

摩擦の研究(2)

栃木県立宇都宮清陵高等学校 科学同好会

高橋久徳 渡邊 潤 本多恵一 横山健次

1. 昨年度の研究の成果と問題点

昨年度の研究は、

「同じ物質であれば、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、違った物質では、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」

との仮説を基にして、接触する2つの物体の凹凸の噛み合いが、摩擦係数の大小関係を説明するものであると考え、摩擦のメカニズムを物体表面の凹凸から解明しようとする立場で研究を進めた。具体的には、アルミ、銅、ステンレスの3種類の金属試料を用い、各々を組み合わせた場合の静止摩擦係数を測定し、同時に、各々の試料の表面状態を、レコード針によるトレース、レーザー光の反射パターン、さらに接触抵抗の測定を通して、研究を行った。

昨年度の問題点・疑問点

昨年度の研究で最大の問題点は、各試料間で生じる静止摩擦係数の大きさの違いが、どのようなメカニズムで生じるのかを解明することが出来なかった事であると思う。さらに実験の中で以下の疑問点・問題点が生まれた。

- ア. レコード針による表面の測定の実験において、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特に、相関関係は認められなかった。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。しかし、このレベルの距離では、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。
- イ. 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。正弦波電流を流したが、接触抵抗に発生する電圧波形は歪んでいた。詳しく測定すると電流を増加させると接触抵抗は増加していた。
- ウ. 摩擦力は垂直抗力に比例する。そこで、垂直抗力を変えて接触抵抗の測定をした結果、導電率は、垂直抗力の2乗に比例する結果になった。垂直抗力に比例するとなれば単純に噛み合う面の面積が垂直抗力に比例して増加すると結論づけられ、静止摩擦係数の大きさを真に接触する面の面積に比例すると結論づけられたが、必ずしもそうとはならなかった。
- エ. 同じ物質であれば、表面の凹凸も同じであり、違った物質間の静止摩擦係数より大きくなるはずであるが下表のように、実験結果は必ずしもそうになっていなかった。また各試料の表面凹凸を定量的に測定することにも成功しなかった。

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

昨年度の研究成果

- ア. 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。つまり、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。つまり、静止摩擦力が垂直抗力に比例する事は、垂直抗力の増加で、真に接触する面の面積が増加するためである。また、導電率の大小関係と静止摩擦係数の大小関係が次の表のように一致した。導電率は接触している面の面積に比例すると考えるのが自然であるから、この実験結果は仮説を導電率の大小関係からある程度証明したと考えている。

静止摩擦係数			導電率 (mho)		
	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

- イ. 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。

2. 今回の研究内容

真に接触する面積が大きいほど、摩擦力が大きくなるとする考え方は、荷重にたいする接触抵抗の測定結果などから昨年度確認できた。(接触抵抗と静止摩擦係数は関連が強い。同種の金属で考えた場合、接触抵抗が小さいほど摩擦力は大きい事を示している)そこで、今回の研究では、接触抵抗の測定を中心にを行い、昨年度の研究結果をふまえ、以下の内容を研究の出発点として、摩擦のメカニズムを探ることにした。

金属資料の凹凸を測定できないのであれば、逆に試料表面に凹凸をつけ、静止摩擦係数を測定し、凹凸のピッチと静止摩擦係数との相関関係を積極的に探してみる。

スイッチの接触が悪くなった時、接点に接点復活剤と称して潤滑剤(油ならどのような物でも効果があると言われている)を塗布すると、接触が良好になる事が知られている。従って、接触抵抗と静止摩擦係数の実験結果から予測すれば、接触する面の間に油を塗る事で、常識とは矛盾するが、静止摩擦係数が大きくなることが予測できる。この事から、摩擦に対する表面に付着する物質の影響を考察する。

金属の硬さと摩擦係数の関係を調べるつもりで、柔らかい金属の代表である鉛を使い実験を行った時、奇妙な現象を発見した。2つの鉛の面を強く擦りあわせると、くっ付いてしまったのである。この事実から摩擦に関して次の様な事が思い浮かんだ。静止摩擦係数の大小は凹凸で説明できると考えてきた。つまり、凹凸が一致すれば真に接触する面積が大きくなるために μ が大きくなるとの考え方であった。しかし、接触する面と面との間に働く力に関しては、昨年度、全く考察していなかった。この力はおそらく大変小さい力であると思うが、真に接触する面の面積が大きくなれば測定できる程度の大きさになると考えた。そこで、真に接触する面の面積は極めて小さく、荷重を加えると、接触する面積が増加し、 $F = \mu N$ が成り立つ。すると、荷重をかけ続けると、それ以上接触する面が増加しなくなる限界があるはずで、接触抵抗の値の変化から限界を見極める事が可能である。そしてこの状態になると、面を上下方向に引き離そうとしたときに目に見える大きさの力が生じるのではないか、そしてこの力こそが摩擦力を生み出す本質的な力のはずであると考えた。そしてこの予測を確認することにした。

3 . 研究内容の背景

昨年度は、表面の凹凸のかみ合わせによって摩擦力が説明できると、ある程度純粋に力学的な要素だけで摩擦力を考えた。また、どのように考えればよいか見当がつかなかったが、原子・分子の間に働く力が関係するのではないかとも思った。今回は、その力として物質表面に存在する荷電粒子間に働くクーロン力が摩擦の源でないかと考えた。なぜならば摩擦電気は、物質表面近くに荷電粒子が局在していて、擦ることによって、電荷がはぎ取られる事で生じるであろうから、物体表面には荷電粒子が存在し、その電荷に働く力により摩擦力が生じると十分に推定できると考えたからである。従って単に凹凸のかみ合わせだけでは摩擦は解決できないであろうと考えて、今回の研究に取り組んだ。

昨年度の研究で接触抵抗に発生する正弦波信号が大変歪んでいたことが気になった。発生した試料はアルミニウムとステンレスであり、銅では起こらなかった。おそらく表面の酸化膜の影響であると思うが、この酸化膜が摩擦に影響するのではないかとこの予想がたった。この膜の存在で、接触抵抗も大きく影響されるであろうから、接触抵抗で摩擦の研究を行う上で、この膜の性質を調べることも重要であると考えた。

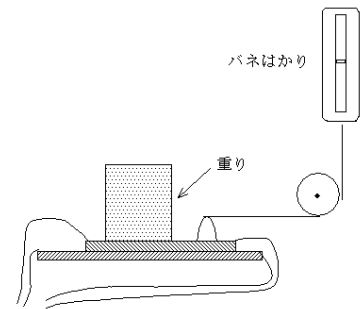
4 . 実験

実験 1

静止摩擦係数の測定

目的

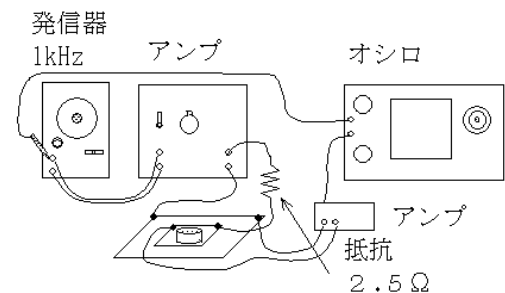
アルミニウムの試料に、紙ヤスリで強制的に傷を付け、静止摩擦係数を測定する。試料には、600番、1200番の紙ヤスリで傷を付けた物、及び傷を付けない物を用意して、それらの試料の間での静止摩擦係数を測定し、表面凹凸の類似性と静止摩擦係数の関係を調べる。



