

レポート表題

小型回転ステージを用いた静止摩擦係数、動摩擦係数の測定
— 接触状態と滑りと摩擦係数の関係 —

第1チャレンジ番号 :
(※1)

1 5 3 1 0 3 0

(※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 : 丹羽 莉人

学校名又は

卒業校名 : 三重県立四日市高等学校 学年 : 3年

学校のある

都道府県名 : 三重県 実験をした場所 : 四日市高校物理実験室

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 :

今西 優泉

岡本 直大

○ 中村 史香

学校名・学年 :

四日市高校3年

四日市高校3年

四日市高校3年

実験課題に取り組んだ感想を書いてください。

今年も物理チャレンジに参加できてより摩擦の世界の奥深さを知ることができた。「F=μN」では決まらないということを知りながら研究を続けて思いました。

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)

小型回転ステージを用いた静止摩擦係数・動摩擦係数の測定 — 接触面状態・潤滑剤と摩擦係数の関係 —

三重県立四日市高等学校 3年 丹羽 英人

《目次》

1. 実験の目的	P.2
2. 実験の手法	P.2～P.16
3. 実験結果	
« I »表面粗さの測定	P.16～P.20
« II »静止摩擦係数の測定	P.21～P.36
« III »潤滑剤影響下の静止摩擦係数の測定	P.37～P.50
« IV »動摩擦係数の測定	P.50～P.53
4. 考察	
(1)静止摩擦係数の粗さ依存性	P.53～P.57
(2)静止摩擦係数に対する接触面の摩耗の影響	P.57～P.59
(3)静止摩擦係数に対する表面の溝の影響	P.60～P.61
(4)最大静止摩擦力の荷重依存性	P.61～P.62
(5)静止摩擦係数の物質依存性	P.62～P.64
(6)静止摩擦係数に対する潤滑剤の効果	P.64～P.69
(7)傾斜法による動摩擦係数の測定結果について	P.69～P.74
①静止摩擦係数と動摩擦係数の値	
②動摩擦係数に対する潤滑剤の効果	
5. 結論	P.74～P.75
6. 共同実験者	P.75
7. 参考文献	P.76
8. 謝辞	P.77
9. 付属資料(元データ集)	P.78～P.122

小型回転ステージを用いた静止摩擦係数・動摩擦係数の測定 —— 接触面状態・潤滑剤と摩擦係数の関係 ——

三重県立四日市高等学校 3年 丹羽 英人

1. 実験の目的

摩擦力は私たちの生活の中で大きく影響を及ぼす。物体の表面の粗さ、素材、物体間の接触の仕方などによって、静止摩擦係数、動摩擦係数は変化する。身近な例として雨の日、自動車でブレーキをかけると、晴れて路面が乾いている日に比べて自動車は止まりにくい。このことより、摩擦係数はいろいろな条件によってその値が変わると考えられる。

この実験では、静止摩擦係数の粗さ依存性、荷重依存性、物質依存性、接触面の摩耗の影響および静止摩擦係数に対する潤滑剤の効果について調べることを目的とする。

測定には小型回転ステージを利用した傾斜法を用いた。この方法により数センチの大きさの試料の摩擦係数をいろいろな条件下で測定することができる。さらに、スマートフォンを用いて動画を撮影し、滑走時間を解析することによって動摩擦係数の測定を行う。傾斜法は静止摩擦係数を測定する簡便な方法であるが、この方法でも動摩擦係数を同時に測定できることを示すことを第2の目的とする。

2. 実験の手法

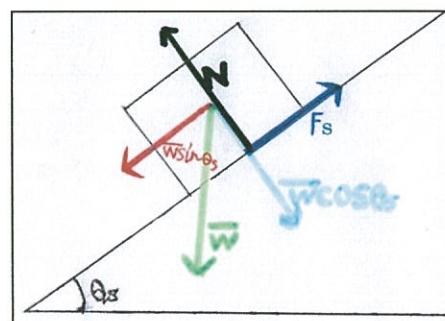
2-1 実験の原理

(1) 静止摩擦係数の測定

斜面上に静止している物体が存在するとき、斜面の角度が大きくなると、物体はある一定の角度において滑りだす。その瞬間の斜面の角度を摩擦角といふ。

「チャート式シリーズ新物理」[1]によると、静止摩擦係数 μ_0 と最大静止摩擦力 F_s の関係は、垂直抗力を N とすると、

図.1 斜面上の静止物体にかかる力



$$F_s = \mu_0 \times N \quad (1,1)$$

と定義されている。滑り出す直前の斜面上に平行方向の力は、最大静止摩擦力と等しい。(図.1 参照)

ここで、斜面に平行方向の力は摩擦角を θ_s 、物体の重さを \bar{W} 、とそれぞれすると、

$$F_s = \bar{W} \sin \theta_s \quad (1,2)$$

となるさらに、斜面上に存在する物体に関して、垂直抗力は、

$$N = \bar{W} \cos \theta_s \quad (1,3)$$

となる。ここで、とする。これらより静止摩擦係数は、

$$\mu_0 = \frac{F_s}{N} = \frac{\bar{W} \sin \theta_s}{\bar{W} \cos \theta_s} = \tan \theta_s \quad (1,4)$$

となる。これらより、摩擦角を測定することによって、静止摩擦係数を測定する。

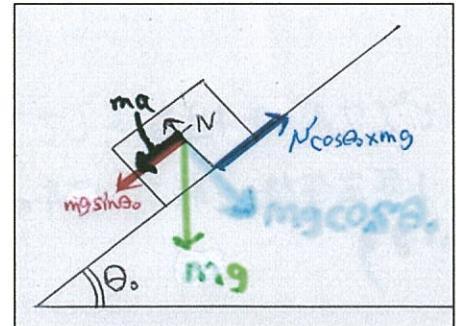
(2) 動摩擦係数の測定

図.2 斜面上の運動中の物体にかかる力

「基礎から学ぶトライボロジー」[18]より斜面上の物体が運動するように斜面を傾けると物体にかかる力は図.2 のようになる。ニュートンの運動方程式[1]より、物体の質量を m 、加速度を a とすると、

$$F = ma \quad (2,1)$$

となる。ここで、斜面の角度を θ_0 、重力加速度を g とすると、



$$F = mg(\sin \theta_0 - \mu' \cos \theta_0) = ma \quad (2,2)$$

これより、加速度は、

$$a = g(\sin \theta_0 - \mu' \cos \theta_0) \quad (2,3)$$

となる。ここで、 t 秒間に滑った距離を x とすると、

$$x = \frac{at^2}{2} \quad (2,4)$$

となる。式(2,3)を式(2,4)に代入し、 μ' について解くと以下の式(2,5)のようになる。

$$\mu' = \tan \theta_0 - \frac{2x}{gt^2 \cos \theta_0} \quad (2,5)$$

これらより、滑る角度、滑走距離、滑走時間を測定することによって、動摩擦係数を測定する。

2-2 準備物

(1) 測定対象物

・板

アルミニウム製、真鍮製、アクリル製、紙、スライドガラス 摩擦係数の測定対象物とするため。

・ブロック

アルミニウム製、真鍮製、アクリル製、紙、ガラス 摩擦係数の測定対象物とするため。

・潤滑剤

グリセリン、純水、エタノール、極圧二硫化モリブデングリース、チョーク(ピンク色、茶色)、

鉛筆(6B)、菜種油 潤滑剤として、表面の状態を変化させるため。

・分銅

質量 50(g)、100(g)、アルミニウムブロックに張り付け加重を変化させるため。

(2) 測定装置

・回転ステージ

バーニア目盛の最小読み取り精度: 0.2°

マイクロメーターの最小読み取り精度: 55" (約 0.015°)

マイクロメーターによる微動範囲: ±5°

図.3 回転ステージ

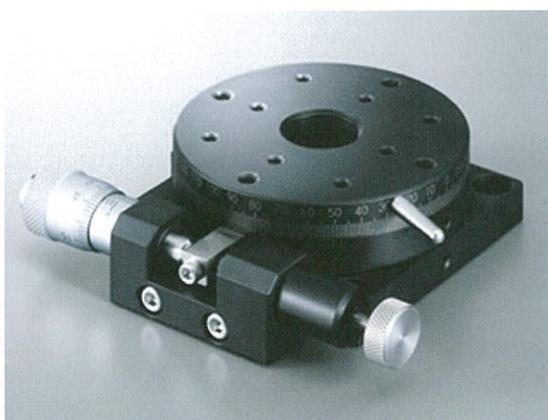
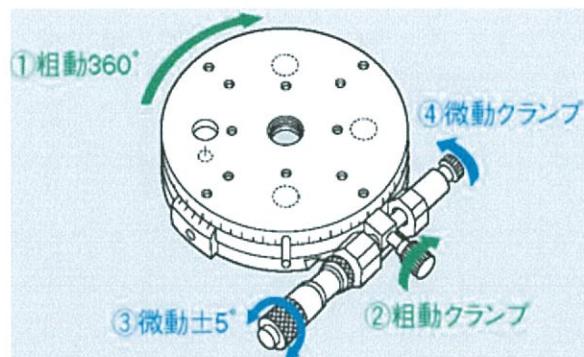


図.4 回転ステージの仕様



(駿河精機HP[2]より)

・表面粗さ測定器

算術平均粗さ Ra、要素の平均長さ RSmを測定するため。

・ノギス

滑走距離を測定するため。

・L字型金具(大)

マグネットベースに回転ステージを回転面が地面に対して垂直になるように固定するため。

- ・L字型金具(中)
回転ステージに測定対象物とする板を地面に対して平行に固定するため。
- ・マグネットベース
鉄板に回転ステージを固定するため。
- ・鉄板
マグネットベースを固定するため。
- ・目玉クリップ
L字型金具(大)に測定する板、L字型金具(小)を固定するため。
- ・円柱おもり
質量 179.3(g)、ブロックと板をなじませるための荷重として用いるため。
- ・スマートフォン(機種:iPhone5)
ブロックが、落下する時間を映像から測定するため。
- ・スタンド、バルサ板
スマートフォンを固定するため。
- ・両面テープ
分銅をブロックに固定するため。
- ・無反発ゴムシート、発泡スチロール
測定対象のブロックが落下した際の安全を確保するため。
- ・キムワイプ、筆
微細な粉、潤滑剤を取り、きれいにするため。
- ・ドライバー、ねじ、六角ボルト、六角レンチ
実験器具を固定するため。

(3) スイッチ用器具

- ・発光ダイオード
緑色、ブロックが滑り落ちたか確認するためのスイッチとして用いるため。
- ・直流電源装置
最大出力 18(V) 6(A)、発光ダイオードの電源として用いるため。
- ・L字型金具(小)
導電性テープを貼りスイッチの一片とするため。
- ・導電性テープ
L字型金具(小)、測定対象のブロックに貼り、スイッチとして用いるため。
- ・ニクロム線
ブロックに貼った導電性テープにトグルスイッチから電気を通すため。

