

摩擦の研究 (1) 物体表面の凹凸の測定

栃木県立宇都宮清陵高等学校・科学倶楽部

高橋久徳 本多恵一 渡邊 潤

1. 研究の動機

摩擦力について次のような法則を学んだ。

(1) 摩擦力は垂直抗力に比例して接触面積に関係しない。($F = \mu N$)

(2) 静止摩擦係数は運動摩擦係数よりも大きい。($\mu > \mu'$)

摩擦力がこんな性質を持つ理由として、次のように大変わかりやすい説明を受けた。

“ (1) の垂直抗力に摩擦力が比例して大きくなるのは、荷重を増加させるに従って、上下の噛み合いが増えるためである。(2) の運動摩擦力が静止摩擦より小さくなる理由は、上の物体が細かくバウンドして滑るために、凹凸の噛み合いが弱くなるためである。”

摩擦の性質が、目には見えない、細かな表面の凹凸で、単純に説明できるのに驚いたのと同時に、色々な物質の摩擦係数を見たときに、直感的に、表面の凹凸と摩擦係数について次のような予測が思い浮かんだ。

予測

(1) 同じ物質の摩擦係数は、大きな値をとるのではないか？

(2) 違う物質間での摩擦係数は、同じ物質の摩擦係数より小さくなるのではないか？

(3) 資料より、摩擦係数はまちまちである。物体の接触は不安定なのではないか？

の点である。

資料 1

材料	摩擦係数	材料	動摩擦係数
ニッケル/タンク ステン	0.3	鋼/鋼	0.35 ~ 0.40
ニッケル/ニッケル	0.6	銅/銅	1.4
銅/銅	0.5	銅/鋼	0.40
金/金	0.6	銀/銀	1.4
軟鋼/硬鋼	0.78		
軟鋼/軟鋼	0.53		
銅/ガラス	0.67		

(1)(2)の点に関して、摩擦が2つの物体の凹凸から生じるという観点から考えれば、十分納得できる特徴である。そして、気づいた点を整理すると、次のような仮説が生まれた。



同じ物質
摩擦大

違う物質
摩擦小

仮説

「同じ物質であれば、上の図のように、表面の凹凸の周期、つまりピッチが同じで、十分に噛み合い、摩擦係数が大きくなるが、違った物質で、表面の凹凸のピッチがずれ、噛み合いが少なく、摩擦係数は小さくなるのではないか？」

このような仮説が、今まで学んだ摩擦の説明から、自然に思い浮かんだ。そこで、この仮説が正しいかどうか、摩擦面の接触状態を科学的に調べて確かめようと思い、研究を開始した。

2．研究内容

(1) 静止摩擦係数の大きさが、表面の凹凸のピッチによって左右される。との仮説が正しいか、摩擦発生メカニズムを表面の状態から研究し、検証する。

3．研究方法

摩擦のメカニズムを物質表面の凹凸から考察する研究である。従って、物質表面をどのような方法で観察するかがポイントになると思う。

表面の凹凸をどのようにして測定するか、色々と議論した結果、次のような観測や測定ができるとの結論に達した。

レーザー光線を照射して、反射する光のパターンで観測する。

物体表面を鋭い針でなぞり、針の上下動を電氣的に増幅して凹凸を検出する。

電気抵抗を測定して、上下の凹凸の接触具合を測定する。

物体表面を顕微鏡で観測することは無理がある、との予測から考えた方法である。また、電気抵抗を測定する方法から、金属に限定して表面の凹凸を測定した。

このような実験方法を考え出したのは、今までに習った科学技術を、実際の研究に応用出来ないだろうかとの背景がある。例えば、 ω については、科学技術Aでのインピーダンスの実験からヒントを得たもので、交流信号を使ってインピーダンスを測定すれば、上下の面の接触具合は電気抵抗として、上下の面の間隔はキャパシタンス成分として測定できるのではないかとの発想に基づいた実験である。

4 . 実験

実験 1

静止摩擦係数の測定

目的

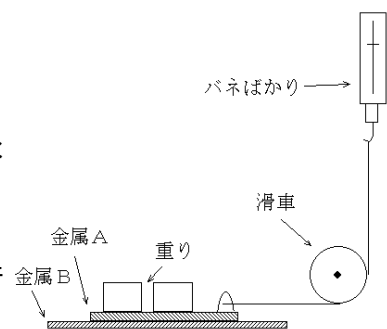
静止摩擦係数と物質表面凹凸の関係を研究するための基礎データとして、まず色々な物質の間の静止摩擦係数を測定することにした。静止摩擦数は、いくつかの資料を見ると、同じ物質の場合に、特に大きくなる傾向が見受けられる。そこで、実際に静止摩擦係数を測定し、この傾向が存在するか確認し、さらに、その結果をもとに、表面の凹凸のピッチとの関係を考察する。

実験方法

0 . 3 mmの3種類の金属板

A: アルミニウム B: 銅 C: ステンレス

を使い静止摩擦係数を測定する。測定方法は、図の通りで、水平な台の上に一枚の金属板をおき、その上にさらに金属板を置き、重りの重さを3回変えて測定する。それぞれの重りで、測定は10回行い、平均をとり、静止摩擦係数を求めた。



0 . 3 mmの薄い金属板を使った理由は、厚い板では、反りなどのために正しい実験ができないと判断したのと、金銭的に厚い板は購入できなかったためである。実験の前にアルコールで板を洗浄し、乾いた状態で行った。

注) 色々な資料に乾いた状態との表現があったが、具体的にどのような状態なのか不明であったので、試料をアルコールでふいて実験を行った。

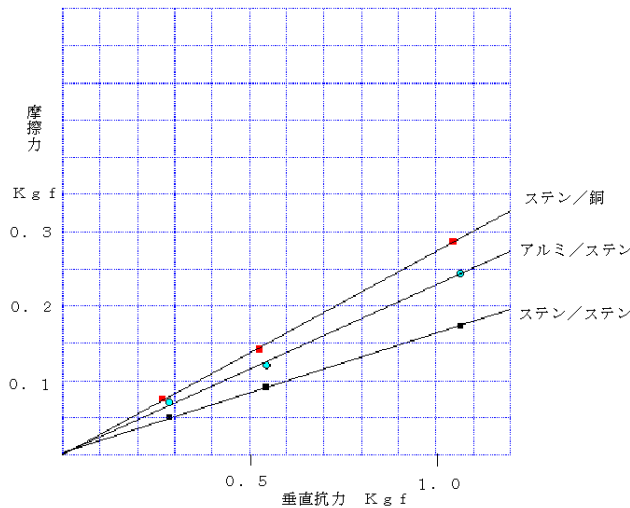
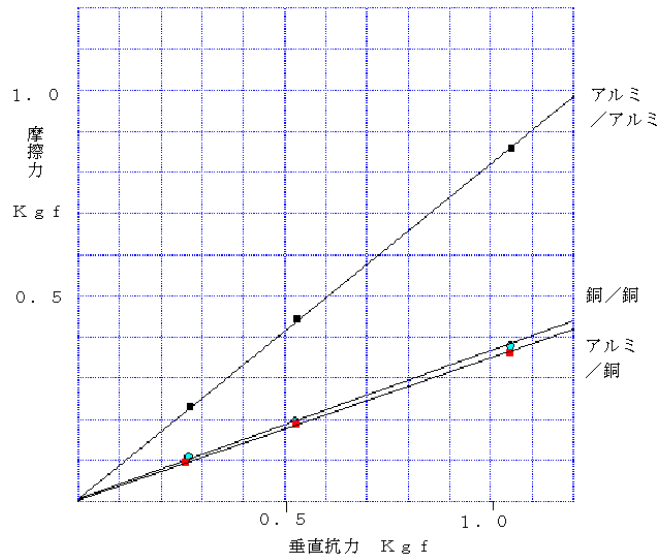
実験結果