実験方法

図のように、接触抵抗を測定しながら静止摩擦係数を測定する。接触抵抗の測定は、1kHzの正弦波を用い、ピーク値で2Aの電流を流し、接点に発生する電圧をシンクロスコープで測定し、接触抵抗を計算した。

静止摩擦力の測定は、重りの重さを80gf、200gf、400gfと変え、各々の重さで静止摩擦力を3回計測し、平均値を求めた。



実験結果

紙ヤスリの番数と静止摩擦係数

	0	600	1200
0	0.54	0.40	0.29
600		0.24	0.26
1200			0.24

注意

- ・ 0とは、傷を付けていない場合
- ・ 600,1200とは紙ヤスリの目の番数

紙ヤスリの番数と接触抵抗 (m)

	0	600	1200
0	11.0	4.3	4.7
600		26.0	4.5
1200			7.1

注意

- ・ 接触抵抗は、測定中の最小値を計測した。

実験結果の考察

同じ番数の紙ヤスリで傷を付けた試料間の静止摩擦係数が大きくなる事は見受けられない。傷を付けていない試料との間の静止摩擦係数が特に大きくなっている。

600 - 1200の組合せでの静止摩擦係数と接触抵抗の大小関係は、昨年度の研究結果を再現し、静止摩擦係数が大きくなると、接触抵抗は小さくなる傾向が見られる。(下表参照のこと)

600			1200		
	μ	m		μ	m
600	0.24	26	600	0.26	4.5
1200	0.26	4.5	1200	0.24	7.1

しかし、傷を付けなかった試料は昨年度の結果とは違った結果になっている

試料に紙ヤスリで傷を付けたが、傷の間隔は殆どランダムで、傷の深さが番数で違う程度であったようである。従って、昨年度の仮説、ピッチが一致すると μ が大きくなるとの仮説を確認する実験には不適當であった。しかし、傷を付けなかった試料が特異的な結果を示したことは、膜の影響ではないかと思う。

考察

実験としては必ずしも成功ではなかった。しかし、 μ と接触抵抗の間にあった相関が、傷を付けなかった試料で、全くない理由は次の様に考えた。

傷を付けた試料は表面がささくれだっていた。おそらくその突起部分同士が接触した。そして、面に横方向に力が働いた時、その突起部分が削り取られる現象が生じたと考えられる。そ

の結果丁度，面と面の間にコロを入れた状態になり，静止摩擦係数が小さくなったと思われる．

昨年度接触抵抗の測定で非直線性が観測された資料はアルミニウムとステンレスであった．今回の試料はアルミニウムである．同じ現象がやはり生じた．アルミニウムは表面に酸化膜が生じ腐食しにくいと言われているが，ヤスリで削った試料は，酸化膜が接触するところと，地のアルミが露出した部分とがあったと考えられる．なお，昨年度の研究で，滑り出す直前に接触抵抗が最小になったが，引く力を増大させながら滑った時の値であり，今回の実験とは測定方法が違っていた．

この様に考えると，昨年度は，深く考察してこなかったが，金属表面の酸化膜の摩擦に対する影響を考慮する必要があると思われる．昨年度の実験で確認した結果．

接触抵抗の非直線性

接触抵抗は物体が滑り出す直前に小さくなる

の2点はアルミニウムの酸化膜の影響ではないかと考えられる．

実験2

油を塗布した場合の静止摩擦係数の測定

目的

静止摩擦係数と接触抵抗には相関関係があることが，昨年度の研究で判っている．接触抵抗が小さいほど静止摩擦係数は大きくなる．所で，接点の接触抵抗を小さくする目的で接点復活剤（油）を使うが，この相関関係から考えると，油を塗布することで静止摩擦係数が大きくなることを示唆する．一般常識からすると矛盾する．

そこで，前回の研究から予測される現象を，実験で確認することにした．

実験方法

実験1と同じ方法で，接触抵抗を測定しながら静止摩擦係数を測定する．試料の接触する面には商品名CRC55と言う潤滑剤を均一に塗布した．

実験結果

紙ヤスリの番数と静止摩擦係数

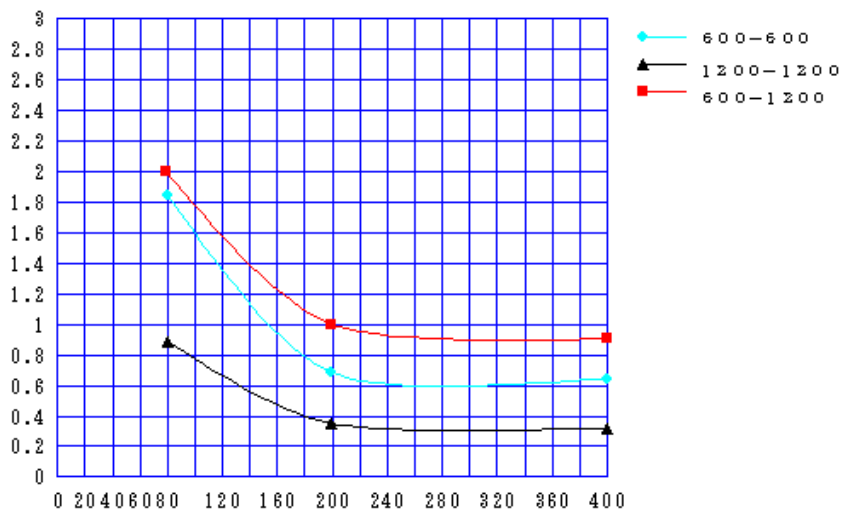
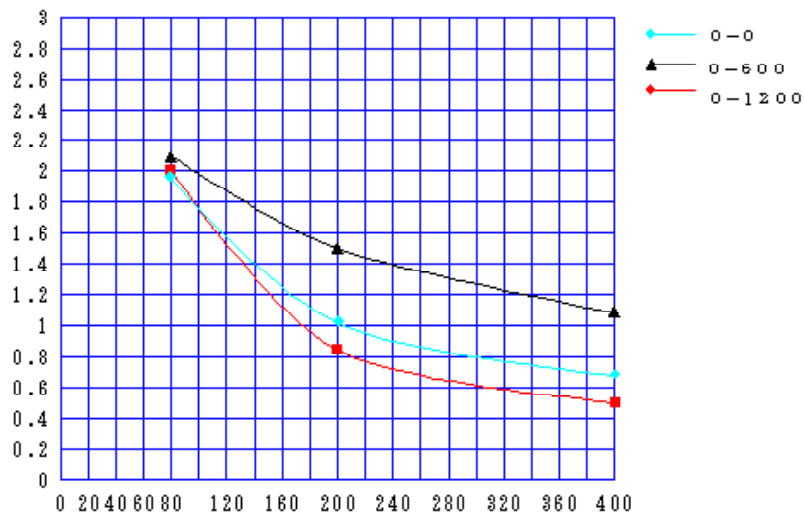
	0	600	1200
0	1.22	1.45	1.11
600		1.02	1.37
1200			0.53