・半田

発光ダイオード、順方向ダイオード、トグルスイッチ、導電性テープ、ニクロム線をそれぞれ接続するため。

・ミノムシクリップ付き導線、

直流電源装置と、スイッチ、発光ダイオードを接続するため。

(4) 研磨器具

・紙やすり

#60、#100、#150、#320、#600 ブロック、板の表面を研磨するため。

・木片

研磨するときに、紙やすりを固定するため。

・ゴム手袋、マスク

研磨するときに、発生する削りかすから身体を保護するため。

2-3 実験器具の組み立て

図.5 全体風景

(静止摩擦係数測定時)

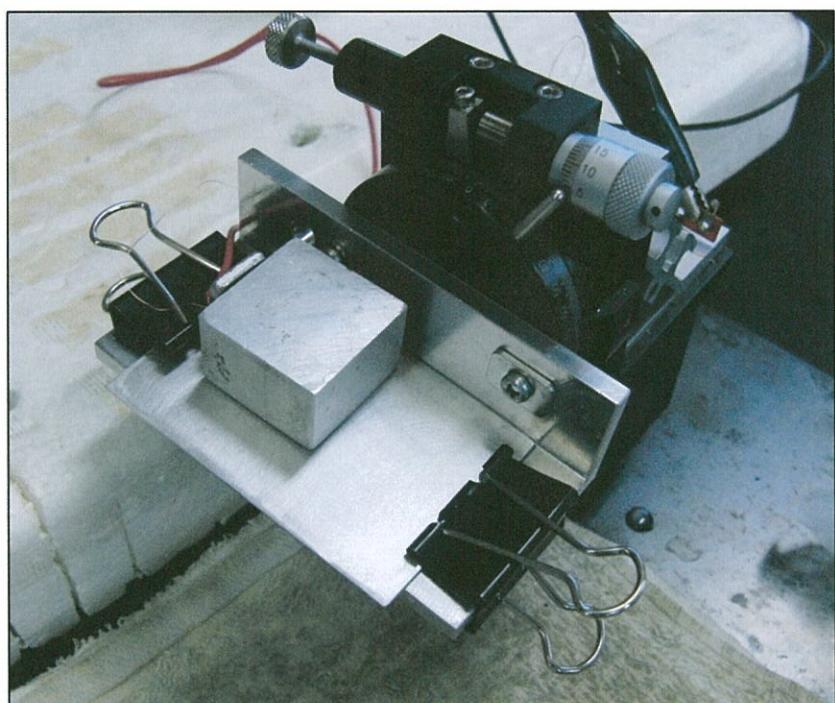


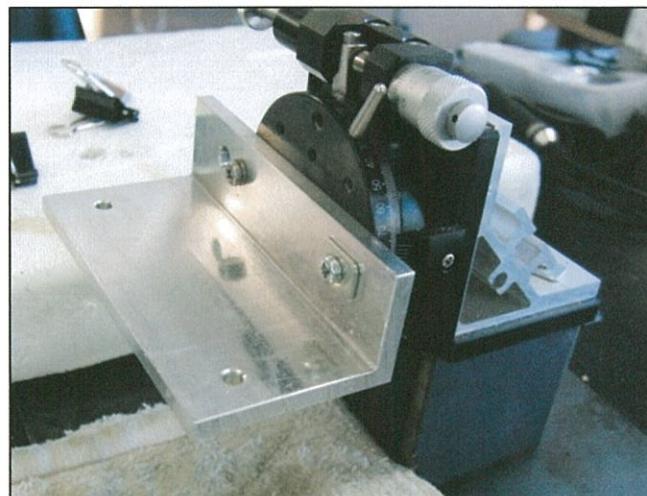
図.6 全体風景
(動摩擦係数測定時)



(1)回転ステージの設置

- 1.マグネットベースを鉄板上に置き、マグネットを用いて固定する。
- 2.マグネットベースに、L字型金具(大)をねじを用いて、設置する。
- 3.L字型金具(大)に回転ステージの回転面が地面に対して垂直になるよう、六角ボルト、六角ナットを六角レンチを用いて固定する。
- 4.L字金具(中)を回転ステージに設置しねじを用いて固定する。

図.7 回転ステージ、
とマグネットベース、
L字型金具(大,中)



(2)スイッチの作成

- 1.L字型金具(小)に導電性テープを巻く。
- 2.導電性テープを巻いた L字型金具(小)を L字型金具(大)に目玉クリップを用いて、設置する。
- 3.測定対象のブロックに導電性テープを張り、そのテープとニクロム線を半田を用いて図 12 のよう

に接続する。

4.トグルスイッチと、発光ダイオード、直流定電流ダイオードを図.8 のように半田を用いて、接続する。

5.ミノムシクリップ付き導線を用いて3.、4.で作ったものを図.8 のように接続する。

図.8 スイッチ 回路図

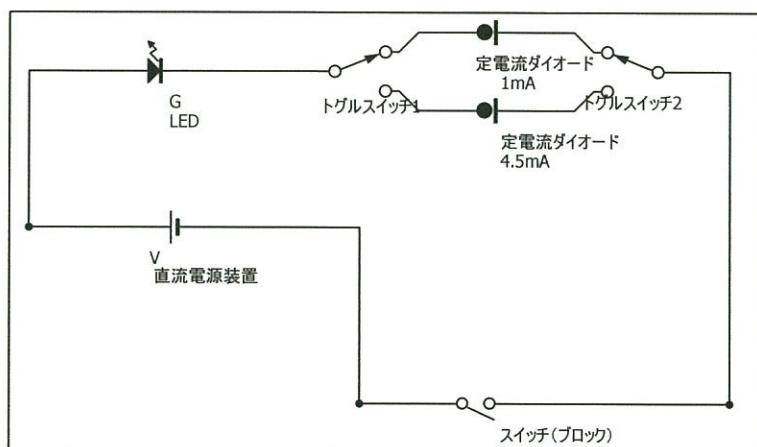


図.9 L字型金具(小)と導電性テープ

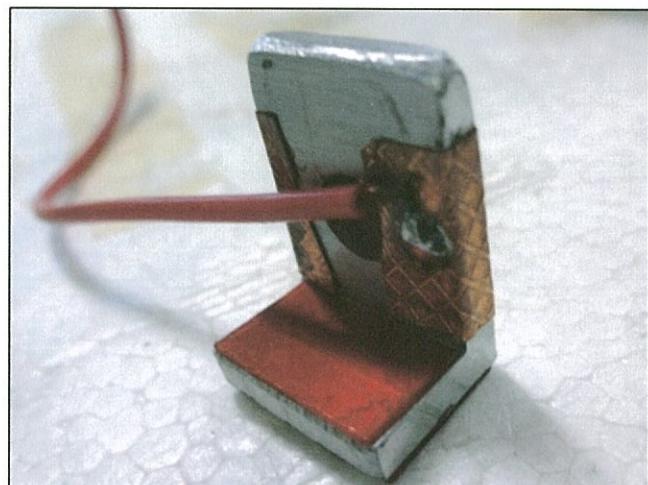


図.10 板に固定した、L字型金具(小)

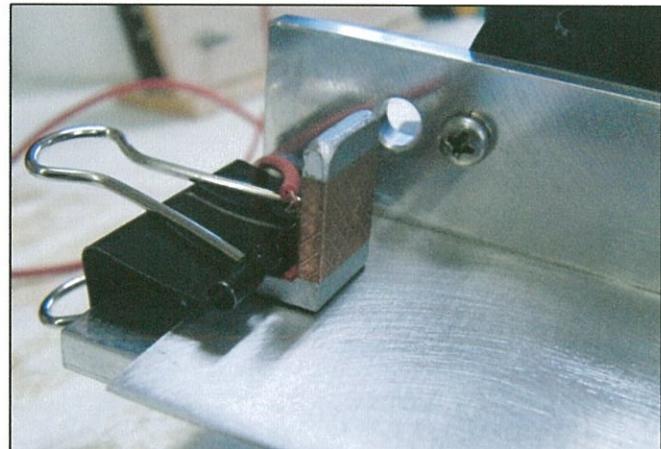


図.11 導電性テープ、ニクロム線とブロック

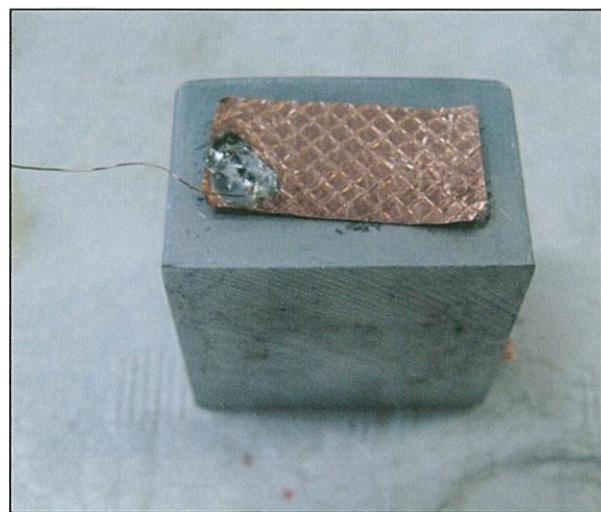
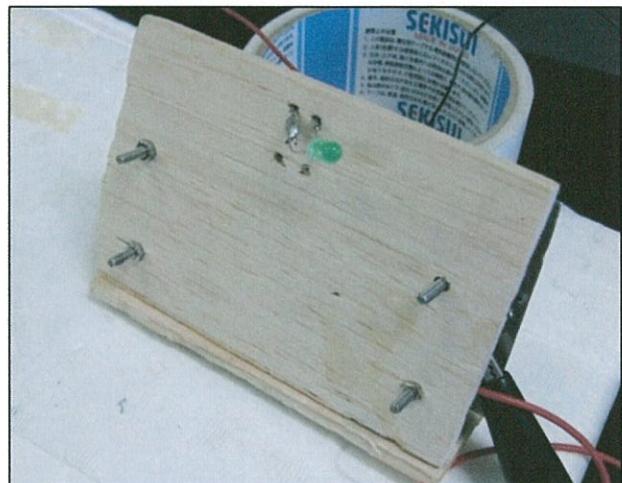


図.12 パルサ板に固定したLED



2-4 具体的な実験方法

(1) アルミニウム・真鍮・アクリルの研磨

静止摩擦係数の測定対象とする、アルミニウム・真鍮・アクリルの表面の粗さを変えるために。紙やすりで磨き、粗さを変化させた。

(方法①・ブロック)

1. ブロックを研磨するための紙やすりを用意し、むらが出ないようにブロックを紙やすりに手で押し当て円を描き、研磨する。
2. 表面が均一に磨かれたら、研磨をやめ、水で研磨による削りかすを洗い流し、乾いた布でふく。