測定データ	[アルミ/アルミ]		[銅/銅]		[ステンレス/ステンレス]	
	垂直抗力 [Kg]	静止摩擦力 [Kg]	垂直抗力 [Kg]	静止摩擦力 [Kg]	垂直抗力 [Kg]	静止摩擦力 [Kg]
	0.270	0.23	0.266	0.107	0.285	0.051
	0.530	0.443	0.526	0.196	0.545	0.091
	1.050	0.858	1.046	0.380	1.065	0.173
	[アルミ/銅]		[アルミ/ステンレス]		[ステンレス/銅]	
	垂直抗力 [Kg]	静止摩擦力 [Kg]	垂直抗力 [Kg]	静止摩擦力 [Kg]	垂直抗力 [Kg]	静止摩擦力 [Kg]
	0.260	0.094	0.285	0.071	0.266	0.075
	0.526	0.189	0.545	0.120	0.526	0.142
	1.046	0.362	1.065	0.244	1.046	0.287

データから最小自乗法で計算した静止摩擦係数

	アルミ	銅	ステンレス
アルミ	0.82	0.35	0.23
銅		0.36	0.27
ステンレス			0.16

摩擦力と垂直抗力のグラフ（直線は最小自乗法で計算した直線）



考察

最大静止摩擦力は、グラフのように垂直抗力に比例していることが確認できる。また、静止摩擦係数が、かなり微妙な値であるものがあるので、最小自乗法で計算し、できるだけ客観的に求めるようにした。

金属の組み合わせと、その場合の静止摩擦係数を、係数が大きい順に並べたものが左の表である。この表をみると、アルミニウム、銅の場合は、同じ物質の場合の静止摩擦係数が、違った物質の組み合わせによる係数より、予想したように大きくなっている。しかし、係数はかなり似かよった値で、誤差の影響も考えられる。

摩擦係数	組み合わせ
0.82	アルミ - アルミ
0.36	銅 - 銅
0.35	アルミ - 銅
0.27	ステン - 銅
0.23	アルミ - ステン
0.16	ステン - ステン

アルミ同士では0.82、銅同士では0.36とアルミの係数が大きかったが、ステンレスとアルミ・銅を組み合わせた場合は、静止摩擦係数の大きさは逆転している。ことから、静止摩擦係数を、接している物体間の面の凹凸のピッチの関係で考えることが妥当であるのではないかとと思われる。

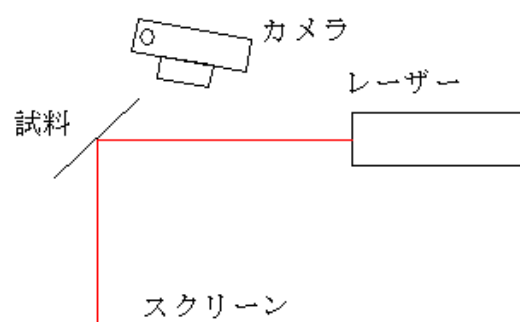
実験 2

金属表面の凹凸の測定

目的

この研究では表面の凹凸に興味があるが、金属表面の凹凸を肉眼で確認することはできない。しかし、レーザー光線の様な光をあてれば、その反射光は、表面の凹凸を反映するに違いない。そこで、レーザー光線を金属表面に照射し、反射したパターンを観察して、金属表面の凹凸の様子を比較する。

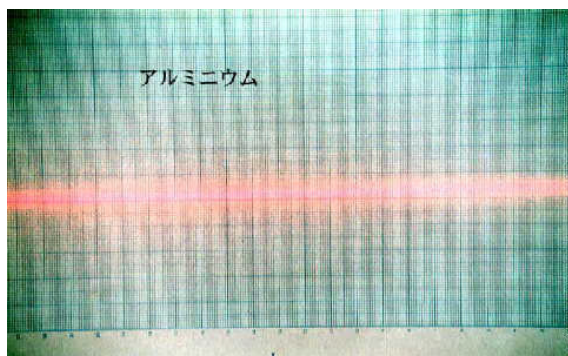
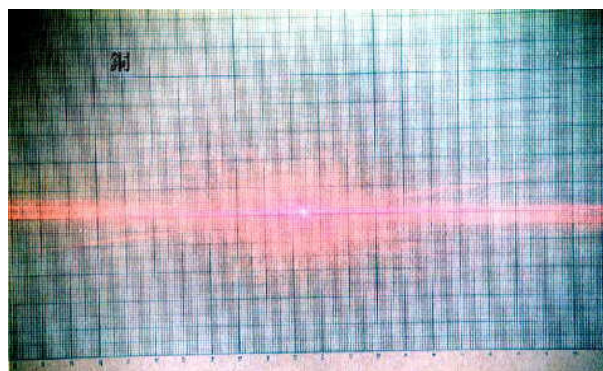
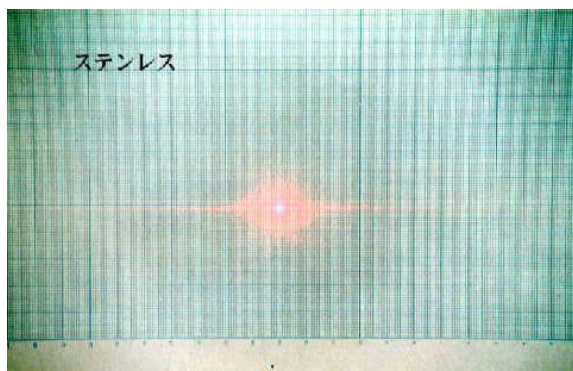
実験方法



左の図のように、試料に45度の角度でレーザー光線を照射して、反射したビームをスクリーンに投影し、そのパターンを観察する。

測定結果

撮影した写真を示す。



考察

見た目には、ステンレスと銅は表面が鏡面状になってる。それに対してアルミニウムは鏡のように反射しない。しかし、レーザー光線の反射の様子をみると、ステンレスは、スポット状のパターンであるが、銅とアルミニウムは、横に線状に広がったパターンを示している。

レーザー光線の反射パターンを見る限りでは、銅とアルミニウムは同じ様な表面凹凸が存在する。しかし、どの程度似通っているのか数量的には、この実験では把握できない。

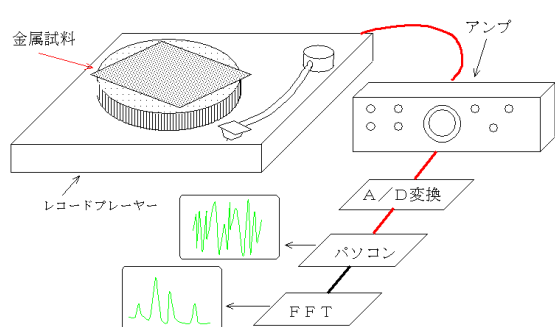
実験 3

金属表面の凹凸の測定

目的

レーザー光線の反射パターンを見ると、試料により明確な差が存在する事がわかった。そこで次に、金属表面の凹凸の長さが何mあるのか数量的に測定し、静止摩擦係数の大小と、表面の凹凸のピッチとの間に相関関係が存在するかを確かめることを目的に実験をする。