注意
・0とは，傷を付けていない場合
・600,1200とは紙ヤスリの目の番数

紙ヤスリの番数と接触抵抗 (m)

	0	600	1200
0	26.0	16.0	6.5
600		9.0	7.5
1200			12.0

注意
・接触抵抗は，測定中の最小値を計測した．



グラフ 1

実験結果の考察

静止摩擦係数は全て大きくなっている。潤滑剤を入れると摩擦は小さくなるのが常識であると思うが、静止摩擦係数は大きくなった。

実験では見かけの接触面積は 100 cm^2 あり、表面に均一に潤滑剤を塗布した。その結果、油の粘性の為に、試料がへばりつき静止摩擦係数が大きくなったと思われる。グラフ 1 は、静止摩擦係数の大きさが、荷重によってどのように変化したかを示したのもである。荷重が増加するほど μ の値は小さくなる。試料のうちで、600, 1200番の紙ヤスリで傷を付け実験を行ったグループは、400 gf の荷重では、静止摩擦係数がほぼ一定値になっている。これは荷重に無関係な一定の力が働いているためと考えられる。

ところで、接触抵抗は、600-600の組合せ以外大きくなっている。潤滑剤を塗布するとスイッチの接触が良くなると聞いていたが、この実験では認められなかった。

考察

実験結果は予測を裏切る物であったが、接触抵抗の荷重による変化は潤滑剤を塗布する前は大きく変化（ランダムに）したが、その変動が小さくなった。従って接触抵抗は必ずしも小さくはならなかったが、接触抵抗の変動から考えて面の接触状態は安定したと考えられる。

油の粘性が関係し、荷重に無関係な一定の力が働いていると考えられる。そこで静止摩擦係数 f を

$$f = \mu N + \text{荷重に無関係な力} \quad \text{とし、2点の測定点を使って、}\mu\text{を求めて}$$

みた。

$$\begin{aligned} f &= \mu N + \text{一定の力} \\ f' &= \mu N' + \text{一定の力} \end{aligned} \quad \begin{aligned} N &= 80gf \\ N' &= 400gf \end{aligned}$$

- より f, f' は上記の点の摩擦力

$$\mu = \frac{f - f'}{N - N'} = \frac{f N' - f' N}{N N' - N' N}$$

μ の計算値

	0	600	1200
0	$\mu=0.33$ =130	$\mu=0.79$ =105	$\mu=0.13$ =150
600		$\mu=0.35$ =120	$\mu=0.63$ =110
1200			$\mu=0.16$ =55

計算結果を見ると、全ての場合において、一定の力、約100gfが作用していることが判る、これは明らかに油の粘性と考えられる。

この結果から考えて、接触面の間に、第3の物質が存在するとき、その物質の特性によって摩擦の法則が崩れる、つまり見かけの静止摩擦係数が垂直抗力の大きさに比例しなくなる現象が生じることもある事を示唆していると思う。

実験1の結果

	0	600	1200
0	0.54	0.40	0.29
600		0.24	0.26
1200			0.24

実験1の結果と静止摩擦係数の大きさを比較してみると、0-600、600-600、1200-600の組合せは油を塗布した場合には、静止摩擦係数は大きくなっているが、残りは小さくなっているので特に油を塗ったことで、必ずしも静止摩擦係数が小さくなったとは言えないという奇妙な結果になった。

実験 3

大きな荷重かけて、接触抵抗が変化しなくなる荷重を求め、次に荷重を除いた時に働く鉛直方向の力を測定する。

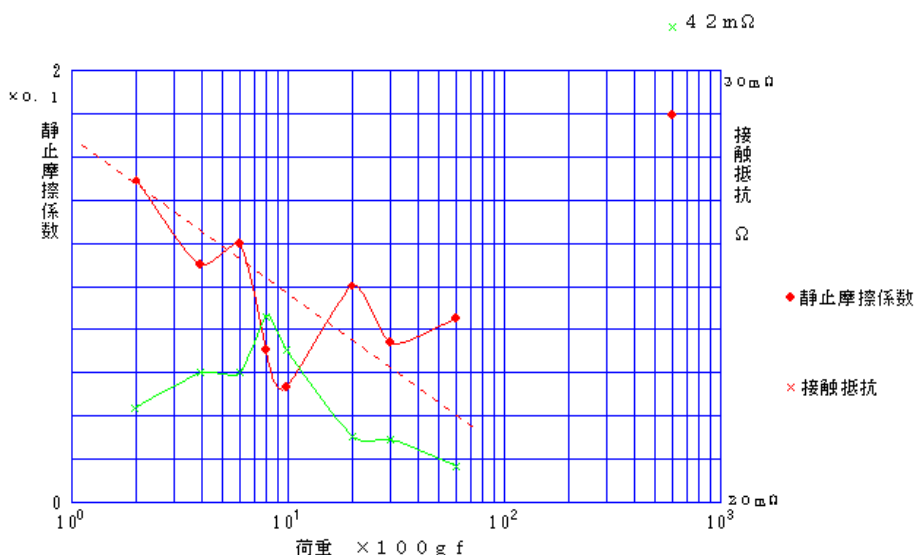
目的

真に接触する面積が大きくなれば μ が大きくなるとの考えられる。これは、接触する面と面との間に働く力が大きくなる為である。この力はおそらく大変小さい力であると思うが、真に接触する面の面積が大きくなれば測定できる程度の大きさになると考えられる。そこで、荷重をかけ続けると、それ以上接触する面が増加しなくなる限界があるはずで、接触抵抗の値の変化から限界を見極める事が可能である。そしてこの状態になると、面を上下方向に引き離そうとしたときに目に見える大きさの力が生じるのではないかと、そしてこの力こそが摩擦力を生み出す本質的な力ではないかとの予測から行った実験である。なお、この実験は、2つの鉛の面を強く擦りあわせると、くっ付いてしまった現象を基に行った。

実験方法

静止摩擦係数の測定と同じ様に接触抵抗を測定しながら静止摩擦係数を測定し、接触抵抗がこれ以上増加しなくなる荷重を測定し、次に、その時の荷重をかけどれだけの力を鉛直方向にかければ外れるかを測定し、面に働く力の大きさを測定する。利用する試料は柔らかい金属である鉛を用いる。試料の見かけの接触面積は約 3 cm^2 、荷重は 400 g f から 60 kg f まで加えた。接触抵抗は 2 A の電流を流し測定した。

