

(レポート表紙)

第11回全国物理コンテスト
物理チャレンジ 2015
第1チャレンジ 実験課題レポート

レポート表題

発生する音を利用して摩擦係数の測定の可能性

第1チャレンジ番号：
(※1)

1	5	4	3	0	3	8
---	---	---	---	---	---	---

(※1) 第1チャレンジ番号を必ず記入してください。

第1チャレンジ番号は、6月中旬頃参加申込者の自宅宛に郵送します。

氏名：沼本 真幸

学校名又は
卒業校名：岡山県立岡山朝日高等学校 学年：1

学校のある
都道府県名：岡山県 実験をした場所：同高校

共同実験者（共同で実験を行った人がいる場合に記入してください。）

氏名：

安藤 貴政

学校名・学年：

同高校・1年

実験課題に取り組んだ感想を書いてください。

本実験は、合計のデータ量が2000を超えるほど、多くの実験結果に基づいて裏付けられた考察とともに、音と摩擦係数との関係にせまったのが、非常にきれいな形でデータが整理でき、また、そこからさらに多くの疑問が生まれる、というように、どこまでも深い「摩擦」に、魅了された。

参加申込み、および実験レポート送付の際には、下のラベルを切り取り封筒に貼って宛名として利用することができます。

参加申込書送付用ラベル

〒192-0081
東京都八王子市横山町10-2 八王子SIAビル 2F
(株)教育ソフトウェア内
科学オリンピック共通事務局 物理チャレンジ係 行
(参加申込書在中)

実験課題レポート提出用ラベル

〒162-8601
東京都新宿区神楽坂1-3 東京理科大学内
特定非営利活動法人
物理オリンピック日本委員会 行
(実験レポート在中)

発生する音を利用した摩擦係数の測定の可能性

岡山朝日高校1年 沼本 真幸

1 研究の目的

摩擦係数という係数は、非常に身近な現象である摩擦という現象に大きな関わりを持っている数であるにも関わらず、現在に至ってもまだ解明されていない部分がある数である。摩擦という力は、結果だけから考えれば、いたって単純そうに見える力であるが、なぜそれが起こっているのかという原因には、非常に複雑な運動が関係している。特に、表面に凹凸のない物体同士の摩擦の場合は、分子間力といったような力も働くことが、研究によって確かめられている。また、温度依存性や速度依存性など、摩擦係数を決定する要素が多くなることも、摩擦の解析の難しさである。そこで、私は摩擦という力についてとらえる際に、原因を詳しく追及してから、結果の説明をするという方法ではなく、その力によって引き起こされる様々な現象を測定して、考察するという方法を使うことにした。それによって、原因がたとえ完全に解明されなかつたとしても、摩擦係数の測定という面では、非常に役に立つ傾向を導き出すことができる可能性を生み出すことができる。摩擦が引き起こす現象として、よく紹介されるのが摩擦熱であるが、私は摩擦によって発生する音に着目して、その音の測定による摩擦係数の特定が、果たして可能なのかどうかを検証することとした。この研究では、まず基本的な実験方法で静止摩擦係数および動摩擦係数を測定、考察を行い、その後で摩擦係数と発生する音との関係について考えていくことにした。当研究の最終的な目的は、音による摩擦係数の測定方法の確立である。

当研究の主な流れは以下のとおり

- 1 研究の目的
- 2 静止摩擦係数の基本的な測定
- 3 動摩擦係数の基本的な測定
- 4 表面の様子と摩擦係数、再考察
- 5 音と動摩擦係数
- 6 全体の結論
- 7 参考文献
- 8 共同実験者
- 9 データ

2 静止摩擦係数の基本的な測定

ここからは、静止摩擦係数の基本的な測定および考察に入る。

2.1 実験 I “四つの試料と紙やすりの静止摩擦係数”

2.1.1 実験 I の目的

当実験の目的は、身近なものと紙やすりとの静止摩擦係数を測定し、摩擦の発生原因とその傾向について考察することである。

2.1.2 実験 I の手法

(A) 実験に用いるもの

木片（縦×横×高さ）=(3×5×3)、紙やすり

番号 (G-40、60、80、100、120、180、240、400)

アルミ板、アクリル板、銅板、ステンレス板、ミシン糸、ばね（長さ約5 cm）木板、レール、滑車、レーザー、ものさし

(B) 実験の方法

実験は、大きな木板につながっている糸を引き、木片が動いた瞬間に止め、Fig1 にあるように、分度器で角度を測る。有効数字は二桁までとする。木片の下面には、紙やすりが貼り付けてあり、木板のほうには、アルミなどの試料が貼り付けてある。ただし、この時動いたと判断する基準として、木片の前の面に平行であり、木片とすれすれの部分で接しないようなレーザー光線を用意し、これに木片がふれたとき、動いたと判断する。これによって、人間の主観を一切排除した実験が行える。この実験は5回の平均をとる。

(C) 実験装置

実験装置については、Figure1 の装置を用いる。様々な試行錯誤と、多数の予備実験の結果、手順が少ないほうが、測定結果のばらつきが少ないことが認められたため、当実験においては、できる限り単純な装置を使って実験することに重きをおくことにする。上の装置は、摩擦力と重力の斜面成分とのつり合いによって、摩擦係数を求めるものであるが、急激な変化によって生じる加速が、測定に影響を与えないように、角度の調整に使用する糸の中に、ばねを挟んだ。また、板の地面との接触点には、その部分で摩擦が極力起こらないように、レールを敷いている。

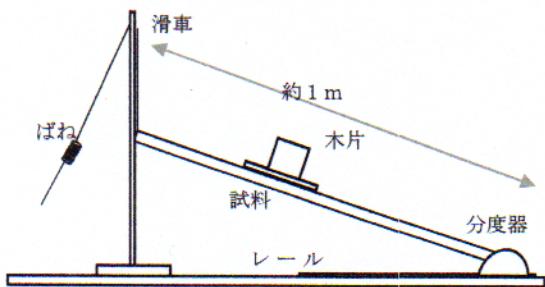


Figure 1

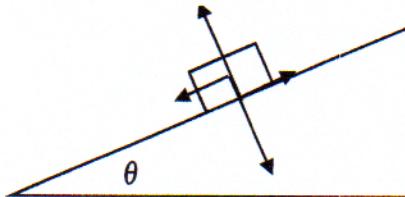


Figure 2

(D) 実験において統一する条件

実験においては、以下の条件を統一する。

- ・木片の質量 (35g)
- ・温度、湿度 (同じ日に行うことで統一)
- ・傾けていく速さ
- ・接触面積 (15 平方 cm で統一する。)
- ・毎回表面を乾いた布でふき取る。

(E) 実験の理論的背景

Figure 2 にあるような場合を考えると、最大静止摩擦力と重力がつり合う傾斜の関係は以下のように式に表せる。木片の質量を m 、重力加速度を g 、図中の角度 θ を使うと、

$$mgsin\theta = \mu mgcos\theta \quad (2.1)$$

よって求める静止摩擦係数は、

$$\mu = \tan\theta \quad (2.2)$$

これによって算出される。これを静止摩擦係数の算出方法とする。

2.1.3 実験 I の結果

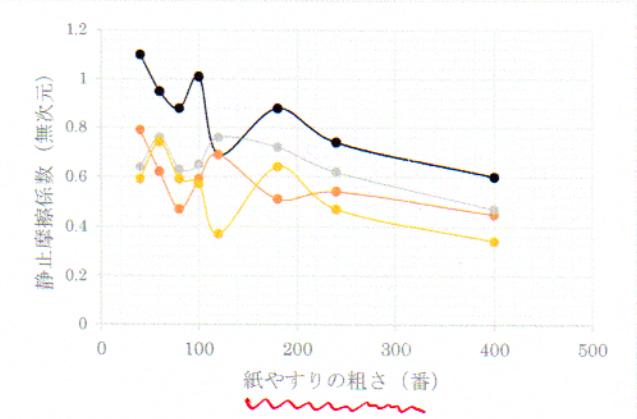
実験の結果は Graph1 のとおりである。実際の測定結果すべては、レポート末に載せている。傾向として読み取れることは、すべてを通じて、静止摩擦係数が一定の変動をしているわけではないことである。静止摩擦係数の変化は、確かに表面の粗さに依存するようであるが、その依存の傾向は簡単には読み取ることができない。しかしその一方で、摩擦係数の変動は、すべての試料で同じような傾向を見せていている。また、この測定を行った時の天気は晴れ、温度 23°C、湿度は 55% であった。

2.1.4 実験 I の考察

まず一つ一つの試料について考察する。

(a) アルミ板

アルミ板は、全体の中で最も静止摩擦係数が大きい傾向にあり、静止摩擦係数が 1 を超えているものが二通り確認できる。また、グラフ化したときにわかるように、まず紙やすりの番号が 40 でピークに達しており、60、80 と番号が大きくなると下がってくるが、番号が 100 になった時に、また大きくなっている。その後またこのような変動を 100 から 180 にかけて見せた後は、小さくなっている。この波のような特徴と、滑り始める時の様子を照らし合わせて考える。40 番の時には、ほぼ転げ落ちるようにいきなり滑り始めた。これは下に滑ろうとする重力による力をと釣り合っていた力が、突然無くなつたことを意味しており、このことから、40 番の時には、何かの限界を超えて、いきなり落ちてくるというように、急激な変化が起こっていたと考えられる。この場合において、急激な変化とは、何が考えられるであろうか。これについては、考察 I の全体考察でまとめて述べることとする。



Graph 1 黒…アルミ、赤…アクリル、灰…銅、黄…ステンレス

ほかにも、このような変動は、波のような何かの繰り返しともとることができる。データの散らばりに注目すると、G-40 から G-120 までは、データがかなり散らばっているが、G-400あたりではほとんど散らばりがみられない。特に G-40、G-80、G-120などの散らばりが激しい。このことから、G-40、G-80、G-120においては、摩擦が大きいということが、いつも続くということではなく、摩擦が小さい時というのも存在する、すなわちこのアルミは、何かの条件が微妙に変化するだけで、滑るか滑らないかが大きく決まるということがわかる。

(b) アクリル板

アクリル板は、全体の中で二番目に静止摩擦係数が大きいものである。主な特徴はアルミと同様であるが、アルミほどに激しい変化ではない。

(c) 銅板

銅板も、大きな特徴はアルミ板と同様であるが、ピークが微妙に異なる。初めに最も大きい部分は G-80 で、一度小さくなつてからまた大きくなったときのピークは、G-180 の時である。全体的にデータの散らばりがあまり見られない。

(d) ステンレス板

ステンレス板は、アルミ板と比べたときに、確かに、アルミ板のときの特徴は残ってはいるが、大きく異なっている部分が多い。これまでのどの板よりも静止摩擦係数が小さく、なおかつ波のように繰り返す部分は、存在こそしているものの、変動が小さく、滑らかである

ここで、グラフに表れている摩擦係数の変化、すなわち摩擦力の変化を、三つに分ける。このグラフには、番号が少ない時に生じる大きい摩擦力 (G-40 など)、その後谷のような形に変化した後に生じてくる大きい摩擦力 (G-100, 120 など)、そのあとの摩擦力の三つの摩擦の種類が表れていると仮定して、考察を開拓する。それぞれに大摩擦、中摩擦、小摩擦と名前を付ける。

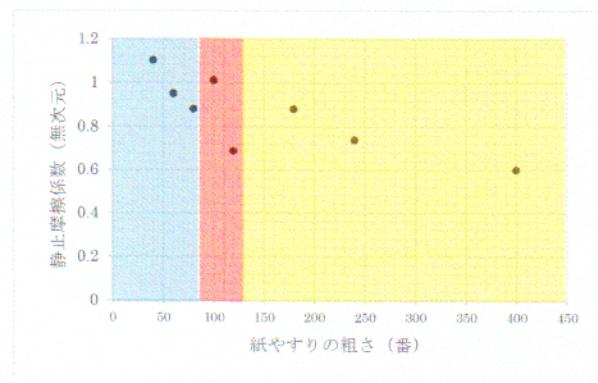
整理すると、

大摩擦：紙やすりの番号が小さい時に生じている摩擦。ほかの二つに比べて大きい場合が多い。

中摩擦：グラフ上で大摩擦の後にくる二つ目のピークの時の摩擦。

小摩擦：二つのピークの後に低下傾向をみせる摩擦

右の Graph2 はアルミの静止摩擦係数の測定結果であるが、このグラフにおいて、青い範囲が大摩擦、赤い範囲が中摩擦、黄の部分が小摩擦にあたる。



Graph 2 (アルミ)

それでは、この大摩擦、中摩擦、小摩擦がもつてている意味について考えよう。

(A) 大摩擦

大摩擦については、以下のような状況ではないかと推測できる。

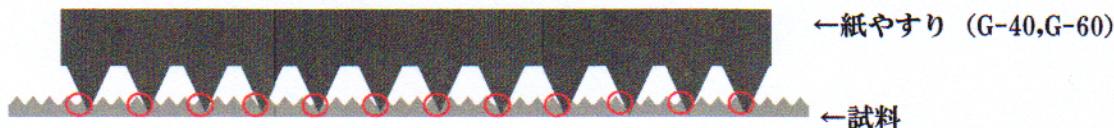


Figure 3

このとき、紙やすりの凹凸はかなり大きいものである。この凹凸は、試料に対して非常に大きいので、試料の表面の凹凸は無視できる。しかし、いくら凹凸が大きいからといって、実際に地面に接触している面積は非常に小さい。なぜなら、突起の中でも最も突き出ているいくつかの突起が、全体を支えているからである。利用しているのが紙やすりであるために、ある程度間隔がそろっている突起によって支えられていると考えられ、モデルも Figure3 のようにあらわせる。ここで注目すべきは、紙やすりが試料に「めり込む」ということである。突起の中のいくつかしか実際に接触していないとなると、一つの突起にかかる圧力が非常に大きくなり、その圧力によって、接触しているところに紙やすりがめり込んでしまう。めり込むと、その部分がひっかかって、Fig3 の丸で囲まれた部分で、重力による滑らせようとする力に対抗する力が生じると考えられる。また、滑り出すときはそのめり込んでいる場所が崩壊したときだと考えれば、それは段階的な変化ではないため、急激に速度が変化することも理解できる。この説を適用するとすれば、めり込みやすいというのは、試料が軟らかいということであるので、軟らかければ軟らかいほどに、摩擦が大きくなるはずである。ここで、四つの試料を (G-40) における静止摩擦係数の大きいものから並べると、

アルミ板 > アクリル板 > 銅板 > ステンレス板

となる。また、軟らかさを表す指標として、硬度という表し方があるが、実際に使用したもので測ることは容易ではないので、表面状態の観察によって、測定の後に、どれだけ削られているかを見て、それで軟らかさを大まかに判断する。また、表面はルーペによって観察した。すると、もっともよく削っていたものから順に

アルミ板>アクリル板>銅板>ステンレス板

となっていた。これは静止摩擦係数の大きさ順にまったく同じものになっている。これは先ほどの大摩擦に関する考察を裏付けるものである。

次に、紙やすりの番号が G-80 あたりまで全体を通して減少することについて考える。これについても、先ほどの考察をそのまま適用して考えることができる。

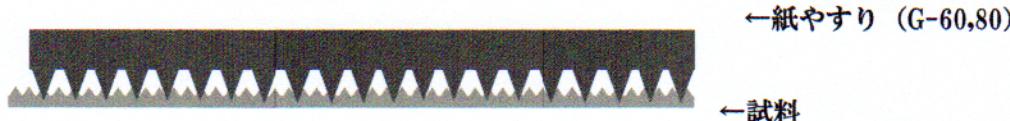
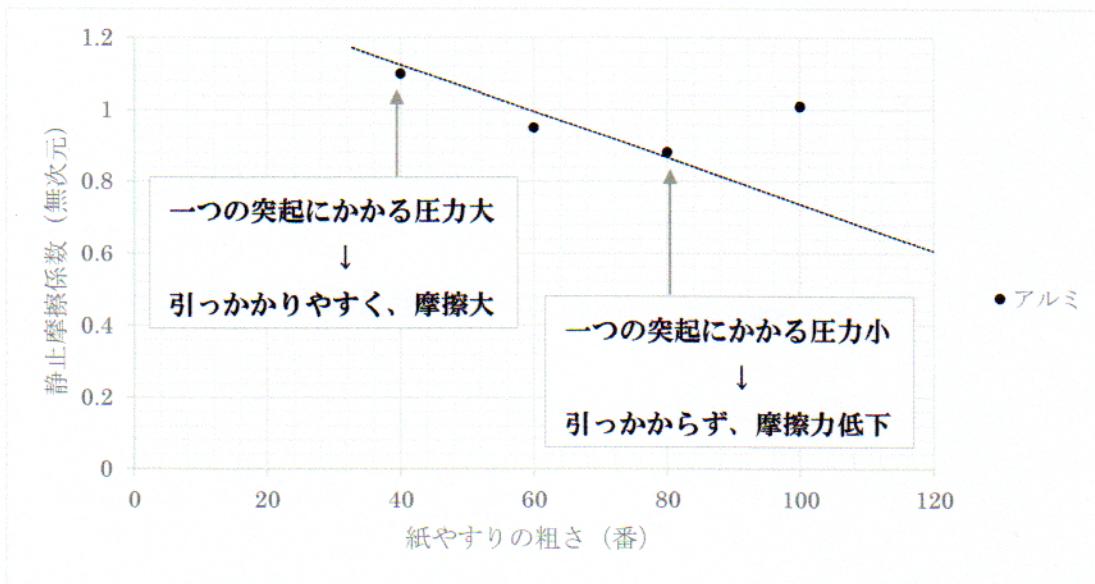


Figure 4

このような場合、G-40 の時と比べて、接触している突起の数が増えている。したがって、全体的な接触面積が増えるが、これによって一つ一つの突起が試料にかける圧力が低下、それによってめり込みにくくなり、したがって滑りやすくなると考えられる。簡単に言うと、引っかからなくなるのである。

以上から、大摩擦の発生原因およびグラフの傾向の理由を示すことができる。最後にまとめると、またアルミを例にとって、



Graph 3

(B) 中摩擦

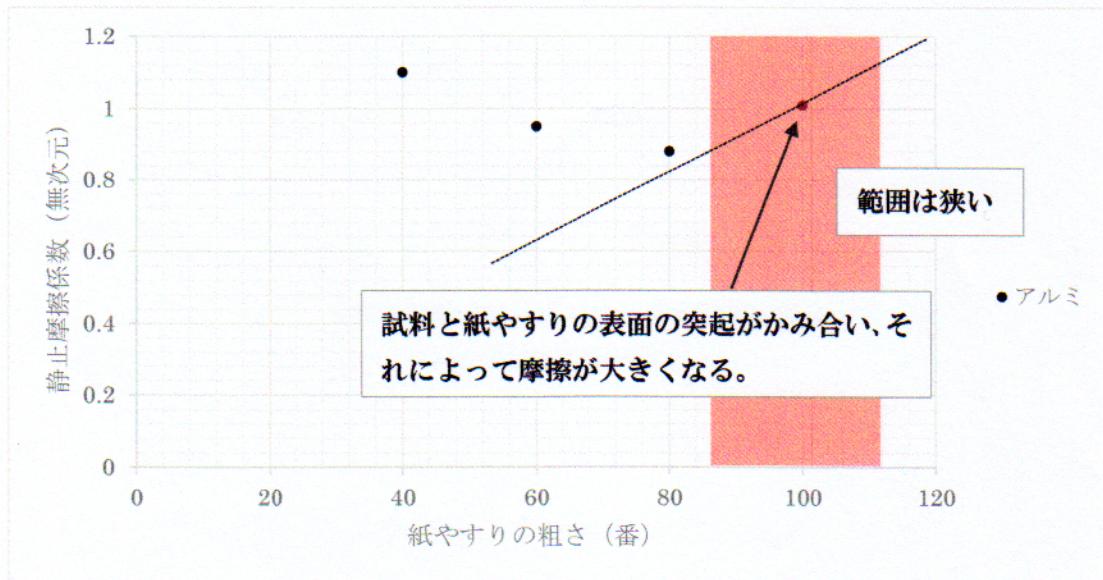
次に、中摩擦に関して考察する。中摩擦時には、下のような状況になっていると考えられる。



Figure 5

紙やすりの番号が大きくなり、どんどん細かくなってきた表面が、試料の表面の突起とか

み合っている状況が、中摩擦の状況ではないかと考えた。摩擦の種類が大摩擦とは完全に異なり、自らめり込んでいるわけではなく、引っかかる場所があり、そこに引っかかっているということである。簡単に言うと、かみ合っているのである。これによって説明できることがいくつかある。一つは、中摩擦が始まる紙やすりの番号が大きく異なるのは、表面の凹凸の違いが大きいということを表しているが、実際にはその通りである。アルミ板とステンレス板では、表面の突起の細かさがまったく違う、アルミのほうは粗く、ステンレスはかなり細かい。それと中摩擦が始まる番号を比べると、アルミのほうは 80 から 100 番あたりで始まっているのに対し、ステンレスは 180 番である。これらの結果は、よく中摩擦の説明と一致している。また、中摩擦はかみ合ったときのみに起こるので、表れる範囲は狭い。ここまでをまとめると、アルミのグラフを例にとると、



Graph 4

(C) 小摩擦

最後に小摩擦について考察する。小摩擦は下のようになっていると考えられる。また、下の図の縮尺は大摩擦、中摩擦と同じではない。(試料を拡大した図)

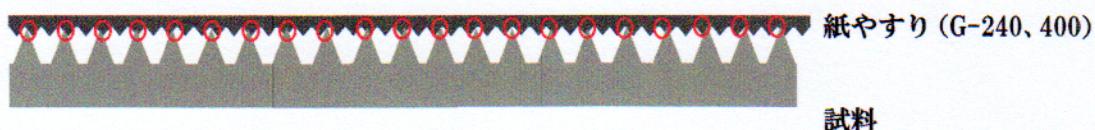
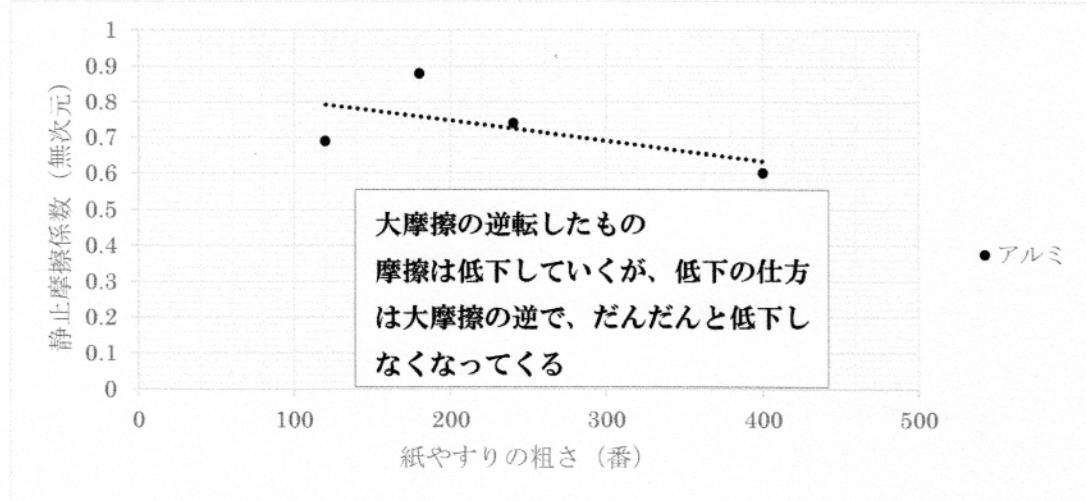


Figure 6

これは、大摩擦の上下が逆転している状況である。これには、大摩擦の時の説明をそのまま適用できる。したがって、大摩擦と小摩擦は、本質的に、同じものであると推測できる。また、大摩擦と違うのは、変化の仕方が、大摩擦の時の傾向から、だんだんと低下していくことである。アルミを例にとってまとめると、



Graph 5

2.2 実験II “紙やすり同士の静止摩擦係数”

実験Iから、摩擦係数が表面の粗さに依存している可能性を示した。この実験IIにおいては、それを検証する。

2.2.1 実験IIの目的

実験IIの目的は、表面の凹凸の様子と、静止摩擦係数との関係を明らかにすることである。

2.2.2 実験IIの手法

(A) 実験に用いるもの

木片（縦×横×高さ）=(3×5×3)、紙やすり

番号 (G-40, 60, 80, 100, 120, 180, 240, 400)

糸、ばね（長さ約5 cm）木板、レール、滑車、レー

ザー、ものさし

(B) 実験の方法

実験は、大きな木板につながっている糸を引き、木片が動いた瞬間に止め、実験Iと同じFig1にあるように、分度器で角度を測る。有効数字は二桁までとする。木片の下面には、紙やすりが貼り付けてあり、木板のほうにも、紙やすりが貼り付けてある。

(C) 実験方法

実験方法は、実験Iの時と全く同じである。

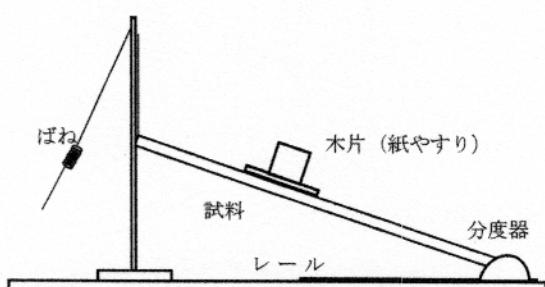


Figure 7

(D) 実験において統一する条件

実験においては、以下の条件を統一する。

- ・木片の質量 (35g)
- ・温度、湿度 (同じ日に行うことで統一)
- ・傾けていく速さ
- ・接触面積 (15 平方 cm で統一する。)

(E) 実験の理論的背景

実験 I と同じ原理で測定する。

2.2.3 実験IIの結果

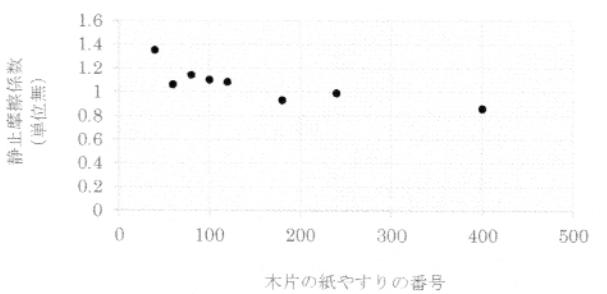
実験 II の実験結果はすべてで 300 を超えた。実験の結果は右のようになっていた。グラフの表示は、横軸が木片の紙やすりの番号、縦軸が摩擦係数である。全体として傾向は実験 I の結果と変わっていないが、傾向が顕著に表れている部分と、まったくあらわれていない部分があり、これらのデータの真偽については、考察が必要であると考えられる。また、この日の天気は曇り、温度 26°C、湿度 60% である。

2.2.4 実験IIの考察

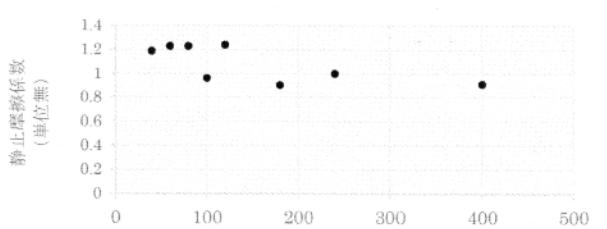
もっとも摩擦が大きかったときが、試料と木片に貼ってある紙やすりの番号が同じときというのが、8 パターン中 4 パターンで、二番目に大きいものまで含めると、8 パターン中 6 パターンになる。したがって、中摩擦に関しては、考察 I での説明がおおむね正しかったといえる。また、大摩擦については、谷のようなグラフの形が 6 パターン中 4 パターン見られた。