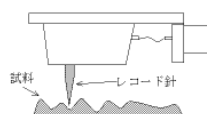
実験方法



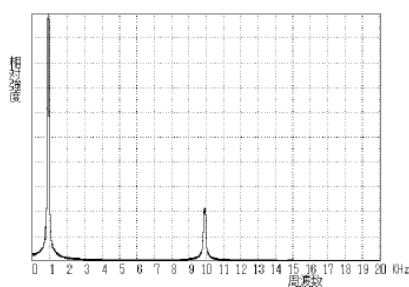
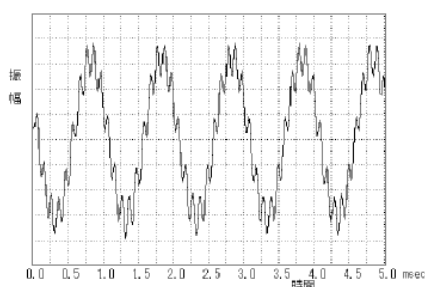
左の図のように、金属の試料をレコードプレーヤーのターンテーブルの上におき、カートリッジでトレースして、出力される雑音を測定する。発生した音は高速A/D変換器を用いてパソコンのメモリーに保存する。次に測定された雑音を、フーリエ変換し、周波数スペクトルを得る。

測定の原理

レコードの音楽再生は、溝に刻まれた細かな振動を、針が拾って電気信号に変換している。レコードに記録されている最高周波数は約20KHzであり、レコードの回転数が33 $\frac{1}{3}$ の場合、最内周の半径を約5cmとすると、20KHzの波形の波長は $= 2\pi \times 0.05 \times 0.56 / 20 \times 10^3$ より計算でき、 $= 8.8 \mu\text{m}$ となる。従ってこの程度の凹凸を音として検出できる計算になる。



金属板試料には、色々な波長の凹凸が存在すると考えられるが、波長の違いは音の周波数の違いとして検出できる。そこで、信号を高速A/D変換してパソコンのメモリーに取り込み、離散フーリエ変換して、周波数スペクトルを計算すれば、どのような周期の、つまりどんな長さの凹凸が分布するか、見積もることができる。



左上の図は、製作した高速A/D変換器の性能を試験するために、10KHzと1KHzの正弦

波を、14 μ秒毎にサンプリングして計測した波形である。この波形を見ただけでは、どんな周波数の成分が含まれるか、数量的に把握しづらいが、参考文献にあったFFTのプログラムを利用して周波数分析すると、右上の図のように、1kHzと10kHzの周波数成分が、5対1の割合で存在する事がわかる。

この場合、かりに金属試料の半径5cmの所を、針でトレースしたときに得られたデータであるとすれば、360 μmと36 μmの周期的な凹凸が、試料の表面に5対1の割合で分布していることがわかる。

なお、14 μ秒毎のサンプリングの場合、サンプリング定理によると約36kHzの正弦波まで計測可能である。目的とする実験には十分利用できる計算になる。なお、不要な高周波成分を除去するために、10kHzのローパスフィルターを入れて計測することにした。この場合10kHzの信号の振幅は約70%小さく計測される。

レコードプレーヤーの回転速度はきわめて高いので、アームが水平方向には動かないように固定し、一定の半径になるようにトレースさせると、原理的には大変高い精度で凹凸の分布が測定できる。波形の計測は14 μ秒毎に連続5000回測定し、そのうちの4096個のデータを利用してFFTで周波数分析する。

測定データの解析

カートリッジからの雑音信号を周波数分析したデータから、試料の凹凸の波長は次の計算で求めることができる。

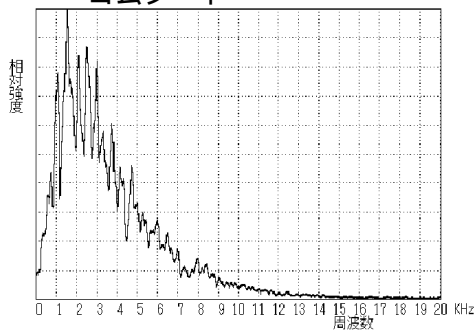
プレーヤーの回転数は33 1/3[rmp]より、角速度は $\omega = 3.49$ [rad/s]となる。トレースした時の半径を r [m]とすると、接線速度 v は $v = r \omega$ [m/s]となる。

FFTの結果、周波数 f [Hz]のピークが現れた場合、その音を発生させる表面の凹凸の長さ、つまり波長は

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{r \omega}{f} = \frac{3.49r}{f} \quad \text{で計算することができる。}$$

測定データについて

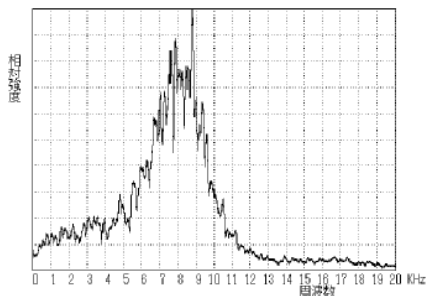
- ゴムシート -



試験的にプレーヤーのゴムシートからの雑音信号を解析した。最大ピークでの周波数は1.5kHz, トレース時の半径が7.5cmから, 凹凸の波長は175 μ mとなる。

アルミ, 銅と比較して, 周波数の高い成分が急激に少なくなっている。(なお, 信号の振幅は, 金属球の10倍以上はあった。解析では, 信号の振幅の絶対値は計算に入れていない。得られたスペクトルの最大周波数成分を1とした相対値で示している。)

- ステンレス

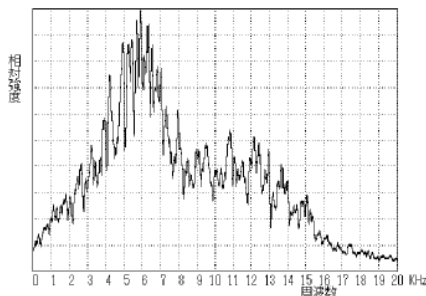


$$r=8.75[\text{cm}]$$

$$f=8.8[\text{KHz}]$$

最大ピークの周波数は8.8kHzで, 凹凸の波長は35 μ mと計算される。アルミ, 銅と比較してスペクトルの広がりが少ないが, 最大ピークの周波数は最も高い。

- アルミニウム

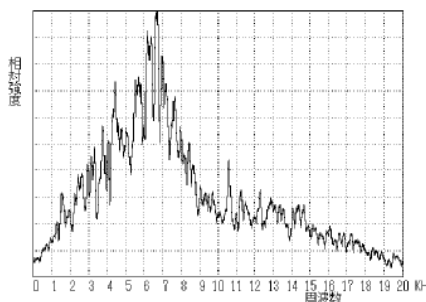


$$r=8.75[\text{cm}]$$

$$f=5.8[\text{KHz}]$$

最大ピークは53 μ mになる。ステンレスと違って10kHz~13kHz(31 μ m~23 μ m)の間に最大ピークの半分程度の大きさのピークがある。レーザー光線を当てて反射させたときのビームの広がりが最も大きかったのはこのためではないかと思う。

- 銅 -



$$r=8.5[\text{cm}]$$

$$f=6.7[\text{KHz}]$$

最大ピークは44 μ mである。スペクトルはステンレスよりもアルミニウムに近い形をしている。しかし肉眼では, 表面が鏡面状で, ステンレスに近い感じを受けた。

A/D変換した波形を見ただけでは全く区別することはできないが, 周波数スペクトルで比較すると, 試料によって全く違ったパターンであることがわかる。

表面凹凸のピッチと静止摩擦係数の解析

測定で得られた静止摩擦係数の大きさは、違った物質の間では、

$$\text{アルミ-銅} > \text{ステン-銅} > \text{アルミ-ステン}$$

の大小関係があった。同一物質同士では

$$\text{アルミ-アルミ} > \text{銅-銅} > \text{ステン-ステン}$$

であるから、違う物質の間での静止摩擦係数の大きさと、各々の物質で測った静止摩擦係数の値との間には、例えば平均値になる等の、関係があるとは思えない。つまり、静止摩擦係数を物質そのものが持つ量と考えずらい。つまり、2つの物質の間にある何らかの相関によって決まると考えられる。そこで、