実験結果



グラフ 2

実験の結果をまとめた物がこのグラフ 2 である。接触抵抗の細かな変動に対して、静止摩擦

計数は反対方向に変化している。この関係は、今までの実験結果と同じである。

次に静止摩擦計数の変化の傾向を見ると、徐々に小さくなり、一定値に収束する傾向が見受けられる。(荷重60kgでは逆に大変大きくなっている。実験では、60kgの荷重は人が重りとなって実験をしたので、細かな振動が常に生じていたのでこの様な結果になったと思われる。)

荷重を取り除いた後に残ると予測した吸着力を確認することは出来なかった。さらに、荷重の測定をあきらめ、万力で試料を十分に圧縮した後、この力が確認できるか実験したが、確認できなかった。

考察

静止摩擦計数の変化は、面の間に油を塗布した場合の変化に似ている。従って鉛の摩擦には、第3の物質が間に存在していると考えられる。

実験1で、表面に傷をつけた試料は、静止摩擦計数が小さくなる傾向があったが、鉛は柔らかい金属なので、摩擦が生じる時点で表面が容易に切削され、静止摩擦計数が小さくなったのではないかと考えられる。

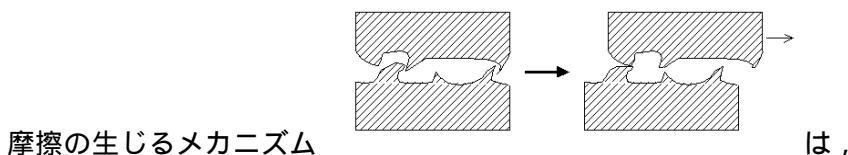
実験2の結果と同じように、静止摩擦計数が荷重の増加で減少し、一定値に近づいている。そこで実験2の解析と同じように、 $f = \mu N +$ と摩擦力を仮定して、 μ 、 W を計算した。計算結果は $\mu = 0.72$ $W = 160g$ であった。

$W = 160g (1.6N)$ の原因は、間に油を入れたわけではないから、鉛の凹凸の引っかかりにより、横方向の力で、鉛が引きちぎられる事で生じると考えた。すると、鉛の引っ張り強さを $0.15 \times 10^8 [N/m^2]$ (理科年表より) を使って、どれだけの面積が引っかかっているかを見積もると、

$$1.1 \times 10^{-7} [m^2]、1 \times 10^{-3} [cm^2] \quad \text{になる。}$$

利用した試料の見かけの接触面積は約 $2.5 [cm^2]$ であったので、実際に接触している面の面積は0.04%程度である。(昨年度の研究では、接触抵抗の変化から0.03%の値を得ている。)

荷重が小さい場合、鉛が引きちぎられる事で摩擦力が生じると考えることもできると思う。すると摩擦に対するイメージは次のようになる。



物質を接触させた場合、表面の細かな凹凸が噛み合うところが生じる、この割合は荷重に比例する。表面の凹凸が良く噛み合う場合、静止摩擦係数は大きくなる。（昨年度の仮説）また、摩擦力の力の源は、噛み合った部分が引きちぎられることで生じる。従って引っ張り強度の大きな物質で、表面の噛み合いが大きな物ほど静止摩擦係数は大きくなる事が予想できる。しかし、昨年度の実験結果を再度考察すると、次の表のようであった。

物質名	静止摩擦係数	引っ張り強さ $\times 10^8 \text{ Pa}$
アルミ - アルミ	0.82	0.95
銅 - 銅	0.36	3.0
ステンレス - ステンレス	0.16	9.0
鉛 - 鉛	0.72	0.15

（今年度実験）
（引っ張り強さ：理科年表より）

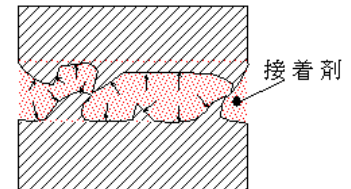
必ずしも、引っ張り強さが大きいと静止摩擦係数が大きいとの相関はない。むしろ柔らかい物質ほど静止摩擦係数が大きくなっている。（昨年度のアルミの試料は、厚さが今年度より薄く、柔らかい物であった）おそらく、柔らかい金属ほど、表面の状態は、色々な要因で傷が発生しやすいから、凹凸が大きく、引っ張りに対する力に弱くても、噛み合っている部分が多ければ、大きな静止摩擦係数が得られると考えられる。表面の噛み合いを再度考慮する必要もある。

実験4

試料表面に生じる接着力（分子間力？）を測定する

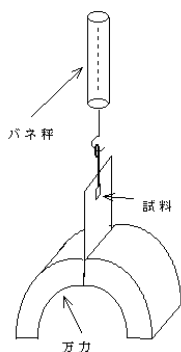
目的

接着剤はどのようなメカニズムで物質を接着するのかを調べたところ、接着剤が面の間に入り、面との間に働く分子間力によって、接着するとあった。そこで、各金属の面に働く分子間力を測定する目的で、接着剤で試料を接着し、引き離すために必要な力の大きさを測定した。この場合、言うまでもなく接着剤



と金属試料の間に働く分子間力であるので、実際の金属間に働く力ではないと思うが、分子間力の大きさのめあずになると思う。

実験方法



10 [cm²]の試料に、4 [mm²]の同じ金属試料を瞬間接着剤（商品名：アロアルファ）で接着し、接着面と水平な方向に力を加え、はがれる時の力の大きさを測定した。

試料は昨年度利用したアルミ，ステンレス，銅である。

実験結果

アルミニウム - アルミニウム	1 kg
銅 - 銅	2.6kg
ステンレス - ステンレス	6 kg

考察

昨年度の実験結果から、3種の試料の静止摩擦係数の大きさは、

$$\text{アルミ}(0.82) > \text{銅}(0.36) > \text{ステンレス}(0.16)$$

の大小関係であった。接着力の測定結果とは全く逆の関係になっている。

接着剤との分子間力の大きさ(この実験結果)と、金属同士の接触で、摩擦力を発生させる力とはメカニズムが少し違っているのかと考えることもできる。つまり、摩擦力の場合は、鉛の実験の様に金属の噛み合っている部分の破断による要素がかなりのウエイトを占めているのかもしれない。そこで、今までの実験の結果を使って判断すると次の様な仮説が考えられる。

接着力の実験では、表面被膜が接着剤と共に金属から引き離されてしまった。従って接着力の実験では被膜の強さが実験結果に反映されているのではないか？

他方、昨年の実験で得た静止摩擦係数は、今年の実験で、特に柔らかい金属の鉛を使った実験をもとに考えると、摩擦力として表面が引きちぎられる事で生じる要素もかなりの部分を占めていると考えられる。また、表面被膜が弱く、すぐに引き離されたとしてもとも、下地の金属間に働く分子間力が強ければ、静止摩擦係数は大きな値が得られるとも考えられる。

従って表面被膜の強さを実験することが必要である。さらに真に接触している(噛み合っている)面積の大きさを、昨年度のデータから再度解析して確かめる事も必要であると思われる。

