している訳である。こういってことを考えると、物体に適当な、取り粉の様なものをまいてやるということが、潤滑するということに言い換えられるだろう。

それでは一体どうやってこの取り粉なるものが、摩擦に影響するのだろうか。



O₂の薄膜が摩擦を少なくする。

雰囲気は通常は空気であるが、その中でも特にO₂が摩擦潤滑の主な役割を果たしている。物体の端というのは、隣りのある一方に原子が存在していないので、いちばん端にある原子が、あまったエレクトロンの手をイソギンチャクのように伸ばしている、非常に活性が高い。そこにO₂がやってくると、化学的に吸着して活性がうまるのであるが、それは一時的にくっつくだけで、すぐ格子振動により分子が飛び出してしまう。けれども、次にまたO₂がどこからか飛んできて吸着する。従って、結果的にO₂の薄い単分子膜を形成するので、滑りやすくなるのである。

先程述べたように、摩擦潤滑の主な役割を果たしているのはO₂が主であり、空気成分の中でもN₂やH₂に比べて、この作用は断然強い。何故O₂が顕著にそういった性質を示すのかは、研究中であるそうだが、どうも π 電子の影響らしい。

O₂に匹敵するのはH₂Oである。実際、湿度が高い梅雨時と低い秋とでは、摩擦の大きさが大きく違ってくる。ここでH₂Oが良いと言うなら、「水をかければ、摩擦はずっと小さ

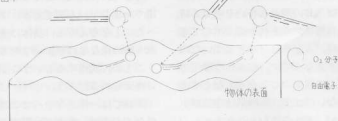


真空中における摩擦実験

くなるのではないかと考える人が、いないだろうか。しかし、これは話が変わってくる。ここ逆水分が多くなってくると、流体力学の適用しうる範囲になってしまう訳で、即ちニュートン力学が適用できるということになる。これでは摩擦の体系から外れた状態になってしまう。

以上のことを考慮に入れば、雰囲気が無い、又は極端に少ない場合、例えば真空中といった場合に、滑らない理由も解るであろう。又宇宙での新素材の合成実験は、こういったことを利用しているのである。この為、宇宙開発は実際、この摩擦・摩擦の研究を飛躍的に進めた。

図1



トンチで表面凹凸と勝負

雰囲気はさておき、次に、二つの物体AとBに目を移してみよう。物体をミクロンオーダーで見ると、真実接触面と呼ばれる、原子同士のinteractionがある場所が存在する。この部分は非常に面積が狭いので、大きな圧力がかかる。つまり、表面の凹凸があることにより、真実接触面ができる訳で即ちどう接触するかは、機械的に決まるのである。だから、接触面を解析して、原子間の関係を解こうとしても、うまくいかないのである。大体、その解析に用い

る界面物性論にしても、数理的に扱えない部分が非常に多いのである。「摩擦というのは、完全に原子と原子の問題に置き換える種類のものではないのです。それ以前に、表面の幾何学的な問題がありますしね。それだから、表面の凹凸と接触というシリーズと、雰囲気によって物の端の活性が埋められるかどうかという界面化学のシリーズとが、うまく結合しないと理解できないのです。」と先生の言われる通り、こうした状態から決まってくる摩擦係数 μ を、今ま



真実接触面

いまはやりの新素材が摩擦にも強いのだ。

ところで、先生は、どちらかと言えば摩擦よりも摩耗の方に重点を置いていられる。これは、摩耗が摩擦より、環境（雰囲気）に大きく左右される為である。摩擦は普通摩擦係数がせいぜい0.2～1.0程度の範囲であるが、摩耗の方は条件が少し違っただけで、1万～10万倍の違いが出るのは、よくあることなのだそうである。