仮定 1

違う物質間での静止摩擦係数の大小は、ふたつの物質の凹凸の類似性から判断できるのではないか。

と考えた。このことを確かめるために、

仮定 2

周波数スペクトルの重なり具合が大きいほど摩擦係数が大きくなる

と仮定して、その重なり具合を計算することにした。

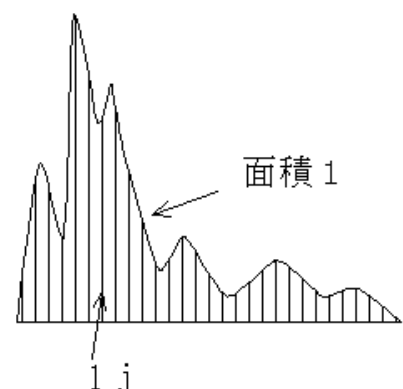
周波数解析した結果、試料の表面の凹凸の分布を数量的に得ることができた。そこで、違う物質の間の摩擦係数の大小関係を周波数スペクトルの重なり具合で考察することを試みた。その解析方法は次のようになる。

周波数スペクトルは14 μS毎に4096個の測定値を離散フーリエ変換した結果である。従って2048の周波数成分の強度 $l_i (i=1 \sim 2048)$ が得られている。

P_i を全体の周波数の中での l_i の割合とすると、

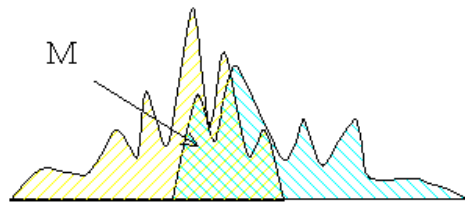
$$P_i = \frac{l_i}{\sum_{i=1}^n l_i} \quad \text{となる。}$$

このように P_i を定義することは、周波数スペクトル全体の面積を1に規格化することになる。このようにする理由は、各成分



の振幅の絶対値が不確定なので、スペクトルパターンの一致のみを考慮したことによる。そこで、試料1の P_{1i} と、試料2の P_{2i} を使って、重なり具合を表す M を次のように定義する。

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{1i} P_{2i}$$



このように M を定義すると、例えば全く同じスペクトルに対して計算すると $M = 1$ となるが、重なる部分が全くない場合は $M = 0$ となる。実際には $0 < M < 1$ の値をとり、重なる部分が大きければ大きいほど $M = 1$ に近づくことになる。この式を用いて2つの試料から得たスペクトルの重なり具合を計算し、表面の凹凸の一致の度合いを数量化した。

静止摩擦係数（測定値）

	アルミ	銅	ステン
アルミ	0.82	0.35	0.23
銅		0.36	0.27
ステン			0.16

重なり具合 M （計算値）

	アルミ	銅	ステン
アルミ	1	0.99	0.93
銅		1	0.94
ステン			1

重なり具合 M の計算結果と、実測した異なった物質間での静止摩擦係数の大小関係と比較してみると一致している。この結果から、 M の値の比較で、異なった物質間での静止摩擦係数の大小関係が説明できそうである。

解析結果の考察

“同じ物質では μ は大きくなる”との予測(2)に対して、アルミ - 銅の組み合わせで測定した静止摩擦係数は合致した。また、予測(2)が成り立たなかったステンレスとの組み合わせでも、重なり具合Mの計算結果を見ると、ステンレスと銅の周波数スペクトルの重なり具合が、アルミの値より、大きな値を示しており、周波数スペクトルの重なり具合が大きいほど、静止摩擦係数は大きくなるとの仮定1が正しいことを示唆している。以上の結果から、

静止摩擦係数の大きさと表面凹凸のピッチとの関係について、違った物質の間において、同じピッチの凹凸の割合が大きい2つの物体ほど、静止摩擦係数が大きくなる
との考え方ができるのではないかと思われる。

問題点

ステンレス同士の静止摩擦係数が0.16と最も小さく、他物質との組み合わせでの静止摩擦係数よりも小さい。この実験結果に対して、重なり具合を計算しても、同一物質の場合は1となるので、解釈ができない。

仮説にそって考えれば、同一物質の場合、表面の凹凸が完全に一致するであろうから、従って、予測(2)のように、他の物質との間での静止摩擦係数より大きくなるはずであるが、ステンレスの場合には当てはまっていない。この理由として、

仮説で示した、凹凸のピッチと静止摩擦係数の関係は、ステンレスのような合金ではあてはまらない。

ステンレスのように表面に強力な被膜が存在する場合は、その被膜の性質が静止摩擦係数に影響して現れる。

我々が仮説で考えた、表面の凹凸とそのピッチによる静止摩擦係数の影響は間違っている。
等が考えられるのではないかとの意見がでた。

の意見に対して、合金と単体で違いが生じるのか、別の試料を用いて再実験する必要がある。
今後の研究にゆだねる事にした。

の被膜に関しては、ステンレスだけではなく、アルミにも同じように存在するから、ステンレスだけが仮説に合致しないというもおかしい。しかし、ステンレスとアルミでは被膜の性質も違うはずであるからこれが原因とも考えられる。

に関して、違った物質間の静止摩擦係数の大小と、重なり具合の解析結果の間には、仮定2にそった結果も得られている。しかし、今回行った新しい実験方法・解析結果に問題点はないのか、確認することにした。

(1) ゴムとの重なり具合の計算

ゴムのラバーの周波数スペクトルを測定してあるので、ゴムと銅、アルミ、ステンレスの間で、重なり具合の計算を行い、静止摩擦係数の大小関係と比較した。

組合せ	M
ゴム - 銅	0.821
" - アルミ	0.819
" - ステン	0.784

計算結果から、それぞれの重なり具合Mは上の表のようになる。従って実験・解析の方法に問題がないとすれば、予想される静止摩擦係数の大小関係も、この表の順になるはずである。

組合せ	静止摩擦係数
ゴム - 銅	0.916
" - アルミ	0.863
" - ステン	0.796

上の表は測定した静止摩擦係数である。静止摩擦係数は、解析の結果、予想した大小関係になっている。しかし、静止摩擦係数の測定は不安定であり、値自体もかなり似かよっている。偶然、Mの大小関係と一致した可能性も高い。

(2) スティック・スリップか？

針で表面の凹凸を調べる実験で得られたデータは、表面の凹凸を反映した音ではなく、ガラスを爪でこすった時に等に出る音、いわゆるスティック・スリップの音を拾ったのではないかとの指摘を受けた。

スティック・スリップは、動摩擦力 < 静止摩擦力のために生じる現象であるが、針と金属資料の間でこの現象が生じ、発生した音を表面の凹凸で生じた音として測定解析したとすると、全く間違った実験を行ってしまったことになる。

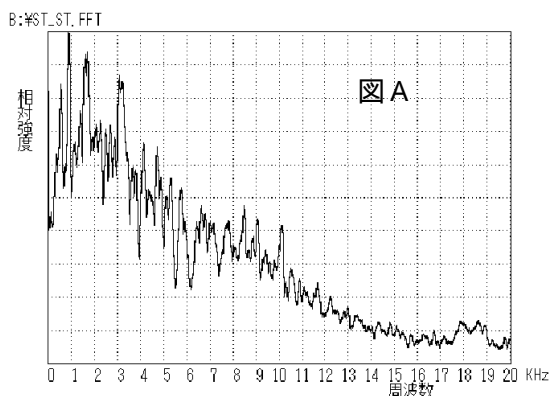
この点を確認するために、針でトレースする時の半径を今までの約 8 cm から 4 cm に変え、その他は同じ条件になるようにして実験を行った。半径を約半分にしたのであるから、ピーク波長はやはり半分になるはずである。

再実験の結果

資料としてステンレスを使って再度実験を行った。この時、針をおろしトレースを開始すると、始め、全く音が聞こえずトレースしていたものが、時間と共に、徐々に耳でわかるような音が聞こえてくることに気づいた。シンクロスコープでカートリッジからの信号をモニターすると、始めは周期・振幅ともに不規則な波形が観測できるが、振幅が徐々に増大し、音が聞こえ始めると振幅・周期とも一定した波形が見られた。明らかにトレースした時間と共に信号が変化した。