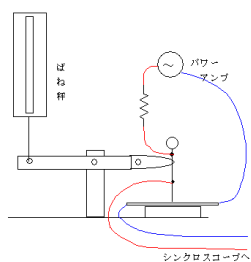
実験5

表面被膜の強さの測定

目的

被膜の強さを比較するために、金属試料に針を押しあて、針にかける荷重を増加させ、被膜が破れることで変化するであろう、接触抵抗の値の変化から被膜の強さを推定することにした。

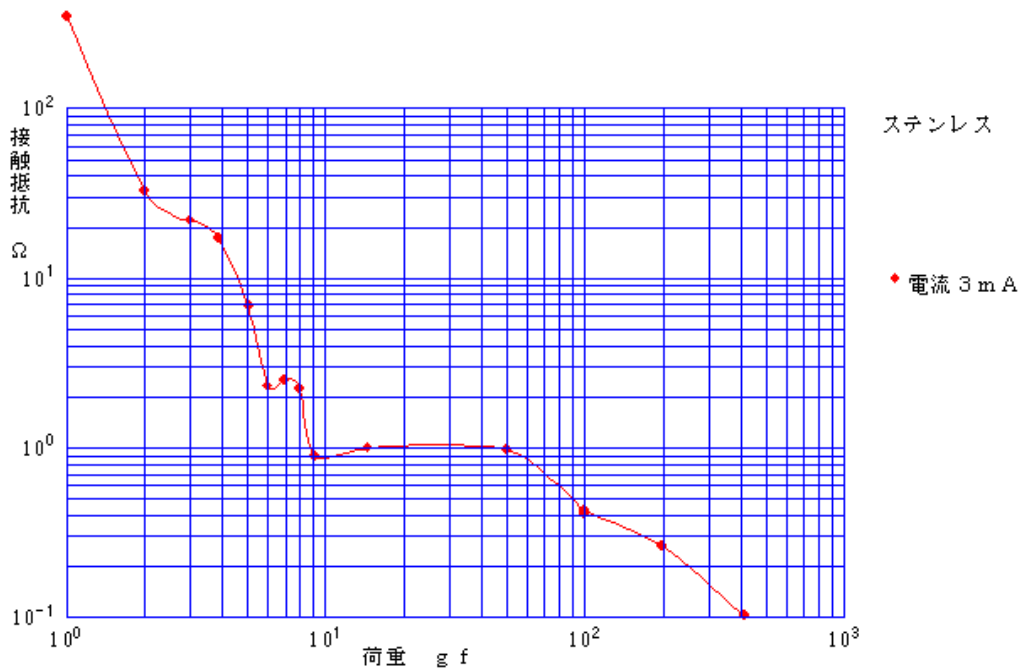
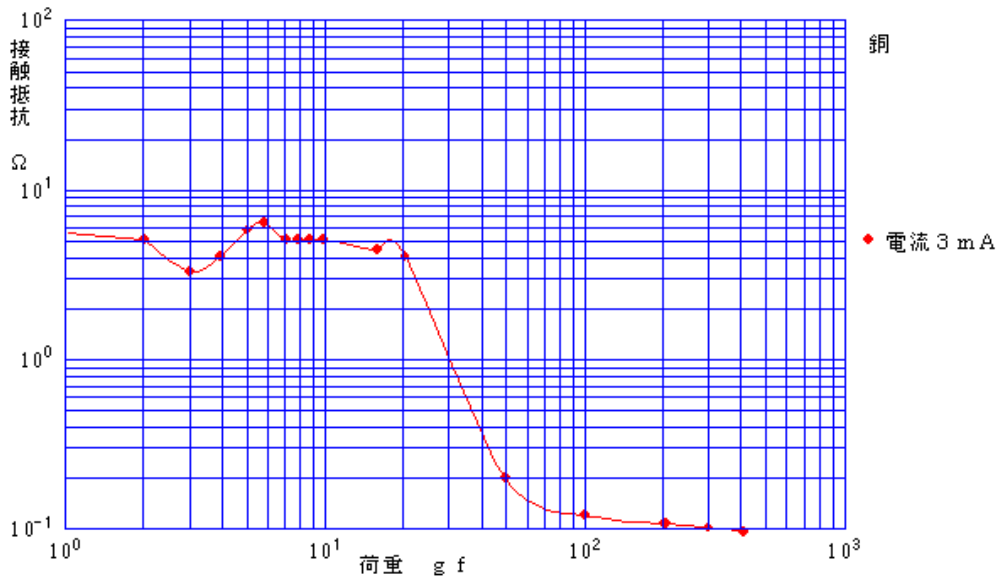
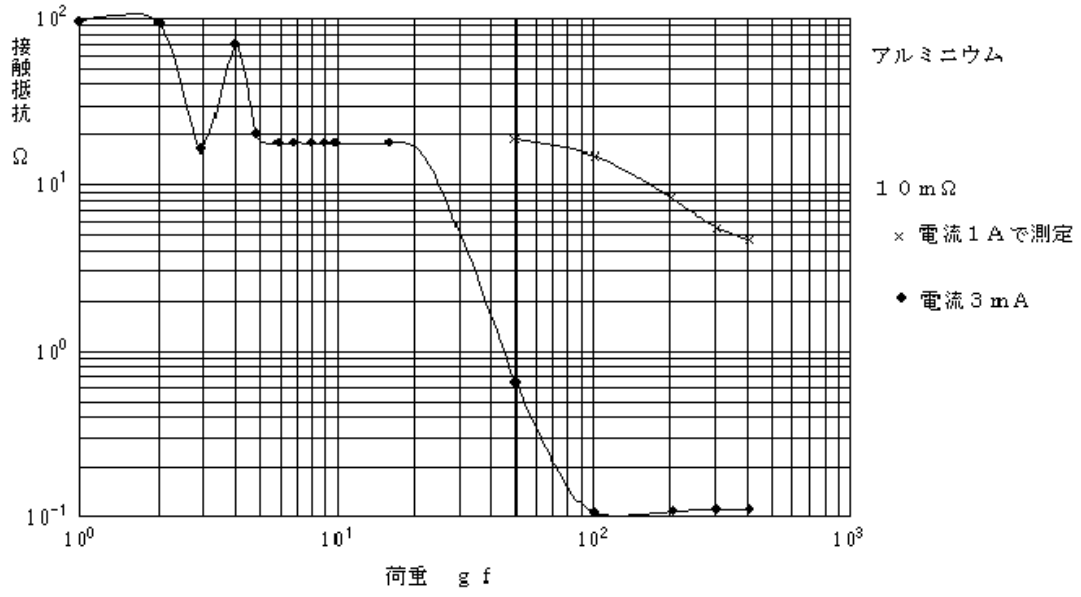
実験方法