(方法②・板)

1. 板を研磨するための紙やすりを用意し、むらが出ないように板に上から木片に固定した紙やすりで研磨する。
2. 表面が均一に磨かれたら、研磨をやめ、水で研磨による削りかすを洗い流し、その後乾いた布でふく。

(2) 測定対象物の表面粗さの測定

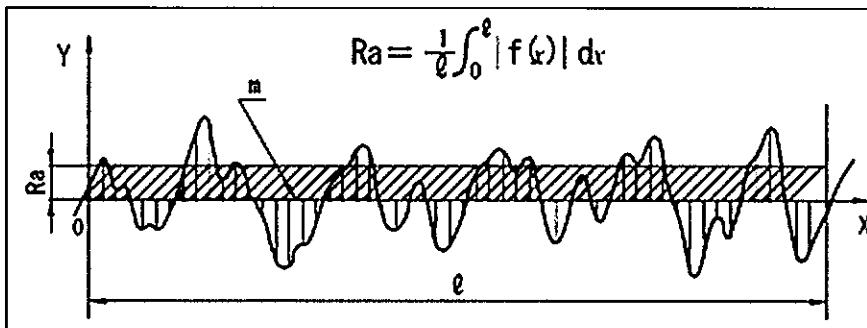
測定対象物の表面の粗さはそれぞれの物質や研磨の状況によって異なる。その表面を表面粗さ測定器を用いて算術平均粗さRa、要素の平均長さ RSmの測定を行った。なお、算術平均粗さRaと要素の平均長さ RSmの測定はアルミニウムブロック・板、真鍮ブロック・板にて行った。そのほかは、算術平均粗さRaのみ測定を行った。

1. 表面粗さ測定器の測定部分を、測定対象と同じ高さにする。
2. 表面粗さ測定器を駆動させ、測定対象物の表面の様子を測定する。
3. 2.の測定結果より、表面粗さ測定器を用いて算術平均粗さ Ra、要素の平均長さ RSmを算出する。
4. 上記を 3 回繰り返し算術平均粗さ Ra、要素の平均長さ RSmの平均値、誤差を求める。

注.1: 算術平均粗さ Ra とは、粗さ曲線からその平均線の方向に基準長さだけを抜き取り、この抜取り部分の平均線の方向に X 軸を、縦倍率の方向に Y 軸を取り、粗さ曲線を $y=f(x)$ で表したときに、次の式(3)によって求められる値をマイクロメートル (μm) で表したものである。[5]

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (3.1)$$

図.13 算術平均粗さRaの解説図[5]

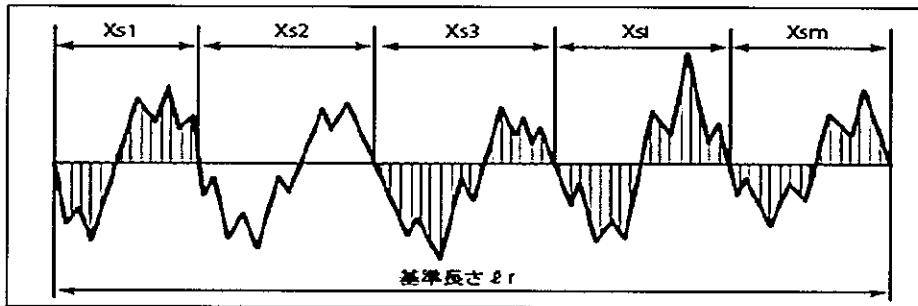


注.2: 要素の平均長さ RSm とは、基準長さに輪郭曲線要素の長さの平均を表したもの。Xsi は、一つの輪郭線要素に対応する長さ。この場合の輪郭要素 を構成する山(谷)には、最低高さと最低長さの規定があり、高さ(深さ)が最大高さの 10%以下、もしくは長さが計算区間の長さの

1%以下であるものはノイズとみなされて、前後に続く谷(山)の一部と認識する。また、以下の式より求められる。

$$RSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n Xs_i \quad (3,2)$$

図.14 要素の平均長さ RSm の解説図[9]



注.3: Ra、RSmの誤差を求めるため、標準誤差 δy 、測定回数 n 、測定値 y_i ($i = 1, \dots, n$)、測定値の平均値 \bar{y} と、それぞれすると、[2,3]

$$\delta y = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

といった、標準誤差の式(4)を用いた。

注.4: 測定条件は以下の表.1 のようであった。

表.1 表面粗さ測定器の測定条件

規格	曲線	区間数	$\lambda_s (\mu m)$	$\lambda_c (\mu m)$	測定速度 (mm/s)
ISO1997	R	8	2.5	0.8	0.5

(3) グリセリン水溶液の調製

以下のようにして、実験VII アルミニウム・真鍮の静止摩擦係数に対する液体潤滑剤(純水・エタノール・グリセリン・菜種油)の効果 ②真鍮(#600)の静止摩擦係数に対するグリセリンの粘度依存性で用いるグリセリン水溶液を作製した。

(作り方)

ビーカーを電子天秤に乗せ、0点補正する。そして、ビーカーへグリセリンを10g分、電子天秤で測

定する。その後、純水を注ぎ、40gにする。同様にして、50%、75%のグリセリン水溶液を作る。

(4) 水平の読みの角度の測定

回転ステージは、角度を読み測定することができる。静止摩擦係数を求めるために、摩擦角の測定を行った。摩擦角は、水平の状態からの動径となっている。そのために、それぞれの板の水平における読みの角度を測定する。

1. 水平器をL字型金具(中)の中心部分に設置する。
2. 回転ステージを回転させ、バーニア目盛の読みの角度が90(度)となるところで粗動ねじを用いて固定する。
3. マイクロメーターを用いて、赤い色の円内の水準器の気泡が、ほぼ中心に来るよう調整する。
そして、マイクロメーターの目盛を読み取る。
4. 式(5)を用いて、水平の読みの角度を計算する。
5. これらを10回繰り返し、平均値、誤差を求める。

注. 1: 水平の読みの角度 θ_h を求めるため、マイクロメーターの目盛を M とそれぞれすると、

$$\theta_h = 90 - \frac{55}{3600} M \quad (5)$$

となる式(5)を用いた。

注. 2: 回転目盛、回転角度、水平の読みの角度の誤差を求めるため、式(4)の標準誤差を用いた。

(5) 静止摩擦係数の測定方法

実験Ⅰ～Ⅷにおいて、回転ステージを回転させ斜面とし、摩擦角の測定を行い、静止摩擦係数の算出を行った。それにおいて以下のように測定をした。

1. 水準器を用いておよそ水平にし、粗動クランプを用いて回転ステージを固定して、板の上にブロックを置く。
2. ブロックと板をなじませるため、円柱おもりを測定するブロックの上に置き、1分間放置する。
3. 円柱おもりを取り外し、粗動クランプを用いて、発光ダイオードの光が消えるまで回転ステージを回転させる。その時のバーニア目盛の読みの角度をLED消の角度とする。
4. さらに、ある一定の角度まで粗動を用いて回転ステージを回転させ、その後、粗動クランプをもじいて回転ステージを固定する。
5. 固定した後、マイクロメーターを用いて回転ステージを回転させ、発光ダイオードの消えた際の

回転ステージの角度をバーニア目盛を用いて読み取る。この際の角度を読みの角度①とする。
この際に完全に滑ったら測定を終了する。

6.7.の読み取り時にブロックが完全に滑っていなかった場合は、マイクロメーターを用いてさらに回転ステージを回転させ、ブロックが滑ったら、バーニア目盛を用いて角度の測定をする。このときの角度を読みの角度②,③…とする。完全に滑るまでこれを繰り返す。

7.最後の読みの角度を最終の角度とし、式(6)より摩擦角を求める。

8.1.~7.を10回繰り返し、平均値、誤差、式(1,4)より静止摩擦係数を求める。

注.1:最終の角度 θ_n 、水平の読みの角度より、摩擦角 θ_s を、

$$\theta_s = \theta_h - \theta_n \quad (6)$$

を用いて求めた。

注.2:誤差の伝搬の一般式は、[3,4]

$$\delta z = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial y_1}\right)^2_{y_1=\bar{y}_1, \dots, y_n=\bar{y}_n} (\delta y_1)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial y_n}\right)^2_{y_1=\bar{y}_1, \dots, y_n=\bar{y}_n} (\delta y_n)^2} \quad (7,1)$$

式(7,1)である。よって、上限を与える近似式は、

$$\delta z = \left| \left(\frac{\partial f}{\partial y_1} \right)_{y_1=\bar{y}_1, \dots, y_n=\bar{y}_n} \delta y_1 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial y_n} \right)_{y_1=\bar{y}_1, \dots, y_n=\bar{y}_n} \delta y_n \right| \quad (7,2)$$

式(7,2)のようになるが、変数は1つであるため、初項だけの

$$\delta z = \left| \left(\frac{\partial f}{\partial y_1} \right)_{y_1=\bar{y}_1, \dots, y_n=\bar{y}_n} \delta y_1 \right| \quad (7,3)$$

を用いた。

注.3:摩擦角の誤差 $\delta\theta_s$ は、水平の読みの角度の誤差を $\delta\theta_h$ 、最終の角度の誤差を $\delta\theta_n$ と、それぞれすると、式(7,3)より、

$$\delta\theta_s = \delta\theta_h + \delta\theta_n \quad (8)$$

を用いた。

注.4:静止摩擦係数の誤差 $\delta\mu_0$ には水平の読みの角度の誤差を $\delta\theta_h$ 、最終の角度の誤差を $\delta\theta_n$ とそれぞれすると、式(7,3)より、

$$\delta\mu_0 = \frac{\delta\theta_h + \delta\theta_n}{\cos^2(\theta_h - \theta_n)} \quad (9)$$

を用いた。

注.5:読みの角度、最終の角度の誤差には式(4)の標準誤差の式を用いた。

(6)動摩擦係数の測定方法

実験IXにおいて、動摩擦係数の測定を行った。この実験の際、以下のような手順で動摩擦係数の測定を行った。

- 1.滑走距離をノギスを用いて測定する。
- 2.水準器を用いて、おおよそ水平にし、粗動クランプを用いて回転ステージを固定し、測定対象とする、板の上にブロックを置く。
- 3.ブロックと、板をなじませるため、円柱おもりを測定するブロックの上に置き、1分間放置する。
- 4.スマートフォンを起動させ、録画を開始する。
- 5.円柱おもりを取り外し、ある一定の角度まで粗動を用いて回転ステージを回転させ、その後、粗動クランプを用いて、回転ステージを固定する。
- 6.固定した後、マイクロメーターを用いてブロックが完全に滑るまで回転ステージを回転させる。
- 7.完全に滑ったら、そのときの角度をバーニア目盛を用いて測定する。この際の角度を最終の角度とする。
- 8.スマートフォンによる録画を終了し、式(6)より滑った角度を求める。
- 9.撮影した映像をより動画編集ソフトを用いて、滑り出す瞬間の時間、止まった時間を求める。
- 10.1.~9.を10回繰り返し、平均値、誤差、滑る長さ、摩擦角、滑走時間、より式(2,5)を用いて、動摩擦係数を求める。