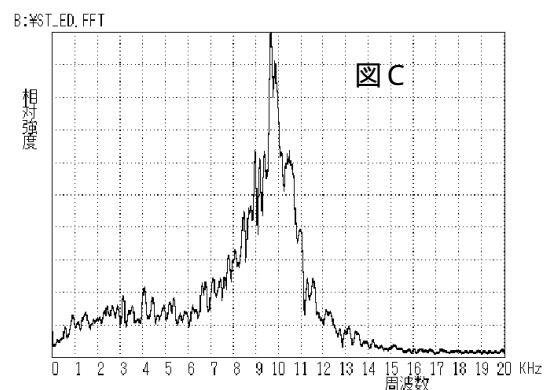
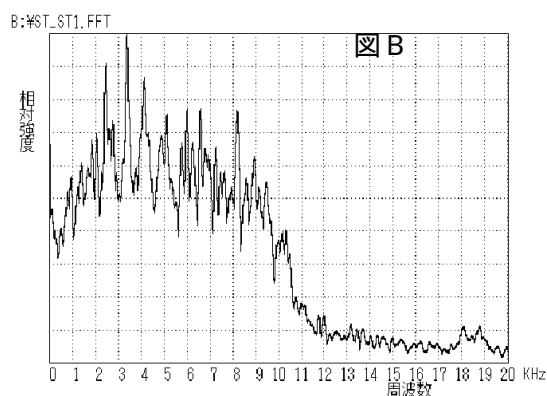
図Aは、トレースを始めた最初に得られる信号をFFTで解析したものである。

このスペクトルは、特に目だった特徴はなく、むしろ全くランダムな信号のスペクトルのようである。



図Bは、数十秒トレースしたあとに測定した信号のスペクトルである。さらに、図Cは、数分間トレースを行った後に得られる信号のスペクトルである。この時、金属資料には、針によって付けられた傷が明らかに観察され、耳に聞こえるような音が発生していた。このように時間と共に測定される信号が変化している。

図Cの状態、初めてピークが現れたが、得られたピークの周波数は約9.6 kHzである。約8 cmの所をトレースし、実験で使った信号では8.8 kHzであるので、このことから、重なり具合の計算に使ったデータは、表面の凹凸を測定していなかったことがわかった。

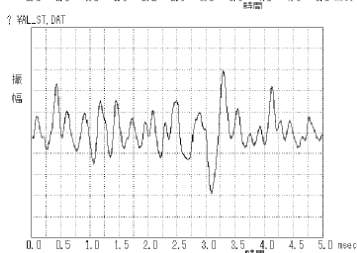
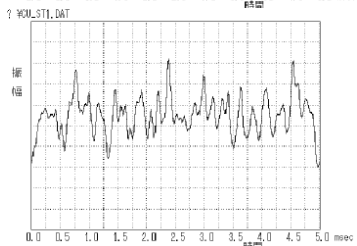
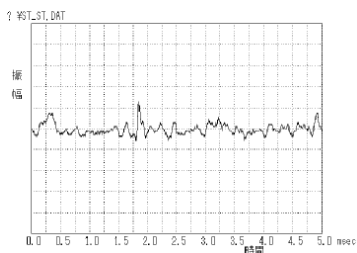


スティック・スリップか？

時間と共に波形が変化していく状況を考えると、硬いダイヤモンドの針によって資料に傷が付き、その傷の凹凸を測定していたようである。周期的な波形が得られたのは、やはりスティック・スリップと同じメカニズムが働いたためではないかと考えられる。しかし、信号の時間変化を考えると、この影響はそれ程強くなく、積算された結果、初めて顕著になったと考えられる。何故ならば、図Cのスペクトルのような特定の周波数が強まるのは、何回か同じ所をトレースしてはじめて生じている。このメカニズムは、レコード針（カートリッジの発電機構）が持つバネ定数 + 金属資料の持つバネ定数（堅さ）と針先の質量で形成されるバネ振り子の共振周波数に関係した、小さな振動によって、まず、金属資料がわずかに削られ、2回目以降のトレースでは、前に刻まれた凹凸の周波数に、系は共振するので、金属資料には、その周波数に対応した波長の溝が、徐々に大きく彫り込まれていく、と考えられる。従って実験に使ったデータは、必ずしもスティック・スリップによって現在発生している音を、測定したとは言いがたい。

表面の凹凸は測定できないのか？

測定される信号は、トレース回数によって変化していく。回数の少ないうちは、スティック・スリップの影響は積算されていないので、無視できると思われる。この事は、シンクロスコープで左右のチャンネルの信号をリサーチで観察すると、最初のうちはビームの軌跡は円状に複雑に動き回るが、（このことは、針先は複雑に上下左右に動いていることを意味する。左右のチャンネルの信号の位相は、針が上下に動くとき逆位相、左右に動くとき同位相になる。）時間がたつと、同位相で、しかも振幅が大きくなる事実から考えて、トレース最初の信号は、資料表面の凹凸を素直に反映した



た信号が得られていると思われる。

次の波形は、トレースを開始した直後に得られた信号の波形である。3つとも増幅器の増幅度は同じで、従って波形の振幅の絶対値は不明であるが、3つの資料の表面の凹凸の大きさの、相対的な大きさは正しく再現されている。波形の振幅を見ると、ステンレスからの信号は、他の2つに比べて小さく、それだけ滑らかに表面加工がなされていることが分かる。しれに対して、銅とアルミニウムの振幅は同程度の大きさで、ステンレスに比較するとかなり大きいことが分かる。レーザー光線をあてたときの反射パターンが似かよっていたのはこの為である。

注意) 上から ステンレス, 銅, アルミ

重なり具合Mの再計算

トレース開始当初に得られて信号は、正しく資料表面の凹凸を示していると考えられる。そこで、各金属（ステン、アルミ、銅）の信号を計測し、FFT解析し、重なり具合Mを再度計算した。

摩擦係数（測定値） 重なり具合M（計算値） 重なり具合M（再計算）

	アルミ	銅	ステン		アルミ	銅	ステン		アルミ	銅	ステン
アルミ	0.82	0.35	0.23	アルミ	1	0.99	0.93	アルミ	1	0.77	0.93
銅		0.36	0.27	銅		1	0.94	銅		1	0.87
ステン			0.16	ステン			1	ステン			1

レコード針による測定では、ある金属を特徴づける様な独特な、マイクロな凹凸は得られず、もっとマクロな、例えば表面加工で生じたであろうランダムな凹凸しか得られない。測定の分解能は十数 μm であるが、色々な表面加工での仕上がりの滑らかさを調べてみると、数 μm 程度には容易に得られるようである。

重なり具合を再度計算した値を考察すると、静止摩擦係数との間に相関があるとは考えづらい。

所で、静止摩擦係数と表面の凹凸に関して、実は混乱があった。予測1, 2や、仮説で示した考えを実証しようとする事は、各々の金属固有の凹凸が存在することを暗に期待していた。つまりその大きさは必然的に、原子・分子のレベルになるであろう事は容易に想像できる。しかし、レコード針で測定できる大きさは理論的に考えて、十数 μm 程度の分解能であるから、表面加工でできた程度の凹凸のオーダーしか測定できない事を意味する。従って、静止摩擦係数と凹凸の相関関係は得られなくとも当たり前である。

静止摩擦係数と凹凸の大きさ

分解能十数 μm の測定で得られた凹凸のパターンでは仮定1, 2を裏付ける様な静止摩擦係数と凹凸の関係は得られない。このことは、仮説が正しいとすれば、もっとマイクロなオーダーの凹凸が関係している可能性がある。つまり、摩擦メカニズムを含めて、仮説を証明するためには原子・分子の大きさの凹凸を考える事が必要なのかもしれない。しかし、このレベルになると、凹凸だけで静止摩擦係数の値が決まってくると考えるのは、無理があると思える。