(大摩擦に関しては、G-40、G-60 はその粗さよりも粗いものがないため除外して考える) 小摩擦の傾向はあまり見られなかった。むしろ、滑らかな山があるように見え、それが全体を通じて見える特徴である。そこで、この実験結果 II も説明できるように、小摩擦の説明をより多くの場合に適用できるように変えることとした。

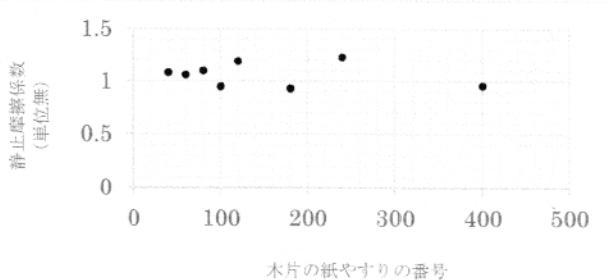
考えてみれば、最初の説明においては、小摩擦の状態になった後の説明がなかったが、大摩擦の説明において、紙やすりが試料にめり込んで、そこが崩壊するときに滑り出す、と考えているわけだから、試料には崩壊する可能性があり、それは紙やすりのほうにも



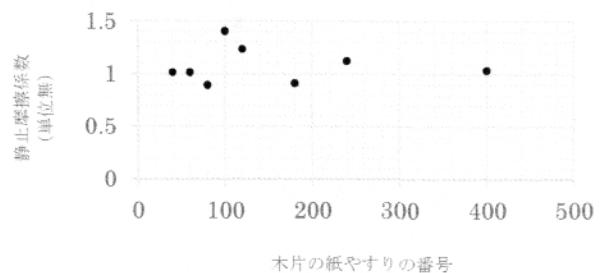
Graph 6 (G-40)



Graph 7 (G-60)



Graph 8 (G-80)



Graph 9 (G-100)

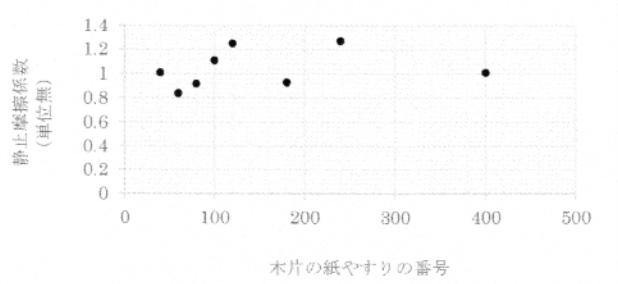
いえるということを考えるべきである。小摩擦については、次のように分けることができる。

i) 小摩擦のうち、中摩擦後に摩擦力が大きくなっているような変化を見せるもの

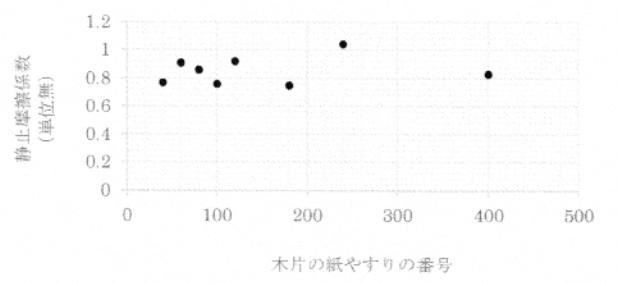
ii) 小摩擦のうち、i) の後にみられるなだらかな低下傾向

まず、中摩擦の直後的小摩擦は、実験Ⅰの考察でも述べているように、大摩擦の上下が反転しているものだと考えられる。したがって、大摩擦のときの傾向から、だんだんと低下傾向から「めり込み」はじめるときにかけて摩擦力は上昇していることが、グラフに表れないととらえられ、その後の低下傾向すなわちii) の傾向は、めり込むことができなくなるほど表面が細かくなつたと考えるべきである。表面がこまかくなるということは当然、引っかかる突起も、めり込める空間の余裕もなくなつてくる。i) とii) にそれぞれ、上昇型小摩擦、低下型小摩擦という名前を付けることにした。この二つの傾向を合わせれば、8パターンの多くの小摩擦について説明することができる。たとえば、あるグラフで G-180 より G-240 が大きいとき、その二つのデータの間が、上昇型小摩擦と低下型小摩擦の変化の変わり目といふことができる。また、すべてに当てはまっているわけではなさそうであるが、G-60, G-120, G-240 などのように、二倍、三倍、四倍になっている番号のもの同士だと、摩擦力が高い傾向があった。これは、中摩擦の延長であると考えられる。今扱ってきた中摩擦では、引っかかる突起は一つずつだったが、一個突起が入っていたところに二個突起が入つても、引っかかる。これが表れているのではないかと考えることができるのである。

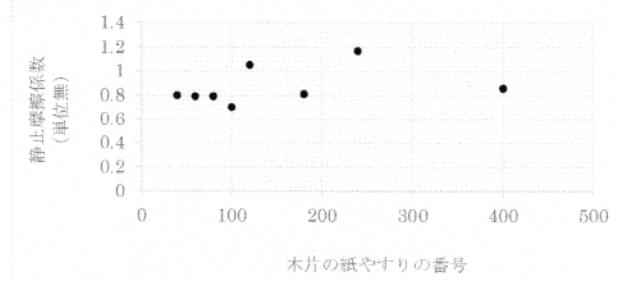
しかし、不思議なことに、G-40 を試料としたときの G-60 との静止摩擦係数と、G-60 を試料としたときの G-40 との静止摩擦係数が異なっていることもわかっている。そこで、同じ木片に対する固定した紙やすりとの静止摩擦係数をグラフにすると、次のようになつた。



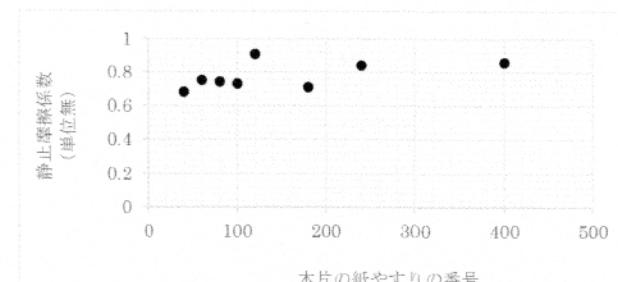
Graph 10 (G-120)



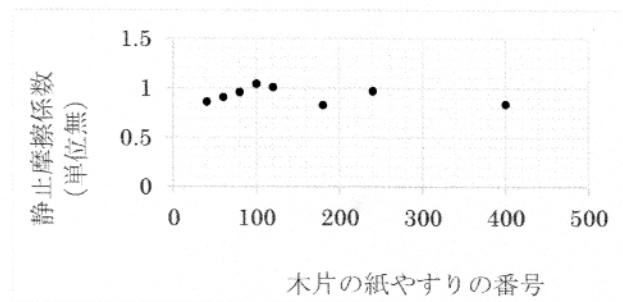
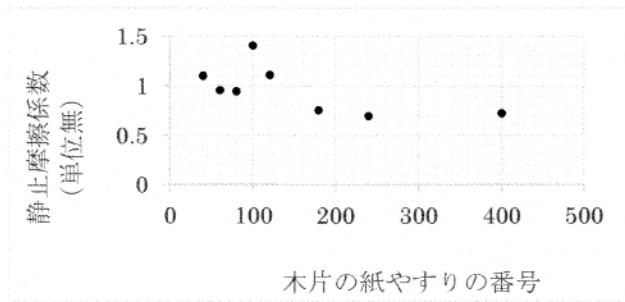
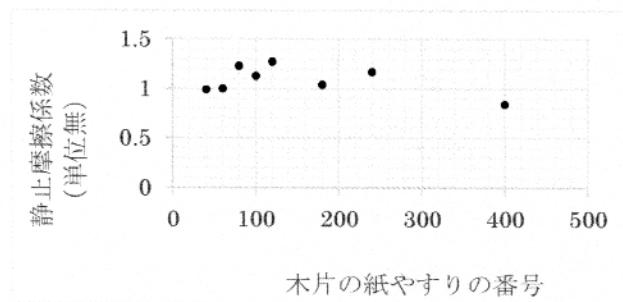
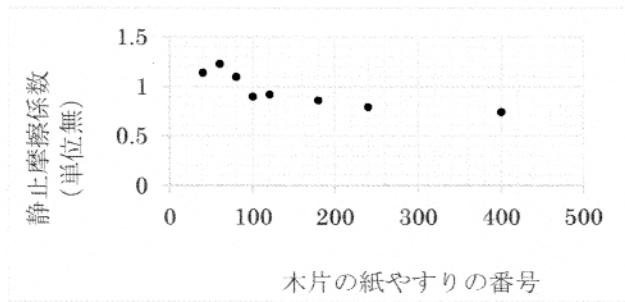
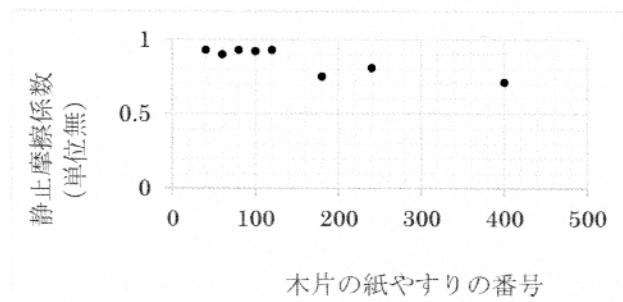
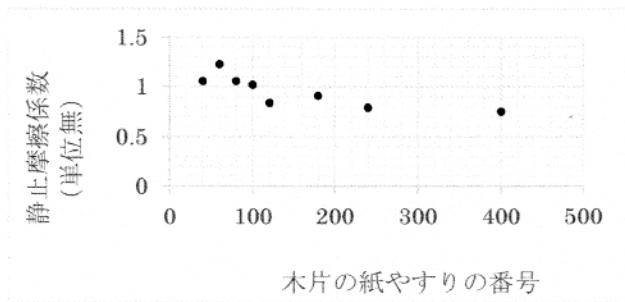
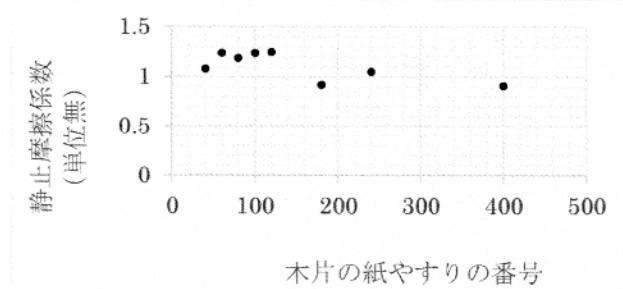
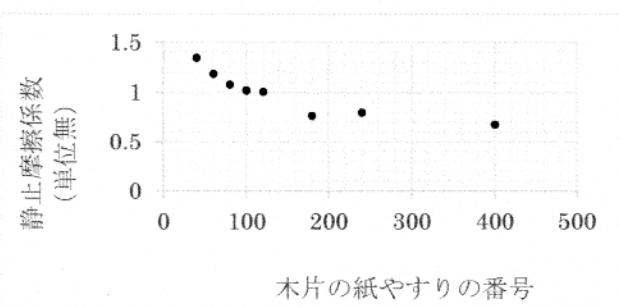
Graph 11 (G-180)



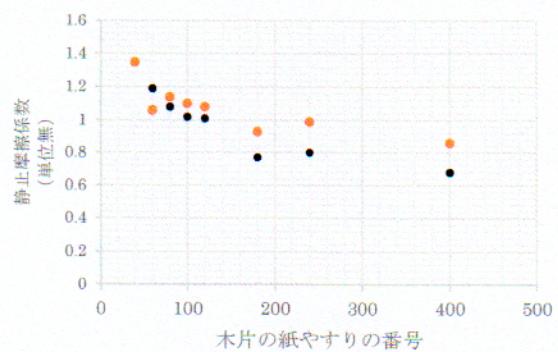
Graph 12 (G-240)



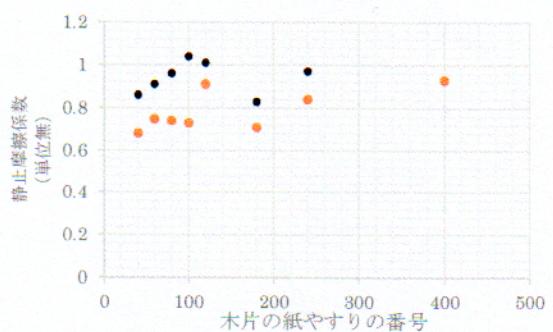
Graph 13 (G-400)



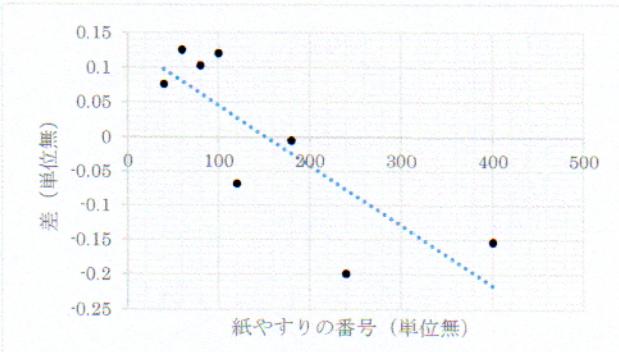
なぜこのような差が生まれるのであろうか、今度は差をわかりやすくするために、二つを重ねたグラフを作成した。これらのグラフによると、番号が小さければ、その分試料に紙やすりの番数を固定したときのほうが摩擦係数は大きく、番号が小さくなると、その全く反対のことがおこるということがわかる。これらの差を、板に固定した紙やすりに対して木片に貼った紙やすりの番号を変化させたときをケース1、木片に貼った紙やすりに対して板に固定した紙やすりの番号を変化させたときをケース2とし、差は(ケース1) - (ケース2)として、グラフにしたのが、Graph 24である。このグラフからは、先ほどの考えを裏付けるような番号による差の変動が読み取れる。ここからは、なぜそのような傾向がみられるのかについて考察する。



Graph 22 (G-40) 黒…木片に G-40



Graph 23 (G-400) 黒…木片に G-400



Graph 24

ここで、実験していたときのことをもう一度振り返ることにしよう。実験Ⅱにおいて、木片まわりは下図のようになっていたはずである。

この時、今まで紙やすりが引っかかっているところしか見ていなかったが、この視点よりも少し細かい部分について考えれば、この傾向を説明できる。

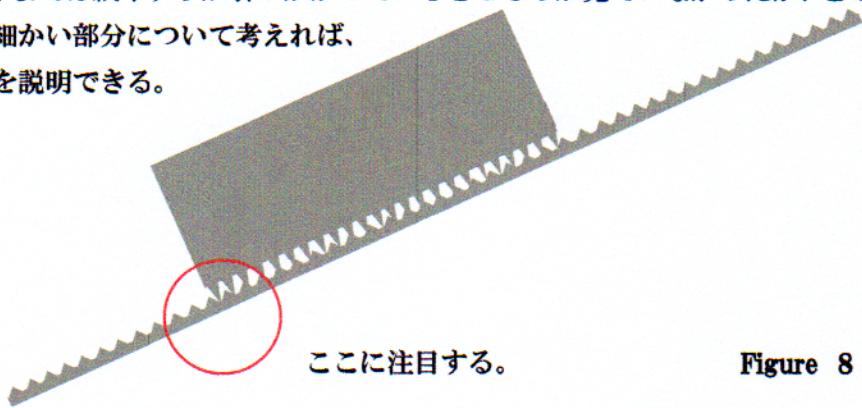


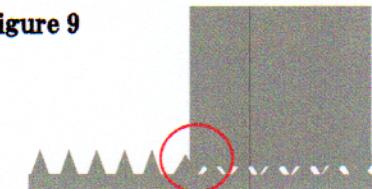
Figure 8

まず、ケース1とケース2ではいったい何が異なっているのかについて考える。すると、やはり貼ってあるものがちがうという点に、最終的にはいきつく。そこで、この違いがどのような差を生んでくるのかについて深めてみよう。

ここで重要なのは、引っかかっているのはやすりだけではないという事実である。紙やすりは確かに引っかかっているが、よく実験の様子を観察すると、図9で示しているように、木片の角が引っかかっていることに気付いた。この角があるかないかが、大きな分かれ目である。これによって、どのような影響があるのかを考えていくこととする。

G-40が板に固定され、G-400が木片に貼られてのっているときの図を下に示す。

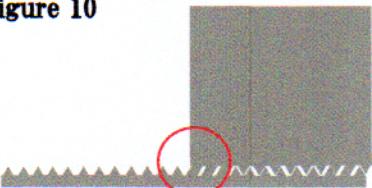
Figure 9



この時、角が、G-40の大きな突起に引っかかっていて、摩擦というよりも、ただ単にストッパーとなって滑りだすのを阻止めていると考えられる。したがって、この説明に従えば、G-40が板に固定され、上にG-400が

のっているときのほうが、G-400が板に固定され、G-40が上に乗った時よりも摩擦が大きいことになる。そして、実験結果Ⅱはその通りである。つまり、差がプラスの値になっているものに関しては実験結果Ⅱのほとんどをこれで説明することができる。そして、ここで気になるのが、差の正負の変化が0なのが、板に貼ってある紙やすりと木片に貼ってある紙やすりが同じ番号の時だということである。この時を図で示すと、下のとおりである。

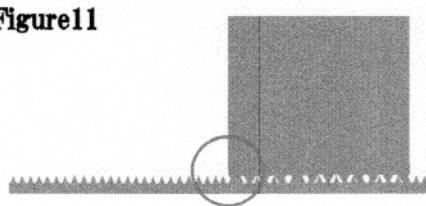
Figure 10



この時、下と上の紙やすりの凹凸はかみ合っている。そうすると、突起の高さが同じなので、下の突起が、角にあたることはない。よって、この値は正確である。つまり、差がないのである。これも実験結果Ⅱに一致している。

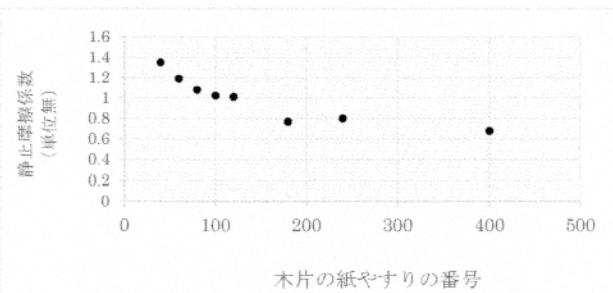
最後に、差が負になっているときには、何が起こっているのだろうか。図で示すと、下のようになっている。この時は、最初に説明した、板に固定されているほうが紙やすりの番号が

小さい場合の逆である。当然、その逆の場合、すなわち最初に説明したもののはうが、摩擦係数が大きいため、(ケース 1) – (ケース 2) という定義によって、負になっているのである。

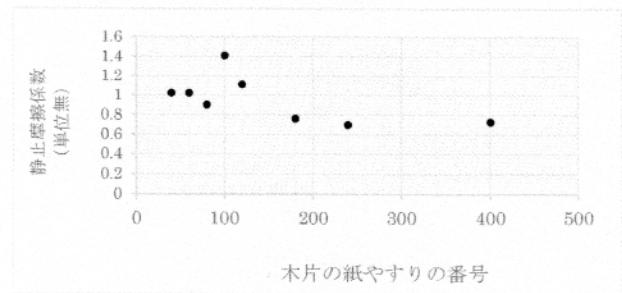


ここまで説明を総合して考えると、平均が正になっているのは、その紙やすりの番号に対して、ほかの紙やすりの番号が大きいときであり、負はその逆の時である。これは、平均の差の傾向を見事に表している。ここまで考察で得られた知見から、データをもう一度見直して、角が影響を与えていない数値、すなわち番号の大きい紙やすりが木片に貼られているときのデータのみによって静止摩擦係数をもう一度グラフにすると、下のようになつた。

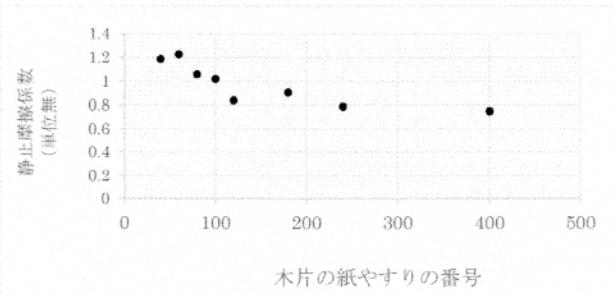
(詳しくはレポート末)



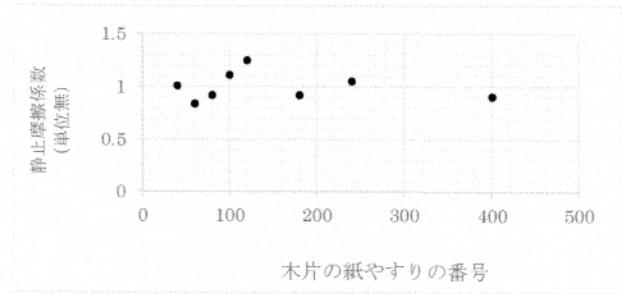
Graph 25 (G-40)



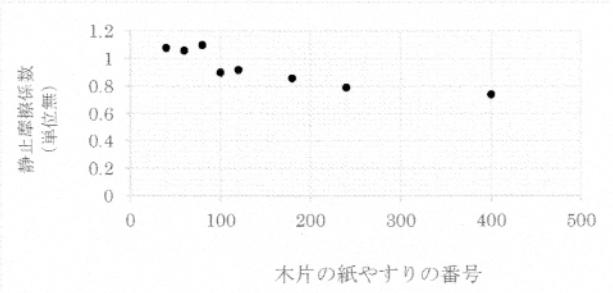
Graph 28 (G-100)



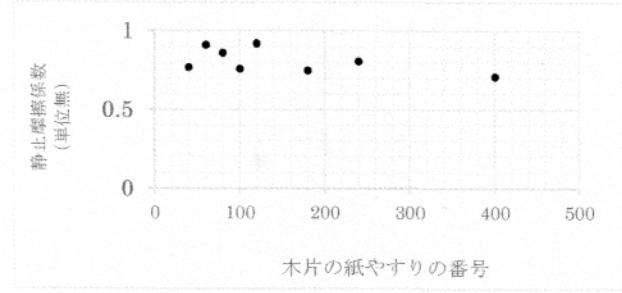
Graph 26 (G-60)



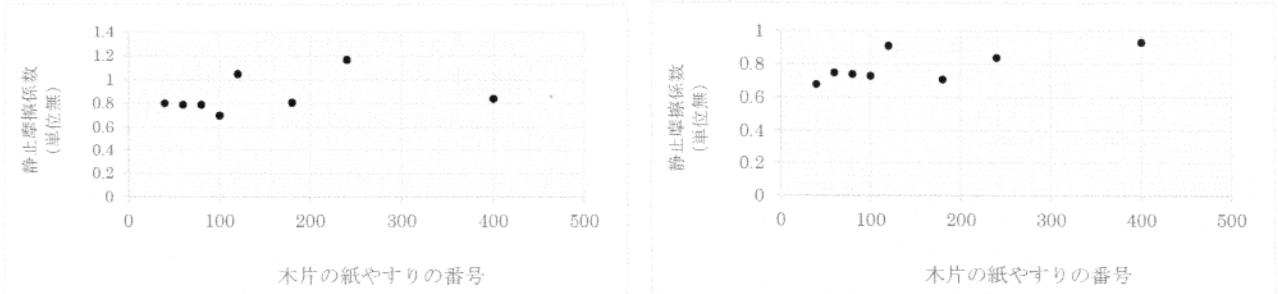
Graph 29 (G-120)



Graph 27 (G-80)



Graph 30 (G-180)



Graph 31 (G-240)

Graph 32 (G-400)

非常にきれいなグラフである。ほとんどのグラフにおいて、大摩擦、中摩擦、小摩擦の傾向が見え、とくに中摩擦が顕著である。これらのグラフによって、考察 I での予想がおおむねその通りであるということが証明された。また、実験 I の実験結果とこれらの結果を照らし合わせたとき、中摩擦が起こっているとき、紙やすりの番号の粗さと、試料の表面の粗さが一致しているというところに注目すれば、表面の粗さは粗いものから順に

アルミ > アクリル板 ≈ 銅板 > ステンレス板

となっていることになる。やはりこの順番に近くなっているのだ。そして、ここで面白い傾向が出ていることに気付く。よく見ると、全体的に 2.2.3 の実験 II の考察で述べているように、摩擦する二つの紙やすりの番号が、番数の小さい方の紙やすりの番数の倍数となっているとき、摩擦係数が大きくなっている傾向がでている。やはり、静止摩擦における中摩擦は、その凹凸の数がこのようになってくると、静止摩擦係数が大きくなるのであろう。この説に、「倍数説」と名前をつけ、これより先はこの名前で呼称することとする。すると、先ほど述べた、「表面の粗さがこの順になっている」ということを言い切ることができなくなってきた。突起の数がその倍数でも、摩擦が大きくなる、すなわち、中摩擦が起こるのは一度だけではないからだ。実際には、表面の粗さはその順番通りになっているように見えるのだが、それはあくまでたまたまであり、実際にはそうではなかったかもしれないということを忘れてはならない。また、この説には適用できる粗さの範囲があると考えられる。例えば、1 の倍数でもかみ合うというわけではないということである。したがって、実験結果からだいたいの範囲を見積もるとすれば、40 の倍数、60 の倍数は実際に傾向がみられており、また、G-240 の中に G-120 が大きくなる傾向がみえていることから、40 の倍数から、120 の倍数までなら適用できるということである。また、この問題については突き詰めて考えていくば様なことがわかりそうであるが、実際には紙やすりのように、突起の大きさがある程度統一されているようなものは少ない。したがって、倍数説の適用できる中摩擦は特殊な場合の摩擦といえる。

また、これらのデータの横軸となっている紙やすりの番号は、1 インチ当たりの選別に用いるふるいの目の数という番号であり、あくまで直線上の数であるために、実際の平面の摩擦に関しては、二乗してだいたい 1 cmあたりの突起の個数を出してもよかつたのかもしれない。しかし、実験 I、実験 IIにおいては、説明にも平面か直線か、という問題があまり出

てこなかったので、ここではそのまま利用してもよい、としておく。

2.2.5 実験ⅠⅡを合わせての結論

ここまで実験から、静止摩擦係数を求める実験の結果に対する結論を出す。

(A) 静止摩擦の種類

静止摩擦には、大きく三種類が存在し、小摩擦は2種類に分けられる。

- ・大摩擦…試料に対して凹凸が粗い物体が接触したときにおこる摩擦
(紙やすりであれば、G-40あたり～G-120あたりまで)
- ・中摩擦…試料の表面と凹凸の状態がほぼ同じ物体が接触したときの摩擦
(紙やすりであれば、G-100あたり～G-120あたりまで)
- ・小摩擦…大摩擦と逆の状態になった時におこる摩擦
(紙やすりであれば、G-120あたり～G-400あたりまで)

上昇型小摩擦…小摩擦のうち、摩擦が大きくなっているとき

(紙やすりであれば、G-120あたり～G-240あたりまで)

低下型小摩擦…小摩擦のうち、試料の粗さに対して細かすぎるか、あるいはもろすぎる物体が接触したときに起こる摩擦

(紙やすりであれば、G-180からG-400あたりまで)