注.1:滑り出す瞬間の時間を t_m 、止まった時間を t_s とすると、滑走時間 t は

$$t = t_s - t_m \quad (10)$$

となる式を用いて、滑走時間を計算した。

注.2:摩擦角の誤差は、式(8)を用いて求めた。

注.3:滑走時間の誤差、最終の角度の誤差、動摩擦係数の誤差は式(4)の標準誤差の式を用いて求めた。

注.4:動画の解析に用いた動画編集ソフトはMicrosoft社のWindows Live ムービーメーカーを用いた。解析の様子は以下の図参照。

図.15 動画解析の様子(Microsoft 社 Windows Live ムービーメーカー)

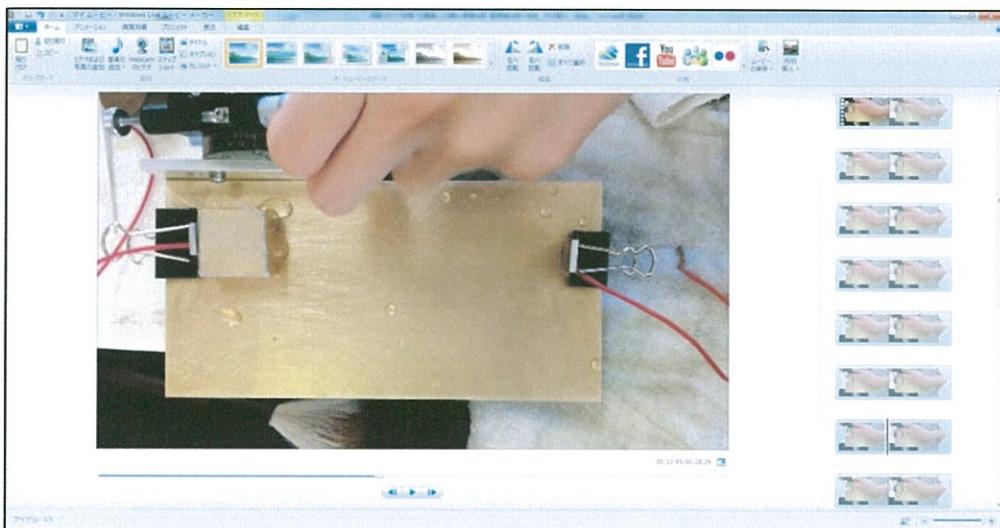


図.16 真鍮ブロックが滑り始める瞬間

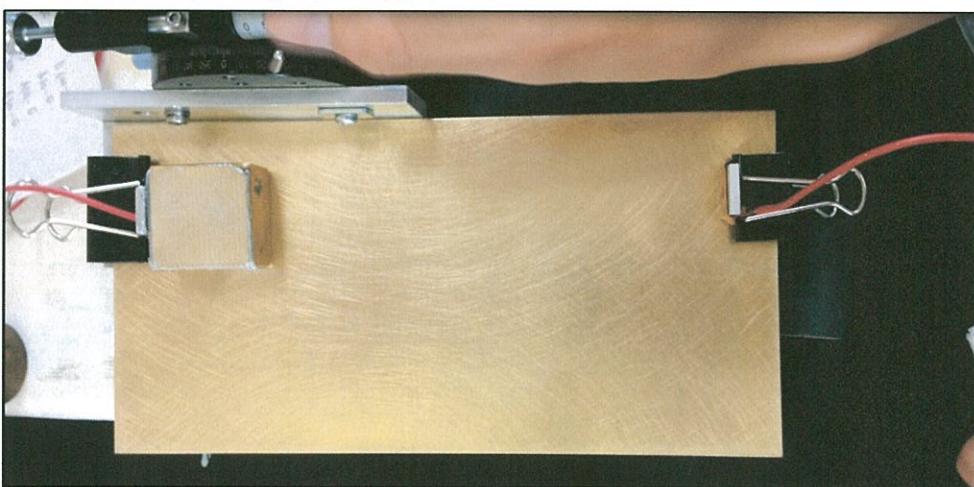


図.17 真鍮ブロックが滑っている途中



図.18 真鍮ブロックが止まった瞬間

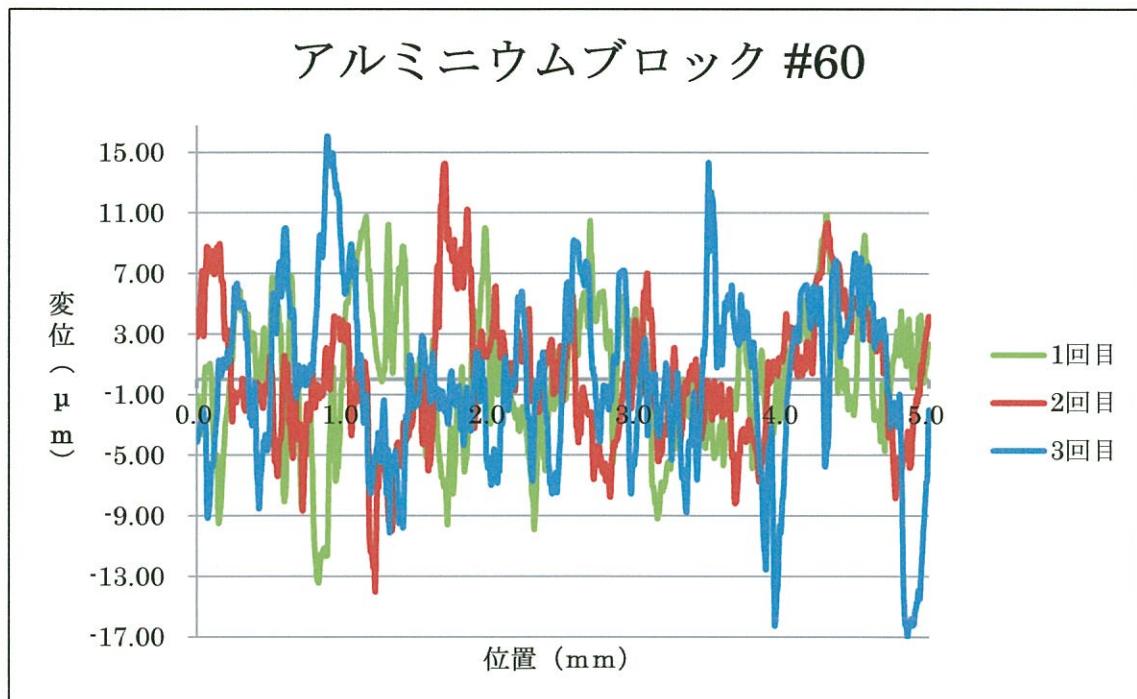


3. 実験結果

« I »表面粗さの測定

表面粗さ測定機を用いて表面粗さを測定すると以下のグラフ.1 のようになった。これより、表面粗さ測定器を用いて、算術平均粗さ Ra、要素の平均長さ RSmを求めた。

グラフ.1 アルミニウムブロック#60 の粗さ測定結果



(1) 算術平均粗さRa 測定結果

①アルミニウムブロック

表.2 アルミニウムブロックの粗さ測定結果

回数(回)	#60(μm)	#100(μm)	#150(μm)	#320(μm)	#600(μm)
1	3.667	1.970	1.660	1.226	0.882
2	3.443	1.826	1.637	1.226	0.879
3	4.512	1.872	1.665	1.198	0.931
平均値	3.9	1.89	1.65	1.22	0.90
標準偏差	0.564	0.074	0.015	0.016	0.029
標準誤差	0.3	0.04	0.01	0.01	0.02

②アルミニウム板

表.3 アルミニウム板の粗さ測定結果

回数(回)	#60(μm)	#100(μm)	#150(μm)	#320(μm)	#600(μm)
1	2.274	1.989	1.607	0.654	0.476
2	2.364	2.013	1.734	0.758	0.568
3	2.707	2.091	1.883	0.905	0.481
平均値	2.4	2.03	1.74	0.77	0.51
標準偏差	0.228	0.053	0.138	0.126	0.052
標準誤差	0.1	0.03	0.08	0.07	0.03

③真鍮ブロック

表.4 真鍮ブロックの粗さ測定結果

回数(回)	#60(μm)	#150(μm)	#320(μm)	#600(μm)
1	1.543	1.359	1.272	0.297
2	1.953	1.493	0.887	0.336
3	2.268	1.102	1.083	0.344
平均値	1.9	1.3	1.1	0.33
標準偏差	0.364	0.199	0.193	0.025
標準誤差	0.2	0.1	0.1	0.01

④真鍮板

表.5 真鍮板の粗さ測定結果

回数(回)	#60(μm)	#150(μm)	#320(μm)	#600(μm)
1	0.726	0.582	0.331	0.189
2	0.759	0.603	0.423	0.156
3	0.710	0.521	0.309	0.200
平均値	0.73	0.57	0.35	0.18
標準偏差	0.025	0.043	0.060	0.023
標準誤差	0.01	0.02	0.03	0.01

⑤スライドガラス

⑥ブロック付きのガラス

表.6 スライドガラスの粗さ測定結果

回数(回)	そのまま(μm)
1	0.023
2	0.016
3	0.018
平均値	0.019
標準偏差	0.004
標準誤差	0.002

表.7 ブロック付きのガラスの粗さ測定結果

回数(回)	そのまま(μm)
1	0.028
2	0.023
3	0.035
平均値	0.029
標準偏差	0.006
標準誤差	0.003

⑦板状の紙

⑧ブロック付きの紙

表.8 板状の紙の粗さ測定結果

回数(回)	そのまま(μm)
1	3.017
2	2.823
3	3.117
平均値	2.99
標準偏差	0.149
標準誤差	0.09

表.9 ブロック付きの紙の粗さ測定結果

回数(回)	そのまま(μm)
1	2.542
2	2.449
3	2.444
平均値	2.48
標準偏差	0.055
標準誤差	0.03

⑨アクリル板

表.10 アクリル板の粗さ測定結果

回数(回)	そのまま(μm)	#60(μm)	#150(μm)	#320(μm)	#600(μm)
1	0.010	2.177	0.913	0.665	0.514
2	0.010	2.335	0.962	0.995	0.562
3	0.012	2.206	1.070	0.755	0.499
平均値	0.0107	2.24	0.98	0.8	0.53
標準偏差	0.001	0.084	0.080	0.171	0.033
標準誤差	0.0006	0.05	0.05	0.1	0.02