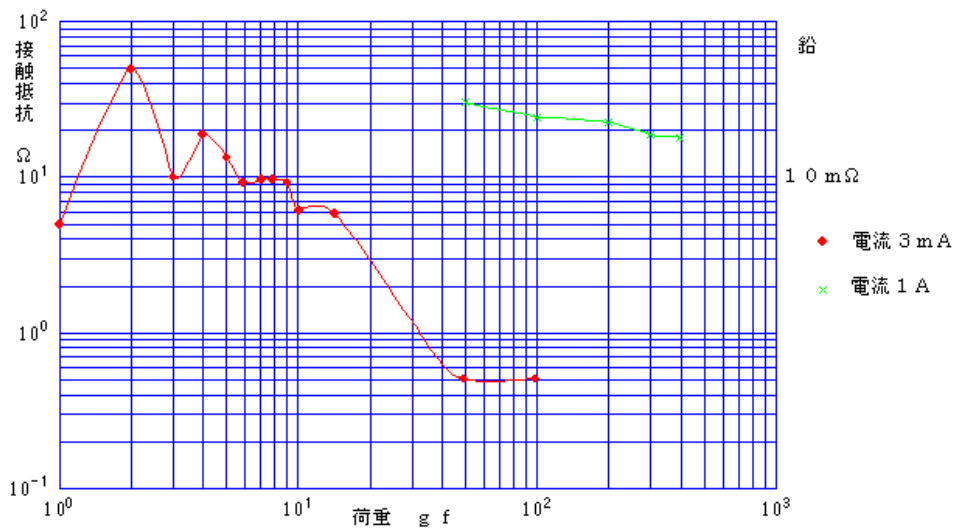


図のようなアームの先に針を固定し、バネ秤で針の先端にかかる力の大きさを変えながら、接触抵抗を読み取る。なお、この実験では力が小さいとき、極めて接触抵抗が大きくなったので、3 mAの電流値で測定した。

アルミ、銅、ステンレス、鉛で実験した。

実験結果

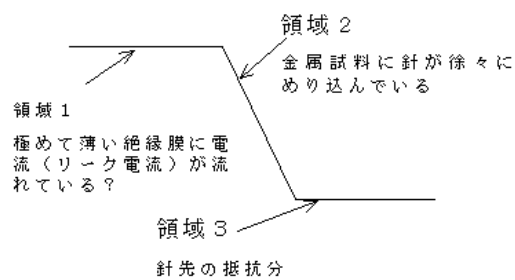




考察

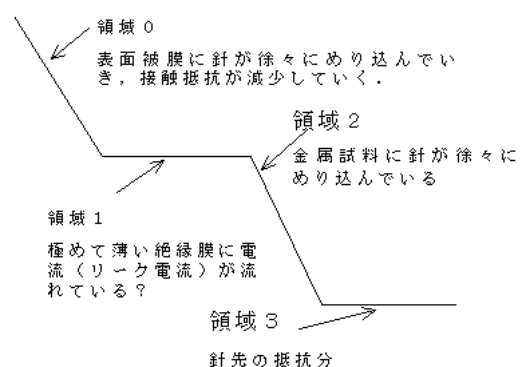
接触抵抗の変化を見ると 銅と鉛のグループと、アルミとステンレスのグループに分かれていることに気づく。まず のグループは次の様なパターンが見られる

銅, 鉛のパターン



そして、 のグループでは次のパターンになっている。

アルミ, ステンレスのパターン



のグループの接触抵抗の変化のパターンは、 のグループのパターンと共通している。従って のグループには、図の領域0が付け加わった形になっている。この領域0は大変電気抵

抗が大きく、明らかに表面の被膜であると考えられる。この被膜での接触抵抗の変化をアルミとステンレスと比較すると、ステンレスの被膜の方が厚く、しかも丈夫であるようである。ステンレスは針に加えた力が10 gfまで被膜の影響が出ていたと考えられる。針先の面積は極めて小さいので、かなり大きな圧力に耐えていると考えられる。他方アルミは、2～3 gfで被膜は突き破られたと考えられる。このパターンから、被膜の厚さと強さの傾向が読みとれる。

ところで、領域1～3までの物理的な意味合いを考えると次のようになる（仮説）

まず、領域3は、測定において針先約1 cm程度の針の抵抗分が接触抵抗に直列に接続されているので、その影響ではないかと思われる。それはほぼ4種類の試料において、同じ程度の抵抗値の収束していることから考えられる。

次に領域2であるが、針にかけた力の大きさと共に、接触抵抗が小さくなっている領域である。このことから、針が徐々に金属試料の中にめり込んでいき、接触している面積が増加していると考えられる。

最後に領域1であるが、大変不思議な変化をしている。力の大きさに関係なく一定の抵抗値を示している。別な言い方をすると一定の電流が流れている領域である。針先に加わる力（圧力）を増加させているのであるから、少なくとも針は少しずつ、試料の中にめり込んでいるはずである。それなのに抵抗が一定（電流が一定）であることは、単なる抵抗体に接しているのではないと考えられる。（一定の抵抗率を持つ物質ならば、抵抗体の長さに比例し、断面積に反比例するはずである。従ってめり込む過程では、断面積の増加、長さの減少が生じるはずである）

5．考察

今回の実験を始める時に、摩擦を発生させる力は何の様なものなのかを解明しようと意気込んで、実験の計画をし、実行した。しかし、実験結果から、静止摩擦係数の大きさの違いを説明できるようなものは得られなかった。しかし、鉛の静止摩擦係数の測定で、明らかに表面が削り取られる事によって、摩擦力が生じていることは確認できた。従って、昨年度の研究の表面の凹凸によるかみ合わせで摩擦が説明できるとする立場で行った実験データと、今回の分子間力などの力に焦点を合わせた実験データを注意深く比較して、再度解析することで、摩擦の本質が見えてくる可能性がある。

そこで、昨年度の実験データである、アルミ - アルミ、銅 - 銅、ステンレス - ステンレスの場合

の静止摩擦係数の大きさ（相対的な大きさ）を，実験データから導く事が可能ならば，その値を導く過程で仮定した摩擦のメカニズムは正しいであろうとの方法で解析を試みることにした．

今までの測定データ，及び関連するデータを理科年表で調べた値を表にする．

表 1

	μ	接着力 kg/4mm ²	膜の強さ -	引っ張り強さ $\times 10^8$ Pa	圧縮率 $\times 10^{-11}$ Pa ⁻¹
アルミ - アルミ	0.82	1.0	2	0.95	1.33
銅 - 銅	0.36	2.6	-	3.0	0.72
ステンレス - ステンレス	0.16	6.0	10	9.0	0.6
鉛 - 鉛	0.72	-	-	0.15	2.2

注 1 実験 5 より，接触抵抗の変化，領域 0 の終わる時の針にかけた重さを採用．（任意単位）
 注 2 理科年表より
 注 3 理科年表より

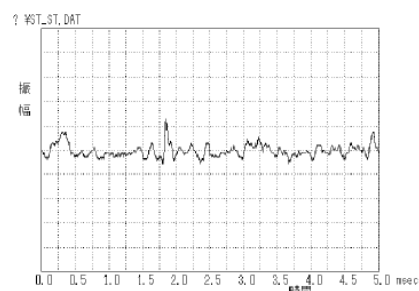
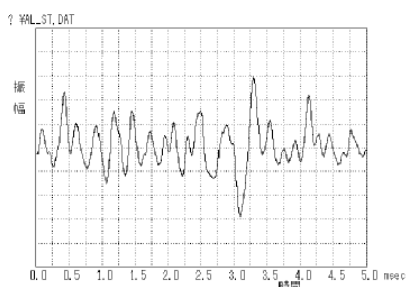
さらに，表 1 の値を，その列の最小値に対する相対値で書き直した．（表 2）