(B) 測定方法

実験の手法Ⅰという簡単な装置でも、ある程度正確に測ることができる。しかし、木片をのせるという方法であると、考察Ⅱに示した通り、角が紙やすりの凹凸にひっかかって、うまく測れない場合が出てくるので、木片の形は立方体の角を丸くとって、それに紙やすりを貼り付けたほうがよい。また、角度をどんどんと傾けていくという手法には、限界があるということもわかった。やはり人の手を使っているため、その誤差を考えないわけにはいかない。すると、もともと大きく範囲をとることがよく知られている静止摩擦係数の測定になると、果たして実験が正しかったのかどうかについて判断がつかなくなってしまう。したがって、本来は人の手ではなく、何かしらの動力を用いたほうがよかっただろう。さらに、この方法での測定は、非常に非効率的である。なぜならば、その試料がどこかに固定されていた場合に、傾けることも切り取ることもできないわけであるから、測定が不可能である。これはこの実験の最も大きい問題点であると私は考える。もちろん、木片のような形にすることができたものと、傾けることができる状態である試料を用いた実験であれば、ある程度の実験の精度が実験の結果Ⅱからうかがえる。私は、この実験方法を、実用的ではないが、ある程度の精度は保証できる方法としてとらえた。もっと他のものもやるべきではあろうが、この実験のなかでは、この測定方法がある程度正確な値を出していると、結論しておく。

(C) 具体的な静止摩擦係数

<紙やすりと紙やすりの摩擦>

Table 1

	G-40	G-60	G-80	G-100	G-120	G-180	G-240	G-400
G-40	1.35							
G-60	1.19	1.23						
G-80	1.08	1.06	1.10					
G-100	1.02	1.02	0.90	1.41				
G-120	1.01	0.84	0.92	1.11	1.25			
G-180	0.77	0.91	0.86	0.76	0.92	0.75		
G-240	0.80	0.79	0.79	0.70	1.05	0.81	1.17	
G-400	0.68	0.75	0.74	0.73	0.91	0.71	0.84	0.93

上の値について、紙やすりに関しては、誤差は小さく、全体を通して 2° 、平均から離れた値が多かった。よって、 45° のときを基準として静止摩擦係数を計算、 43° と 45° のときの静止摩擦係数の差と、 45° と 47° のときの静止摩擦係数の差の平均を、誤差として認めることとする。実際に計算すると、約 ± 0.07 である。傾向を式にすることできなかったのが残念であるが、中摩擦の傾向は倍数説によって説明できる。

<四つの試料と紙やすりの静止摩擦係数>

これらに関しては、誤差の範囲が非常に大きい。そこで、どれだけ離れているのか、無作為に 10 パターンを選んで、誤差の範囲がどれだけ大きいのかを調べたところ、だいたい平均 5° 、差が出ているので、 45° を基準として、紙やすりと紙やすりの時と同じように誤差を出すと、約 ± 0.18 の誤差を認める必要がある。これは非常に大きな誤差である。紙やすりのように規則正しい形をとっていない試料のほとんどのデータは、誤差が大きくなっている。下に、実際の結果を載せる。

	G-40	G-60	G-80	G-100	G-120	G-180	G-240	G-400
アルミ板	1.10	0.95	0.88	1.01	0.69	0.88	0.74	0.60
アクリル板	0.79	0.62	0.47	0.59	0.69	0.51	0.54	0.45
銅板	0.64	0.76	0.63	0.65	0.76	0.72	0.62	0.47
ステンレス板	0.59	0.74	0.59	0.57	0.37	0.64	0.47	0.34

(D) 具体的な静止摩擦係数の傾向

- i) 四つの試料を用いた実験Ⅰで、次のようなことが明らかになった。
- ・試料が軟らかい場合、静止摩擦係数は大きくなる。
 - ・全体的な静止摩擦係数の大きさは、アルミ板>アクリル板>銅版>ステンレス板の順
- ii) 紙やすりと紙やすりの実験で、次のようなことが明らかになった。
- ・紙やすり同士の摩擦においては、中摩擦の時の静止摩擦係数が最も大きい場合が多い。
 - ・紙やすり同士の摩擦には、大、中、小の摩擦の傾向がよくあらわれる。
 - ・摩擦させる紙やすりの番号が同じ大きな数字の倍数となっていたときに、静止摩擦力が大きくなるという倍数説がある程度の範囲で認められる。

3 動摩擦係数の基本的な測定

3.1 実験Ⅲ “4つの試料と紙やすりの動摩擦係数の測定”

3.1.1 実験Ⅲの目的

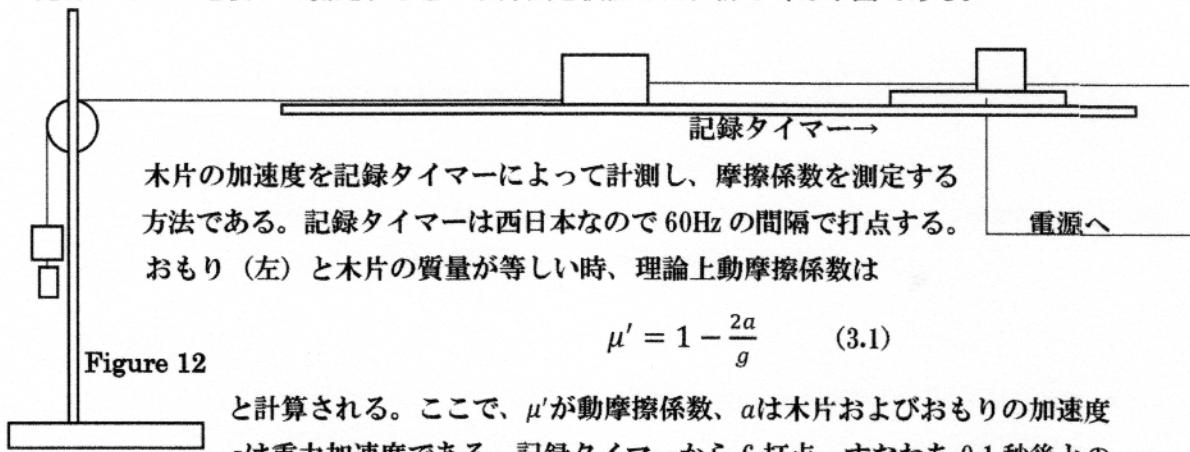
この実験は、4つの試料と紙やすりの、動摩擦係数の測定および考察によって、動摩擦係数の、特に速度依存性の傾向をつかむことを目的とする。速度依存性の傾向を重視するのは、摩擦の時に発生する音は、速度と大きなかかわりを持っていると予想したからである。

3.1.2 実験Ⅲの手法

この実験にあたって、様々な実験方法が考案され、試されたが、動摩擦係数を正確に測定する装置の考案には至らなかった。そこで、残念ではあるが、最終的にはBeespiをもちいた測定を行った。ここでは、まずどのような実験方法が考案されたのかということを、一部紹介する。

(a) 記録タイマーを用いた方法

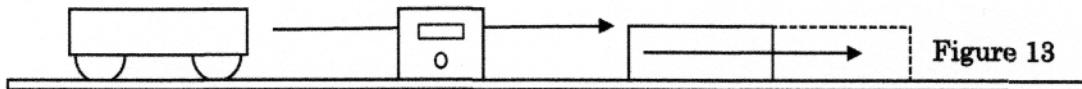
記録タイマーを使って測定するという方法を検証した。詳しくは下図である。



速度をはかりとて計算し、時間ごとの速度の変化から加速度を求めようという方法である。この方法で実際に計測してみると、アルミ板と G-40 の場合で摩擦係数が 1~1.5 の値をとった。この実験結果は、静止摩擦係数の結果に比べてかなり大きく、本来加速すべき速度に達していないと考えられるが、これはおそらく記録テープの重みで、質量に変化が生じているうえに、紙テープとアルミとの摩擦も考えられる。さらに、記録タイマーが打点する際に一瞬ではあるが紙を挟んでいるために、摩擦が生じていると考えられる。したがって、この実験方法では正確に測ることができないので、この方法は不採用とした。

(b) 運動エネルギーと摩擦の仕事を用いた測定方法

Beespi で台車の速度を測定し、その台車の運動エネルギーが、すべて木片に貼った紙やすりによる摩擦で失われると考えたとき、下のような実験を行えば、理論上計測が可能である。



しかし、実際には算出以前の問題として、台車が木片に二回当たったり、台車の摩擦があつたりと、正確さを欠いた部分が多かったので、この方法も採用しなかった。

(c) ばねを用いた実験

実験の目的の中に、動摩擦係数の速度依存性があるのかどうかを検証するというものがある。この実験は、それを確かめられるようになっている。実験装置は以下のようになっていた。

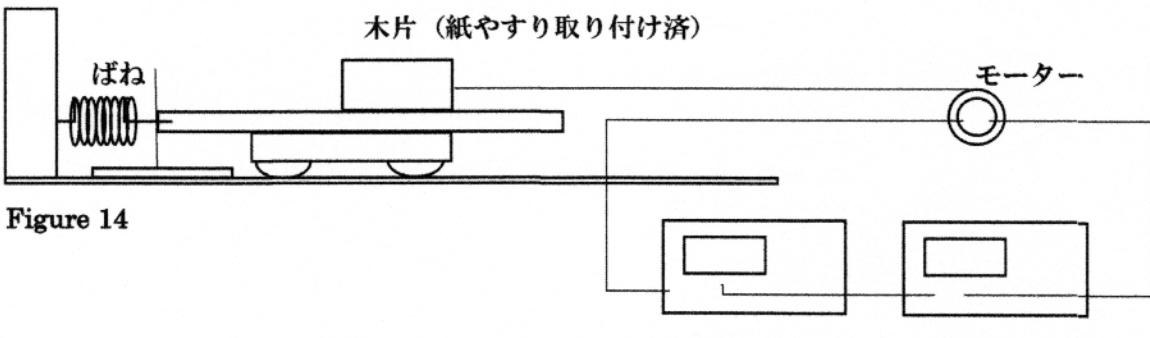


Figure 14

この実験では、特定の速度の時の動摩擦係数求めることができるようになっている。速度はモーターの回転数を調整するだけでよい。この実験において、動摩擦係数は以下のように求められる。

ばねの弾性力と摩擦係数が釣り合ったとき、台車は止まる。この時、動摩擦係数 μ' は

$$kx = \mu' mg \quad \dots (3.2)$$

から、ばねの自然長を x_0 、伸びたときのばねの長さを x_1 とすると、

$$\mu' = \frac{k(x_1 - x_0)}{mg} \quad \dots (3.3)$$

で求められる。ここで、 k はばね定数、 m は木片の質量、 g は重力加速度である。

また、ばねにシャープペンシルの芯を取り付け、その先を紙にあてておくことによって、どれだけのびたのかを測ることができるようにしておく。モーターの回転数については、オシロスコープに表れる波形を基に計測、調整することができる。

もしも速度依存性がなければ、動摩擦係数はどんな速度になろうとも一定である。実際に実験してみたところ、台車と地面との転がるときに生じる摩擦力が動摩擦係数を測るのに大きすぎるということがわかった。ほかに下にボールや円柱を挟んでみたが、うまく回ってくれなかった。したがってこの実験は実際に値をとるまでに失敗であることが分かった。しかし、モーターの回転数を上げたときのほうが摩擦力が大きくなっている、台車が動いているということに気が付いた。また、回転数がもう少し速くなってくると、今度はまったく動かなかった。これはやはり、動摩擦係数に速度依存性があるということを示唆しているのかもしれない。そこで、速度依存性に関しても検証できる、新しい方法を考えた。それが、実際に値を計測した、次の実験方法である。

(A) 実験IIIに用いるもの

静止摩擦係数の測定に用いたアルミ板、ステンレス板、銅板、アクリル板、木片、支え台、滑車、両面テープ、銅線、ミシン糸、Beespi、ものさし 実験Iで用いていたものと同じ番号の紙やすり（銅版、ステンレス板、アクリル板、アルミ板などの、固定するものを試料と呼ぶ）

(B) 実験IIIの方法

実験Iで使用したような木片に紙やすりをつけたものに糸を取り付け、それを滑車にかけて、おもりをつける。そして、Beespi を 8 cm 感覚で固定し、もっともおもりに近いところにある Beespi の中心から、40 cm 離れたところに持ってきて、離す。この運動を、その木片に銅線をつけておいて、その銅線の速度を、Beespi によって求める。その後、速度の変化から、動摩擦係数を測定する。また糸を木片につける際は、回転させる力のモーメントを発生させないように、できるだけ地面に近いところに固定する。この作業は 4 回行って平均する。

(C) 実験IIIの装置

実験装置には右のものを使う。記録タイマーを用いた実験の時に使用した実験台の装置の上に Beespi を並べたものである。おもりには 30 g、60 g、90 g を用いて、試料として固定するものの長さは 50 cm 以上である。垂直荷重は 35 g で統一する。



Figure 15



Picture 1

(D) 実験IIIで統一する条件

- ・木片の質量（35g） 　・接触面積（15平方cmで統一する。）
- ・温度、湿度（同じ日に行うことで統一） 　・4回行った平均をとる。
- ・毎回表面を乾いた布でふき取る。

(E) 理論的な背景

この実験装置について、理論的な求め方および装置自体に関する説明をする。この装置は、Beespi をもちいて、速度の変化から動摩擦係数を求める実験である。速度から求めるという求め方は、考案した実験 I と同じであるが、赤外線センサを用いて計測する Beespi を使えば、まったく触れずに計測することが可能である。また、速度がわかることで、速度依存性との関係についても簡単に考察することができる。そして、Beespi が使えるかどうかについて検証するときに、Beespi は金属に反応しやすいということが分かったので、実験には、銅で作った質量の無視できる細い線を木片に取り付けることによって、Beespi での正確な測定を可能にした。滑車を使っているのは、測定している動摩擦以外の摩擦によって、正確な値が出ないことを危惧したからである。気になるのは、滑車の回転エネルギーに重力の位置エネルギーがどれだけ変化しているかであるが、滑車に大きいものを使わないことで、無視できるとした。理論的には、以下のように求められる。

まず木片に関する運動方程式である。木片の質量を m 、加速度を a 、張力を T としている。

$$ma = T - \mu' mg \quad \dots (3.4)$$

次に、おもりに関する運動方程式である。おもりの質量を M とすると、

$$Ma = Mg - T \quad \dots (3.5)$$

(式6) と (式7) を足して、

$$(m + M)a = Mg - \mu' mg \quad \dots (3.6)$$

この式を変形して、

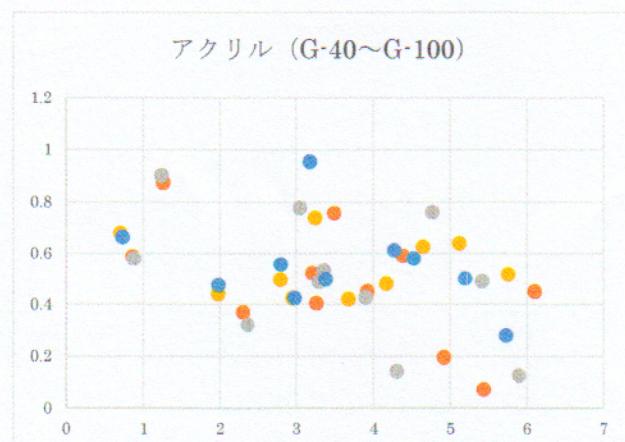
$$\mu' = \frac{M}{m} - \frac{a}{g} \left(\frac{M+m}{m} \right) \quad \dots (3.7)$$

これによって、摩擦係数を求めることができる。

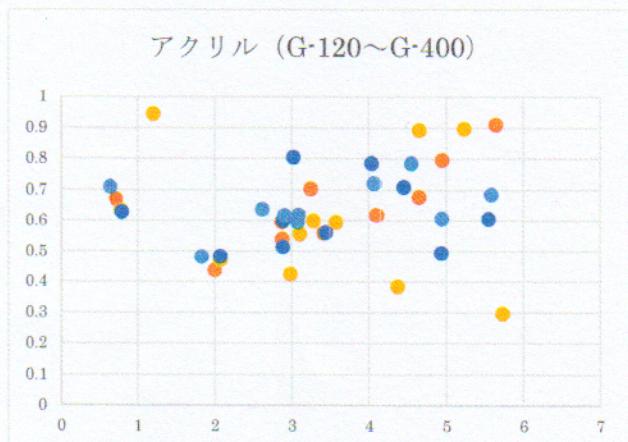
3.1.3 実験IIIの結果

木片 35g に対しておもり 30g、60g、90g の三つの種類のおもりについて行った。また、実験 I と同じ組み合わせで、試料に対して紙やすりは 8 種類行った。実験回数は失敗もふくめると、2000 回ほどとなった。実験中に、1 つ問題が発生した。特に、おもりが重くなってきたときに、木片が動き出してすぐの Beespi に記録されている速度から算出した摩擦係数が、どう考えてもそとはなりえないであろう値になるという事態である。これは、Beespi の測定原理が大きく関係していると考えられる。Beespi も、瞬間の速度を求められるわけではなく、赤外線センサを使った測定を行っているため、Beespi の厚みのなかでの加速度的な変化は、測定不能であり、それが実際と異なる値を出している原因になっている

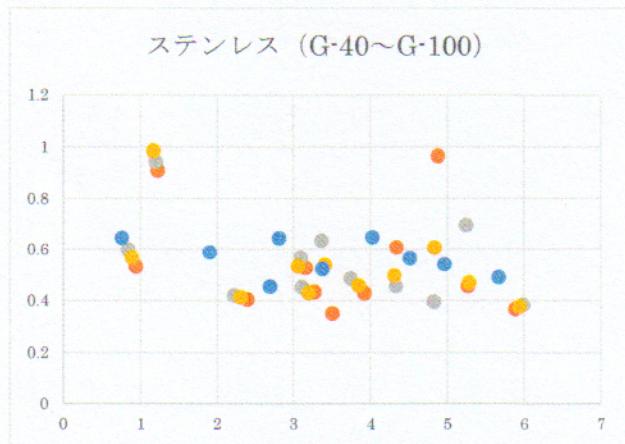
のだ。そうなると、その Beespi が出している値をそのまま信用するわけにはいかなくなる。そこで、データを処理する際に、滑り出してから 2 個目までの Beespi のデータのうち、0.8 を超えたものを除外して考えることとした。また、負の数になっているものや極端に小さいものもあるので、これも除外して考えることにする。これを除外する理由については、のちに述べる。実際にとられたすべてのデータは、レポート末に載せている。また、グラフの色分けであるが、紙やすりの番号の小さいほうから、赤、灰、黄、青の順番であり、データは半分に分けてある。単位は、縦軸が摩擦係数、横軸が速度であり Graph32 から、Graph39 までは同じものである。注意すべきは、計測時の速度が時速表示になっていることである。



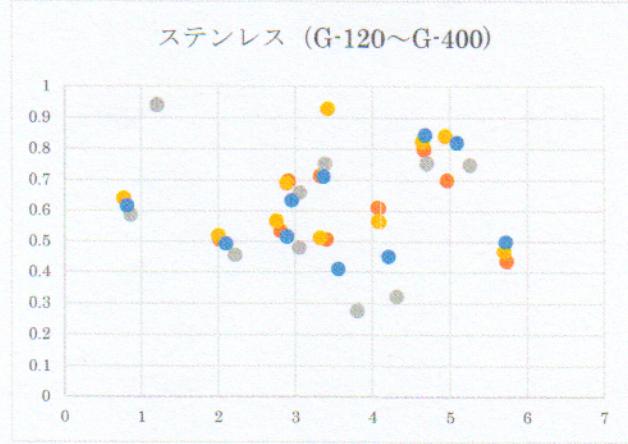
Graph 32 (アクリル-G·40~G·100)



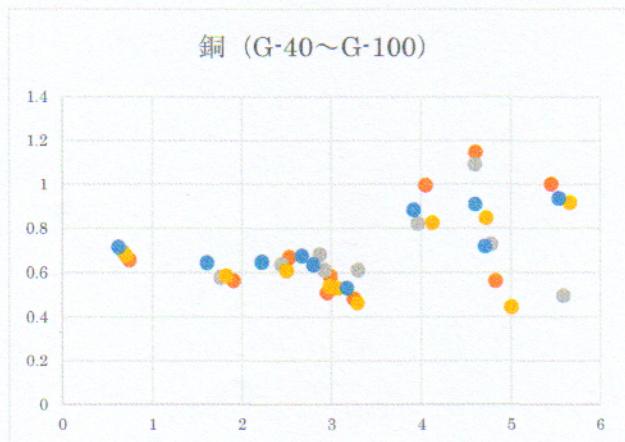
Graph 33 (アクリル-G·120~G·400)



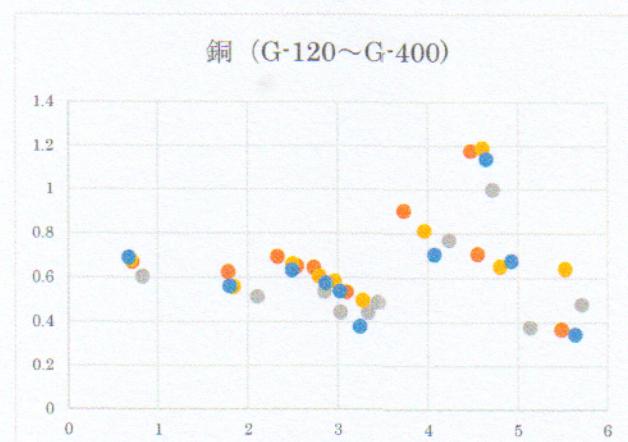
Graph 34 (ステンレス-G·40~G·100)

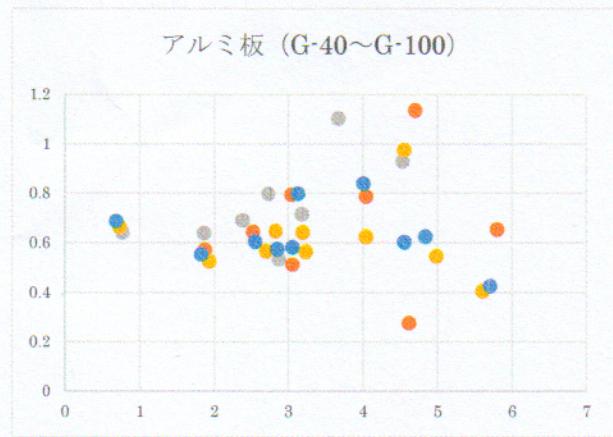


Graph 35 (ステンレス-G·120~G·400)

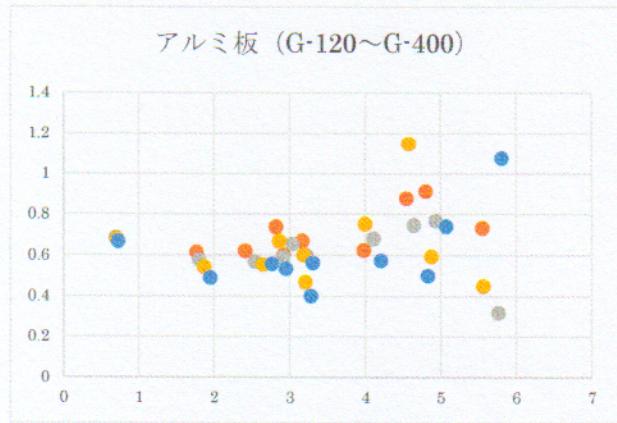


Graph 36 (銅-G·40~G·100)



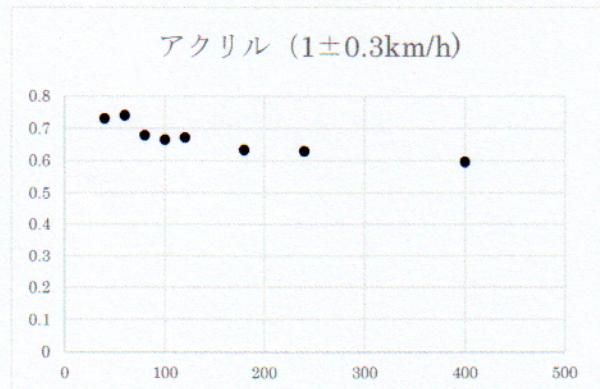


Graph 38 (アルミーG-40～G-100)

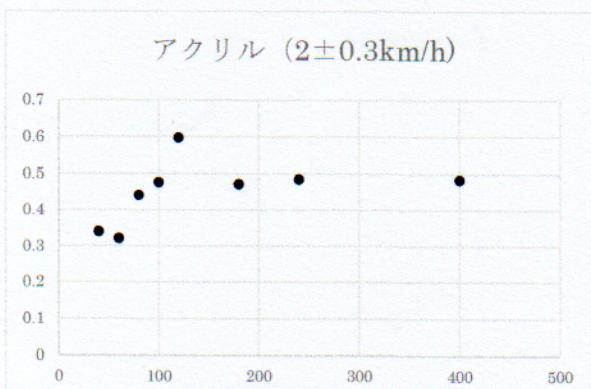


Graph 39 (アルミーG-120～G-400)

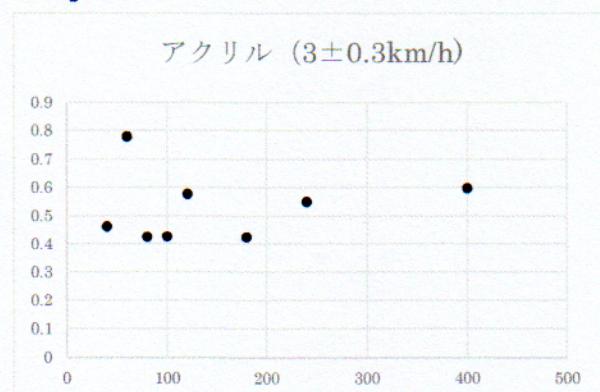
ここまでデータだけでは、まだ何も言えない上に見にくいので、ほとんど同じ速度の時の、同じ試料に対する紙やすりの番号と動摩擦係数をグラフとして整理する。定義として、 $\pm 0.3\text{km/h}$ にあれば、ほとんど同じ速度としておく。速度は整数で分ける。また、該当する範囲に値がなければ、仕方がないので最も近い値とする。そして、同じ範囲に二つ数字があった時には、速度が基準となる整数により近い方をとる。ただし、ほとんど離れ方が同じだったとき (± 0.05 以内) だったときには、その二つの平均とする。Graph40～Graph59でのグラフの横軸は紙やすりの番数、縦軸は動摩擦係数である。



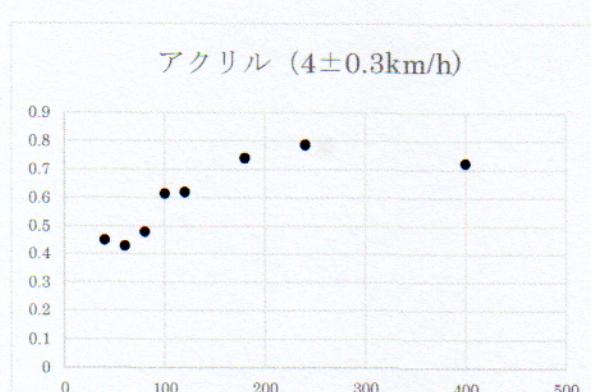
Graph 40



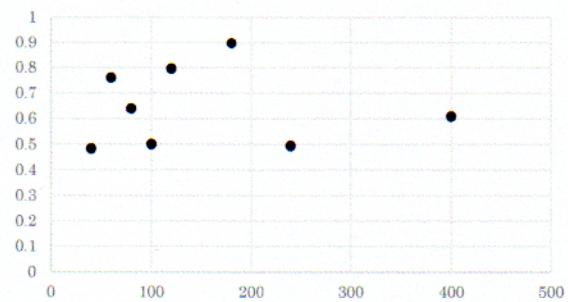
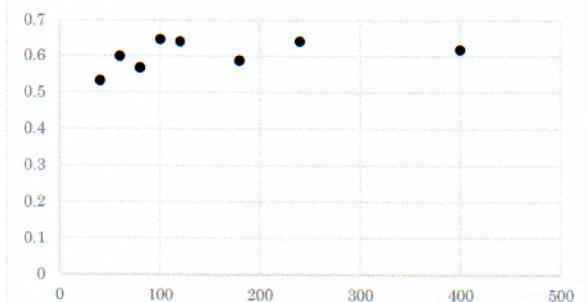
Graph 41