⑩アクリルブロック

表.11 アクリルブロックの粗さ測定結果

回数(回)	そのまま(μm)	#60(μm)	#150(μm)	#320(μm)	#600(μm)
1	0.122	3.933	2.036	1.314	0.995
2	0.167	3.626	1.575	1.365	1.012
3	0.136	4.200	1.587	0.971	1.103
平均値	0.14	3.9	1.7	1.2	1.04
標準偏差	0.023	0.287	0.263	0.214	0.058
標準誤差	0.01	0.2	0.2	0.1	0.03

(2)要素の平均長さ RSm 測定結果

①アルミニウム板

表.12 アルミニウム板の RSm 測定結果

回数(回)	#60(μm)	#150(μm)	#320(μm)	#600(μm)
1	278.8	169.5	104.5	131.3
2	261.1	179.2	166.6	153.8
3	208.3	247.2	170.2	89.5
平均値	250	200	150	120
標準偏差	36.7	42.3	36.9	32.6
標準誤差	20	20	20	20

②アルミニウムブロック

表.13 アルミニウムブロックの RSm 測定結果

回数(回)	#60(μm)	#150(μm)	#320(μm)	#600(μm)
1	401.6	159.9	200.5	142.2
2	697.9	159.9	200.5	131.9
3	587.4	164.3	120.4	149.9
平均値	560	161	170	141
標準偏差	149.7	2.5	46.2	9.0
標準誤差	90	1	30	5

③真鍮板

表.14 真鍮板の RSm 測定結果

回数(回)	#60(μm)	#150(μm)	#320(μm)	#600(μm)
1	389.4	132.5	147.7	89.5
2	254.5	141.6	105.7	79.3
3	178.9	168.5	90.8	66.4
平均値	270	150	110	78
標準偏差	106.6	18.7	29.5	11.6
標準誤差	60	10	20	7

④真鍮ブロック

表.15 真鍮ブロックの RSm 測定結果

回数(回)	#60(μm)	#150(μm)	#320(μm)	#600(μm)
1	242.0	120.7	102.2	85.4
2	260.1	98.1	89.0	97.7
3	260.1	154.2	86.1	83.0
平均値	254	120	92	89
標準偏差	10.5	28.2	8.6	7.9
標準誤差	6	20	5	5

« II » 静止摩擦係数の測定

(1) 実験 I アルミニウム・真鍮における静止摩擦係数の粗さ依存性

静止摩擦係数は、接触面の条件によって、変化されると予想される。そのため、同じ物質において表面の粗さ R_a を、 $0.3 \sim 3.9 \mu m$ に変化させ、静止摩擦係数を測定した。使用した板、ブロックはアルミニウム・真鍮を #60, #100, #150, #320, #600 の研磨紙を用いて研磨したものとした。

(結果)

以下の表に摩擦角、静止摩擦係数についてまとめた。

10 回の測定を行ったそれぞれの測定値、誤差の数値は、9.付属資料 (1) 実験 I アルミニウム・真鍮における静止摩擦係数の粗さ依存性 に示した。

⟨1⟩ アルミニウム

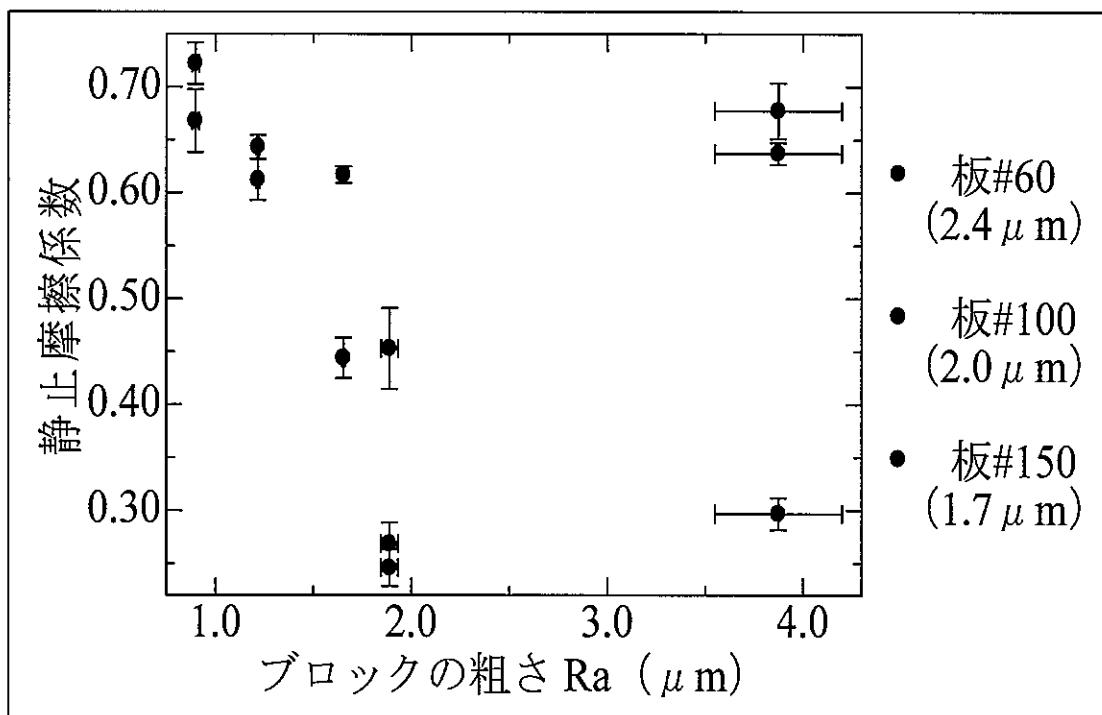
表.16 アルミニウムの摩擦角 θ_s まとめ

アルミニウム 摩擦角(度)		アルミニウム板				
		#60 ($2.4 \mu m$)	#100 ($2.0 \mu m$)	#150 ($1.7 \mu m$)	#320 ($0.8 \mu m$)	#600 ($0.5 \mu m$)
アルミニウム ブロック	#60 ($3.9 \mu m$)	32.5 ± 0.4	16.5 ± 0.8	34 ± 1	29.3 ± 0.7	32.9 ± 0.8
	#100 ($1.9 \mu m$)	13.8 ± 0.9	24 ± 2	15 ± 1	20.1 ± 0.1	16 ± 2
	#150 ($1.7 \mu m$)	31.7 ± 0.3		30 ± 1	33.9 ± 0.3	27.4 ± 0.7
	#320 ($1.2 \mu m$)	32.8 ± 0.5		31.5 ± 0.8	30.3 ± 0.8	39 ± 2
	#600 ($0.9 \mu m$)	36.0 ± 0.5		33.7 ± 0.9	33 ± 1	37.7 ± 0.9

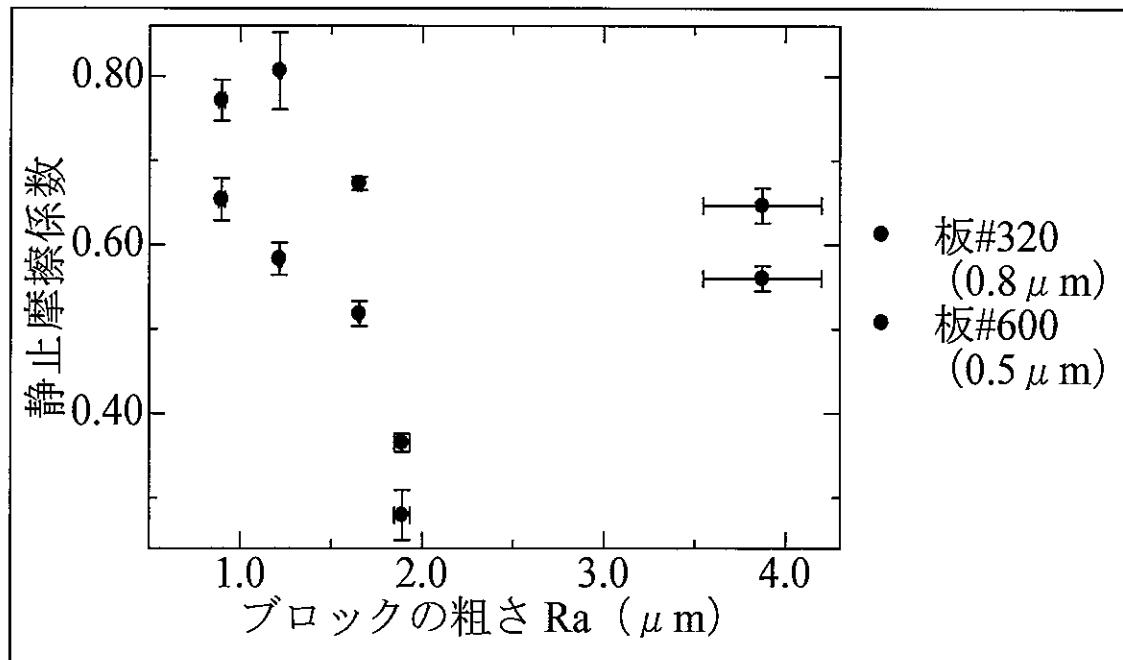
表.17 アルミニウムの静止摩擦係数まとめ ($\mu_s = \tan\theta_s$)

アルミニウム 静止摩擦係数	アルミニウム板					
	#60 ($2.4 \mu m$)	#100 ($2.0 \mu m$)	#150 ($1.7 \mu m$)	#320 ($0.8 \mu m$)	#600 ($0.5 \mu m$)	
アルミニウム ブロック	#60 ($3.9 \mu m$)	0.64 ± 0.01	0.30 ± 0.02	0.68 ± 0.03	0.56 ± 0.01	0.65 ± 0.02
	#100 ($1.9 \mu m$)	0.25 ± 0.02	0.45 ± 0.04	0.27 ± 0.02	0.37 ± 0.01	0.28 ± 0.03
	#150 ($1.7 \mu m$)	0.617 ± 0.008		0.57 ± 0.02	0.673 ± 0.008	0.52 ± 0.01
	#320 ($1.2 \mu m$)	0.64 ± 0.01		0.61 ± 0.02	0.58 ± 0.02	0.81 ± 0.05
	#600 ($0.9 \mu m$)	0.73 ± 0.01		0.67 ± 0.02	0.65 ± 0.03	0.77 ± 0.02

グラフ.2 アルミニウムの静止摩擦係数と粗さの関係(板:#60,#100,#150)



グラフ.3 アルミニウムの静止摩擦係数と粗さの関係(板:#320,#600)



アルミニウムの静止摩擦係数は、0.25～0.81 の間の値となった。

アルミニウムブロックの粗さ Ra が 1.9 (μm) のとき、静止摩擦係数が全体的に小さくなった。

板#60、#150においてブロックの粗さが 2.0 (μm) 以下のとき、ブロックの表面が細かくなると静止摩擦係数は小さくなった。ブロックの粗さが 3.9 (μm) のとき、静止摩擦係数は、0.65, 0.60 と大きくなつた。板#100 のとき、ブロックの粗さが細かくなると静止摩擦係数は、大きくなつた。