表 2

	μ	接着力	膜の強さ	引っ張り強さ	圧縮率
アルミ - アルミ	5.125	1	1	1	2.22
銅 - 銅	2.25	2.6	-	3.16	1.2
ステンレス - ステンレス	1	6.0	5	9.47	1
鉛 - 鉛	4.5	-	-	0.158	3.67

表 2 を使って考察をすると，まず気づくことは，接着力，膜の強さ，引っ張り強さの関係が大変に似かよっている．しかし，接着力（分子間力），膜の強さ，引っ張り強さだけで静止摩擦係数を説明する事は明らかに無理がある．他方，圧縮率の関係は，静止摩擦係数の傾向と似かよっている．しかし，やはりこれだけでは十分に μ を説明できないし，物理的な意味あいを見いだすことも無理がある．

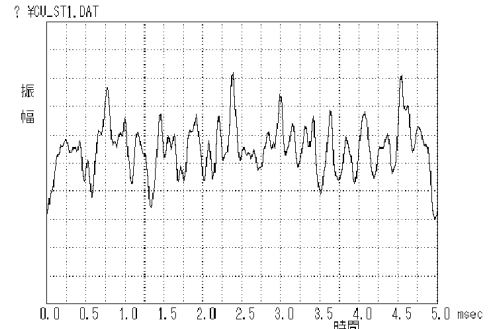
鉛の実験で表面の切削により生じる力が，摩擦力に影響することが確認できた．従って，どれだけ面が接触し，引っかかるかが摩擦に影響することは明らかである．従って，接触した部分に働く力が，分子間力によるものであっても，引っかかった部分が引きちぎる事により生じる力（引っ張り強さ）であっても，また膜の強さが関係するにしても，それぞれの試料間の真に接触している面



の面積が解らなくては、 μ の大きさを比較することはできないと思う。

そこで、昨年度針を試料の上でトレースしたときに得られる信号で、表面の凹凸を測定したが、その時のデータを利用して、それぞれの試料間で接触している面積の相対値を解析することを試みることにした。

このグラフが昨年度測定した表面の凹凸である。昨年度、針によるトレースでは、表面が針に削られて、正しく表面を測定できな事に気づき、傷の影響が出ない様に、針でトレースする時間を大変短くして測定したもので、ほぼ正しく表面の凹凸を示していると思われる。また昨年度はFFTを使った解析で、表面の重なり具合なる量を定義して、接触具合を間接的に解析し定量化しようとしたが、この解析は失敗であったと反省している。



グラフを見ると、直感的にステンレスの表面凹凸は、鋭い突起が所々あるだけで、実際の接触では、その数少ない突起部分が接触している感じがする。しれに対して銅とアルミは、同程度の凹凸が多数あり、実際の接触ではこれら多数の突起が接触に関わっているような感じを受ける。

そこで、昨年度とは違って、もっと単純な解析を行い、接触の具合を評価する事にした。その解析方法は次のように行った。

表面の凹凸を測定データは表している。そこで、そのデータを180回転（マイナス1を掛ける）させ、元のデータと重なる部分をカウントすることにした。回転させたデータは、最大振幅の値の下駄をはかせておく（各データに一定値を加算する）。上の面のデータが代入されている配列をUP（ ）、下の面のデータが代入されている配列をDOWN（ ）とすると、もし面が接触すれば UP（ ） DOWN（ ）となるので、この条件が成立した場合、変数COUNTの値を+1すれば、接触する面の数がわかる。

そして、 の値を小さくしながら同じ計算をさせれば、面と面の間が近づくにつれてどれだけ接触する面が増加するかを見積もることができる。さらに、添字 をずらして（UP（ ）とDOWN（ +10 ）で計算する）同じ計算をさせれば、横方向にずれた場合の接触する面の变化も見積もることができる。このような解析方法でアルミ、銅、ステンレスの場合の接触する面の变化を計算した。

解析結果

次の表の結果になった。なお、沈み深さとは、凹凸の最大振幅だけ、上の面をずらして解析を始めているので、次にその値の10%づつ上の面を近づけた。その下げ幅を沈み深さといった。なお、データは約2000個あり、接触する点が1000この場合、約半分の面積が接触していることを示す。

凹凸の最大振幅 = 44

ステンレス													
沈み深さ	横方向のずれ										横合計	割合%	
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90			100
0	6	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	12	0.053
4	6	1	0	1	1	1	3	2	1	1	1	18	0.080
8	7	1	0	1	1	4	3	3	2	4	1	27	0.120
12	7	1	3	4	4	4	5	4	4	4	4	44	0.195
16	7	3	3	4	4	4	6	4	4	4	4	47	0.209
20	11	4	4	5	5	5	6	4	5	6	5	60	0.266
24	16	4	5	5	6	6	7	7	6	7	6	75	0.333
28	24	5	6	8	10	7	8	7	7	10	7	99	0.439
32	47	6	13	22	16	15	12	15	15	18	14	193	0.857
36	116	55	54	57	60	45	62	63	65	67	47	691	3.067
40	349	282	263	272	276	267	284	277	275	274	272	3,091	13.721
44	839	912	944	895	921	925	919	923	922	918	903	10,021	44.482

銅													
沈み深さ	横方向のずれ										横合計	割合%	
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90			100
0	29	0	1	3	4	5	1	11	5	6	6	71	0.315
3	52	1	8	7	8	11	4	15	8	12	14	140	0.621
6	68	4	14	20	18	18	14	27	18	16	22	239	1.061
9	117	28	31	33	30	36	24	43	31	29	33	435	1.931
12	143	54	56	60	66	70	54	75	62	48	59	747	3.316
15	256	104	107	110	131	122	106	136	116	99	108	1,395	6.192
18	330	194	197	214	217	190	178	226	217	187	200	2,350	10.431
21	499	333	329	356	359	325	337	321	343	337	333	3,872	17.188
24	606	518	520	557	546	537	529	514	533	507	537	5,904	26.207
27	841	777	785	806	770	788	798	769	782	774	759	8,649	38.392
30	976	1061	059	1051	1040	1052	1049	1044	1045	1068	1021	10,466	46.458

アルミ													
沈み深さ	横方向のずれ										横合計	割合%	
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90			100
0	56	6	6	0	4	3	8	8	10	11	7	119	0.528
9	67	10	11	8	11	4	15	11	19	13	20	189	0.839
18	92	12	16	21	25	10	27	21	31	22	28	305	1.354
27	114	21	41	37	48	26	41	46	44	44	43	505	2.242
36	157	48	58	73	88	55	61	80	67	75	73	835	3.706
45	218	78	112	121	134	99	124	143	112	129	120	1,390	6.170
54	305	126	182	209	216	177	201	210	181	195	186	2,188	9.712
63	416	225	268	314	341	304	304	304	280	293	298	3,346	14.853
72	552	347	401	448	479	457	475	440	421	423	470	4,913	21.808
81	682	555	595	652	682	664	678	625	640	650	653	7,076	31.410
90	878	856	870	889	890	895	931	905	873	917	902	9,806	43.528