Graph 42

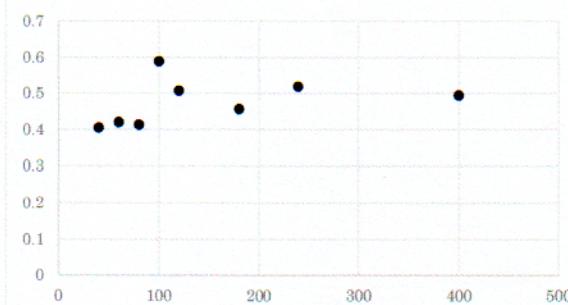
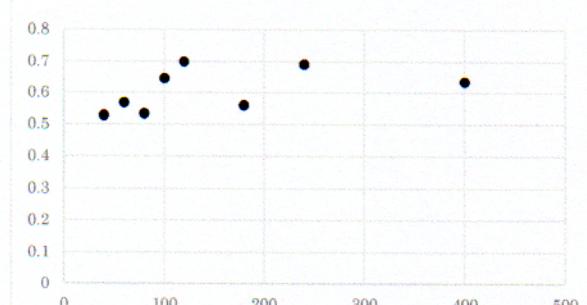


Graph 43

アクリル ($5 \pm 0.3 \text{ km/h}$)ステンレス ($1 \pm 0.3 \text{ km/h}$)

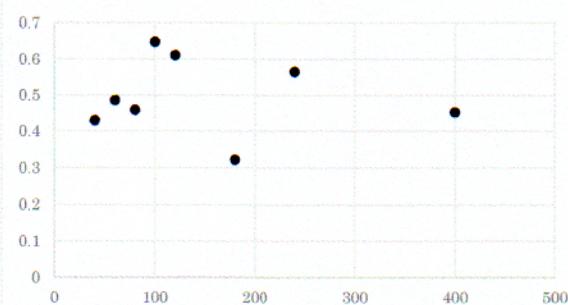
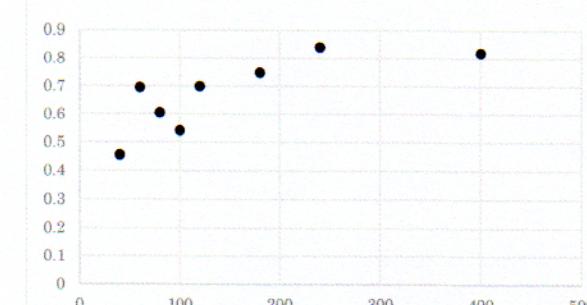
Graph 44

Graph 45

ステンレス ($2 \pm 0.3 \text{ km/h}$)ステンレス ($3 \pm 0.3 \text{ km/h}$)

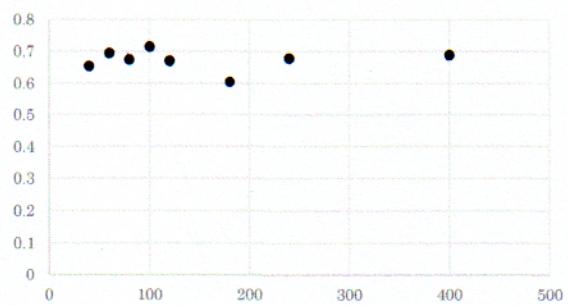
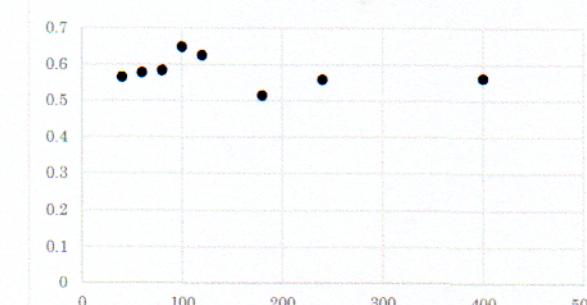
Graph 46

Graph 47

ステンレス ($4 \pm 0.3 \text{ km/h}$)ステンレス ($5 \pm 0.3 \text{ km/h}$)

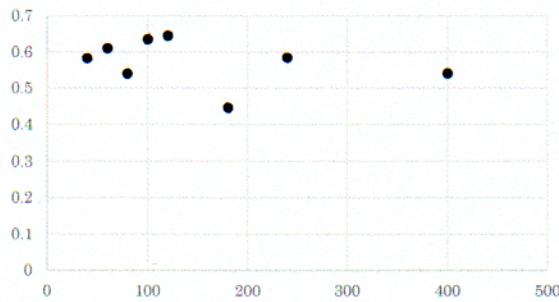
Graph 48

Graph 49

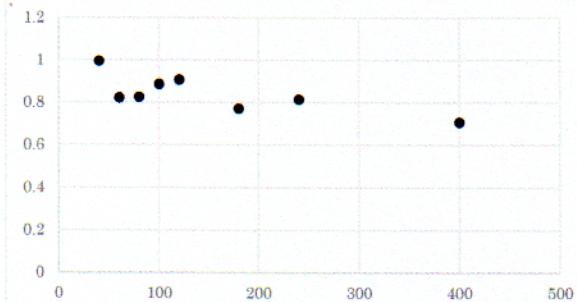
銅 ($1 \pm 0.3 \text{ km/h}$)銅 ($2 \pm 0.3 \text{ km/h}$)

Graph 50

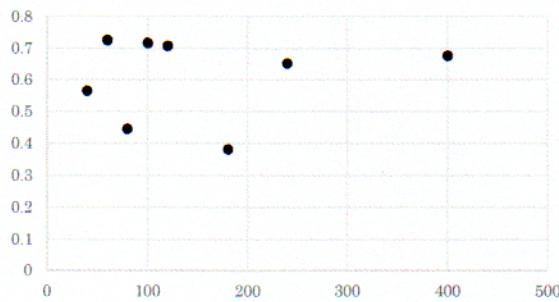
Graph 51

銅(3 ± 0.3 km/h)

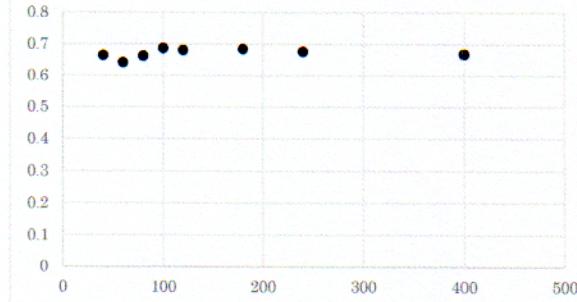
Graph 52

銅(4 ± 0.3 km/h)

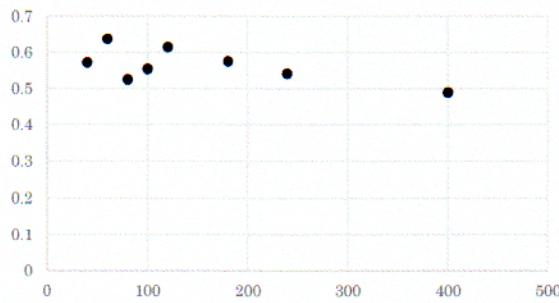
Graph 53

銅(5 ± 0.3 km/h)

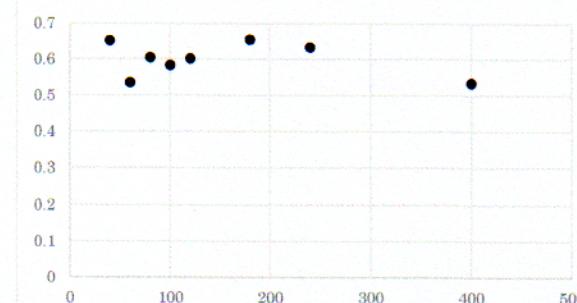
Graph 54

アルミ(1 ± 0.3 km/h)

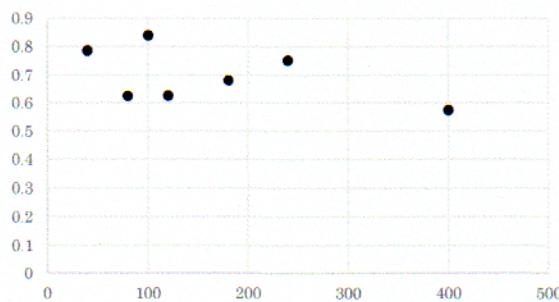
Graph 55

アルミ(2 ± 0.3 km/h)

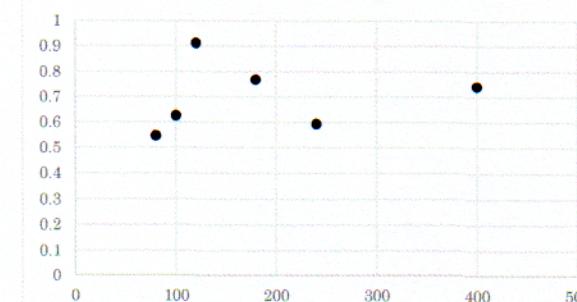
Graph 56

アルミ(3 ± 0.3 km/h)

Graph 57

アルミ(4 ± 0.3 km/h)

Graph 58

アルミ(5 ± 0.3 km/h)

Graph 59

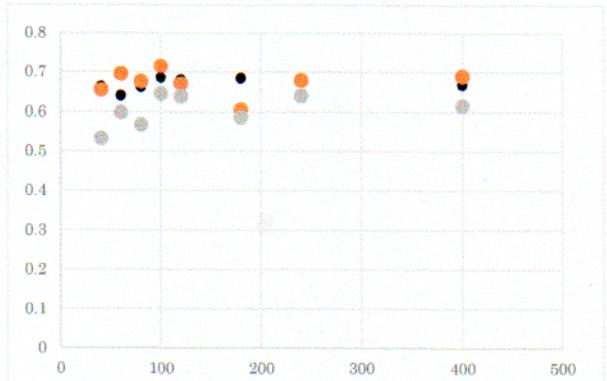
さて、ではこれらのデータについて考察していこう。

(A) アクリル

アクリルのグラフの傾向は、ほかの 15 のグラフと比べて、明らかに違う傾向を見せていく。例えば、Graph41 や Graph42 に表れているような、番数にしたがってだんだんと動摩擦係数が大きくなっていくような傾向は、ほかのグラフには見られていない。アクリルだけに表れている傾向が、様々に見受けられる。ここで、ほかの三つの試料と比べると、アクリルだけプラスチックで、それ以外は金属である。静止摩擦力の実験の際にはあまり影響がなかったのに対して、動摩擦になると、その違いが顕著に表れてきていると考えられる。つまり、この違いを生んでいるのは、アクリルの動摩擦に対する特性なのだ。では、どのような特性がみられるのだろうか。アクリルは、一般的に金属と比べて、よく曲がるほうではなく、むしろ曲げるような力を加えると割れてしまうことが多い。つまり、展性・延性という金属の特性ではなく、表面が削れた時にはぼろぼろと崩れてしまうような性質を持っていると考えられるのである。これは確実に動摩擦に影響を及ぼす。おそらく、接触しているものの周りに摩擦によって崩れてできた非常に小さなアクリルの粉がたくさんあることによって、突起が引っかかるからなったり、あるいはすべり止めの砂と同じように摩擦を大きくする働きを持ったりするのだろう。もしこの考えにのっとって考えるならば、番数が小さい時には、その紙やすりの突起とアクリルの間に小さな粒子が入り込むことによって、引っかかることができなくなるため摩擦力は低下、番数が大きい時には、なにかしらの紙やすりの摩擦を補助する役割をはたして、摩擦力が上昇していることが、Graph40～Graph44 に表されていると考えられる。実際に、その傾向はいくつかのグラフに見られている。

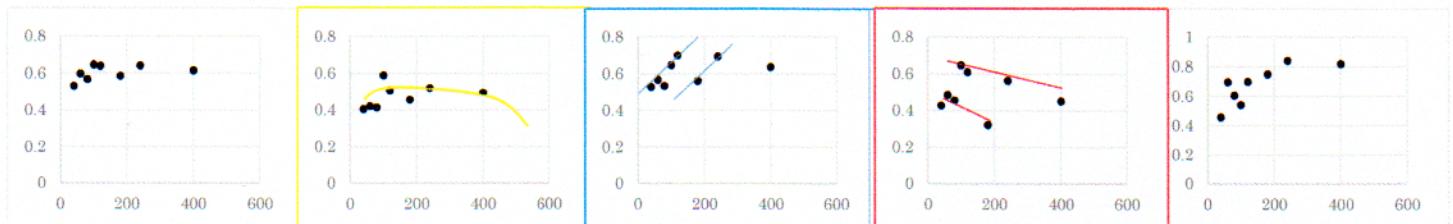
(A) 三種類の金属

次に、三種類の金属について考察する。この三種類の金属のグラフは非常に面白い傾向を見せていく。この三種類には、共通した形が表れているのだ。例えば、ステンレス (4 ± 0.3 km/h) のグラフと、銅 (5 ± 0.3 km/h)、アルミ (5 ± 0.3 km/h) のグラフは、データの散らばり方が似ている。また、ステンレス (1 ± 0.3 km/h), 銅 (1 ± 0.3 km/h)、アルミ (1 ± 0.3 km/h) のグラフは、グラフの形がほとんど一緒である。また、この時、ステンレス、銅、アルミの動摩擦係数は、Graph60 にあるように、最も大きいのは銅の動摩擦係数であり、それについてアルミの動摩擦係数、もっとも全体として低かったのはステンレスの動摩擦係数であった。この順番と、そのほかの傾向にはどのような関連性があるのかについて考えてみよう。

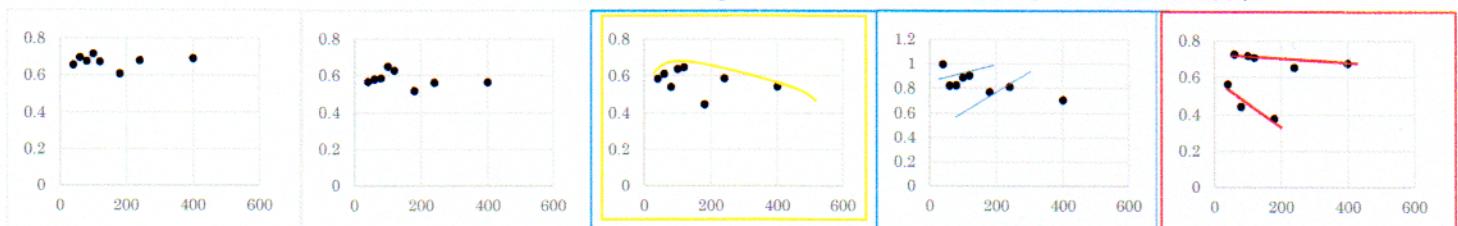


Graph 60 (黒…アルミ、オレンジ…銅、灰…ステンレス)

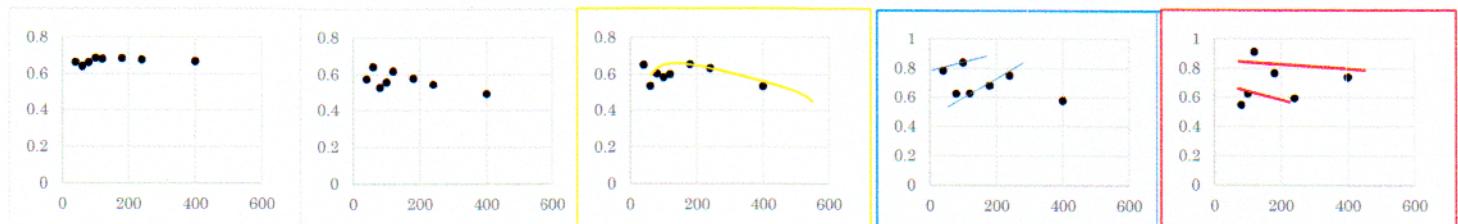
ここで、金属を銅とアルミというグループとステンレスというグループを作つて、それらの違いを調べた。すると、非常に興味深い傾向がわかつてきた。動摩擦係数と速度との間に、ある関係があると思われる結果が出てきたのだ。単位は、縦軸が摩擦係数、横軸が紙やすりの番号である。



Graph61 (ステンレス 左から 1~5±0.3km/h)



Graph62(銅 左から 1~5±0.3km/h)

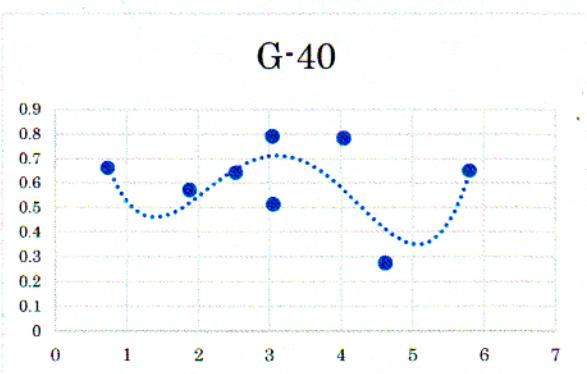


Graph63(アルミ 左から 1~5±0.3km/h)

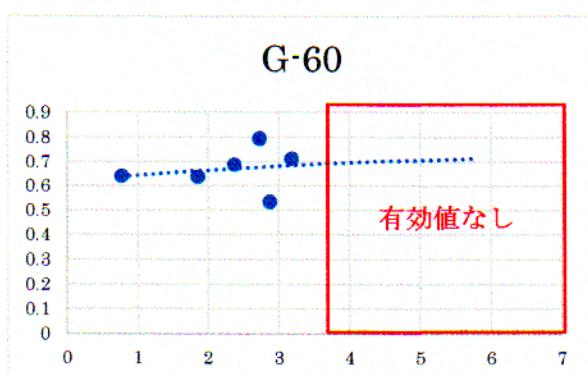
同じ傾向にあるグラフを同じ色で囲んでみたところ、上のようなになった。ステンレスの速度に対する摩擦係数の傾向と銅、アルミの速度に対する摩擦係数の傾向を比較すると、同じような傾向が三種類の金属にあるものの、ステンレスのほうが、銅、アルミより約 1 km/h 遅い段階で同じ傾向が表れていることがわかつた。これは大きな発見である。そして、摩擦係数を比較すると、ステンレスのほうが摩擦係数が小さく、摩擦係数が小さいほど、速度が小さい時に同じ傾向が表れてくるとも考えられる。しかし、表面の構造や、摩擦時の物体の挙動は非常に複雑である。したがつて、理論的にこれを証明するのは、現段階ではほぼ不可能である。そこで、今わかっていることだけから、この結果を利用してこのほかの金属との摩擦係数に関して、摩擦係数を予想する。

まず、基準とするのはアルミの傾向だと定めて、アルミの傾向をもう一度読み取る。アルミの速度と摩擦係数との関係のグラフを、もう一度紙やすりの番号ずつ見てみると、次のグラフのようになっていた。

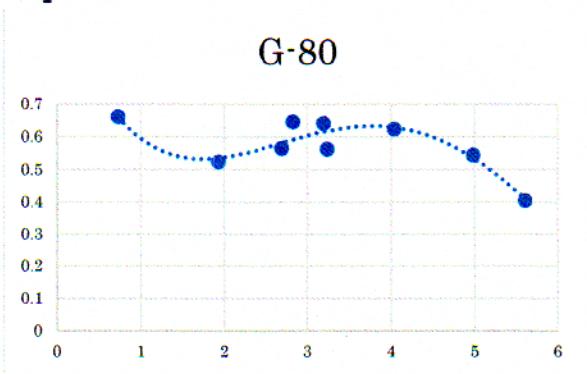
Graph64～Graph71 の縦軸は動摩擦係数、横軸は速度 (km/h)



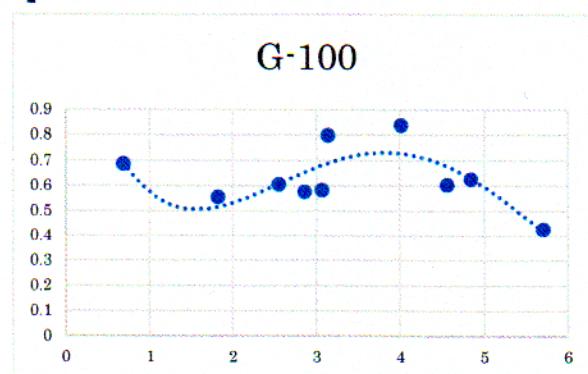
Graph 64



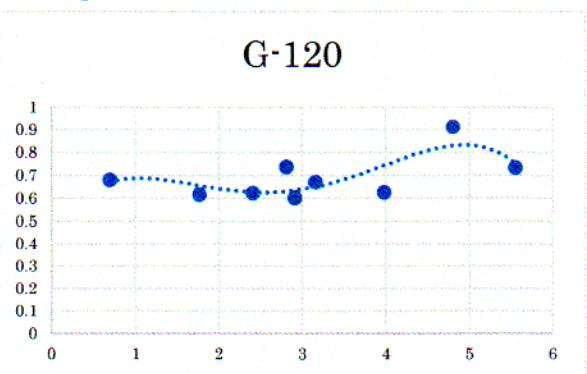
Graph 65



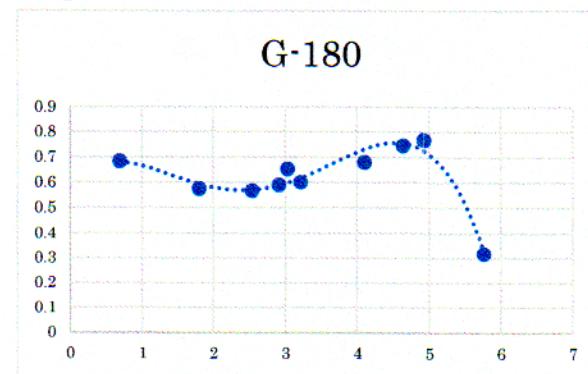
Graph 66



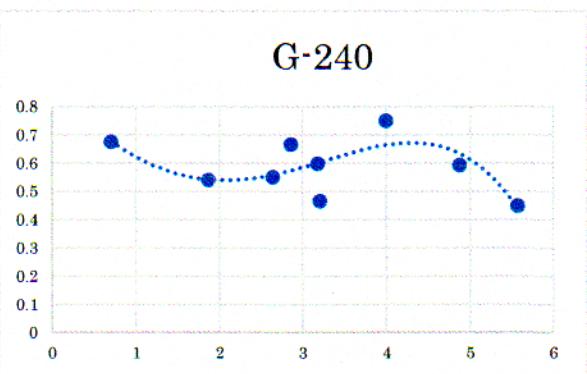
Graph 67



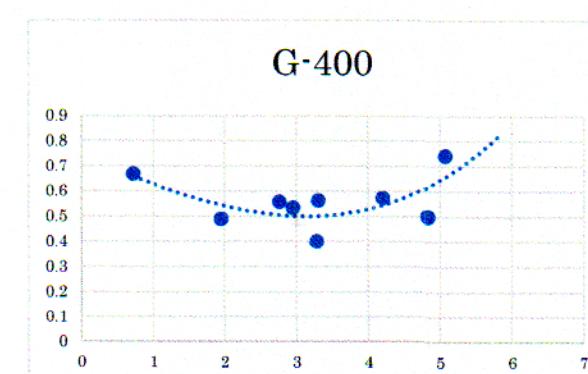
Graph 68



Graph 69



Graph 70



Graph 71

それぞれの近似曲線について、誤差があることがわかっているので、まず小数以下第四位までを計算式にもちいて、そのあとで誤差の値として±0.1を認めることとする。この数値の根拠は、全体的に近似曲線とずれているものには平均して約0.1のずれが見受けられるからである。標準偏差などを用いてもよいのであろうが、この場合それほどこれらのグラフを構成している値に信ぴょう性がないことから、あまり正確に見積もる必要はなく、できないと考えたので、だいたいの間隔から勝手に定めた。下に近似式を載せる。

〈アルミと紙やすり〉Vを速度(km/h)として、動摩擦係数を μ とする

G-40	$\mu = (0.027 V^4 - 0.343 V^3 + 1.458 V^2 - 2.358 V + 1.741) \pm 0.1 \quad (1 \leq V \leq 6)$
G-60	$\mu = -0.002 V^2 + 0.026 V + 0.619 \pm 0.1 \quad (1 \leq V \leq 4)$
G-80	$\mu = 0.0032 V^4 - 0.0586 V^3 + 0.333 V^2 - 0.6932 V + 1.0113 \pm 0.1 \quad (1 \leq V \leq 6)$
G-100	$\mu = 0.007 V^4 - 0.1152 V^3 + 0.608 V^2 - 1.1652 V + 1.2404 \pm 0.1 \quad (1 \leq V \leq 6)$
G-120	$\mu = -0.0085 V^4 + 0.0966 V^3 - 0.3462 V^2 + 0.4451 V + 0.4999 \pm 0.1 \quad (1 \leq V \leq 6)$
G-180	$\mu = -0.0102 V^4 + 0.1034 V^3 - 0.3135 V^2 + 0.2847 V + 0.602 \pm 0.1 \quad (1 \leq V \leq 6)$
G-240	$\mu = -0.0029 V^4 + 0.0138 V^3 + 0.0549 V^2 - 0.299 V + 0.8564 \pm 0.1 \quad (1 \leq V \leq 6)$
G-400	$\mu = 0.0035 V^3 + 0.0024 V^2 - 0.1191 V + 0.7411 \pm 0.1 \quad (1 \leq V \leq 6)$
… (3.8)	

近似式 A

まず重要なのは、これらの変化が連続的であるということである。すなわち、Vは整数以外の値をとることももちろんあるということである。そこで、このVというものに関して、様々に比較してみようとした。アルミは、動摩擦係数では銅とほとんど同じ値をとっている。そこでアルミと銅と同じ摩擦係数をもつ金属のグループとして考えて、ステンレスとの傾向をみる。この考え方で考えていくというのならば、アルミ、銅とステンレスの間には、同じ速度の時の傾向が、ステンレスでは、アルミおよび銅の近似式AでのVに、(V+1)を代入したときの傾向にだいたいなっていることが見て取れる。そして、アルミ、銅の動摩擦係数とステンレスの動摩擦係数は、Graph60から、一定の割合でステンレスのほうが小さくなっていると見て取れるので、アルミと銅の摩擦係数を平均したのち、それぞれの紙やすりの番号における、アルミと銅の動摩擦係数をステンレスの動摩擦係数で割ったものの平均を出すと、約0.9となっていた。割合が0.9になった時に、それが約1になるということを利用して予想を立てると、下のようになった。また、これ以降アルミと銅の動摩擦係数は、基準としてアルミに代表させて扱うこととする。

アルミと紙やすりの動摩擦係数を基準として、その時の動摩擦係数が、どのようにほかの金属と紙やすりの動摩擦係数とずれているのかを示す。割合を α 、基準となるアルミと紙やすりとの動摩擦時の速度をVとして、ある金属との動摩擦の速度vは、勝手な定数Aをもちいて

$$v = V - A(1 - \alpha) \quad \dots (3.9)$$

という関係で表せるとする。この時、ステンレスと比較したときの実際の値を α に代入すれば、 $A \approx 10$ である。これをアルミを基準にしたときの金属と紙やすりの摩擦固有の値と考