板#320において、ブロックの粗さが 1.3 (μm) 以下や 1.6～2.0 (μm) のとき、ブロックの粗さが細かくなると、静止摩擦係数は、大きくなつた、それ以外のとき、静止摩擦係数は、ブロックの粗さが粗くなると小さくなつた。

板#600 のときブロックの粗さが、1.3 (μm) 以下や 1.6 (μm) 以上のときはブロックの粗さが細かくなると静止摩擦係数は、小さくなつた。1.3～1.6 (μm) のときにおいて静止摩擦係数は、ブロックの粗さが細かくなると大きくなつた。

〈2〉真鍮

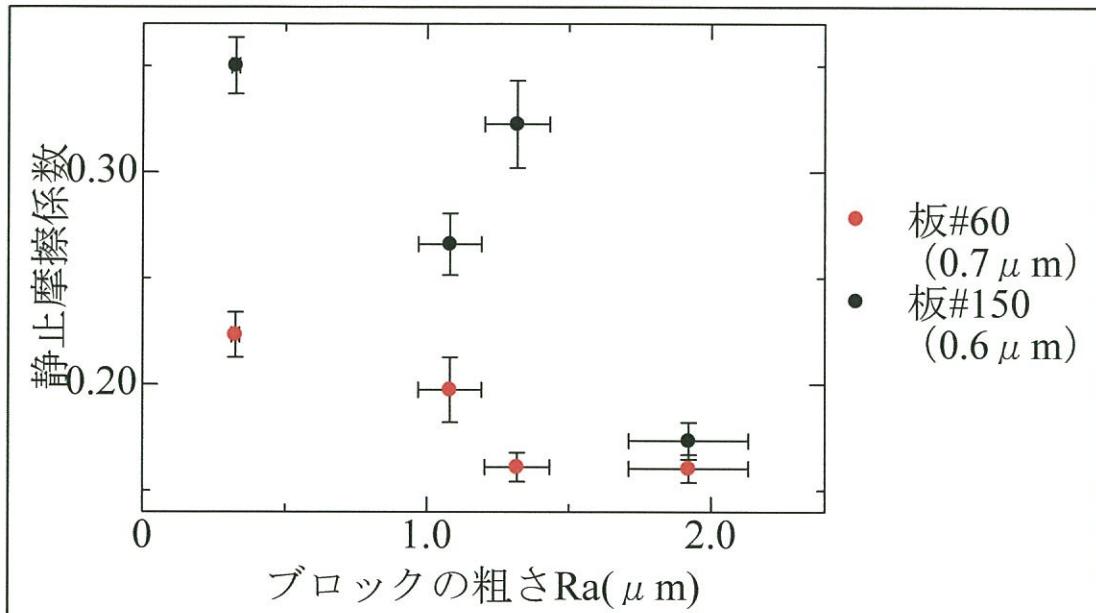
表.18 真鍮の摩擦角 θ_s まとめ

真鍮 摩擦角(度)		真鍮板			
		#60 (0.7 μ m)	#150 (0.6 μ m)	#320 (0.4 μ m)	#600 (0.2 μ m)
真鍮 ブロック	#60 (1.9 μ m)	8.0±0.4	9.7±0.5	14.9±0.7	11.9±0.5
	#150 (1.3 μ m)	9.2±0.4	18±1	15.2±0.7	21.5±0.9
	#320 (1.1 μ m)	11.2±0.8	14.9±0.8	15.8±0.9	15.0±0.6
	#600 (0.3 μ m)	12.6±0.6	19.3±0.7	19.6±0.8	23±1

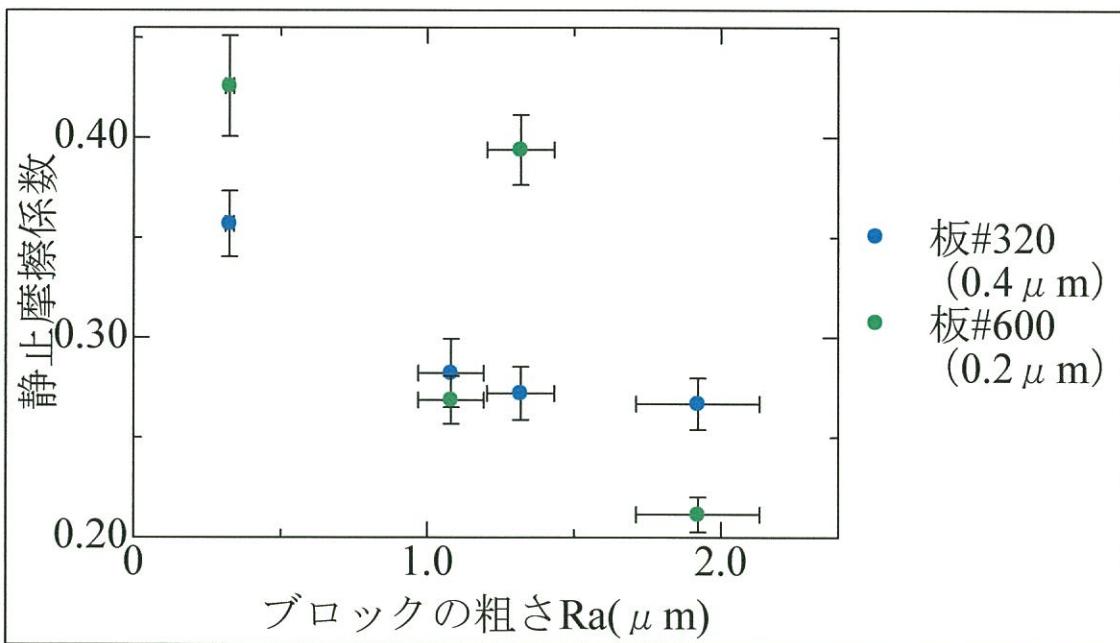
表.19 真鍮の静止摩擦係数まとめ ($\mu_s = \tan\theta_s$)

真鍮 静止摩擦係数		真鍮板			
		#60 (0.7 μ m)	#150 (0.6 μ m)	#320 (0.4 μ m)	#600 (0.2 μ m)
真鍮 ブロック	#60 (1.9 μ m)	0.140 ±0.007	0.173 ±0.009	0.27 ±0.01	0.211 ±0.009
	#150 (1.3 μ m)	0.161 ±0.007	0.32 ±0.02	0.27 ±0.01	0.39 ±0.02
	#320 (1.1 μ m)	0.20 ±0.02	0.27 ±0.01	0.28 ±0.02	0.27 ±0.01
	#600 (0.3 μ m)	0.22 ±0.01	0.35 ±0.01	0.36 ±0.02	0.43 ±0.03

グラフ.4 真鍮の静止摩擦係数と粗さの関係(板:#60,150)



グラフ.5 真鍮の静止摩擦係数と粗さの関係(板:#320,600)



真鍮の静止摩擦係数は、0.140～0.43 となった。全体的にアルミニウムの静止摩擦係数に比べて小さくなった。

板#60,#150,#320において、全体的に静止摩擦係数はブロックの粗さが粗くなると小さくなつた。

板#600 ブロックの粗さが 1.2(μm)以下や 1.4(μm)以上のとき、静止摩擦係数は、ブロックの粗さが粗くなると小さくなつた。

(2) 実験 II アルミニウムにおける最大静止摩擦力の荷重依存性

アモントン・クーロンの法則や式(1,1)より、最大静止摩擦力は垂直抗力に比例することが一般に知られている。[6]一方で、実験 Iにおいて、アルミニウムと真鍮において、静止摩擦係数の粗さ依存性が大きく異なった。そのため、アルミニウムブロックに分銅を乗せ、アルミニウムブロックの荷重を変化させ(0.047kg、0.097kg、0.197kg、0.297kg、0.398kg、0.497kg)、最大静止摩擦力の荷重依存性の測定を行い、静止摩擦係数を求めた。

なお、最大静止摩擦力 F_s 、斜面に対する垂直抗力 N を、重力加速度 g 、荷重を m とすると、

$$N = mg \cos \theta_s \quad (11,1)$$

$$F_s = mg \sin \theta_s \quad (11,2)$$

とそれぞれなる式より、求めた。また、最大静止摩擦力の誤差 δF_s 、垂直抗力の誤差 δN は、式(5,3)より、

$$\delta N = \delta \theta_s \times mg \sin \theta_s \quad (11,3)$$

$$\delta F_s = \delta \theta_s \times mg \cos \theta_s \quad (11,4)$$

となる式を用いた。(重力加速度 g は、気象庁の四日市観測所における値である、9.7969(m/s²)を用いた。[7])

さらに、測定においては、同じ粗さのアルミニウムブロック、アルミニウム板(#60、#320)の最大静止摩擦力の測定を行った。

(結果)

以下の表に摩擦角、静止摩擦係数についてまとめた。

10回の測定を行ったそれぞれの測定値、誤差の数値は、9.付属資料 (2) 実験 II アルミニウムにおける最大静止摩擦力の荷重依存性 に示した。

表.20 アルミニウムの摩擦角 θ_s 荷重依存性まとめ

アルミニウム 摩擦角(度)		荷重(kg)					
		0.047	0.097	0.197	0.297	0.398	0.497
粗さ (ブロック、 板)	#60 ($3.9 \mu m$ 、 $2.4 \mu m$)	32.5 ± 0.4	14.9 ± 0.7	11.6 ± 0.3	16.3 ± 0.6	19.2 ± 0.8	24.3 ± 0.4
	#320 ($1.2 \mu m$ 、 $0.7 \mu m$)	26.3 ± 0.7	16.4 ± 0.7	22.6 ± 0.6	22.7 ± 0.8	21.3 ± 0.5	26.1 ± 0.6

表.21 アルミニウムの最大静止摩擦力 F_s 荷重依存性まとめ

アルミニウム 最大静止摩擦力		荷重(kg)					
		0.047	0.097	0.197	0.297	0.398	0.497
粗さ (ブロック、 板)	#60 ($3.9 \mu m$ 、 $2.4 \mu m$)	0.249 ± 0.003	0.24 ± 0.01	0.387 ± 0.009	0.82 ± 0.03	1.25 ± 0.05	2.00 ± 0.03
	#320 ($1.2 \mu m$ 、 $0.7 \mu m$)	0.205 ± 0.005	0.27 ± 0.01	0.74 ± 0.02	1.10 ± 0.03	1.50 ± 0.04	1.77 ± 0.04