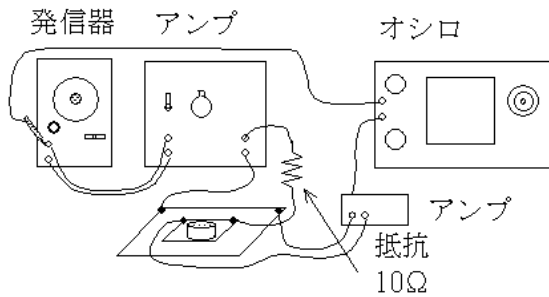
実験 4

接触抵抗の測定

目的

接触抵抗は、接触面積に反比例すると考えられる。仮説に従えば、静止摩擦係数の大きさと、接触面積には相関関係があるはずである。そこで、接触抵抗を荷重を変えて測定し、その変化から上下の面の凹凸の噛み合いを、電気抵抗を通して観測し、静止摩擦係数と表面の状態の関係を考察する。

実験方法



発信器で 1 K H z の正弦波信号を発信させ、その信号をパワーアンプで 8 V まで増幅する。増幅器の出力に、直列に 10 の抵抗をつなぎ、図のように上下の金属に接続する。接触抵抗の測定は、上下の金属板の反対側の点から信号を取り出し、アンプで増幅し、オシロスコープで電圧を測定した。測定は導線などの抵抗の影響を受けないように、図のような 4 端子法で行った。なお、電圧はすべて振幅で測定した。

接触抵抗は 10 に比較して無視できるほど小さいので、回路に流れる電流 I は 0.8 A と考えてよいので、接触面の両端に発生した電圧を e とすると、接触抵抗 r

は $r = \frac{e}{0.8}$ で計算することができる。

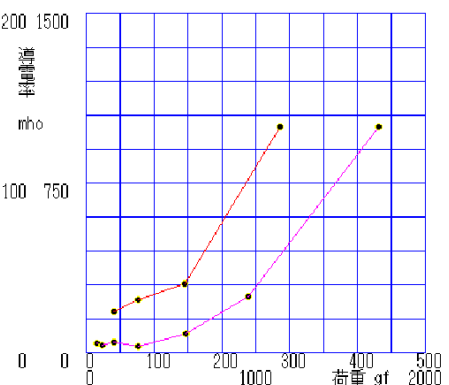
荷重を変えて、電圧を測定し、この式で接触抵抗を計算した。

実験結果

銅 - 銅			ステンレス - ステンレス		
荷重 gf	抵抗 m	導電率	荷重 gf	抵抗 m	導電率
41	5.5	182	60	175	5.7
76	4.3	233	95	225	4.4
146	3.3	303	165	163	6.1
286	1.0	1000	305	275	3.6
			585	89	11.2
			955	30	33
			1725	7.5	133

実験の結果、接触抵抗は表のようになった。また接触抵抗から導電率を計算した。実験は極めて再現性が悪く、荷重が小さい時は特に、小さな振動を与えても、すぐに変化してしまった。この影響を少なくするために、荷重を増やすと、接触抵抗が小さくなりすぎ、測定が困難になった。次のグラフは導電率と荷重のグラフである。

上のグラフはそれぞれの場合、 x 、 y 軸の値が大きく違うので、スケールを変えて比較しやすいようにまとめた。(上が銅、下がステンレス)

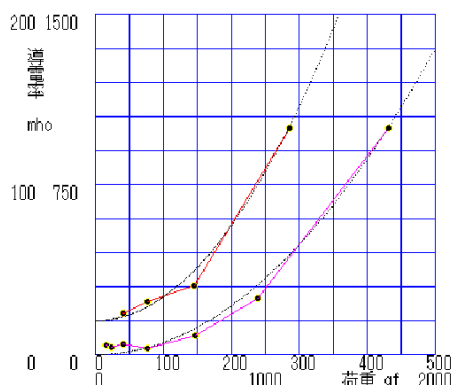


荷重と導電率の間にどのような関係があるか調べるために、導電率が荷重の1乗、2乗、3乗に比例するとして比例定数を計算し、最も確からしい関係を探った。

銅 - 銅					ステンレス - ステンレス				
荷重 gf	導電率 mho	$=am^1$ の a	$=am^2$ の a	$=am^3$ の a	荷重 gf	導電率 mho	$=am^1$ の a	$=am^2$ の a	$=am^3$ の a
41	32	0.78	19×10^{-3}	4.6×10^{-4}	305	3.6	12×10^{-3}	3.9×10^{-5}	1.3×10^{-7}
76	83	1.09	14×10^{-3}	1.8×10^{-4}	585	11	19×10^{-3}	3.3×10^{-5}	5.6×10^{-8}
146	150	1.03	7×10^{-3}	4.8×10^{-5}	955	33	34×10^{-3}	3.6×10^{-5}	3.9×10^{-8}
286	850	2.97	10×10^{-3}	3.6×10^{-5}	1725	133	77×10^{-3}	4.5×10^{-5}	2.5×10^{-8}

計算した比例定数 a はこの表のようになった。なお、ステンレスの場合 305 g 以上の荷重でのデータを使った。銅の場合、測定値をプロットしたグラフを見ると、y切片が 150 程度あるので、導電率' = 導電率 - 150 で計算した値を使って見積もった。

この表から考えて、導電率は荷重の自乗に比例すると解釈するのが、ステンレスの場合、最も妥当である。銅に関しても自乗に比例すると考えるのが妥当である。しかし、荷重286gfを除けば、単純に荷重に比例するとも結論づけられる。



このグラフは銅（上）、ステンレス（下）の測定点に、荷重 m の自乗に導電率が比例するとして 銅： $= 10.5 \times 10^{-3} \times m^2 + 150$

ステンレス： $= 4.5 \times 10^{-7} \times m^2$ の式で計算しグラフを重ねて比較した。

考察

「摩擦力は接触している面積には関係しない。」となっているが、電気抵抗の測定から、垂直抗力が大きくなると、接触抵抗は小さくなる。このことから、見かけは、接触面積に変化は無いが、実際は、上下の凹凸の接触する面積が増加していることがわかる。

摩擦力は真に接触する接触面積に比例すると考えるのが合理的である。従って摩擦力が垂直抗力に比例する理由は、荷重を増加させると、ミクロな接触面積が荷重に比例して増加するからである、と考えるのが自然である。また、導電率は接触面積に比例するはずであるから、摩擦の法則を説明するためには、導電率も荷重に比例して大きくなると考えられる。

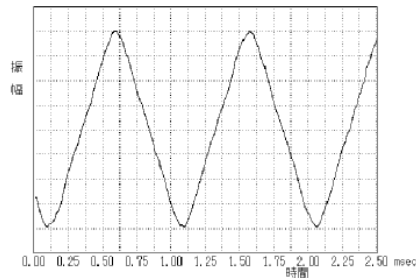
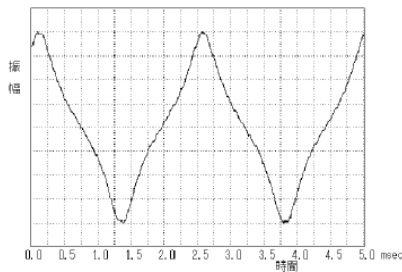
しかし、実験結果は導電率は荷重の自乗に比例しているもので、荷重の自乗に比例してミクロな接触面の面積が増加することになる。

摩擦の法則と、実験結果の導電率から単純に考えると、荷重を2倍にすると、真に接触する面積は4倍になるが、接触する面の面積が4倍になると摩擦が2倍になる。つまり、摩擦力は真に接触する面の面積の平方根に比例して増加する、と考えなくてはならない事になる。