え、摩擦の物体的な特性を表す定数として「紙やすりの動摩擦特性の定数（基準アルミ）」と置いておく。すると、この定数は、試料が金属であり、同じような表面状態でそれが紙やすりと摩擦する場合に有効であると考えられる。そこで、同じような性質をもった金属と紙やすりとの摩擦係数は次のような変化をたどるのではないか、と、当然予想できる。

ある紙やすりとある金属の摩擦において、アルミと紙やすりとの間で成り立っている定数 P,Q,R,S,T を利用して、アルミと紙やすりの時の動摩擦の速度を V として、ある金属と紙やすりとの動摩擦の速度を v、ある同じ速度での紙やすりとの動摩擦係数の割合（ある金属のとき/アルミのとき）を α とすると、

$$\mu = (PV^4 - QV^3 + RV^2 - SV + T) \pm 0.1 \quad (1 \leq V \leq 6) \quad \text{ただし, } V = v + 10(1 - \alpha) \quad \cdots (3.10)$$

これを用いれば、たとえば $\alpha = 0.5$ のある金属と紙やすりの、1km/h の時の動摩擦係数は、

$$V = v + 10(1 - \alpha) = 1 + 10(1 - 0.5) = 6 \quad \cdots (3.11)$$

となるので、アルミにおいて速度が 6 km/h のときの傾向が、1km/h のときに表れるということを予想することができる。ある。

しかし、ここまで考察はほとんど予想であり、実験データがたくさんあるわけではないので、一概にこれが成り立つとはとても言えない。金属に関するデータをたくさん収集し、それら一つ一つについて解析していきたいところではあったが、一つの実験に膨大な労力と時間がかかるため、このレポート内では検証できなかった。残念ではあるが、この予想はあくまで予想である。ただし、近似式 A 数値に関しては、実際の実験が根拠となっているため、信用できるとする。また、ここまで「傾向」に関する傾向についての考察は複雑を極めたため、考察での説明がわかりにくくなってしまっているかもしれない。ここでこの考察を簡単にまとめると、下のように言える。

「金属と紙やすりの、ある速度の時の、動摩擦係数の紙やすりの番号による変化の傾向は、アルミを基準にして、任意の速度における動摩擦係数の割合がわかれば、だいたい予測することが可能である、という予想ができ、少なくとも三種類の金属においては、成り立っている。」

3.1.5 実験IIIの結論

実験IIIにおいては、次のようなことが明らかになった。

(A) 測定方法

測定方法は、様々なものが存在するが、実際に正確な値を測るために、できる限り小さな範囲での平均速度が求められる機器が必要である。実際に、今回の実験において利用した Beespi という機械も、測定がある一定の距離を動くときの平均の速度であるために、加速の状態が一様ではない滑り出した直後の速度の計測は、うまくできていないものがほとんどであった。しかし、傾向をどの試料に対しても、ある程度つかむことができたということは、ある程度の正確さもあったということである。実際に認められた誤差は ± 0.1 であるが、

平均をとる回数を増やすことができれば、さらに精度が上がると考えられる。結論として、今回の実験で用いた実験の手法Ⅲは、誤差が約±0.1で、ある程度正確であったとする。

(B) 具体的な動摩擦係数

動摩擦係数は、やはり速度依存性を持っており、速度による変化は、一概に減少、あるいは増加といえるものではなかった。速度によってその傾向はかなり変化しており、一見するとどのような傾向が全体を通して存在しているのかどうかを判断するのは非常に難しいことではあるが、これらのデータから、およそどのような傾向があるのか、ということは、予想することができた。金属と紙やすりの摩擦係数については、下のような式が成り立っていると考えられる。(3.10) の式。

$$\mu = (PV^4 - QV^3 + RV^2 - SV + T) \pm 0.1 \quad (1 \leq V \leq 6) \quad *V = v + 10(1 - \alpha)$$

ここでP,Q,R,S,Tは摩擦する金属によって決まる定数、Vはアルミと紙やすりの動摩擦の際の速度で様々な判断の基準となる速度、vが実際の速度であり α はある速度におけるアルミと紙やすりの動摩擦係数で、同じ速度におけるある金属と紙やすりの動摩擦係数を割ったものである。

(C) 動摩擦の種類

動摩擦については、挙動が複雑すぎるために、実際にどのようなことが起こっているのかを考えることはできなかった。結論としては、それこそまさに、その物体によって、動摩擦係数は変化するということである。この実験で得られた具体的な内容としては、静止摩擦係数ではほとんど変化の見られなかつたアクリルの傾向が、動摩擦はほかの金属と明らかに異なっており、アクリルは金属とは全く別物であるということがわかった。また、速度が大きくなると、値の散らばり方が大きくなってくることもわかっている。

4 表面の様子と摩擦係数、再考察

4.1 表面の様子の観察

4.1.1 観察の目的

この実験の目的は、今まで、特に静止摩擦の部分でモデルとして扱われていた紙やすりの表面および、四つの試料の表面の様子を観察し、数量で評価することである。

4.1.2 観察の手法

(A) 観察に用いるもの

顕微鏡、レーザー、試料、紙やすり

懐中電灯、支え台、カメラ

(B) 観察の方法

顕微鏡を用いるが、試料の表面に、ほとんど真横からレーザーを当て、突起の先端だけが光るようにする。これを顕微鏡にカメラをつけたもので撮影する。

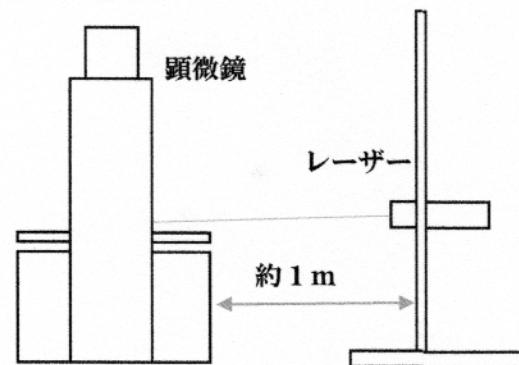


Figure 16

この時、レーザーだけを当てる場合と、レーザーと懐中電灯を当てる場合の2種類で撮影を行った。ただし、懐中電灯は真横からではなく、ななめ上方から照らした。

(C) 観察の装置

観察の装置は、Figure16 のものを使用するが、レーザーと顕微鏡の間が約 1 m であり、顕微鏡の倍率は、60 倍である。(接眼レンズ 15 倍、対物レンズ 4 倍)

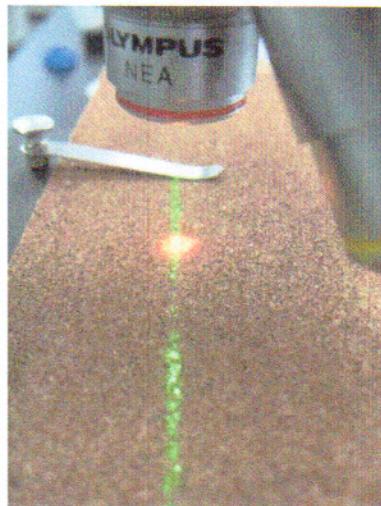
(D) 統一する条件

- ・レーザーをあてる角度 　・顕微鏡の倍率
- ・データとして扱う光の強さ…この実験においては

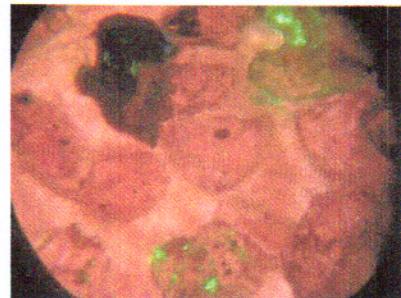
白く光りが見えているもののみをデータとして扱う。周りに反射しているものはデータに含まない。

4.1.3 観察の結果（紙やすり）

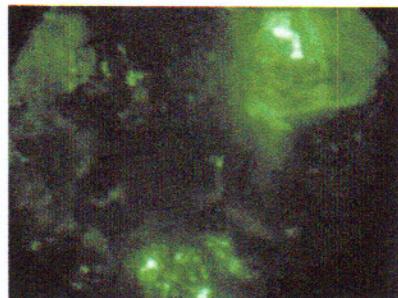
まずは G-40 を懐中電灯でななめ上方から照らしたときには、Picture 3 のように見えた。G-40 は、非常に大きな粒が表面についており、隙間も非常に大きいことがわかる。また、紙やすりという、番号の決まっているものでさえ、このように均等でないということが明らかになった。すなわち、静止摩擦の考察時に使ったモデルのとおりではなかったということである。そして、懐中電灯を消して、レーザーの光だけで観察したものが Picture4 である。この観察結果を見ればわかるように、実際に接触している面積は非常に小さい。さて、この Picture 4 を数値で評価しよう。顕微鏡に接眼ミクロメーターを入れて数値を見ると、一メモリが $25 \mu\text{m}$ の均等なメモリが表れる。これをを利用して、50 メモリの中のどれだけの部分が実際に接触しているのかを表す。まず写真の横方向に注目して、中央に横にとった写真の中の 50 メモリの幅の中に、光っている部分がどれだけあるかを調べて、それを横の方向のメモリの数に変えて、それを 50 で割った比を記録する。次に、縦方向に注目して、中央に縦にとった 50 メモリの幅の中に光っている部分がどれだけあるのかを調べ、同じように比を算出し、その二つの比の平均を、粗さを表す数と定める。



Picture2



Picture 3



Picture 4

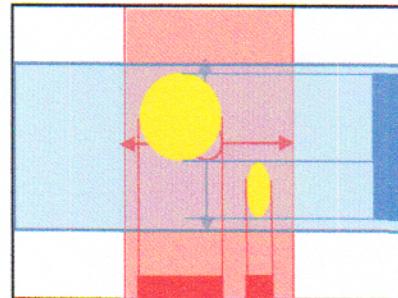


Figure17

上の図において、うすい赤色の長方形の横の長さで、濃い赤の範囲の長さを割った比となる。縦の青についても同様である。

Figure17にどのようにするのかを示している。実際に行うと、以下のようにになった。

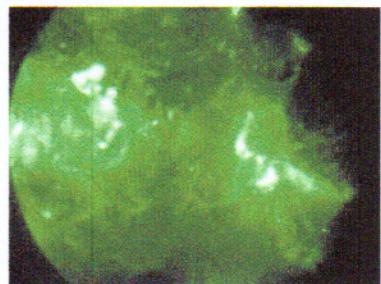
紙やすりの番号	横方向の比	縦方向の比	平均
G-40	0.292	0.167	0.23
G-60	0.429	0.495	0.46
G-80	0.429	0.476	0.45
G-100	0.476	0.571	0.52
G-120	0.650	0.600	0.63
G-180	0.450	0.550	0.50
G-240	0.450	0.400	0.43
G-400	0.333	0.381	0.36

Table2

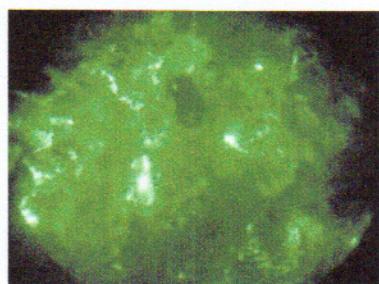
下に測定に用いた紙やすりの写真を示す。



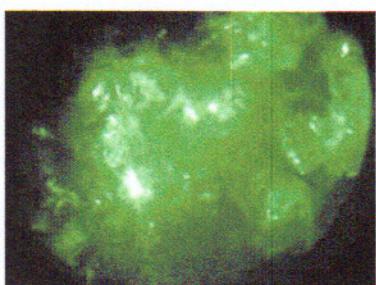
Picture 5 (G-40)



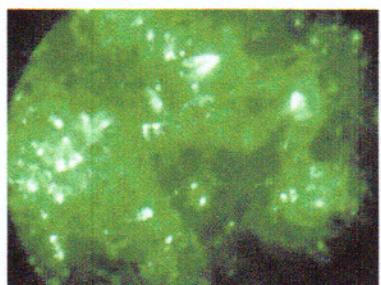
Picture 6 (G-60)



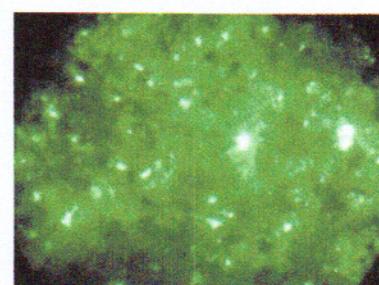
Picture 7 (G-80)



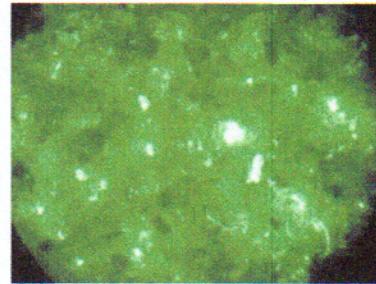
Picture 8 (G-100)



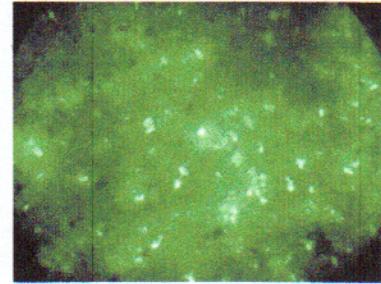
Picture 9 (G-120)



Picture 10 (G-180)



Picture 11 (G-240)



Picture 12 (G-400)

ここからは静止摩擦係数と観察結果を照らし合わせていく。

4.1.4 観察の考察（静）（紙やすり）

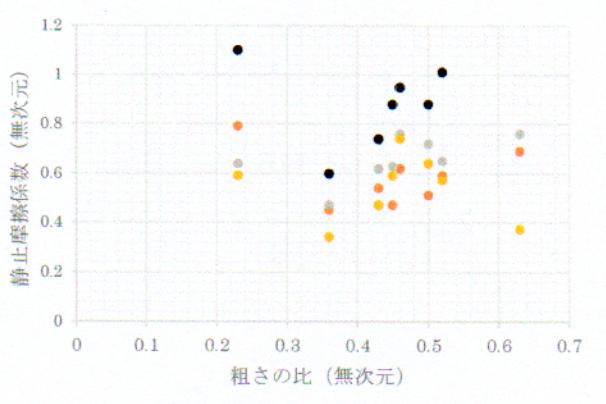
ここで、この得られたデータと静止摩擦係数を比較した。すると、これも興味深い結果を得ることができた。まずは静止摩擦係数との傾向を見てみよう。また、これ以降は観察で得られた比のことを「粗さの比」と呼称する。実験Ⅰで得た、紙やすりと四つの試料との静止摩擦係数を縦軸、横軸にその紙やすりの粗さの比にとると、下のようなグラフになった。

粗さと静止摩擦係数の関係が、さらに明瞭になった。Graph72の粗さの比0.3から0.5の範囲においては、かなり顕著な直線的関係がみられる。これは大きな発見である。また、G-40のとき、すなわち粗さの比が0.3を下回った時には、非常に静止摩擦係数が大きくなっているということもわかる。特にアルミの傾向は顕著である。また、G-120のとき、すなわち粗さの比が0.6の周りにときには、アクリルと銅は直線的関係を保ちながら静止摩擦係数が上昇しているが、アルミとステンレスに関しては、傾向を明らかに外れている。これがなぜなのかは不明であるが、ちょうど金属の方の表面状態が、G-120とあまり多く接触しないものになっているのかもしれない。

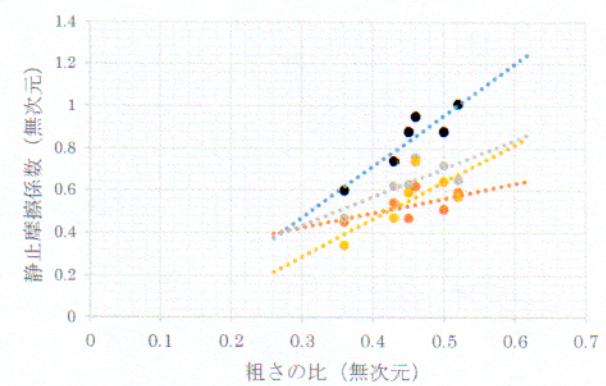
ここで、比例しているところだけを抜き出して、近似直線をひくことにした。それが右のGraph73である。このグラフを見てわかるように、グラフの傾きとなっているものは、金属の種類によって異なっている。その異なり方は意外なことに今までに出てきたどんな傾向とも異なっていた。傾きだけを考えるのであれば、傾きの大きさは

アルミ>ステンレス>銅>アクリル
となっていた。

さて、ここまで考察から、実験Ⅰの考察を変更しなければいけないということが確実になった。なぜなら、実験Ⅰの考察のなかで粗さとして扱っていた紙やすりの番号が、実は接触面積という観点ではほとんど違うものであったからである。したがって、実験Ⅰの考察および結論の中で粗さとして扱っていた、紙やすりの番号は、あまり意味をなしていない。しかし、考察の中にあった倍数説という傾向は確かに存在しているのである。この二つの考察を総合して、新しい考察をすることが必要である。



Graph72 黒…アルミ、赤…アクリル、灰…銅、黄…ステンレス



Graph73 黒…アルミ、赤…アクリル、灰…銅、黄…ステンレス

しかしながら、そのような考察を立ち上げる以前の問題として、静止摩擦係数の実験Ⅰと実験Ⅱは、果たして同じ性質がいえる実験であったのかどうかということを吟味すべきである。この観察を行って気付いたことであるが、実験Ⅰと実験Ⅱは、本質的に摩擦が違う可能性がある。紙やすりと金属の状態は、明らかに異なっている。確かに表面にはかみ合いそうな幅で傷がついていたり、小さな穴が開いていたりはする。それだからといって、まったく同じ摩擦であるとどうしていえるであろうか。私はとんでもない思い違いをしていたのかもしれない。そこで、今度は四つの試料の表面を観察することで、この問題の解決を図った。

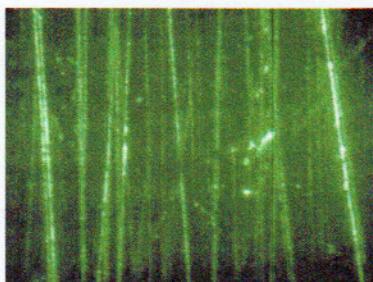
4.1.5 観察の結果（四つの試料）

アクリルは透明であったため、まったく光らず、よくわからなかった。また、金属については、摩擦していたところを調べると、金属にスジが入っていることがわかった。これは実験によってついたものももちろんあるようであったが、金属板全体に、もともとスジが入っていたので、今回は問題がないとする。また、スジには切れ目があり、レールのようにずっと続いているわけではないので、このスジに突起が入ったら、摩擦は起こるととらえる。そして、ずっと実験をしていたのは、スジに対して平行な向きであった。また、今回比としてとらえるのは、スジに対して垂直方向の比である。もし平行の方向であれば、比が1になってしまう。実験をしていた向きのことも考えて、こちらだけでよいと判断した。

もう一つ重要なことは、この下の写真において、光っているのはへこんでいるところであるということである。スジが盛り上がっているわけではないので、へこんだところの傾いているところに、レーザー光が反射しているのだ。したがって、比として表されるのは、光っていないところと中央の50メモリとの長さの比である。算出の仕方は紙やすりの時と同じく、中心の50メモリをとって、比を計算する。

試料	スジに対して垂直方向での比
銅	0.667
ステンレス	0.825
アルミ	0.625

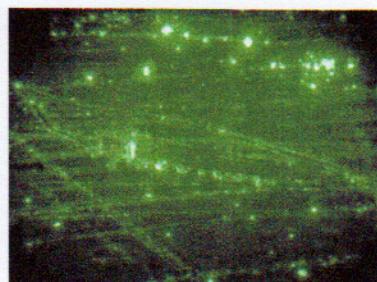
Table3



Picture 1 3 銅



Picture 1 4 ステンレス

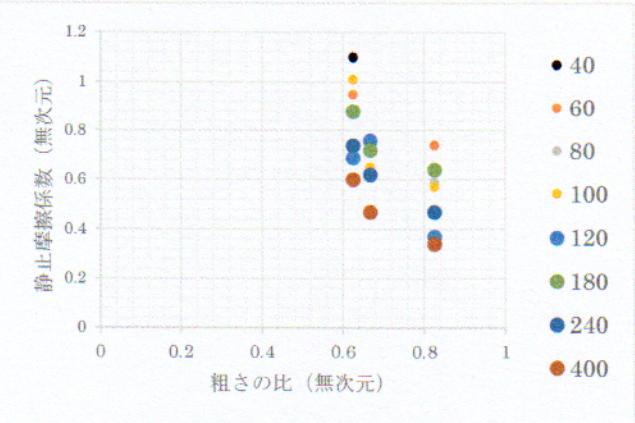


Picture 1 5 アルミ

これと静止摩擦係数との関係を調べる。紙やすりの番号ごとに、金属を変化させたグラフが、

下の Graph74 である。このグラフは紙やすりの時とまったく反対の傾向を見せてている。

しかも、例外なく減少の傾向をみせているところから、金属の表面の粗さの比は、摩擦係数に明らかに影響している。この減少傾向が、金属特有の傾向であるとするならば、紙やすりと金属の摩擦に関しては、次のようなことがいえる。



4.1.6 観察の考察（四つの試料）

具体的に摩擦係数を算出するためには、さすがにデータの量が少なすぎる。したがって、この考察では、どのような傾向がみられるかというところまで考えることとする。まず、紙やすりの番号を変化させたときの、紙やすりの粗さの比と、静止摩擦係数の関係である。Graph72 をみればわかるように、粗さの比が小さすぎると静止摩擦係数が大きくなり、その後粗さの比が大きくなると急激に低下したのち、粗さの比と静止摩擦係数は、直線的な関係を示す。そして、その直線的な関係は、確実に粗さの比が 0.3~0.6 の間には続いている。この傾向の理由は、以下のように説明できる。

まず粗さの比が小さい時、すなわち、接触部分が小さい時には、静止摩擦係数が非常に大きい。これは、接触部分が小さいことによって、一つの突起に対してかかる圧力が非常に大きくなつたからであろう。当然紙やすりの突起はめり込んでしまっているはずである。それが、急激に低下するのは、接触部分が大きくなつて、めり込まなくなるということだろう。ただし、それでは急激に変化するということの説明にはならない。そこで、観察の時に用いた写真をもう一度確認した。すると、突起は粒であり、形が Figure18 のようになっている。この形の粒がめり込んでいるとき、Figure19 のように、めり込み方が少し違うだけで、摩擦の様子は大きく異なる。突起のめり込んでいる切り口がななめであれば、簡単にそこから出てしまうが、切り口が垂直であった場合には、なかなか抜け出すことはできない。すなわち、摩擦が大きいのである。

実際に、粒の形は Figure18 のようになっていることが、写真からもわかる。



Figure18

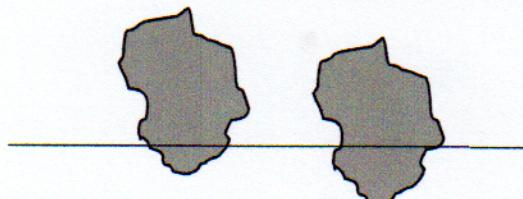


Figure19

そのあとの直線的関係の理由は、だんだんと接触部分が大きくなることで、摩擦の原因となっている要素の量が増えていくことにするととらえられる。たとえば、表面のかみ合いだったとしても、かみ合う部分の数が多ければ、それだけ摩擦は大きくなるはずである。

次に、金属の粗さの比と静止摩擦係数の関係については、金属の粗さの比が大きくなるということが、逆に溝がなくなることであるという理解の仕方をすれば、簡単に理解できる。だんだんと引っかかる場所がなくなっていくということは、引っかかることを主とした摩擦の原因についていたものは、自らの突起が引っかからなくなる時点で急激に摩擦がなくなるのは自明である。そして、自らの突起が引っかからない粗さの中で金属の粗さが変化したところで、引っかかるものはもうないのだから、影響はない。したがって、引っかかることをおもな摩擦の原因に持つものは、金属の方がある粗さの比よりも大きい粗さの比をとった場合、それにはもはや変化をもたらされず、低い静止摩擦係数を維持するのではないかと予想できる。そして実際に、全体として急激な低下傾向が見て取れたのち、変化が小さくなっているのが見て取れる。

4.1.7 静止摩擦係数に関する総合的な考察

実験Ⅰ、実験Ⅱ、そして観察によって得られたことを総合的に用いて、静止摩擦係数について考察する。

(A) 四つの試料と紙やすりの摩擦と、紙やすり同士の摩擦の違いについて

今までの静止摩擦係数に関する実験を通して、私は静止摩擦係数に対して、次のように考えた。

「実験Ⅱは、実験Ⅰの検証になっていなかった」

実験Ⅱは、実験Ⅰで得られた結果から場合分けした様々な静止摩擦の種類が本当にあるのかどうかということを確かめるために行われた。しかし、その根本の問題として、実験Ⅰの考察で扱っているモデルは、実際には実験Ⅰでは再現されておらず、それは実験Ⅱのほうに表れている現象になっているのではないか、と考えられる。根拠は金属板のほうには、スジがあり、モデルとしては突起がかみ合っているようなものが不適であるからだ。実験Ⅰにおいて考察する際に使用したモデルは、お互いにかみ合っているようなものであった。確かに、かみ合いそうな位置にへこんでいる場所はあるが、それはモデルとしては全く別物である。両方とも紙やすりという、実験Ⅱの結果はモデルのとおりになっている可能性が高いが、四つの試料のほうの考察は当てはまっておらず、したがってあのような傾向が出た理由はかみ合いではない。金属板に関する考察は、観察によって得られたデータを加味して考えた、「4 観察」での考察がよりよいと思われる。したがって、実験Ⅱにおいて述べた、静止摩擦係数に関する結論の、「静止摩擦の種類」の部分が通用するのは、お互いにとがっている突起をもった物体同士の静止摩擦についてである。片方が突起のある紙やすりのようなもので、もう片方が金属板のように、ところどころへこんでいる、というようなものの静止摩擦に関しては、新しく種類を付け足さなければならない。つまり、まとめると、実験Ⅰで行

った考察は間違っていたが、それが実験Ⅱでたまたま同じように表れていた、といえるのである。

(B) 紙やすり同士の静止摩擦係数と、観察の結果の関係

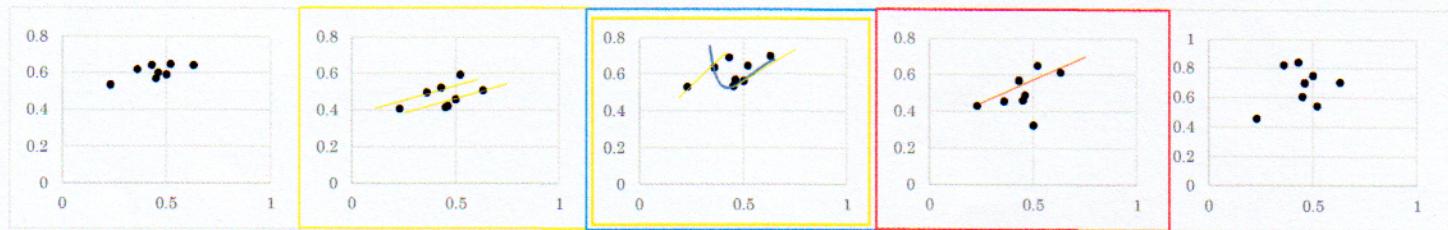
観察の結果と紙やすり同士の静止摩擦係数に関係はあるのだろうか。四つの試料と紙やすりの静止摩擦係数には、接触面積が非常に重要な条件となっていた。しかし、紙やすり同士の摩擦係数には、観察で得たような、粗さの比はほとんど関係していないのではないかと私は考えている。観察で求めた粗さの比が影響を及ぼすのは、もう片方がある程度滑らかであった時である。そうでなければ、実際に接触する部分というのは、凹凸があることによって大きく変化するため、観察して得た粗さの比が、ほとんど役に立たないからである。したがって、紙やすり同士の静止摩擦について考えるとき、すなわちお互いに突起をもつもの同士の摩擦については、実験Ⅱの結論で述べているような傾向で考えたほうが、よほどわかりやすく、扱いやすい。