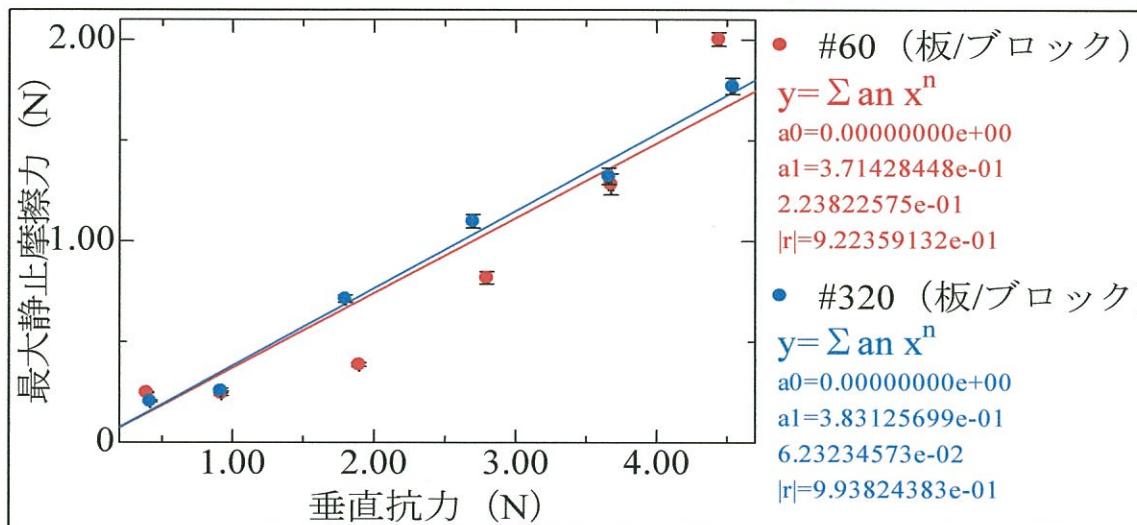
表.22 アルミニウムの垂直抗力 N 荷重依存性まとめ

アルミニウム 最大静止摩擦力		荷重(kg)					
		0.047	0.097	0.197	0.297	0.398	0.497
粗さ (ブロック、 板)	#60 ($3.9 \mu m$ 、 $2.4 \mu m$)	0.391 ± 0.002	0.921 ± 0.003	1.895 ± 0.002	2.795 ± 0.009	3.68 ± 0.02	4.44 ± 0.01
	#320 ($1.2 \mu m$ 、 $0.7 \mu m$)	0.415 ± 0.002	0.914 ± 0.003	1.786 ± 0.008	2.70 ± 0.01	3.59 ± 0.02	4.54 ± 0.02

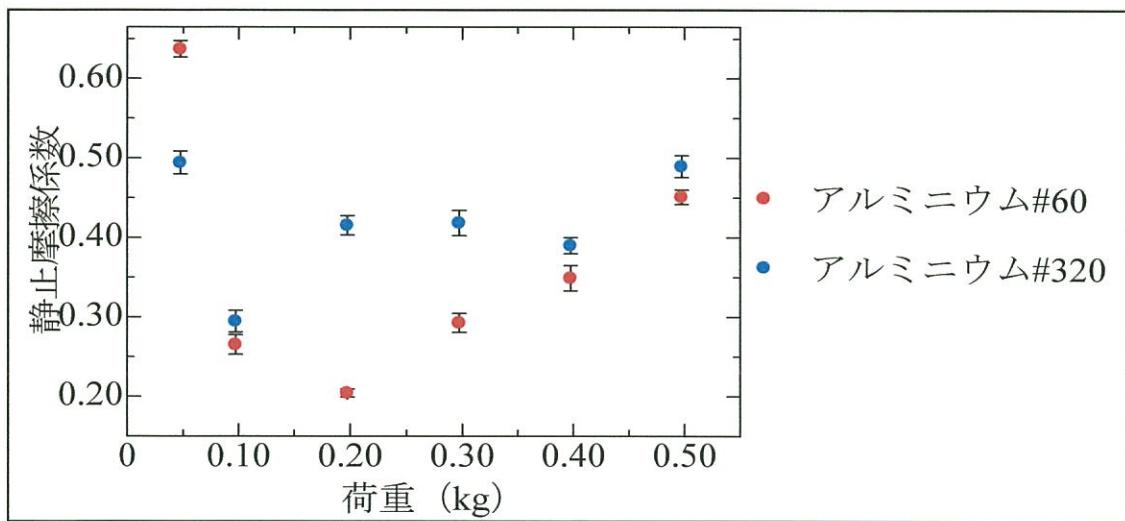
表.23 アルミニウムの静止摩擦係数($\mu_s = \tan\theta_s$) 荷重依存性まとめ

アルミニウム		荷重(kg)					
静止摩擦係数		0.047	0.097	0.197	0.297	0.398	0.497
粗さ (ブロック、 板)	#60 ($3.9 \mu m$ 、 $2.4 \mu m$)	0.64 ± 0.01	0.27 ± 0.01	0.204 ± 0.005	0.29 ± 0.01	0.35 ± 0.02	0.451 ± 0.009
	#320 ($1.2 \mu m$ 、 $0.7 \mu m$)	0.49 ± 0.01	0.29 ± 0.01	0.42 ± 0.01	0.42 ± 0.02	0.39 ± 0.01	0.49 ± 0.01

グラフ.6 アルミニウム(#60、#320)の最大静止摩擦力と垂直抗力の関係性



グラフ.7 アルミニウムの静止摩擦係数の荷重依存性(#60、320)



最大静止摩擦力は#60において、垂直抗力が2.0(N)より大きいときに比例関係を示した。また、#320のとき、#60のときよりも垂直抗力が小さい範囲から、最大静止摩擦力は垂直抗力に対して比例関係を示した。

静止摩擦係数の荷重依存性は#60において、荷重が0.20(kg)より小さいとき、静止摩擦係数は荷重が小さくなればなるほど大きくなった。また、0.20(kg)以上のとき、荷重が大きくなると静止摩擦係数も大きくなった。

#320においては、分銅を乗せてない荷重0.047(kg)のときの静止摩擦係数が一番大きくなった。そして、荷重が0.097(kg)のときに静止摩擦係数が一番小さくなった。その後全体的に荷重が重くなると、静止摩擦係数は大きくなった。

#320に比べて、#60の方が静止摩擦係数は荷重によって大きく変化した。

(3) 実験III 研磨の方向による静止摩擦係数の変化

研磨の方向に沿って、金属表面に小さな傷や溝ができることが研磨をしていて分かった。このことを生かして、研磨の方向による静止摩擦係数の変化を測定した。測定した物体は、真鍮ブロック、真鍮板とした。また、研磨の方向は、斜面に対して平行方向、垂直方向の2種類とし、使用した研磨紙は#60とした。

(結果)

以下の表に摩擦角、静止摩擦係数についてまとめた。

10回の測定を行ったそれぞれの測定値。誤差の数値は、9.付属資料 (3)実験III 研磨の方向による静止摩擦係数の変化に示した。

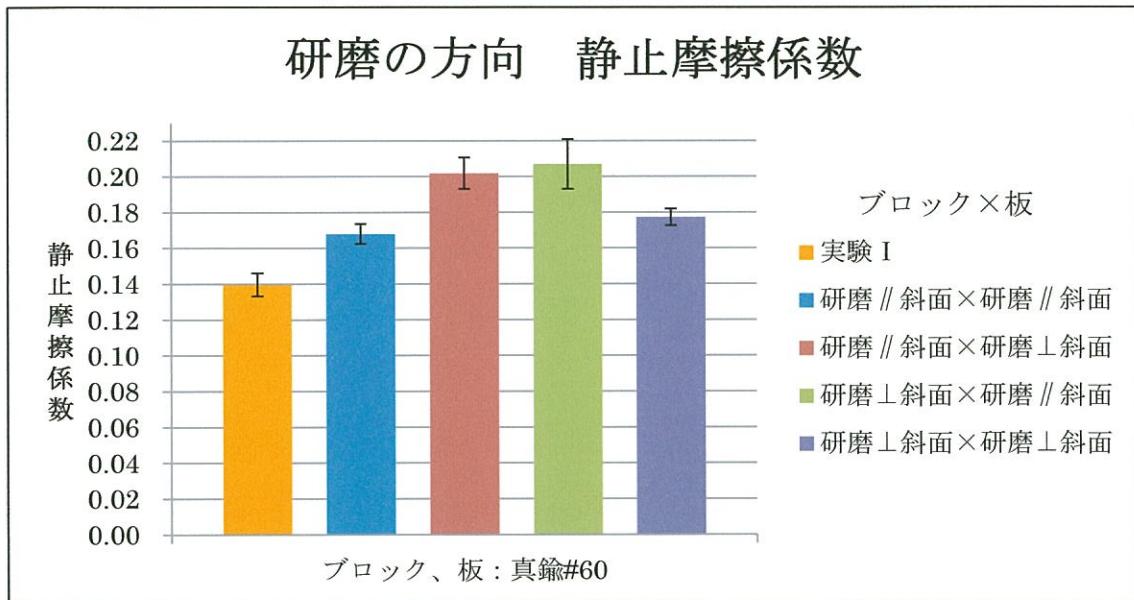
表.24 研磨の方向による摩擦角 θ_s まとめ

研磨の方向		真鍮板 #60 (0.7 μm)	
摩擦角(度)		研磨 // 斜面	研磨 ⊥ 斜面
真鍮ブロック #60 (1.9 μm)	研磨 // 斜面	9.5 ± 0.3	11.7 ± 0.8
	研磨 ⊥ 斜面	11.4 ± 0.5	10.1 ± 0.3

表.25 研磨の方向による静止摩擦係数 ($\mu_s = \tan\theta_s$) まとめ

研磨の方向		真鍮板 #60 (0.7 μ m)	
静止摩擦係数		研磨 // 斜面	研磨 ⊥ 斜面
真鍮ブロック #60 (1.9 μ m)	研磨 // 斜面	0.168 ± 0.006	0.21 ± 0.01
	研磨 ⊥ 斜面	0.202 ± 0.009	0.177 ± 0.005

グラフ.8 研磨の方向による静止摩擦係数の変化



ブロックと板の研磨の方向が平行となったとき、静止摩擦係数は 0.16～0.18 と小さくなった。また、研磨の方向がブロック、板で垂直のときの静止摩擦係数は 0.20～0.21 であり、平行のときに比べて大きくなつた。

いずれの状態においてもランダムに研磨した実験 I の静止摩擦係数と比較して大きくなつた。

(4) 実験IV 研磨による測定回ごとの静止摩擦係数の変化(摩耗効果)