では摩耗を少なくするには、どうすればよいのだろうか。勿論、摩擦同様、直接接触している物質だけではなく、雰囲気を考慮に入れることが重要である。

今までの話で解っているのは、 O_2 を表面に吸着させると摩擦は少なくなる、ということであった。我々の使う物は、ほとんど空気中に存在するので、雰囲気の主な物は O_2 というように決まってしまう。それゆえ摩耗を減らすには、残りの物体AとBの材質を工夫して、 O_2 を良く吸着するようにしてやらなくてはならない。

O_2 が吸着するかどうかということ、触媒化学になるのであるが、今までに発見された耐摩耗材は、

- ・トラジションメタル（遷移金属）
- ・半導体
- ・アモルファス

で多くの人が式で表すことを試みたが、成功した例はない。「これを解くには、トンチでやるしかありません。トンチでどうにかしてつかむんですよ。」と先生は言われた。

・セラミック

・希土類

といった物質がある。

トラジションメタルは、dオービタル電子を持つ金属のことである。これは O_2 をよく吸着するので、耐摩耗材としては適当であると考えたのが、笹田先生の学位論文である。

半導体は知ってのとおり、正孔が電子を欲しがるとし、アモルファス、セラミック等も、構造的に不安定な物質である。

こうして見ると、不思議なことに今の新素材（今、流行の変な物!）が、どうも摩耗材の開発には通しているらしい。

「これらは、ある種の不安定性を持っている訳です。物をこするといことが、そもそも不安定な行為だから、今まであるような安定な物は摩耗するのです。新素材のように、ある種の不安定な要素を持つ物こそ、こするといった不安定な状態を切り抜けていくことができるようです。」と笑っておられたが、これらの新素材はいずれも高価なものであることが痛いところだそうである。

まだまだ解らないことがたくさん。

さて、この様に摩擦・摩耗に関し
て雰囲気の影響の重要さが解ったが、
ここまで来ると、 $F = \mu N$ の摩擦係
数 μ も、ただの比例定数ではなさそ
うである。

例を挙げると、突然、軸受が焼け
ついてしまうという現象がある。こ
れはとりもなおさず $\mu \rightarrow \infty$ を意味し
ている。また普通は $\mu = 0.2 \sim 1.0$ で
あるが、単なる鉄同士でも、真空中

で中性子を照射して表面のよれを
追い出してしまうと、 μ は一気に50
や100といった値を取り、立てても
物が落ちないという現象が起る。

それだけではなく、次の様な場合
も、 $\mu = \text{const}$ は成立しない。

例えば、800m/s という高速で摩
擦する場合や、逆に褶曲山脈のよう
に、 $0.2 \mu\text{m}/\text{year}$ といった非常に遅
い速さで摩擦する場合、更に、金属

の超微粒子といった極端なものを
扱う場合等々、クーロンの摩擦法則
($\mu = \text{const}$) は成り立たない。

この様に摩擦の研究は未知の部分
が今だに多くあって、これから学
問なのだということがお解りいただ
けたであろう。

医工学への応用

笹田研究室では、北里大学などの
医科大学とタイアップして医工学に
ついても取り組んでいる。特に人工
関節、人工臓器において、摩擦・摩
耗といった研究が大いに役立つのだ。

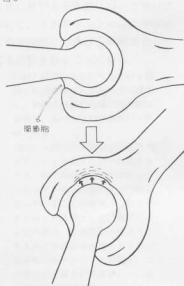
とにかく、人工物を人体に埋め込
むということは容易なことではない。
人間と人工物がどうやってうまくつ
ながるか、どうやって排除しようと
するか、その境にどんな関わり合
いがあるのだろうか。

人工関節の場合、その摩耗粉が毒
となるために、摩耗してはいけない。
具体的に言うと、ステンレスを材料
に使う場合、摩耗といっても、一部
が脱落するのではなく、ある特定の
成分元素（この場合はNi）が選択的