ここからは、動摩擦係数と観察の結果を照らし合わせていく。

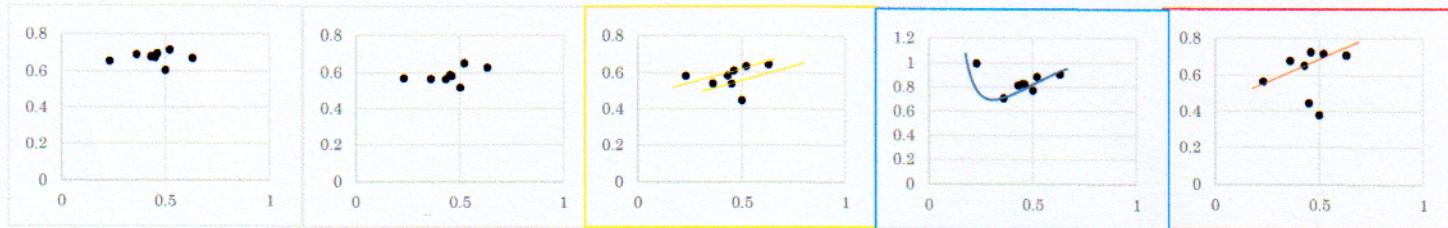
4.1.8 観察の考察（動）

動摩擦係数と紙やすりの番号の関係を表すグラフを、観察で得られた、粗さの比との関係を表すグラフに書き直す。紙やすりの番号を粗さの比に直接書き換えると、下のようになっていた。Graph75～Graph77までの縦軸は摩擦係数、横軸は紙やすりの粗さの比である。

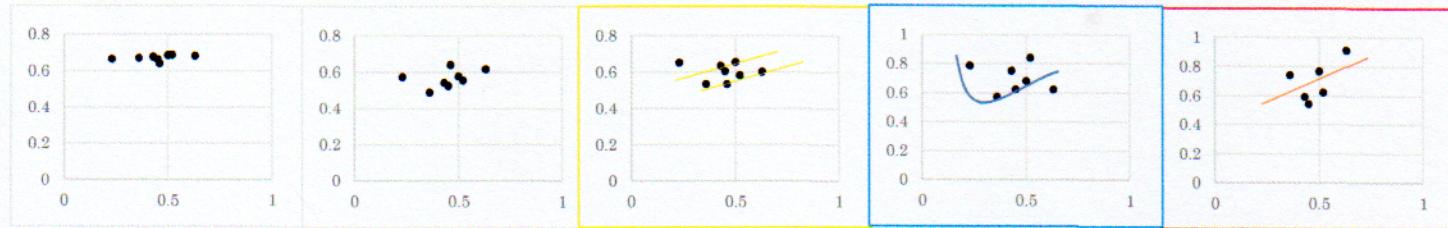
下のGraph75～Graph77において、左から摩擦の速度は $1 \sim 5 \pm 0.3 \text{ km/h}$ である。



Graph 75 ステンレス



Graph 76 銅



Graph 77 アルミ

グラフの表示を変えても、アクリルと三種類の金属では、まったく傾向が異なっていた。そこで、三種類の金属を比べると、傾向のずれ方を判断するのが、すこし前よりも難しくなっていることがわかった。特に、 $4 \pm 0.3 \text{ km/h}$ の時のずれ方を判断することが難しくなり、また、 $1 \sim 2 \pm 0.3 \text{ km/h}$ のときにあまり変化がないというのも、判断しにくい原因の一つとなった。これらについて実験IIIの考察のように式を立てて予測することはできないことはない。しかし、表面の粗さの比と、近似式Aの定数P,Q,R,S,Tについて関連付けるのは難しいことがわかった。しかしあることもあった。ほとんどのグラフの傾向が、粗さの比とおおまかに正の傾きの関係を持っているような傾向であることを示している。動摩擦係数もまた、同じように粗さの比と直線的な関係を持っているのだろう、ということが推察できる。

4.1.9 粗さと摩擦係数の関係に関する結論

(A) 静止摩擦係数と粗さの関係

静止摩擦係数と、表面の粗さの比の関係として、実験IIの結論を発展させる。

静止摩擦係数について考えるときに、まず静止摩擦を二つの種類に分ける。

- i) 実験Iで行った、金属板のようなものと紙やすりのようなものの摩擦
- ii) 実験IIで行った、紙やすりのようなもの同士の摩擦

一般的にこれらを説明するならば、i)は、片方だけの粗さの比が大きい時の摩擦、ii)は、両方ともそれほど粗さの比が大きくなない場合の摩擦である。

まず i) について、結論を述べる。

・片方だけの粗さの比が大きい場合、それに対する物体の粗さの比が小さい時、具体的には、0.2のあたりになっていると、静止摩擦係数は非常に大きい。そののちある粗さの比よりも大きくなると急激に小さくなり、その後は直線的関係を示すようになる。これは、接触する部分が増え、摩擦の原因となる要素が増えるからであると考えられる。

次に ii) に関する結論を述べる。

・この時の摩擦は、実験IIで考察したとおりのことが起こっていると考えられる。なぜなら、物体のかみ合いの様子によって接触する部分が決まってくるわけだから、それに粗さの比はほとんど関係なく、純粋にかみ合いが影響していると考えられるからである。

(B) 動摩擦係数と粗さの関係

・動摩擦には、粗さの比は関与していると考えられるが、どのように関与しているのかを全体を統一して述べることはできない。この研究のなかでは、片方だけの粗さの比が大きいときの動摩擦係数を、様々な速度で測定した場合に、動摩擦係数はもう片方の物体の粗さの比と、ある程度の直線的関係を持っていると考えられる、というところまでが結論としていえることである。

5 音と動摩擦係数

5.1 実験IV 動摩擦時の音の測定

5.1.1 実験IVの目的

ここまででは、実験の目的で述べたような、結果だけから判断するという実験ではなく、どのような表面構造になっていて、それがどう摩擦係数に影響を与えていているのかについてまで考察したとおり、かなり小さな視点で判断する実験を行ってきた。確かに実験の目的で述べたように、本当はどのようなことが起こっているのか、ということについては、はっきりとは分からなかった。摩擦というものを扱うということ自体が、非常に難しい問題ということも、私は思い知らされた。そこで、ここからは、実際に起こっている小さな事象を総合したような、発生する音というものに着目して、音と動摩擦係数の関係について明らかにする。この実験の目的は、今までに得られた摩擦係数に関する知見をすべて使いながら、発生する音と動摩擦係数の関係を明らかにし、それをを利用して、音だけから動摩擦係数を予測することができるようになることである。

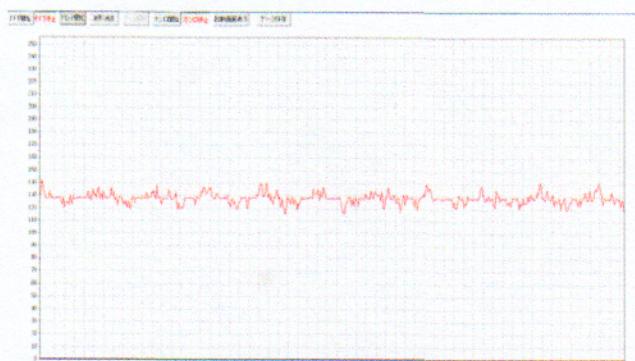
5.1.2 実験IVの手法

(A) 実験IVに用いるもの

・実験IIIでもちいた装置一式 　・マイク 　・マイク
スタンド 　・コンピューター（ソフト：「音オシロ」）
(Prtscrn1 参照)

(B) 実験IVの方法

実験は、実験IIIで行った実験をもう一度行うが、同時に音を測定する。ある速度での動摩擦係数は、実験IIIで作り出してある近似式 A によって求められる。実験は四つの試料に対して行う。まず実験IIIと同じようにおもりの重力で木片を引っ張らせ、そこからある程度離れた地点に Beespi をおいておく。そしてその隣にマイクをセットしておき、Beespi を通過する瞬間の音を記録する。データの処理の仕方はのちの理論的背景に関する説明で説明する。そして、おも



Prtscrn1

りの重さを変化させることで、速度を変化させるが、Beespiをおく位置が、滑り出す地点から遠すぎると、実験IIIで考察した範囲を超える可能性があるので、まず約 24 cm離れたところでデータをとった。実験IIIでいう、三つ目のBeespiの位置にあたる。これに重りの変化を与えるさい、1~2km/hの値も知りたいので、おもりは30g、60gの二つで変化させ、そして加速が少なく、誤差も少ないと考えられる30gのおもりの時に、滑り出す地点から8 cmのところでも測ることにした。また、今回は平均という形でなく、すべての値をグラフの中に値としてとり、あとからそのグラフから考察し、平均についても述べる。また、紙やすりは、すべてを代表して、G-40、80、120、240の4種類にした。

(C) 実験IVの装置

実験IVの装置は、Figure20 のようなものを使う。ほとんど実験IIIとおなじである。マイクが付く位置は、試料から 5 cm離れた場所と定めておく。

(D) 実験IVで統一する条件

実験IVにおいて統一する条件は、以下のとおりである。

- ・温度、湿度（同じときにすべての実験を行う）
- ・マイクの距離
- ・Beespi の位置
- ・木片の質量（35 g）
- ・接触面積（約 15 平方 cm）

(E) 理論的背景

ここからは非常に重要な部分である。まず私が音について考へた仮説を述べる。

(a) 仮説の説明

私は、音の波長や振動数にはあまり重きを置いていない。なぜなら、そのような数値の解析は、あまり意味がないのではないかと考えたからである。まず摩擦には、一様な変化というものが存在していないことは、今までの実験IIIでよくわかっていることである。つまり、音の波長や振動数はもちろん変化しているということになる。そのような値について考えて、動摩擦と関係させて説明できるといふのであれば、それは素晴らしいことであるが、非効率的である。そこで、波長や振動数といった細かな数ではなく、もっとマクロな視点からみた傾向で判断できないだろうかと考えた。この実験のおよそ 2か月前から、様々なものの摩擦の際の音をオシロスコープに記録しては、何か傾向がないかと調べ続け、すべてのデータを合わせると 1000 近くなっているが、そのなかで波長や振動数に関する傾向は全く見いだせなかった。それぞれの物体がそれぞれの振動数をとっていて、中には振動数というものすら存在していないようなものも、まったく音がしないものもあった。そこで私は、音をも

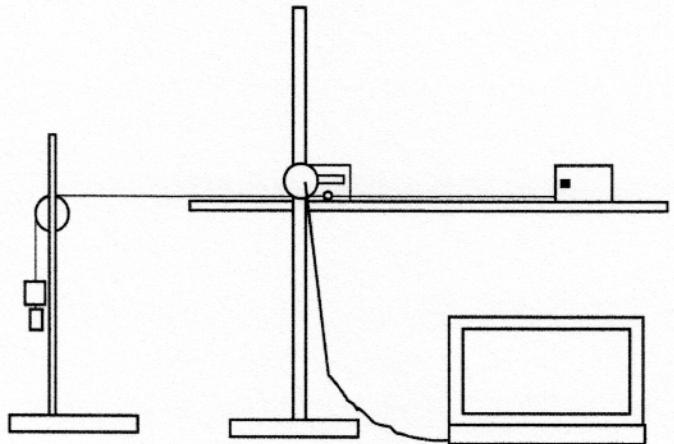


Figure20

っと大きな幅でとらえるとどうなるか、ということを検証する実験を繰り返した。その中で得られたデータのひとつが、この実験の理論的背景となっている。まず実際に摩擦させた音を、オシロスコープなどを通さず聞いてみて、そのあとその物体を摩擦させたもう片方の物体の上に落としてみるのだ。落とした先にある物体が大きな音を発するようなものでないか、机などに固定されていた場合、そこで聞こえる音は、どこか摩擦の音と似ているように感じる。そこで私が思いついた仮説は、摩擦の音は、物体が落ちるときの音、すなわち衝突音ではないかというものである。思考実験をしてみよう。試料として、洗濯板のような形状のものを思い浮かべてほしい。そこに、紙やすりとして、突起の代わりとなる、大きとなつた石を思い浮かべよう。ちょうど、Figure21 のようにならうか。さて、ここで洗濯板において、そこに石のとがった部分を載せて、洗濯板の凸凹と垂直な方向に動かしてみよう。すると、当然石のとがった部分は、ある程度の速度をもてば、洗濯板の凸凹の上をカタカタと動くだろう。このカタカタという音こそ、摩擦の音なのではないかという説である。このカタカタという音は、石のとがった部分が、洗濯板を打つ音であり、衝突音である。これをもしオシロスコープでとったなら、Figure22 のようになるはずである。

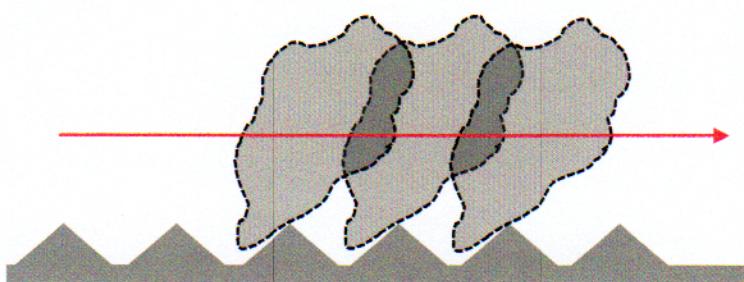


Figure21



Figure22

動摩擦係数は間違いなくこの衝突に関係があるはずである。なぜなら、この衝突によって、摩擦の様子は大きく変化するからである。そこで、この衝突の単位時間当たりの回数を調べればよいのではないかと考えた。単位時間当たり衝突回数がわかれば、速度はわかっているのだから、表面にどれだけ衝突する突起があるのかを判断することができる。つまり、この仮説のとおりであるならば、音を測定し解析するだけで表面の突起の分布という摩擦にとって重要な要素を知ることができるということである。そしてそれに「4観察」での粗さの比と関係があるならば、音によって粗さの比がわかり、粗さの比から動摩擦係数がだいたい予想できるというように、音を使うことで動摩擦係数が求められるかもしれない。この実験では、この仮説にのっとり、次のような要素を測定することにした。

(B) 測定するもの

この実験で測定するのは、単位時間当たりの「衝突」の回数である。音が急激に変化して、その後急激に元の様子に戻るという傾向を見せていている部分が、単位時間当たりに何か所見つけられるか、という数を得ることが、今回の実験の測定である。ただし、定義が少し曖昧

なので、新しく定義を付け加えておく。「衝突」によるものだとはんだんする基準は、まずそれが連続的でなくその傾向がその瞬間のみに見られたと判断できる傾向のうち、もっとも大きかったときの振幅が、そのような「衝突」とみられていない音の、ほとんど変化していない部分の振幅の約5倍以上の振幅を持つ部分では、衝突があった、と判断する、というものである。「衝突」とみられない音は、もっとも小さかった振幅を持ったもの。したがって、下の図において衝突と判断されるのは



Figure23

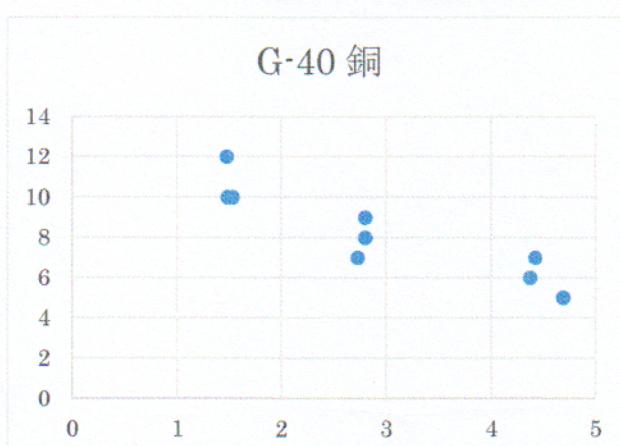
4つである。そのほかの8つは、もっと小さい振幅のもの、すなわち基本的に「衝突」でない音と、その最大の振幅から、5倍以上の振幅を持っていないかのどちらかである。

この考えにのっとって、実験IVを行った。

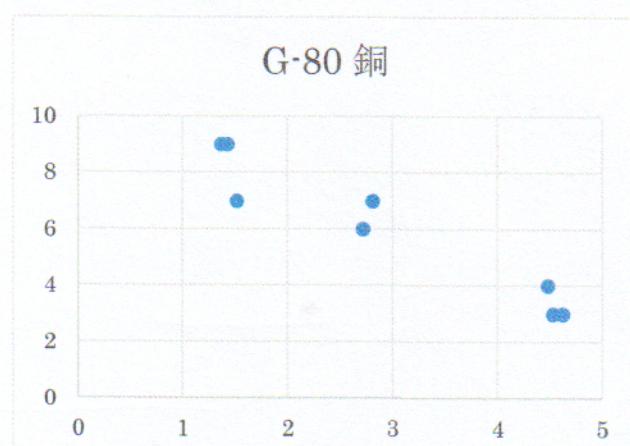
5.1.3 実験IVの結果

最初に、実験によって、紙やすりとステンレス、アクリルとの動摩擦の音が記録できなかったことを述べなければならない。両方とも、非常に発生する音が小さく、とてもふつうのマイクで記録できるようなものではなかった。この実験は半分が失敗であった。しかし、アルミと銅については、データをしっかりと取ることができた。実験の結果を、そのまま0.0554秒の中での衝突と思われる波形の数と、その時の速度でグラフにすると、次のようになる。

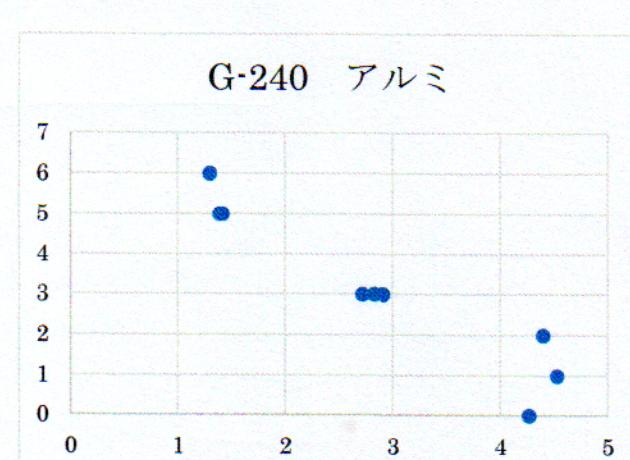
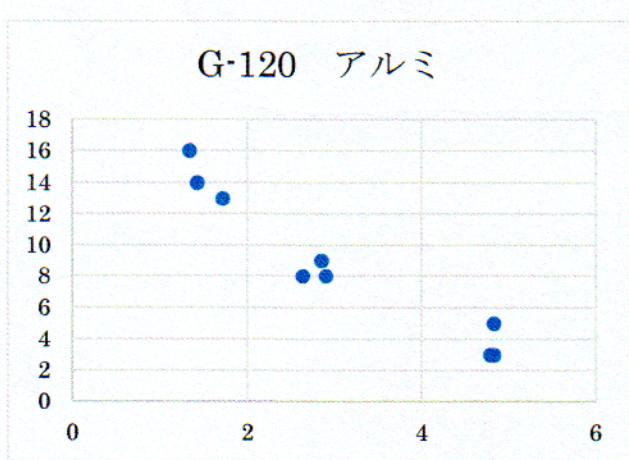
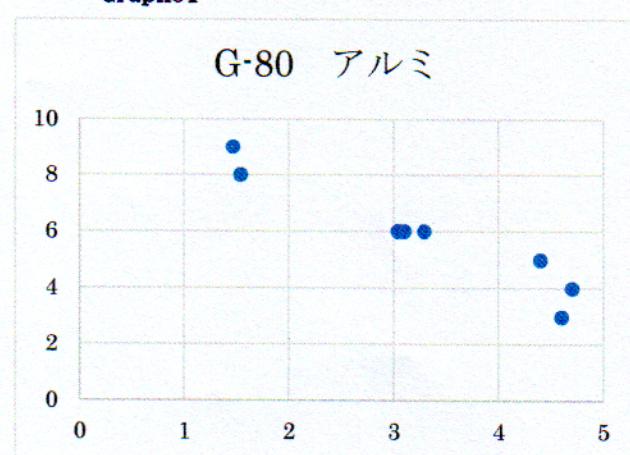
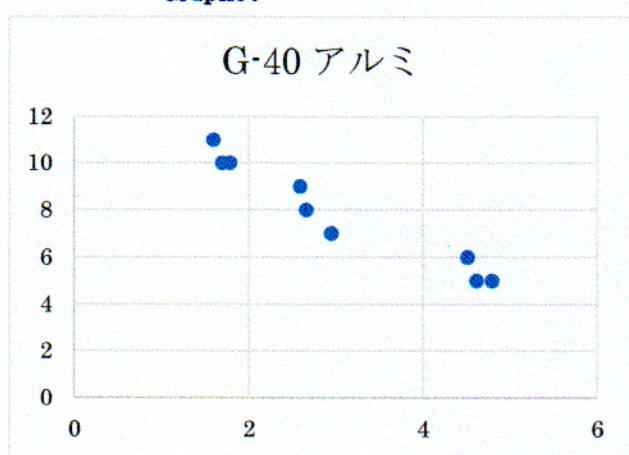
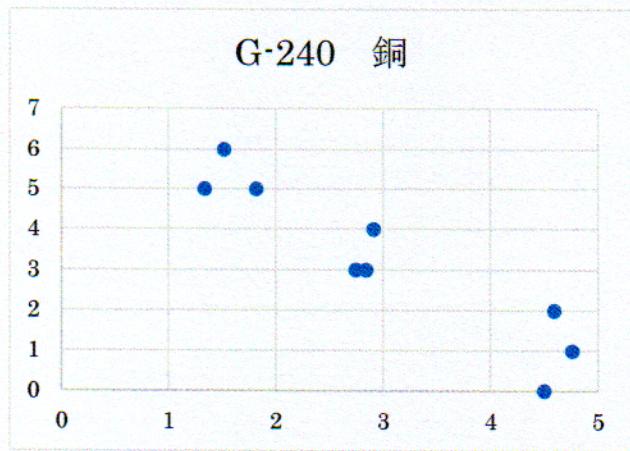
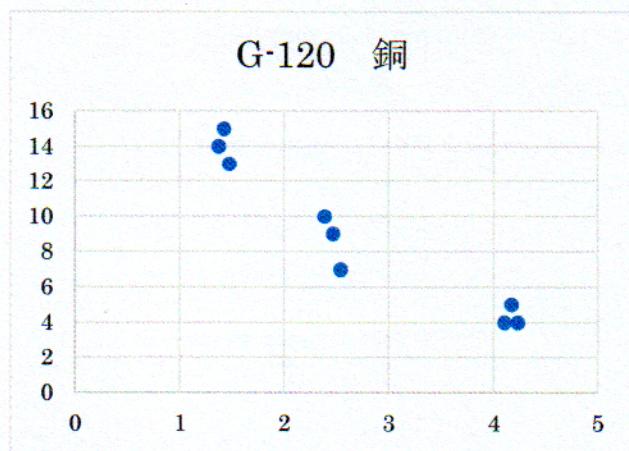
ただし、縦軸は衝突回数と思われる回数、横軸は速度 (km/h) である。



Graph78



Graph79

**Graph84**

それでは、これらのデータを基に考察する。

Graph85

5.5.4 実験IVの考察

これは私にとって衝撃的な結果であった。まさか音にこのようなきれいな傾向が認められようとは、思ってもみなかったからである。速度が大きくなるにつれて、単位時間当たりの衝突は減っている。これは、単純に考えたときの結果と全く反対である。ふつうは、単位時間あたりの衝突回数が、紙やすりのある部分が、試料の突起に引っかかったり衝突したりする回数を表しているのだとすれば、速度が大きくなるにつれて回数は多くなるはずだと考える。しかしそうはならなかった。これは動摩擦に対する考え方方に大きな変化をもたらす結果である。確かに、速度に依存はしているものの、どのように依存しているのかがはっきり定まっていなかった動摩擦係数に関して、多くの謎が残っているままに実験IIIを終えてしまっていたことが気がかりではあった。もしかすると、この結果は動摩擦係数に関して新しい考え方を考えだすことができるきっかけになるかもしれない。そう考えたので、このデータの持つ意味について、ここからは慎重に考察していく。

(A) Graph78～Graph85の解釈

まずここで得られた結果を整理する。

- i) 速度が大きくなると、単位時間当たりの紙やすりと試料との間での衝突とみられる波形の数が少なくなっていく。その変化の仕方は直線的である。
- ii) 変化の仕方は、アルミでも銅でもG-120の時が最も大きい。
- iii) 速度が同じときを比べても、G-120が最も大きい。

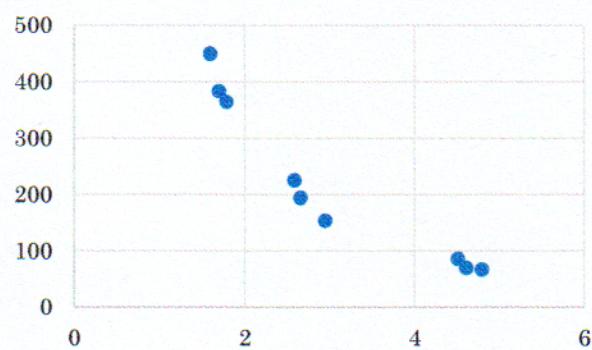
このi)からiii)と、今までに得られた知見を照らし合わせて、この結果に解釈を与える。まず、単位時間当たりの衝突回数を、それぞれの一秒間の衝突回数に直す。すべてのデータを0.0554で割って、出たデータを一の位で四捨五入して、それをデータとして扱う。グラフの傾向は、Graph78～Graph85での傾向とほとんど変わりはない。そして、そのそれぞれのデータを測定した際の速度を時速から秒速に直し、1秒間に何m進む速度なのかを出し、一秒間あたりの衝突回数を利用して、その1秒間ですすむ距離の中に、どれだけ衝突音を生じさせる原因があるのか、という分布を算出する。すなわち、この音だけから判断した、摩擦に影響を与えていたりいる原因となっている突起のようなものの分布を考えるのである。この時、長さあたりの衝突回数ということになり、実際には平面上に衝突音を生じさせる原因が散らばっているはずである。しかし、面積あたりの散らばりぐらいは、音からは判断できない。そこで、「4観察」で用いた粗さの評価が役に立ってくるのである。観察でもちいた粗さの比という値は、実際の突起分布を縦横の長さとの比でとらえ、それらを平均している。したがって、面積当たりの分布を、長さで評価することになる。この考え方には、音に関してこれから評価しようとしているやり方とよく似ていることがわかるだろう。よって、今までのデータ、特に「4観察」とのデータの矛盾は少ないと思われる。実際の算出の式は以下のように定める。算出結果をΩとおいて、

$$\frac{\text{1秒当たりの衝突回数}}{\text{1秒当たりに進む距離}} = \Omega \quad (5.1)$$

実際に算出した結果 Ω と速度とのグラフは次の通りである。（具体的な数値はレポート末）

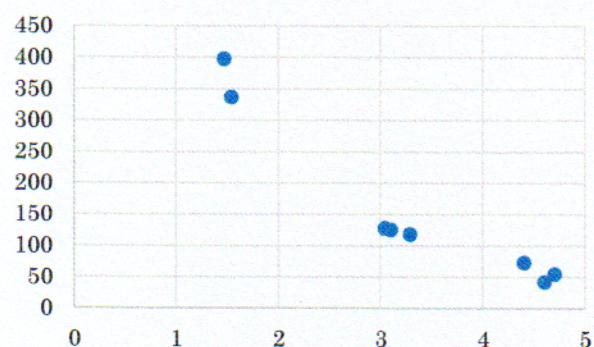
ただし、Graph86～Graph93の縦軸は Ω (1/m)、横軸は動摩擦の速度 (km/h) である。