意外な考察結果が得られた。実験の精度が不十分であったので、再度注意深く実験を行えば、違った結論に達する可能性もあるので、今後の課題とする。

接触抵抗の電圧依存

アルミニウム同士の接触抵抗を測定したときに、不思議な現象に遭遇した。接触抵抗の測定は、オシロスコープで行ったが、正弦波を加えているのに、接触面に現れた波形は図のように大変ゆがんでいた。(測定で使った1KHzの正弦波の場合、三角形のような波形になった。また周波数を下げると左下の図のように全く歪んだ波形に変化した。)



電流 A	抵抗	導電率
0.05	0.24	4.17
0.10	0.24	4.17
0.15	0.23	4.35
0.20	0.22	4.55
0.30	0.23	4.35
0.40	0.25	4.00
0.60	0.28	3.57
0.80	0.35	2.86
1.00	0.38	2.63

このようなゆがみが発生していることから、接触抵抗が電流によって変化していることが考えられる。この様子はリサージュ波形を観測しても認められる。(左下)そこで、接触面に流す電流を変えて接触抵抗を測定し、導電率を計算した。

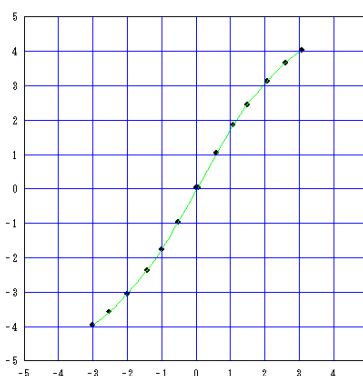
考察

アルミニウムほどハッキリとした変化はなかったが、ステンレスの場合も波形の一部が歪むときがあった。また、波形の歪みをリサージュで観察したとき、一本の線

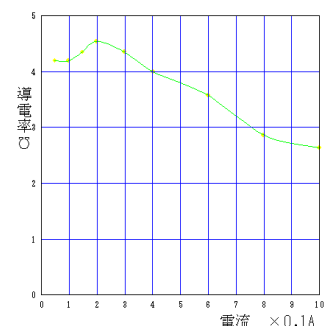
にならずループ状になるときもあった。このことは電流を増加させて行くときの接触抵抗と減少させていくときの抵抗とで違った値をとることを意味している。

このように接触抵抗は大変不安定で、特にアルミニウムやステンレスのように表面に強い被膜を作っている金属で顕著であると思える。(銅の場合現れなかった)

金属の摩擦を考えると、この被膜の影響はかなり大きく関係してくるはずであるから、銅と比



導電率の電流依存



較して、アルミやステンレスでは、複雑な結果が現れてくるはずである。

導電率の変化を、流した電流に対してプロットしたグラフを見ると、電流値が大きくなると導電率が小さく、つまり抵抗が大きくなっていることがわかる。これは、電球のフィラメントの抵抗変化と似ている。そこで、それに倣って接触抵抗の変化を考えてみる。

フィラメントに電流を流すと、抵抗値が大きくなるのは、発生した熱による温度上昇のためである。すると、アルミの接触抵抗が電流の値で大きくなるのは、上下の金属板の接触面が、ジュール熱によって加熱され、高温になるためと推察できる。

真の接触面の間には被膜が存在し、その面積は微少である。従って、電流が集中し、短い時間で、温度上昇と温度低下が繰り返され、抵抗値が変化して波形が歪んだと考えられる。ステンレスの場合、抵抗値のヒステリシス現象も見られたが、この理由は、ステンレスは熱伝導が悪いために、温度の低下が時間的に遅れて生じたと考えられる。波形のゆがみが、信号の周波数を少し下げた場合に顕著になったのも、熱の発散と加熱のタイミングがうまくあったためではないかと思う。

真の接触面の割合

このアルミニウムの抵抗値の変化から、上下の面の真の接触面積をこの結果から極めて大まかに概算してみる事にする。

ここで、次の定数を使って評価した。

$$\begin{aligned} \text{アルミニウムの抵抗値の温度係数} &= 4.2 \times 10^{-3} \text{ [1 / K]} \\ \text{アルミニウムの比重} &c = 0.88 \text{ [J / g \cdot K]} \end{aligned}$$

抵抗の変化は0.22 から、電流が1 A流れたときに0.38 まで変化した。このとき接触面で発生した電力を0.38 Wと仮定する。

抵抗の変化から、接触面の温度を計算すると、0.22 を0 の時の抵抗として計算すると、0.38 になったときの温度 t は

$$0.38 = 0.22 (1 + 4.2 \times 10^{-3} t)$$

より逆算して、 $t = 173$ となる。

1秒間の加熱で、173 になったと仮定して、発熱している部分の質量を計算すると、 $Q = c m t$ の関係より質量mを逆算して、 $m = 2.5 \times 10^{-3} \text{ g}$ と見積もられる。($c=0.88[\text{J/g}\cdot\text{K}]$, $t = 173$, $Q=0.38[\text{W}]$ より)

アルミの板の質量が10 gであったので、この結果をもとに、上下の面で接触に関係している部分の質量の割合は、 $2.5 \times 10^{-3} / 10$ で、約0.03%程度と見積もられる。

不的確な仮定を含み、大変大雑把な計算であるが、上下の面で、実際に接触している部分の割合は大変少ない事が推定できる。

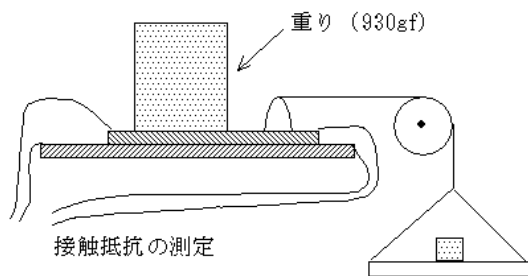
実験 5

接触抵抗の測定 (2)

目的

静止摩擦係数の測定では、横方向に力を加え、動き出したときの値から測定している。従って、この状態で上下の面の接触の状況を、接触抵抗から考察するには、同じように力を加えてゆき、接触抵抗を測定する必要があると判断した。そこで、資料に一定の荷重を加え、水平方向に引く力を変えて測定し、その変化から上下の面の凹凸の噛み合いを、電気抵抗を通して観測する。

実験方法



実験 4 と同じ回路で接触抵抗を測定するが、実験 4 では、試料の上に重りを置いたときの振動で抵抗値が変化する等、再現性が不十分であった。そこで、この図のように荷重を一定にし、水平に引く力を増加させながら接触抵抗を測定していった。

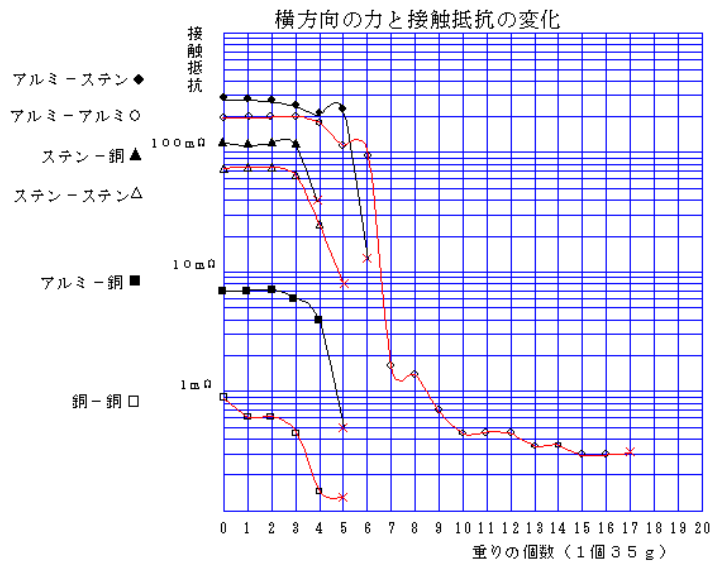
接触抵抗は試料を置いたときの状態で微妙に増減するので、ボールペンで重りを細かくたたいて、金属の接触面に発生する電圧が最大になった状態から、水平方向の力を徐々に増加させていった。