に溶け出す。この原因についてはま
だ解らないので、培養液中で摩擦試
験を行い、その中で細胞の成長の具
合を観る実験をしている。

また逆に、生体関節のまねをして優
れた機械軸受を作る試みもなされて
いる。しかし残念ながら、機械的に
弱いということと、位置が定まらな
いということから、まだ実用化には
至っていない。位置が定まらない
というのは、生体の場合は関節液を雰
囲気として挟んで、球の部分が受け
ている骨に対し押しつけられると、
軟骨がそれに伴ってへこむからであ
る。従ってそれを真似したものは当
然、摩擦は少ないが、位置を決める
精度が低いのである。

図3



人工心臓、速さが決めて

先生の研究室に所属する学部四年
生のうち毎年1人か2人は生体をテ
ーマにするということである。今述
べた人工関節についてもそうであっ
たように、今年は人工心臓をテー
マにするということなので、話を伺っ
た。

人工心臓では、血栓形成と血球破
壊という大きな問題がある。血液を
送り出す速さが遅過ぎると、血液が
滞り血栓ができてしまい、血管がづ
まってしまう。血栓が千切れて脳に

行くと、脳血栓で死んでしまう。逆
に速過ぎると赤血球が破壊されて、
血液の役割を果たさないばかりか、
破壊された赤血球のかすは腎臓を冒
してやはり、尿毒症で死んでしまう。
従って血液を送り出す速度が、速過
ぎず、遅過ぎずといった範囲で人工
心臓を設計しなければならない。笹
田研究室の研究結果から、その範囲
は解ったのだが、極めて狭いので、
完全な物はまだ完成していない。

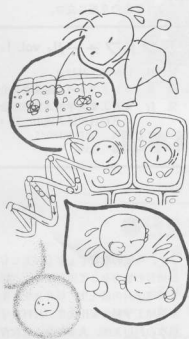
「さすがに心臓ともなると、全部

それで設計できないのです。どうしても血液が澱む所ができてしまうんです。そこには仕方無しにヘパリン（抗凝血剤の一種）を使うのですが、このヘパリン材料は、構造材料になりにくいんです。

これらは“バイオメカニクス”（＝古典力学の人体に対する応用）と呼ばれる分野である。そもそも古典力学というのは、バイオメカニクスから始まった。ダ・ビンチの頃の力学というのは、全部人間の動きが基になっている。例えば、石を投げるのに“どの角度で投げれば一番よく飛ぶのか”などといった問題がそうである。

先生は、「でも最近では、機械工学において発展してきたことが、再び生体に適用されるようになってきているのです。それが今、“バイオメカニクス”と呼ばれているもののなのです。

でも、単なる力学だけでなく簡単なだけでも、摩擦が入るととても難しいのです。」と首をひねっておられた。



若いときにもんもんと悩みなさい。

以上の様に先生の研究は、摩擦・摩耗から医工学まで多方面に及んでいるのだが、底に流れる信念といったものは一つである。

笹田先生の興味の中心は、物の端というものはどうなっているのか、言い換えれば、“自分の体にしても、どこからが自分の肉体でどこからが空気なのか、その2つの境はどのようにしてつながっているのか、不思議でしょうがない。”ということなのである。我々も始めは先生がかなり多くの研究を行っているのに驚き、何故その様に多くのことを手がけているのか解らなかった。しかし、このことを伺って本当に“はっ”とし

た。研究する動機というものは、真に根元的なもので、具体的なテーマはいろいろあっても、そこに根ざすものは一本筋が通っており、究極的には人間と宇宙の存在に関した、むしろ哲学的なものなのである。

「研究というものは、その個人が一つの根本的な思想を持っていれば、あとは金と暇と年があれば、いくらでも具体的に広げるものです。その根本的なものを認識する為には、若いうちにもんもんとした思い悩む時が必要なのではないでしょうか。」最後に先生は、そう我々学部生に提言された。

今回取材させていただいた笹田先生は、人間を深く理解しておられ、自分の人生を自分の研究に提げただけの哲学的思想をもっていらっしやいました。真に学問を愛するためには、それなりの思想を根底にもっていなければならないのかもしれない。