G-40 アルミ



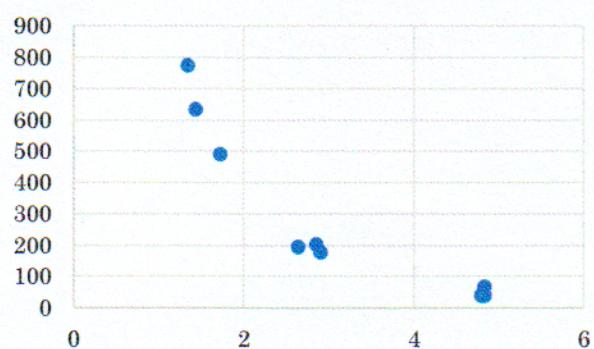
Graph86

G-80 アルミ



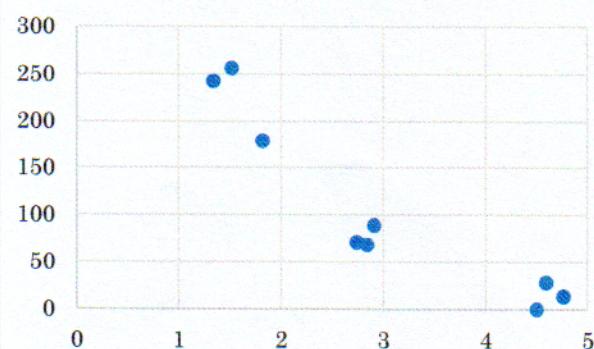
Graph87

G-120 アルミ



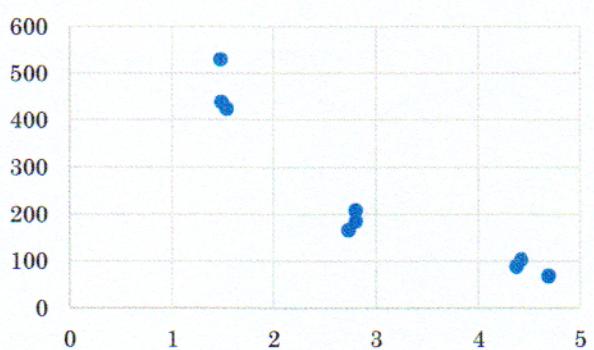
Graph88

G-240 アルミ



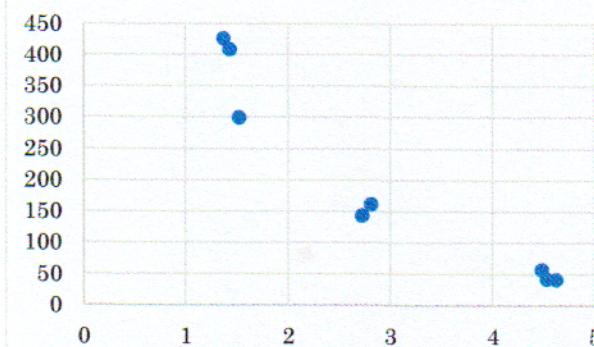
Graph89

G-40 銅



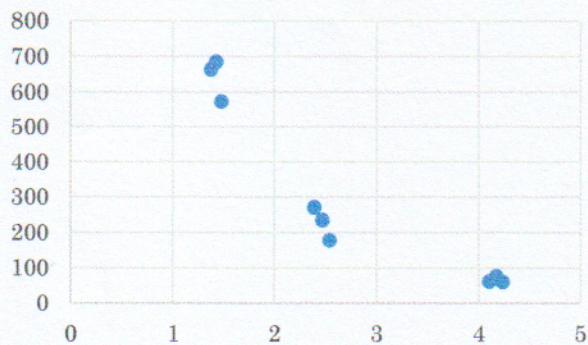
Graph90

G-80 銅



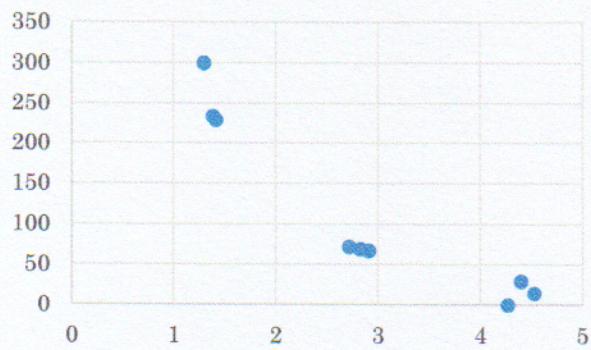
Graph91

G-120 銅



Graph92

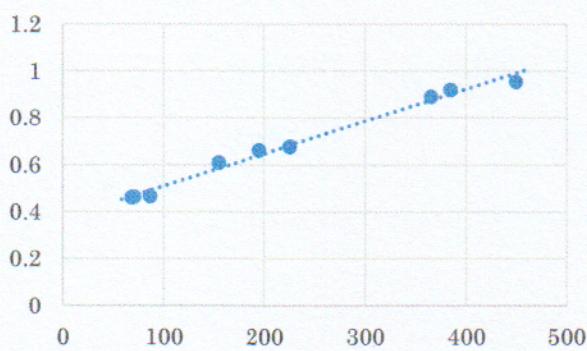
G-240 銅



Graph93

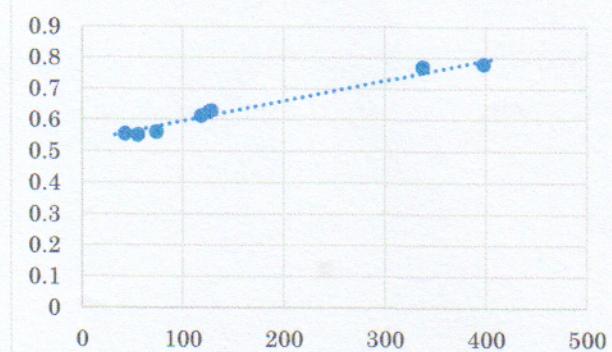
今度はまた、前のグラフとは異なる傾向を示している。すべてのグラフにおける変化が、大きなカーブを描くように変化しているのだ。この変化から、速度が上がるにつれてだんだんと Ω が0に近づいて行っているのがわかる。ここで Ω についてであるが、実際に粗さが変化しているわけではない。そこで、この粗さを表す Ω のことを仮想的な粗さとして、「バーチャル粗さ」と呼称することにし、これ以降このことを「V粗さ」と表記する。さて、速度によってどのようにV粗さが変化するのかということがわかったところで、この数と動摩擦係数を比較するが、アルミと銅は、紙やすりに対する動摩擦係数が微妙にことなるので、アルミを代表としてここで使用する。近似式Aを使用して、実験IVによって測定された速度における動摩擦係数を概算し、実験IIIの考察においては縦軸に動摩擦係数、速度を横軸にとっていたが、そこにその速度におけるV粗さをとり、どのような変化をたどっているのかを調べることにした。グラフは以下のようにになった。縦軸は概算された動摩擦係数、横軸はV粗さ(1/m)である。

G-40 アルミ



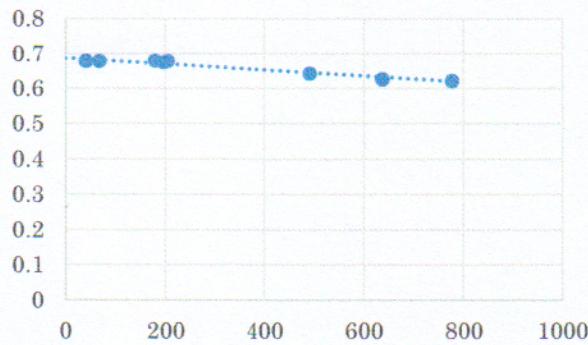
Graph94

G-60 アルミ

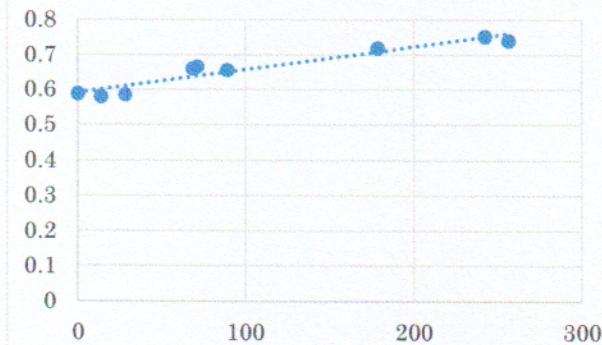


Graph95

G-120 アルミ



G-240 アルミ



Graph96

Graph97

この研究を通して、もっとも大きな発見はこれである。V粗さと動摩擦には、直線的な関係が存在したのである。私も様々な驚くべき結果を、この研究を通して目の当たりにしてきたが、この結果ほどではなかった。あれほど混沌としていた動摩擦係数を、これほど簡潔に表すことができたのである。このデータは同時に、動摩擦係数の測定実験である実験Ⅲの精度の確かさもうかがい知ることができるものとなっている。あのデータが本当に誤差をたくさん持っていたなら、ここまできれいな値の傾向は出なかつことであろう。とくにG-40とアルミの動摩擦に関しては、これ以上ないほどにきれいな傾向が出ている。この四つのグラフを要約すると、動摩擦係数は、実際にはかったときに得られる粗さの比ではなく、「バーチャル粗さ」に関係があり、それは音によって測定が可能であり、その関係は至って簡潔な形である、ということである。音で動摩擦係数を測定することが可能であるという可能性は、かなり強まったといえる。ただし、動摩擦係数の近似式Aには、誤差が約±0.1認められていたので、それは誤差として考慮しなくてはならない。

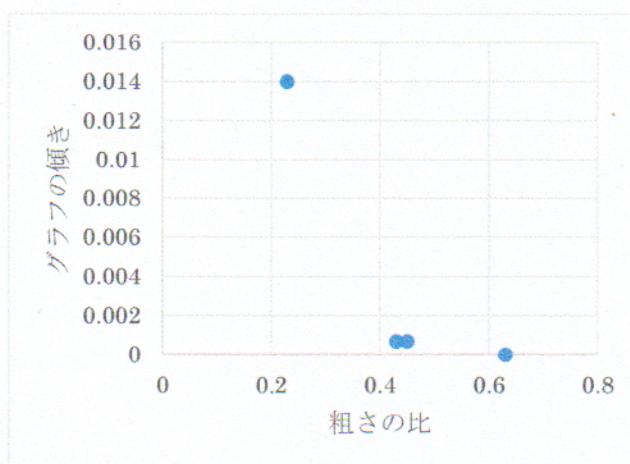
(B) 動摩擦係数とV粗さとの具体的な関係

ここからは動摩擦係数とV粗さとの関係について、さらに多くのことを考えながら考察する。まずは、Graph94～Graph97の近似式を示す。動摩擦係数を μ 、V粗さを Ω とすると、

近似式 B

$$\begin{aligned} \text{G-40} \quad \mu &= 0.0014\Omega + 0.3741 \\ \text{G-80} \quad \mu &= 0.0007\Omega + 0.5297 \\ \text{G-120} \quad \mu &= -0.00009\Omega + 0.6890 \\ \text{G-240} \quad \mu &= 0.0007\Omega + 0.5913 \quad \dots (5.2) \end{aligned}$$

G-120に関しては、本来は Ω がかかわっているところを無視するところであるが、 Ω が大きな値をとるために、グラフ上でも変化があることは見て取れたので、ここでは無視せずに扱う。さて、それではこのV粗さと動摩擦係数との関係に解釈を与えよう。まずは、「4観察」で扱った粗さの比との関係があるのかどうかを見てみよう。近似式の傾きと、粗さの比の関係について考える。まず縦軸に近似式の傾き、横軸に粗さの比をもってきて、グラフをかく。書いたグラフは下のとおりである。



データを見ればわかるように、粗さの比が小さくなれば、急激にグラフの傾きは大きくなっている。G-40 というのは表面の凹凸が非常に大きい番数である。そこで、左の傾向を説明できる考察を述べる。まずグラフの傾きが大きいということはどういうことなのかということを考えよう。それは、小さな速度の変化で摩擦係数が大きく変わるということである。すこ

Graph98

しの速度の変化によって影響を及ぼされやすいのが G-40 のような粗いものだということには、次のような説明ができる。静止摩擦係数の考察でも述べているように、表面の凹凸が大きければ止まった時にめり込む可能性が高い。ここで動摩擦時にも、引っかかって一時的にめり込むことがあるのではないか、と考えられる。速度によって動摩擦係数が変わり、V 粗さが変わるということは、引っかかり方方が異なってくるということである。その際、速度が速くなればなるほど影響を受けるのは、もともと引っかかる場所が少なかった G-40 などである。もしも G-80 であった場合、あるところが引っかからなくてほかの場所が引っかかる可能性は十分にある。つまり「保険」のようなものがきいているのだ。それに比べて G-40 は、引っかからなかった場合の動摩擦係数は、非常に小さな値をとるのに対し、引っかかるときには大きくめり込んでいるために非常に大きな動摩擦係数を示す。残念ながら、データの量が少ないために検証ができない。したがってこの説明は「仮説」である。しかしながら、G-80 のときと G-240 の時は、表面の粒子の様子がまったく違うにも関わらず、粗さの比がほとんど同じ値をとっていると、グラフにおける傾きも同じになっていることから、確実にグラフの傾きと粗さの比には関係があると言い切れる。

(C) 動摩擦係数の新しい測定方法

今までの実験の中で得られてきた様々な情報を総合すると、新しい測定方法を提案することができる。まず、動摩擦係数が V 粗さと直線的関係にあり、近似式 B にできたことから、アルミや銅のような表面構造をもつものと紙やすりの動摩擦係数は、V 粗さがわかれば測定できる。V 粗さは速度と音によって計測、算出できるため、動摩擦時の速度と音のデータがあれば、動摩擦係数を概算することができる事になる。誤差の範囲は、近似式 B の誤差がほとんど見られないことから、その前の音の計測および速度の計測によって生じる誤差がみられると考えることができる。もし動摩擦係数に関する近似式 A が実験を重ねることでさらに正確になるのなら、誤差を小さくすることができる。音に関しては誤差の出しようがないので、問題は速度の計測による誤差のみとなり、誤差の少ない実験ができる。しかし、その計測においては、動摩擦係数と V 粗さのグラフの傾きが必要になる。この傾

きに関しては、今回はデータの少なさから近似式をだすことができなかった。この値が、もしも粗さの比と関係しているのだとすれば、この傾きも、事前の表面観察によって求めることができる。当研究においては、粗さの比と動摩擦係数—V粗さの傾きが関係している可能性を示せた。

5.5.5 実験IVの結論

ここで、動摩擦係数と音の関係について結論する。

(A) 動摩擦係数と音の関係

動摩擦係数と関係しているのは、音の測定によって得られる、バーチャル粗さ（V粗さ）という新しく作った粗さを評価する仮想的な数である。V粗さの定義は、下の式によってあらわされる。この研究の中では、V粗さのことは文字Ωと置く。（5.1）より

$$\frac{1\text{秒当たりの衝突回数}}{1\text{秒当たりに進む距離}} = \Omega \quad \dots (5.1)$$

一秒当たりに進む距離は、速度を測定してその速度で1秒あたりに進む距離を出したものであり、1秒当たりの衝突回数というのは、音の測定によってあらわれる衝突音によると思われる大きな音が、一秒間あたりに何回発生しているかという回数である。0.1秒当たりの回数を測定したのなら、その回数を0.1で割ったものが、1秒当たりの衝突回数である。このΩは（1/m）という単位を持つ。この定義によってあらわされるV粗さは動摩擦係数と直線的な関係を持つことがわかり、その傾きには観察によって得られる粗さの比に関係している可能性を示すことまでできた。（粗さの比に関しては「4 観察」を参照）

ここまで発見は、すべて実験から考察して出したことである。したがって、まだ一般化して述べることはできない。しかし、確実にこの実験で用いた銅、アルミにおいては成り立っていた。

(B) 測定方法

この音に関する実験には、誤差がでるところが少なかった。音の記録に誤差は存在しないものとするならば、誤差を生じさせるのは速度の測定が主な原因となる。そして、実験の方法に記述があるように、できるだけ誤差が少なくなるように、動摩擦係数に関する実験IIIで誤差が大きかった場所での測定は避けている。また、動摩擦係数—V粗さのグラフにおいて、非常にきれいな直線となったことからも、誤差が少なかったといえる。したがって、測定による誤差は小さいものであったと結論する。ただし、誤差が約±0.1ほど認められていた、近似曲線を利用したために、この場合も誤差が動摩擦係数に約±0.1ほど認められているものとする。

(C) 発生する音を利用した動摩擦係数測定の可能性

動摩擦係数というデータ自体が、あまり理論の役に立たない領域である。したがって、さらに多くのデータを集め、粗さの比と動摩擦係数—V 粗さグラフの傾きがどのように関係しているかを近似的にでも得られれば、粗さの比と音と速度の計測のみによって、動摩擦係数を測定することが可能である。この研究の大きな成果は、音の測定によって、動摩擦係数を測定する方法を考案、ある程度実証、それが実際に使用できる可能性を示したことである。

6 全体を通した結論

今までに得られたすべての知見をまとめて、最終的な考察とする。

(A) 測定方法

(i) 静止摩擦係数測定装置について

静止摩擦係数測定装置は、実験Ⅰ、実験Ⅱで用いたものには、木片を使うという要素が、大きな誤差の要因になることがわかっている。それらが誤差を及ぼした測定結果を結果としてとらなければ、静止摩擦係数は傾向がはっきりとわかるほどに正確に測ることが可能である。

(ii) 動摩擦係数測定装置について

動摩擦係数測定装置に関しては、文献値がないためにどれだけ誤差が出ているのかがまったく見当のつけようのないという中での測定であったので、実際にどれだけの誤差が出ているのかは不明である。しかし、その中の音との関係についての考察の時も、非常にきれいなグラフを描けるほどに整った値をしており、速度と動摩擦を比べるだけでうまく測れていないと判断する必要はなく、むしろ正確な測定であったと考えられる。

(iii) 動摩擦係数と音の関係を調べる装置について

手順の中にあまり誤差の原因がないことで、かなり正確な測定が可能になっている。これに関してももちろん自分で思いついて実験していることであるので、文献値はない。したがってどれだけの誤差があるのかについては結論しかねるが、データの散らばりは比較的小さかった。動摩擦係数という、幅が大きくあるような数に関係するとされる音の測定としては、十分満足できる測定装置であったと考えられる。

(B) 摩擦係数の傾向

(i) 静止摩擦係数

静止摩擦係数は、「4 観察」で得られた粗さの比に大きく関係していることがわかった。片方が金属板、もう片方が紙やすりのとき、静止摩擦係数は本質的には実際に接触している部分の大きさによって決まるということもわかり、紙やすりの番号にはほとんど関係がないことが明らかになった。また、紙やすり同士の摩擦に関しては、下のように場合分けできる。

- ・大摩擦…試料に対して凹凸が粗い物体が接触したときにおこる摩擦

(紙やすりであれば、G-40あたり～G-120あたりまで)

- ・中摩擦…試料の表面と凹凸の状態がほぼ同じ物体が接触したときの摩擦
(紙やすりであれば、G-100あたり～G-120あたりまで)
- ・小摩擦…大摩擦と逆の状態になった時におこる摩擦
(紙やすりであれば、G-120あたり～G-400あたりまで)
 - 上昇型小摩擦…小摩擦のうち、摩擦が大きくなっているとき
 - 低下型小摩擦…小摩擦のうち、試料の粗さに対して細かすぎるか、あるいはもろすぎる物体が接触したときに起こる摩擦

実際にこの傾向に従っていることは実験によって確かめられている。

(ii) 動摩擦係数

動摩擦係数は、一見混沌とした結果に見えるものの、速度に注目してデータを整理すると、下のようなことがわかった。

- ・動摩擦係数は、速度に依存しているが、その依存の仕方は直線的ではない。
- ・動摩擦係数がある速度で紙やすりの番数や、それらを粗さの比に書き直したものを作させたときに示す傾向は、アルミの時を基準として、ほぼ同じ傾向が銅に表れ、そしてステンレスには、アルミで5km/hのときに表れる傾向が4km/hで、アルミで4km/hの時に表れる傾向が3km/hで現れる。アルミとステンレスの平均的な動摩擦係数の差をアルミの動摩擦係数でステンレスの動摩擦係数を割ったものの平均で表すと、だいたい0.9になっており、それとこの傾向のずれとを関連付ける式として、以下のようなものを仮定する。

$$v = V - A(1 - \alpha)$$

ここで v は動摩擦の速度、 V はアルミにおける基準となる速度、 α が説明したような動摩擦係数の比である。 A は、金属板と紙やすりとの摩擦であれば、約1.0になることが実験から求められた。この式から何がわかるかというと、たとえば $\alpha=0.5$ の試料（金属板）あれば、速度1km/hで動摩擦を起こすとき、その傾向はアルミが6km/hの時の傾向がみられるというものである。このアルミにおける基準となる速度というのは、どのような傾向が表れるのかを判断する基準になるという意味である。

(iii) 動摩擦係数と音

動摩擦係数と、音から測定できるバーチャル粗さ（V粗さ）が、直線的な関係を持っており、そのグラフの傾きに、紙やすりの方の粗さの比が関係しているという可能性を示した。V粗さは以下のように定義される。衝突回数とは、音の測定によって得られる、物体の衝突音と思われる音の、単位時間当たりの回数である。この実験では、コンピューターの都合上、0.0554秒で測ったものを、0.0554秒で割った。また、V粗さ=Ωと置いておく。

$$\frac{1\text{秒当たりの衝突回数}}{1\text{秒当たりに進む距離}} = \Omega$$

単位は（1/m）である。

(C) 音によって動摩擦係数を測ることは可能か

今回の実験のデータのみで動摩擦係数を測ることは難しい。しかし、測定に関するすべてのものにたいして、音や観察の結果などがわからばだいたいの動摩擦係数の概算は可能である。そこで結論としては、音と動摩擦係数の関係を考察したなかで、音や速度を用いて、動摩擦係数を測る十分な可能性を見出すことができた、としておく。

7 参考資料

今回の研究においては、自分の考えを展開していったために、あまり参考文献がない。

- ・物理学（三訂版） 小出昭一郎 著 裳華堂
- ・理解しやすい物理 近角聰信一三浦登著 文英堂
- ・サンドペーパーの種類について↓

<http://www.toishi.info/faq/question-eight/papergrit.html>

8 共同研究者

岡山朝日高等学校 1年 安藤 貴政君

役割：実験Ⅰ、実験Ⅱにおける共同実験者。同じ実験を行っている。実験Ⅰ、実験Ⅱの発案はおおむね私が行った。また、我々の実験のデータを同じ高校から出場する複数の人に参考として公開しているが、実験はすべて私と安藤貴政君によって行われている。

また、連日夜遅くまで実験に付き合っていただいた、物理の先生方にはここで感謝の意を表させていただきます。

9 レポート末 データ集

実験で得たすべてのデータを圧縮して載せる。

(A) 実験Ⅰ（静止摩擦係数）

(a) アクリル板 (紙やすり 40番→G-40 とあらわす)

アクリル板	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
G-40	41 (°)	39	39	35	37	38.2
G-60	30	33	34	30	31	31.6
G-80	21	24	25	31	25	25.2
G-100	25	25	35	37	31	30.6
G-120	36	42	30	37	28	34.6
G-180	25	29	29	32	21	27.2
G-240	29	29	26	32	27	28.6
G-400	19	25	26	23	27	24.0

算出された静止摩擦係数は

紙やすりの番号	G-40	G-60	G-80	G-100	G-120	G-180	G-240	G-400
静止摩擦係数	0.79	0.62	0.47	0.59	0.69	0.51	0.54	0.45

(b)銅板

銅	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
G-40	30	32	35	33	34	32.8
G-60	38	39	37	36	37	37.4
G-80	33	32	27	34	35	32.2
G-100	31	32	32	32	38	33.1
G-120	36	36	35	40	45	37.4
G-180	36	37	42	38	30	36.6
G-240	34	31	33	31	30	31.8
G-400	24	25	24	28	24	25.0

算出された静止摩擦係数は

紙やすりの番号	G-40	G-60	G-80	G-100	G-120	G-180	G-240	G-400
静止摩擦係数	0.64	0.76	0.63	0.65	0.76	0.72	0.62	0.47

(c)ステンレス板

ステンレス	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
G-40	27	27	35	35	20	30.5
G-60	37	37	34	37	37	36.4
G-80	37	32	30	29	24	30.4
G-100	24	32	31	30	32	29.8
G-120	20	21	22	18	20	20.2
G-180	32	35	33	31	32	32.6
G-240	25	23	22	28	27	25.0
G-400	20	17	22	18	18	19.0

算出された静止摩擦係数は

紙やすりの番号	G-40	G-60	G-80	G-100	G-120	G-180	G-240	G-400
静止摩擦係数	0.59	0.74	0.59	0.57	0.37	0.64	0.47	0.34

(d)アルミ板

アルミ	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
G-40	57	43	43	47	48	47.6
G-60	42	47	41	44	44	43.6
G-80	30	52	50	36	39	41.4

G-100	40	48	50	47	42	45.4
G-120	26	33	36	35	43	34.6
G-180	43	43	47	38	37	41.2
G-240	38	34	34	39	38	36.6
G-400	36	30	29	28	32	31.0

算出された静止摩擦係数は

紙やすりの番号	G-40	G-60	G-80	G-100	G-120	G-180	G-240	G-400
静止摩擦係数	1.10	0.95	0.88	1.01	0.69	0.88	0.74	0.60

(e) 紙やすり同士の滑り出す角度（縦が試料、横が木片の紙やすり番号）

紙やすり同士の静止摩擦係数には、あまり幅がみられず、傾向も見られなかった。

そこで、5回の測定の平均値のみを載せる。実際の測定値はすべてで失敗も含めると、400回ほどである。

	G-40	G-60	G-80	G-100	G-120	G-180	G-240	G-400
G-40	53.4	46.8	48.8	47.8	47.2	42.8	44.6	40.8
G-60	50.0	51.0	51.0	43.8	51.2	42.0	45.2	42.2
G-80	47.2	46.6	47.6	43.6	50.0	42.8	50.8	43.8
G-100	45.6	45.6	42.0	54.6	51.2	42.6	48.4	46.0
G-120	45.4	40.0	42.6	48.0	51.4	43.0	51.8	45.4
G-180	37.6	42.2	41.2	37.2	42.6	36.8	46.0	39.6
G-240	38.8	38.4	38.4	34.8	46.4	39.0	49.6	44.2
G-400	34.2	36.8	36.6	36.2	42.2	35.4	40.0	43.0