図を見て得た予想どおり、ステンレスの接触している部分の割合がきわめて少ない事が解る。単純に最大振幅の半分の幅の沈み込みで、全体の何%が接触しているかを比較すると

	計算式	割合	相対割合
ステンレス	$60 / (2048 * 11)$	0.27%	1
銅	$1395 / (2048 * 11)$	6.19%	22.9
アルミニウム	$1390 / (2048 * 11)$	6.17%	22.9

実に、アルミ・銅はステンレスの20倍も接触する点が多いことになっている。従って、ステンレス同士の静止摩擦係数が小さいのは、このためであると考えられる。

ここで、静止摩擦係数の大きさの違いがこの結果を使って再現できるか次の様な仮定に基づいて計算してみる。

沈み込みの深さは、試料の堅さに反比例するであろう。そこで単純に最大振幅の半分と見積もらずに、表2の圧縮率に比例させて考える事にする。つまりステンレスの沈み込みの深さを1として、銅：1.2 アルミ：2.2とする。ステンレスの深さを最大振幅の10%程度のところと決め、銅は10%、アルミは25%のところでの接触する点の割合を採用する。（計算上の都合でおおよその値を採用した）この場合、ステンレスを1としたときの接触している面の比率は

$$\text{ステンレス} : \text{銅} : \text{アルミニウム} = 18 : 140 : 505 = 1 : 7.8 : 28$$

次に接触している部分に分子間力が働き、その合計が摩擦力の大きさになるとすると、その分子間力の大きさとして、実験で得た接着力の比率を当てはめる。

$$\text{ステンレス} : \text{銅} : \text{アルミニウム} = 6.0 : 2.6 : 1$$

摩擦は と の積に比例すると考えると予想される静止摩擦係数の比率は

$$\text{ステンレス} : \text{銅} : \text{アルミニウム} = 6 : 20 : 28 = 1 : 3.3 : 4.7$$

このようになる。この比率は、実測した静止摩擦係数の比率と大変似かよった値になっている。

力を仮定したときの μ の計算値（ステンレスを1とした相対値）

	実測	分子間力	引っ張り
アルミニウム	5.1	4.7	3.0
銅	2.3	3.3	2.6
ステンレス	1	1	1

次に の分子間力ではなく、かみ合った表面が引きちぎれる時の力が摩擦を生じさせる力だと仮定し、各試料の引っ張り強さに比例した力が働くと考えれば

$$\text{ステンレス} : \text{銅} : \text{アルミニウム} = 9.47 : 3.16 : 1$$

この値に の面の面積の割合を掛け合わせると。

$$\text{ステンレス} : \text{銅} : \text{アルミニウム} = 9.47 : 24.6 : 28 = 1 : 2.6 : 3.0$$

同じように実測した静止摩擦係数の値と似かよった値が得られるが、力として分子間力を仮定した場合の方が、実験結果との一致は良い。

以上の解析結果から、上下の面の真に接触する面の面積とその接触する部分に働く分子間力の積に比例する可能性が高いと思う。

6 . まとめ

昨年度の研究を継続した今回の摩擦の研究は、実験を始めるときにたてた予想・予測等はことごとく裏切られる結果になった。実験の方法・精度などにも問題はあったと思うが、最大限注意深く行ったつもりである。

しかし、失敗の中で、いくつか興味深い結果を得る事が出来、その結果をもとに昨年度のデータを別な方法で解析する事で、摩擦に対するいくつかの結果、及び仮説を得る事が出来たのは収穫である。

実験で得られた結果

1 . 昨年度行った基礎実験として、アルミ、銅、ステンレスの間の静止摩擦計数の大きさの違いを測定した。今年度の実験で、接着剤の接着力の物質による違いはその物質に働く分子間力の違いであると仮定して、この静止摩擦計数の違いは、分子間力（接着力）と、さらに、昨年度のデータより解析した真に接触する面の面積の物質間の違いとを掛け合わせると、大変うまく静止摩擦計数の大きさの違いを説明できる事が解った。しかし、残念ながら違った物質の間の静止摩擦計数は、それらの物質の間に働く分子間力を浮き彫りにする事が出来なかったので、今回の解析では見送った。

昨年度、面のかみ合いで摩擦が説明できるとする立場で研究を進め、表面の凹凸のピッチが一致する場合に静止摩擦計数が大きくなると考えてたが、今回の解析のように、もっと単純に考えた方がうまく説明できる事に気がついた。つまり、ステンレスの場合は、ほとんどの面は小さな凹凸で、所々に大きな突起が存在する。このような場合、実際に接触するのはその突起であり、真に接触する面の面積はきわめて少なくなり、従って静止摩擦計数は小さくなる。

ところで、ステンレスは大変堅い金属であるから、このように大きな突起が存在できるであろうが、柔らかい金属では、たとえ最初このような突起があったとしても、接触の過程で研磨され存在できず、銅やアルミのようにすべての凹凸が同じような大きさになり、従って真に接触する面の面積が大きくなり、大きな静止摩擦計数を示すようになるのではないかと思われる。

2 . 摩擦が 1 . で述べたメカニズムだけで生じるとは考えづらいとも思った。具体的には、1 . では分子間力を計算入れたのであるが、その力の変わりに引っ張り強さを仮定してもほぼ同じ程度

の比率の静止摩擦計数が計算できる事と、鉛の予備実験で擦り合わせたときに表面がかみ合っ
てくっついてしまった現象と、鉛の静止摩擦計数の変化を測定したときに現れた一定の力は、突起
を引きちぎる時に生じるとする事が妥当であるからである。従って、面を引きちぎる事によって
生じる成分もおそらくあると考えられる。

3．アルミやステンレスのように表面に強い被膜を持った物質は、その被膜により静止摩擦は影響
を受けると思われる。今回の針を下ろして接触抵抗を測定した実験では、接触抵抗の変化の様
から、かなり大きな抵抗値を示す被膜の存在を確認できた。そして昨年度の実験で、物体が滑り
出す直前に接触抵抗が小さくなる現象を発見している。この事を考えあわせると、被膜が削り取
られた時に物体は動きだしと言うメカニズムも考えられる。

4．摩擦とは直接関係しないが、金属の接触抵抗は大変不思議な振る舞いを示す。針を下ろしての
接触抵抗の測定で、重さを増加させても接触抵抗が変化しない領域がすべての金属にあらわれた
が、いったいどのようなメカニズムで生じるのか興味深い。昔の鉱石ラジオは、うまく接触させて
検波したと聞いたが、それではこの不思議な領域は半導体の様な振る舞いをするのではないかと
考えている。いずれ、温度による接触抵抗を測定して確認したいと考えている。