測定結果

銅 - 銅		ステン - ステン		銅 - ステン		銅 - アルミ		ステン - アルミ	
重りの数	接触抵抗 m	重りの数	接触抵抗 m	重りの数	接触抵抗 m	重りの数	接触抵抗 m	重りの数	接触抵抗 m
0	0.88	0	75	0	131	0	7.0	0	288
1	0.63	1	75	1	125	1	7.0	1	288
2	0.63	2	75	2	131	2	7.0	2	275
3	0.45	3	63	3	131	3	5.8	3	250
4	0.14	4	25	4	40	4	4.0	4	225
5	0.13	5	8			5	0.5	5	238
								6	13

注) 網掛けの所で、物体は滑り始めた。

アルミ - アルミ						組合せ	
重りの数	接触抵抗 m	重りの数	接触抵抗 m	重りの数	接触抵抗 m	導電率	
0	213	6	94	12	0.45	ステン - 銅	25
1	213	7	1.6	13	0.35	ステン - アルミ	77
2	213	8	1.4	14	0.35	ステン - ステン	125
3	213	9	0.69	15	0.30	アルミ - 銅	2000
4	188	10	0.45	16	0.30	アルミ - アルミ	3030
5	125	11	0.45	17	0.33	銅 - 銅	7692



考察

接触抵抗は、滑り出す瞬間に急に小さくなる。小さくなった状態で、水平方向の力を除いても、そのままの状態を維持する。電流をゼロにし、荷重をゼロにして初めて最初の状態に復帰する。

この現象から考えると、上下の面の真の接触面は、滑り出す直前に、お互いの面をそれぞれの面の突起部で、かじっていることが推察できる。その部分に電流が集中し、ジュール熱で面が軟化し、表面の被膜が削り取られ、本来の物質が、かみ合う、この様なメカニズムが働いているのではないかと推定できる。

導電率と静止摩擦係数の関係

導電率（接触抵抗の逆数）の測定結果を見ると、静止摩擦係数に関してたてた 予測「(1)同じ物質の静止摩擦係数は、大きな値を取る (2)違う物質間での静止摩擦係数は、同じ物質の静止摩擦係数より小さい」において、静止摩擦係数のかわりに、導電率という全く違った物理量で置き換えた実験結果が得られた。つまり、

(1)同じ物質の導電率は大きな値をとる。

(2)違う物質間での導電率は、同じ物質の導電率より小さい

の関係になっている。

体積抵抗率は、ステンレス > アルミニウム > 銅の関係にあるが、金属を組み合わせるとして接触抵抗を測定すると、必ずしもこの関係になっていない。

	アルミ	銅	ステン
アルミ	0.82	0.35	0.23
銅		0.36	0.27
ステン			0.16

	アルミ	銅	ステン
アルミ	3030	2000	77
銅		7692	25
ステン			125

導電率が大きいということは、それだけ良く上下の面が、かみ合っていることを示している。アルミニウムと銅を組み合わせた場合、アルミよりも体積抵抗率の小さい銅を接触させた時の導電率が小さくなっているのは、噛み合いが少ないためである。ステンレスと組合せた導電率の場合、静止摩擦係数の大小関係とは一致していない。

5 . まとめ

今回の実験で次の事が分かった .

実験 4 の接触抵抗の測定から , 荷重を増加させると接触抵抗が減少した . この結果から , 真に接触している面積は極めて少なく , 荷重を増加させるとその面積が増加することが確認できた . 静止摩擦力が垂直抗力に比例する事は , 垂直抗力が増加するのに従って , 真に接触する面の面積が増加するためであることが導かれる . 従って , 接触している面の表面凹凸のピッチが同じであれば , 静止摩擦係数が大きくなるとした仮説を間接的に支持している .

実験では , 3 種類の金属を用いたが , このうちステンレスを除いた , アルミニウム・銅の組合せで , 静止摩擦係数 , 実験 5 での導電率の大小関係は完全に一致した .

静止摩擦係数			導電率		
	アルミ	銅		アルミ	銅
アルミ	0.82	0.35	アルミ	3030	2000
銅		0.36	銅		7692

実験 2 でアルミニウムと銅のレーザー光線の反射パターンがにかよっていた . また , 面の接触によって生じる接触抵抗 (導電率の逆数) の値を比較すると , 明らかに面の接触という観点かに関しては , 予測 (1) (2) (3) を間接的に支持する結果が得られている . そして , 大小関係が静止摩擦係数と一致した事実から考察すれば , 仮説がある程度的を得ていることが裏付けられると思う .

実験 5 の接触抵抗の測定で得られた各金属管の導電率の値は , 予測 (1) (2) (3) の静止摩擦係数の代わりに , 導電率を置き換えて完全に当てはまった . 接触による導電率であるから , 金属間の接触の状態を反映していると考えられる . その結果 , 同じ金属では導電率は大きく , 違った金属の間では同じ物質よりも小さくなっているのであるから , 同じ物質ほど良く接触していることになる .

レコード針による表面の測定の再実験において , 十数 μm 程度の分解能の範囲では表面の凹凸と静止摩擦係数の間には , 静止摩擦係数と導電率にあった相関関係は認められなかったが , 我々が立てた表面の凹凸と静止摩擦係数の関係は , 導電率が面と面の接触の度合いを表していると考えれば , 静止摩擦係数と導電率に相関があるのだから , 少なくとも良く触っている物体間の静止摩擦係数は大きくなる . つまり , 仮説を裏付ける実験結果が得られている .

すると , 静止摩擦係数はどの程度の大きさの凹凸で左右されるのかのヒントが得られる . つまり , 少なくとも十数 μm 程度の凹凸が静止摩擦係数に影響するのではなく , もっと小さなレベル , おそらく原子・分子のレベルの凹凸ピッチが関係すると思われる . そしてこの様な考え方をすると , ステンレスの静止摩擦係数の振る舞いが仮説と食い違うことが多かったが , この様な合金の場合 , 分

子・原子の凹凸に規則性がなくなり、仮説とは食い違う傾向を示すとも考えられる。

接触抵抗の測定から、金属資料間の接触が極めて不安定であった。摩擦が大変不安定であることが接触抵抗の測定でも認められた。

静止摩擦係数は垂直抗力に比例する。実験 4 で荷重を変えて接触抵抗の測定を測定した結果、導電率は、荷重の 2 乗に比例する結果になった。導電率は接触面積に比例すると考えると、この結果から、摩擦力は真に接触している面の面積の平方根に比例することになる。

摩擦力が真に接触する面の面積の、平方根に比例する結果は、摩擦を単に凹凸のかみ合わせで解決できる問題ではないことを暗示しているとおもう。 のまとめとも関係するが、何故ならば、摩擦が面積に比例するとなれば単純に引っかかりが荷重に比例して増加すると結論づけてもいいが、平方根に比例するという結果は、摩擦のメカニズムをもっと別の要因に求めるのが素直な考え方である。つまり荷重を増加させることで真に接触する面積が増加し、上下の面の、その他の部分の間隔が荷重の増加とともに、接近することを意味するから、摩擦力を生み出す本質的な力として、原子・分子間に働く力等を考えなくてはいけないと思われる。

接触抵抗の測定で、接触抵抗の電流に対する非直線性が観測できた。いったいどのような理由で生じるのか、更に詳しく実験を行い研究したい。希望的観測であるが、摩擦力の本質が反映された結果ではないのかと思われる。