(f) 紙やすり同士の静止摩擦係数

(e) のグラフの角度を静止摩擦係数におしてものである。

	G-40	G-60	G-80	G-100	G-120	G-180	G-240	G-400
G-40	1.35	1.06	1.14	1.10	1.08	0.93	0.99	0.86
G-60	1.19	1.23	1.23	0.96	1.24	0.90	1.00	0.91
G-80	1.08	1.06	1.10	0.95	1.19	0.93	1.23	0.96
G-100	1.02	1.02	0.90	1.41	1.24	0.92	1.13	1.04
G-120	1.01	0.84	0.92	1.11	1.25	0.93	1.27	1.01
G-180	0.77	0.91	0.86	0.76	0.92	0.75	1.04	0.83
G-240	0.80	0.79	0.79	0.70	1.05	0.81	1.17	0.97
G-400	0.68	0.75	0.74	0.73	0.91	0.71	0.84	0.93

(B) 実験II (動摩擦係数)

表示は、縦が木片に貼った紙やすり、横は、一番上の横は滑り出した位置からの距離、紙やすりの番号の横の数字は、その一つの位置での4回の測定値である。また、物質の名称の隣の()の中のグラムは、引くおもりの重量である。また、平均値の小数点以下3桁までをその後の計算に用いた。測定結果がそのまま載っているので数値は速度であり、単位はkm/hである。

(アクリル)(30g)	8cm	平均		16cm	平均		24cm	平均		32cm	平均										
		40	40		40	40		40	40		40	40									
40	1.74	1.81	1.59	1.71	1.725	3.01	2.82	2.62	3.05	2.875	3.6	3.87	3.6	3.47	3.635	4.31	4.39	3.91	4.2	4.2025	
60	1.81	1.7	1.77	1.68	1.74	2.95	2.9	3.25	2.83	2.9825	3.69	3.58	3.53	3.58	3.595	4.11	4.04	4.16	4.16	4.48	4.1975
80	1.34	1.4	1.4	1.44	1.395	2.55	2.44	2.6	2.61	2.55	3.39	3.31	3.16	3.44	3.35	3.88	4.05	4.35	3.72	4	
100	1.37	1.49	1.52	1.42	1.45	2.52	2.46	2.59	2.44	2.5025	3.14	2.98	3.21	3.02	3.0875	3.62	3.34	3.97	3.74	3.6675	
120	1.39	1.56	1.45	1.3	1.425	2.6	2.59	2.6	2.5	2.5725	3.18	3.21	3.13	3.18	3.175	3.59	3.73	3.63	3.65	3.65	
140	1.54	1.66	1.52	1.53	1.565	2.65	2.7	2.45	2.52	2.58	3.28	3.42	3.55	3.25	3.375	3.91	3.38	3.38	3.59	3.775	
240	1.66	1.65	1.51	1.49	1.5775	2.6	2.55	2.56	2.53	2.56	3.22	3.26	3.25	3.1	3.2075	3.78	3.74	3.74	3.44	3.675	
400	1.12	1.14	1.36	1.45	1.2675	2.24	2.23	2.37	2.5	2.365	2.77	2.7	3.08	2.82	2.8425	3.11	3.16	3.5	3.45	3.305	
(アクリル)(60g)		平均		平均		平均		平均		平均		平均									
40	2.56	2.54	2.68	2.25	2.5075	4.05	3.78	3.98	3.79	3.9	4.79	4.68	5	4.97	4.86	6.14	6.12	5.87	5.84	5.9925	
60	2.12	2.32	2.6	2.82	2.465	3.69	2.68	3.98	4.12	3.6175	4.87	4.89	5.08	5.1	4.985	5.88	5.66	5.61	6.18	5.8325	
80	2.03	2.04	1.87	1.95	1.9725	3.68	3.58	3.24	3.93	3.6075	4.69	4.76	4.68	4.74	4.775	5.65	5.5	5.19	5.68	5.505	
100	2.27	1.92	2.24	2.23	2.165	3.96	3.68	3.87	3.63	3.765	4.91	4.68	4.77	4.64	4.75	5.76	5.63	5.44	5.67	5.625	
120	2.04	2.25	2.05	2.22	2.14	3.66	3.69	3.4	3.64	3.5975	4.68	4.48	4.68	4.55	4.5975	5.24	5.45	5.26	5.22	5.2925	
140	2.61	2.1	2.58	2.31	2.4	3.77	3.75	3.87	3.8	3.7975	5.04	4.66	5.23	4.82	4.9375	5.33	5.68	5.59	5.49	5.5225	
240	2.23	2.1	2.18	2.15	2.165	3.59	3.6	3.56	3.68	3.6075	4.5	4.39	4.59	4.39	4.4675	5.48	5.34	5.21	5.54	5.3925	
400	2.16	2.21	2.07	2.35	2.1975	3.64	3.56	3.54	3.7	3.61	4.67	4.53	4.63	4.26	4.5225	5.32	5.41	5.27	5.44	5.36	
(アクリル)(90g)		平均		平均		平均		平均		平均		平均									
40	2.46	2.3	3.11	3.12	2.7475	4	4.3	4.21	4.4	4.2275	5.55	5.25	5.98	5.73	5.6025	6.66	6.29	6.58	6.84	6.5925	
60	2.4	2.45	2.47	2.63	2.4875	4.1	4.11	4.16	4.5	4.2175	5.26	5.2	5.57	5.17	5.3	6.65	6.46	6.34	6.47	6.48	
80	2.44	2.39	2.52	2.39	2.435	4.15	3.78	4.21	4.04	4.045	5.25	5.15	5.34	5.21	5.2975	5.98	6.33	6.33	6.18	6.235	
100	2.58	2.29	2.38	2.53	2.445	3.74	3.53	3.96	4.35	3.895	5.13	4.97	5.39	5.1	5.1475	5.78	6.36	6.65	6.36	6.2875	
120	2.55	2.31	2.5	2.34	2.425	4.06	3.83	4.27	4.09	4.0625	5.01	5.18	5.36	5.34	5.2225	6.25	6.27	5.75	5.97	6.06	
140	2.2	2.37	2.16	2.03	2.19	3.96	3.92	3.92	3.61	3.8525	5.21	4.91	5.09	4.96	5.0425	6.02	6.05	5.91	6.22	6.05	
240	2.26	2.11	2.25	2.12	2.185	4.03	4.06	4.02	3.83	3.985	5.17	4.96	5.34	4.94	5.1025	6.03	5.93	6.08	6.21	6.0625	

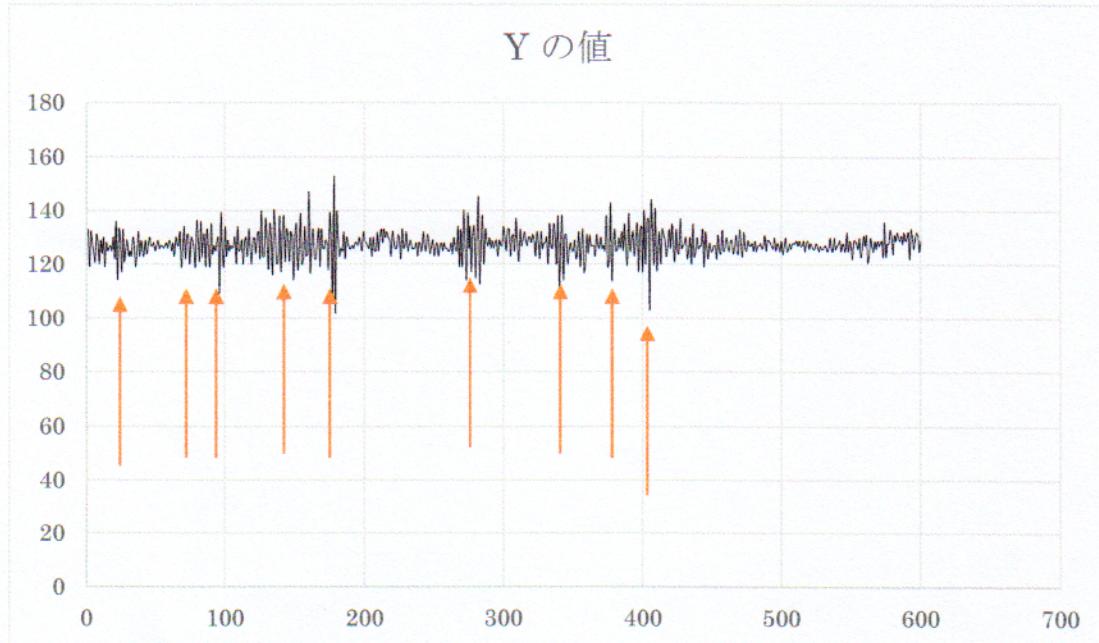
		(スキンレス)(30g)cm			平均			16cm			平均			24cm			平均			32cm			平均		
		40	2.1	1.78	1.87	1.79	1.885	303	286	291	286	295	364	367	35	368	3625	4.21	4.22	4.21	4.24	4.22			
		60	1.82	1.7	1.59	1.62	1.6825	294	272	245	292	2755	355	35	371	312	347	4.15	4.04	4.01	3.85	4.025			
		80	1.76	1.92	1.62	1.82	1.78	28	296	269	288	2825	362	357	36	346	35625	4.2	4.1	4.18	4.04	4.13			
		100	1.41	1.66	1.43	1.58	1.52	1.97	246	232	241	229	313	311	304	314	3105	3.59	3.7	3.61	3.68	3.645			
		120	1.56	1.59	1.49	1.53	1.5425	26	242	258	237	24925	318	308	32	303	31225	3.64	3.63	3.67	3.8	3.685			
		180	1.69	1.76	1.61	1.82	1.72	2.76	265	269	274	271	335	339	349	332	33875	4.59	4.23	4.06	4.01	4.225			
		240	1.52	1.6	1.44	1.59	1.5375	25	242	25	243	24625	303	303	303	307	304	3.75	3.38	3.66	3.64	3.6075			
		400	1.73	1.7	1.56	1.5	1.6225	2.72	257	261	238	257	346	317	327	295	32125	3.95	4.02	3.84	3.79	3.9			
		(スキンレス)(60g)																							
		40	2.38	2.63	2.39	2.41	2.4525	387	3.9	387	3.8	386	5.02	4.66	4.85	4.73	4.815	5.62	5.79	5.71	5.72	5.71			
		60	2.5	2.31	2.34	2.45	2.4	387	3.79	3.79	3.7	3.7875	4.81	4.99	4.95	4.75	4.875	5.49	5.61	5.7	5.61	5.6025			
		80	2.21	2.36	2.26	2.52	2.375	3.75	383	366	389	37825	4.89	4.76	5.02	4.69	4.84	5.77	5.68	5.63	5.81	5.7225			
		100	2.15	2.13	2	2.13	2.1025	3.57	345	355	353	3525	4.56	4.48	4.53	4.5	4.5175	5.49	5.29	5.36	5.47	5.4025			
		120	2.26	2.23	2.31	2.22	2.255	3.66	341	369	349	35625	4.65	4.46	4.5	4.7	4.5775	5.34	5.2	5.38	5.45	5.3425			
		180	2.28	2.65	2.1	2.6	2.4075	3.92	375	335	378	3.7	4.94	4.87	4.7	5.13	4.91	5.84	5.4	5.57	5.58	5.5975			
		240	2.17	2.35	2.19	2.18	2.2225	3.7	3.5	3.56	3.44	3.55	4.63	4.62	4.55	4.62	4.605	5.27	5.3	5.17	5.33	5.2675			
		400	2.36	2.06	2.17	2.47	2.265	3.74	342	392	346	3635	4.7	4.69	4.97	4.68	4.76	5.45	5.34	5.48	5.4	5.4175			
		(スキンレス)(90g)																							
		40	2.64	2.48	2.64	2.66	2.605	4.57	4.35	4.39	4.32	4.4075	524	545	54	529	5.345	6.52	6.17	6.35	6.61	6.4125			
		60	2.46	2.66	2.54	2.52	2.545	4.32	4.1	4.01	4.3	4.825	5.5	522	5.76	5.38	5.465	6.57	6.31	6.77	6.37	6.505			
		80	2.38	2.91	2.5	2.42	2.525	4.07	4.46	4.49	3.99	4.2525	5.72	5.15	5.35	5.42	5.41	6.36	6.63	6.48	6.38	6.4625			
		100	2.48	2.52	2.65	2.29	2.485	3.9	365	3.9	4.06	3.8775	5.06	527	5.22	5.02	5.1425	6.63	6.17	6.21	6.34	6.1875			
		120	2.7	2.49	2.52	2.4	2.5275	4.09	4.16	4.37	3.85	4.1175	5.4	505	523	5.12	5.2	6.15	6.69	6.12	6.08	6.26			
		180	2.41	2.46	2.68	2.92	2.675	4.37	4.01	4.18	4.03	4.1475	4.92	5.54	5.11	5.42	5.2475	6.87	6.59	6.39	6.63	6.622			
		240	2.68	3.01	2.84	2.41	2.735	4.37	4.2	3.73	4.11	4.025	5.49	4.94	5.19	5.08	5.175	6.21	6.25	6.14	6.3	6.225			
		400	2.81	2.55	2.38	2.59	2.5825	4.47	3.96	4.35	383	4.1525	553	5.1	5.07	5.11	5.2025	6.32	6.01	6.33	6.27	6.2325			

(鋼)(30g)	8cm				16cm				24cm				32cm				平均				
	平均		16cm		平均		24cm		平均		32cm		平均		平均						
#DV/0!	#DV/0!	#DV/0!	#DV/0!	#DV/0!	#DV/0!	#DV/0!	#DV/0!	#DV/0!	#DV/0!	#DV/0!	#DV/0!	#DV/0!	#DV/0!	#DV/0!	#DV/0!	#DV/0!					
(鋼)(60g)	40	1.49	1.51	1.45	1.5	1.4875	2.36	2.33	2.23	2.38	2.325	2.7	2.82	2.75	2.67	2.735	3.19	3.27	3.34	3.15	3.235
	60	1.23	1.16	1.49	1.44	1.33	2.09	2.03	2.31	2.35	2.195	2.61	2.59	2.82	2.75	2.6925	3.1	3.07	3.25	3.19	3.1525
	80	1.51	1.38	1.41	1.34	1.34	2.33	2.21	2.17	2.21	2.23	2.8	2.7	2.74	2.85	2.7725	3.62	3.07	3.31	3.42	3.355
	100	1.12	1.28	1.46	1.13	1.2475	1.97	2.05	1.83	2.03	1.97	2.38	2.49	2.54	2.52	2.4825	2.8	2.83	2.83	2.96	2.855
	120	1.39	1.5	1.37	1.45	1.4275	2.08	2.2	2.12	2.15	2.1375	2.54	2.55	2.41	2.59	2.5225	2.96	2.96	2.75	3.11	2.945
	180	1.7	1.62	1.71	1.6	1.6575	2.58	2.52	2.57	2.52	2.5475	3.19	3.09	3.24	3.11	3.1575	3.78	3.72	3.75	3.7	3.735
	240	1.45	1.4	1.44	1.3	1.3975	2.22	2.22	2.55	2.14	2.2825	2.69	2.71	2.77	2.69	2.715	3.21	3.22	3.25	3.19	3.2175
	400	1.3	1.23	1.46	1.42	1.3525	2.18	2.22	2.26	2.33	2.2475	2.73	2.73	2.76	2.73	2.7375	3.29	3.34	3.32	3.29	3.31
					#DV/0!																
(鋼)(90g)	40	2.25	2.13	2.15	2.22	2.1875	3.76	3.62	3.5	3.98	3.715	4.53	4.37	4.47	4.15	4.38	5.23	5.45	5.14	5.27	5.2725
	60	2.14	2.18	2.18	2.27	2.1925	3.5	3.45	3.48	3.74	3.525	4.4	4.16	4.47	4.51	4.385	5.03	5.13	5.08	5.4	5.16
	80	2.12	2.4	2.1	2.36	2.245	3.58	3.82	3.57	3.91	3.72	4.61	4.26	4.67	4.57	4.5275	5.65	5.28	5.53	5.45	5.4775
	100	2.13	2.25	1.89	2.04	2.0775	3.58	3.62	3.43	3.45	3.52	4.42	4.37	4.27	4.19	4.3125	5.32	5.16	5.09	4.85	5.105
	120	1.83	1.57	1.97	1.67	1.76	3.38	3.34	3.32	3.26	3.325	4.21	4.1	4.18	4.06	4.1375	5.08	4.9	5.02	4.86	4.985
	180	2.11	2.06	2.41	2.42	2.25	3.69	3.75	3.91	3.91	3.815	4.55	4.55	4.8	4.7	4.65	5.52	5.51	5.73	5.73	5.6225
	240	2.33	2.14	1.89	1.84	2.05	3.73	3.51	3.45	3.45	3.535	4.56	4.38	4.31	4.3	4.3875	5.4	5.28	5.11	5.07	5.215
	400	2.17	2.23	2.02	2.07	2.1225	3.53	3.66	3.59	3.65	3.6075	4.43	4.66	4.52	4.53	4.535	5.35	5.26	5.32	5.36	5.3225
					#DV/0!																
(鋼)(90g)	40	2.36	2.31	2.39	2.27	2.3325	4.23	4.25	4.14	4.03	4.1625	5.1	5.18	4.79	5.1	5.0425	5.77	5.83	5.88	5.97	5.8625
	60	2.45	2.52	2.41	2.41	2.4475	3.99	4.31	4.26	4	4.14	5.09	5.11	5.01	5.01	5.055	6.11	6.2	6.13	6.01	6.1225
	80	2.59	2.42	2.5	1.99	2.375	4.53	4.21	4.12	3.94	4.2	5.17	5.3	5.49	5	5.24	6.22	5.92	5.99	6.16	6.0725
	100	2.42	2.29	2.28	2.05	2.26	4.25	4.16	4.06	3.88	4.0875	5.28	5.05	5.15	4.98	5.115	5.98	5.95	6.04	5.85	5.955
	120	2.42	2.12	2.03	2.1	2.1675	4.17	4.08	3.91	3.98	4.035	5.11	4.98	4.75	4.84	4.92	6.14	6.11	5.89	6.1	6.06
	180	2.54	2.27	2.65	2.27	2.4325	4.06	4.02	4.34	4.56	4.245	5.01	5.05	5.36	5.35	5.1925	6.34	6.06	6.36	6.17	6.2325
	240	2.53	2.29	2.41	2.3	2.3825	4.31	4.08	4.23	4.1	4.18	4.8	5.01	5.25	5.07	5.0325	6.11	6.1	6.08	5.81	6.025
	400	2.46	2.12	2.13	2.29	4.36	4.37	4.02	4.08	4.2075	5.28	5.21	4.92	4.92	5.0825	6.21	6.36	6.17	6.07	6.2025	

		(7)1/2)(30g)			8cm			平均			16cm			平均			24cm			平均			32cm			平均			
		40	1.35	1.13	1.73	1.61	1.455	2.17	2.09	2.49	2.4	2.2875	2.75	2.55	2.97	2.73	2.75	3.36	3.32	3.39	3.39	3.365							
		60	1.54	1.5	1.57	1.54	1.5375	2.27	1.94	2.12	2.39	2.18	2.96	2.7	2.24	2.37	2.5675	3.28	3.24	3.04	3.16	3.18							
		80	1.41	1.47	1.43	1.53	1.46	2.4	2.38	2.37	2.45	2.4	3.04	2.97	2.98	2.97	2.99	3.44	3.47	3.53	3.5	3.485							
		100	1.36	1.34	1.42	1.35	1.3675	2.19	2.23	2.34	2.34	2.275	2.72	2.76	2.9	2.88	2.815	3.2	3.3	3.31	3.41	3.305							
		120	1.32	1.34	1.43	1.47	1.39	2	1.91	2.14	2.51	2.14	2.56	2.38	2.66	3.1	2.675	3.03	3	3.11	3.48	3.155							
		140	1.21	1.39	1.58	1.32	1.375	2.05	2.1	2.49	2.27	2.275	2.72	2.68	3.1	2.85	2.97	2.96	3.58	3.35	3.215								
		160	1.39	1.37	1.46	1.4	1.405	2.21	2.21	2.5	2.39	2.3275	2.76	2.82	3.12	3.13	2.9575	3.17	3.28	3.56	3.59	3.4							
		180	1.52	1.47	1.33	1.42	1.435	2.51	2.53	2.44	2.38	2.465	3.07	3.1	3.07	2.99	3.0575	3.53	3.61	3.57	3.47	3.545							
		(7)1/2)(60g)																											
		40	2.61	2.37	2.51	2.42	2.4775	3.3	3.54	3.38	3.8	3.61	4.22	4.66	4.61	4.39	4.47	4.49	5.51	5.22	4.5	4.93							
		60	2.03	2.17	1.93	2.28	2.1025	3.56	3.21	3.42	3.25	3.36	4.31	3.99	3.66	3.97	3.925	6.26	5.91	5.69	5.37	5.8075							
		80	2.14	2.2	2	2.15	2.1225	3.55	3.56	3.49	3.54	3.535	4.57	4.61	4.5	4.5	4.545	5.45	5.57	5.27	5.4	5.4225							
		100	2.06	2.03	2.13	2.21	2.1075	3.58	3.59	3.64	3.6	4.4	4.41	4.4	4.46	4.475	5.18	5.37	5.2	5.29	5.26								
		120	2.19	2.14	2.21	2.13	2.1675	3.48	3.49	3.45	3.44	3.465	4.47	4.46	4.53	4.5	4.49	5	5.16	5.21	5.09	5.115							
		140	2.32	2.08	2.2	2.15	2.1875	3.65	3.61	3.36	3.67	3.6325	4.64	4.53	4.62	4.51	4.575	5.36	5.36	5.29	5.16	5.2925							
		160	2.11	2.63	2.05	1.9	2.1725	3.57	3.73	3.41	3.46	3.5425	4.58	4.34	4.43	4.43	4.445	5.5	5.39	5.15	5.18	5.305							
		180	2.13	2.24	2.34	2.09	2.2	3.65	3.68	3.76	3.7	3.6975	4.66	4.8	4.82	4.57	4.7125	5.46	5.42	5.44	5.4	5.43							

(C) 実験IV 音と動摩擦係数

実際には、非常に多くのデータを扱っているが、ここではどのようなデータから判断しているのかを示すために、まず実際の例を一つ紹介する。



(G-40 速度 2.59km/h の時 衝突回数 9 回)

判断基準は、実験IVでの記述のとおりであるが、見てわかるように、多くの傾向は見ればすぐによくそれとみてとれる。このようにして得られた結果を表にしたのが下のものである。

速度(km/h)	2.59	2.95	2.66	4.51	4.79	4.61	1.78	1.69	1.59
G-40	9	7	8	6	5	5	10	10	11
速度	3.04	3.29	3.1	4.6	4.7	4.4	1.47	1.47	1.54
G-80	6	6	6	3	4	5	9	9	8
速度	2.86	2.91	2.65	4.79	4.83	4.83	1.72	1.34	1.43
G-120	9	8	8	3	5	3	13	16	14
速度	2.74	2.91	2.84	4.59	4.5	4.76	1.52	1.82	1.34
G-240	3	4	3	2	0	1	6	5	5
速度	1.48	1.53	1.47	2.8	2.73	2.8	4.37	4.69	4.42
G-40	10	10	12	9	7	8	6	5	7
速度	1.37	1.52	1.43	2.81	2.72	2.72	4.48	4.62	4.53
G-80	9	7	9	7	6	6	4	3	3
速度	1.47	1.42	1.37	2.47	2.54	2.39	4.1	4.23	4.17
G-120	13	15	14	9	7	10	4	4	5
速度	1.3	1.42	1.39	2.91	2.72	2.83	4.53	4.27	4.4
G-240	6	5	5	3	3	3	1	0	2

また、上のグラフから、V 粗さΩに計算しなおしたものが、次のものである。一秒間あたりの衝突回数を R とする。グラフの上半分がアルミ、下半分が銅であり、実際にデータとしてとってグラフ化してあるのは、有効数字三ヶタまでである。

G-40	速度 (m/s)	0.72	0.82	0.74	1.252222	1.33	1.28	0.494444	0.469444	0.441667
	R	162.4549	126.3538	144.4043	108.3032	90.25271	90.25271	180.5054	180.5054	198.556
	Ω	225.6318	154.09	195.141	86.48884	67.85918	70.50993	365.0671	384.5086	449.5607
G-80	速度	0.844444	0.913889	0.861111	1.277778	1.305556	1.222222	0.408333	0.408333	0.427778
	R	108.3032	108.3032	108.3032	54.15162	72.20217	90.25271	162.4549	162.4549	144.4043
	Ω	128.2538	118.5081	125.7715	42.37953	55.30379	73.84312	397.8487	397.8487	337.5686
G-120	速度	0.794444	0.808333	0.736111	1.330556	1.341667	1.341667	0.477778	0.372222	0.397222
	R	162.4549	144.4043	144.4043	54.15162	90.25271	54.15162	234.657	288.8087	252.7076
	Ω	204.4887	178.6445	196.1719	40.69851	67.2691	40.36146	491.1426	775.9039	636.1869
G-240	速度	0.761111	0.808333	0.788889	1.275	1.25	1.322222	0.422222	0.505556	0.372222
	R	54.15162	72.20217	54.15162	36.10108	0	18.05054	108.3032	90.25271	90.25271
	Ω	71.14812	89.32227	68.6429	28.31457	0	13.65167	256.5077	178.5218	242.47
G-40	速度	0.411111	0.425	0.408333	0.777778	0.758333	0.777778	1.213889	1.302778	1.227778
	R	180.5054	180.5054	216.6065	162.4549	126.3538	144.4043	108.3032	90.25271	126.3538
	Ω	439.0672	424.7186	530.4649	208.8706	166.6204	185.6627	89.22007	69.27713	102.9126
G-80	速度	0.380556	0.422222	0.397222	0.780556	0.755556	0.755556	1.244444	1.283333	1.258333
	R	162.4549	126.3538	162.4549	126.3538	108.3032	108.3032	72.20217	54.15162	54.15162
	Ω	426.8887	299.259	408.9773	161.8767	143.3425	143.3425	58.0196	42.19607	43.0344
G-120	速度	0.408333	0.394444	0.380556	0.686111	0.705556	0.663889	1.138889	1.175	1.158333
	R	234.657	270.7581	252.7076	162.4549	126.3538	180.5054	72.20217	72.20217	90.25271
	Ω	574.6703	686.429	664.0491	236.7763	179.0841	271.891	63.39702	61.44865	77.91601
G-240	速度	0.361111	0.394444	0.386111	0.808333	0.755556	0.786111	1.258333	1.186111	1.222222
	R	108.3032	90.25271	90.25271	54.15162	54.15162	54.15162	18.05054	0	36.10108
	Ω	299.9167	228.8097	233.748	66.9917	71.67127	68.88546	14.3448	0	29.53725

(D) プログラム

動摩擦の導出には、vba を用いた。下にプログラムを紹介する。

Sub 動摩擦()

o = Range("B4")

p = Range("C4")

q = Range("D4")

r = Range("E4")

a = (o / 3600) * 1000

b = (p / 3600) * 1000

c = (q / 3600) * 1000

d = (r / 3600) * 1000

x = a * a / 0.16

y = (b * b - a * a) / 0.16

Z = (c * c - b * b) / 0.16

u = (d * d - c * c) / 0.16

m = Range("B2")

n = Range("E2")

g = 9.8

$\alpha = n / m - ((x / g) * ((m + n) / m))$

$\beta = n / m - ((y / g) * ((m + n) / m))$

$\gamma = n / m - ((Z / g) * ((m + n) / m))$

$\delta = n / m - ((u / g) * ((m + n) / m))$

Range("B7") = α

Range("C7") = β

Range("D7") = γ

Range("E7") = δ

End Sub