実験 Iにおいて、摩擦角の測定を10回行った。しかし、真鍮板#60と、真鍮ブロック#60において、1回目と、2回目の測定値がその後の値と大きくかけ離れていたので、外れ値として、測定値から除外し、全体として12回測定を行い10回分として処理した。外れ値が発生した主な原因是、測定回数を重ねるごとによる、金属同士の研磨が起こつてしまい、表面粗さが研磨したてから小さくなるように変化したのだと考えられる。このことを調べるために、測定回ごとに研磨を行い測定面の粗さをほぼ一定に保つようにして、測定を行つた。なお、使用した研磨紙は、#60、#600、測定対象物は、同じ粗さの真鍮板・真鍮ブロックとした。

(結果)

以下の表に摩擦角、静止摩擦係数についてまとめた。

10回の測定を行ったそれぞれの測定値、誤差の数値は、9.付属資料 (4) 実験IV 研磨による測定回ごとの静止摩擦係数の変化(摩耗効果)に示した。

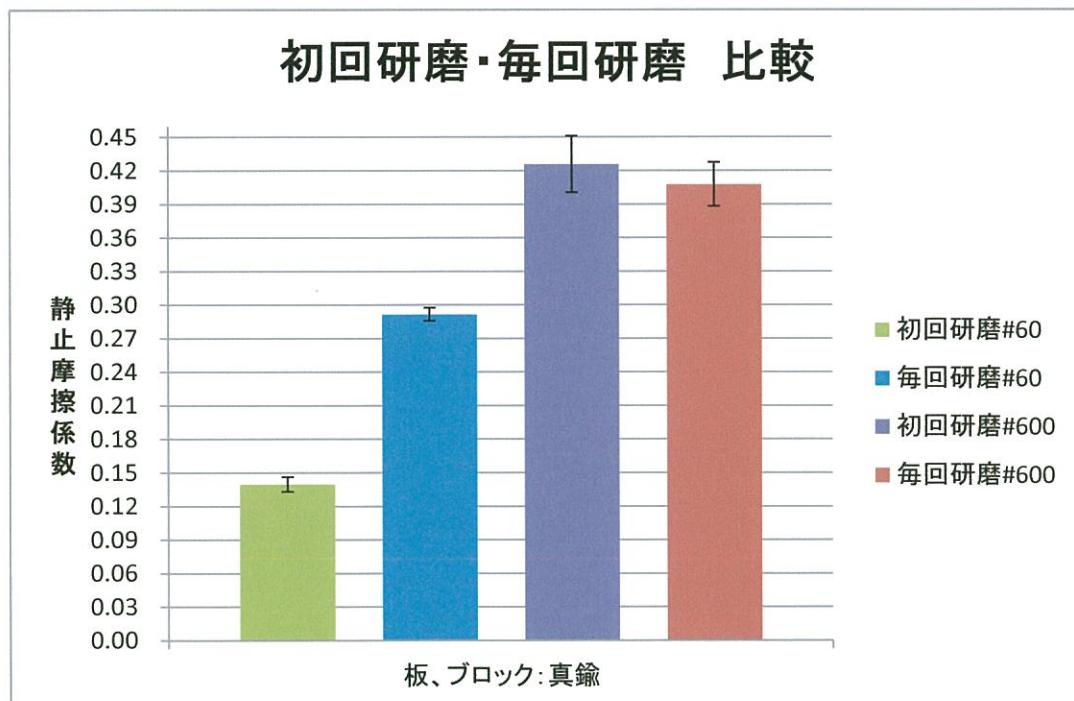
表.26 測定回ごとの摩擦角 θ_s まとめ

真鍮 每回研磨		真鍮板	
摩擦角(度)		#60 (0.7 μ m)	#600 (0.2 μ m)
真鍮	#60 (1.9 μ m)	16.3±0.3	
ブロック	#600 (0.3 μ m)		22±1

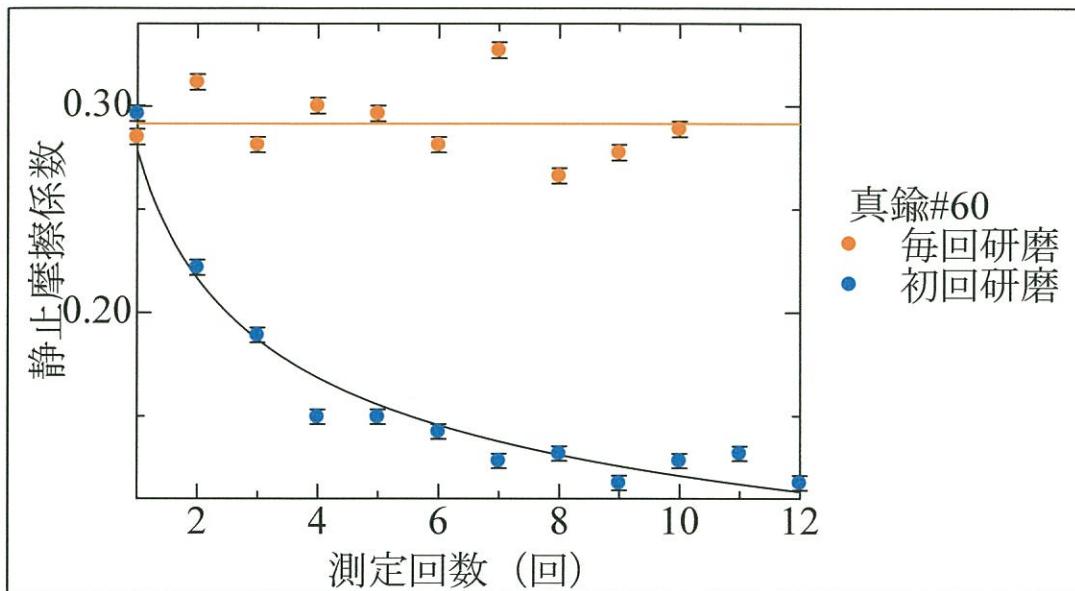
表.27 測定回ごとの静止摩擦係数 ($\mu_s = \tan\theta_s$) の変化まとめ

真鍮 每回研磨		真鍮板	
静止摩擦係数		#60 (0.7 μ m)	#600 (0.2 μ m)
真鍮	#60 (1.9 μ m)	0.292±0.006	
ブロック	#600 (0.3 μ m)		0.41±0.02

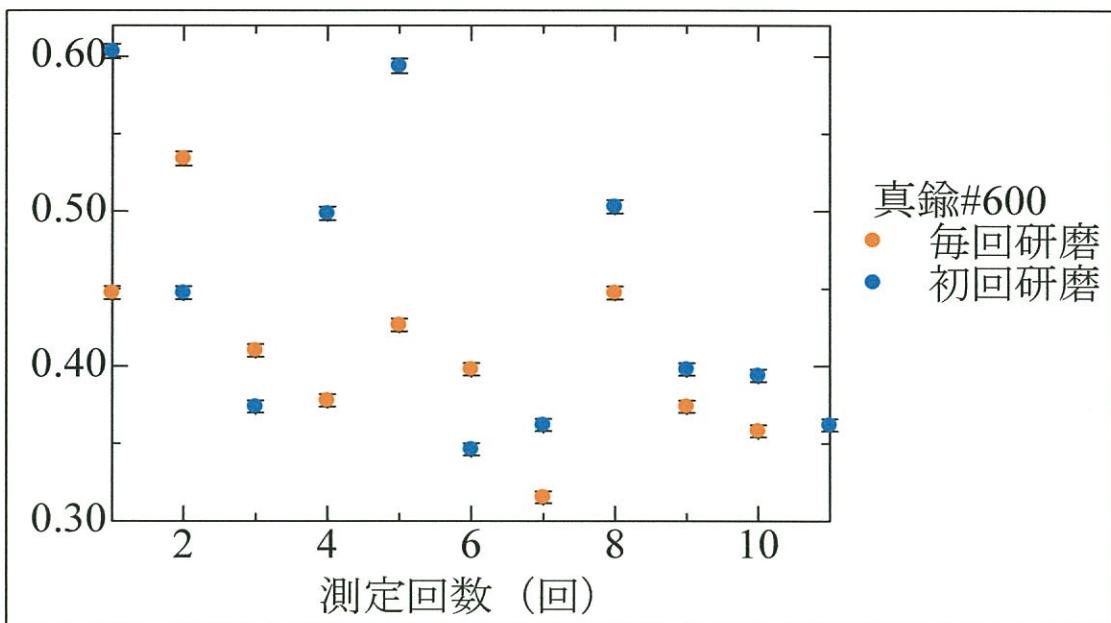
グラフ.9 初回研磨・毎回研磨による静止摩擦係数の変化



グラフ.10 測定回ごとの静止摩擦係数の変化(真鎌#60)



グラフ.11 測定回ごとの静止摩擦係数の変化(真鎌#600)



毎回研磨を行うと、#60において静止摩擦係数は 0.292、#600において静止摩擦係数は 0.41 となつた。

毎回研磨を行った方が、#60において、静止摩擦係数が 0.15 も大きくなった。

また、#600において毎回研磨を行っても、静止摩擦係数は変化しなかった。

さらに、初回研磨のときと同様に、#60と比べて#600のほうが静止摩擦係数は、大きくなつた。

(5) 実験V アルミニウム・真鍮とガラスの静止摩擦係数の粗さ依存性

実験Iでは同種の金属間における静止摩擦係数の粗さ依存性を測定した。実験III、実験IVより、静止摩擦係数が金属の接触面の状態によって変化することが分かった。ガラスは、アルミニウム・真鍮と比較して表面粗さがとても細かい。さらに、ブロックが滑ることによって表面の状態が変化しにくい。このことを生かし、アルミニウム・真鍮とガラスにおける静止摩擦係数の測定を行った。また、スライドガラスは研磨紙を用いての研磨が難しいので研磨せず、そのまま用いた。

(結果)

以下の表に摩擦角、静止摩擦係数についてまとめた。

10回の測定を行ったそれぞれの測定値、誤差の数値は、9.付属資料 (5) 実験V アルミニウム・真鍮とガラスの静止摩擦係数の粗さ依存性 に示した。

〈1〉アルミニウムブロック・スライドガラス

表.28 アルミニウムブロック・スライドガラスにおける摩擦角 θ_s まとめ

アルミニウム・ガラス 摩擦角(度)	アルミニウムブロック				
	#60 (3.9 μ m)	#150 (1.7 μ m)	#320 (1.2 μ m)	#600 (0.9 μ m)	
スライドガラス (0.02 μ m)	そのまま	7.2±0.3	8.6±0.3	8.4±0.2	10.6±0.2

表.29 アルミニウムブロック・スライドガラスにおける静止摩擦係数 ($\mu_s = \tan\theta_s$) まとめ

アルミニウム・ガラス 静止摩擦係数	アルミニウムブロック				
	#60 (3.9 μ m)	#150 (1.7 μ m)	#320 (1.2 μ m)	#600 (0.9 μ m)	
スライドガラス (0.02 μ m)	そのまま	0.127 ±0.005	0.151 ±0.006	0.147 ±0.004	0.187 ±0.004

〈2〉真鍮ブロック・スライドガラス

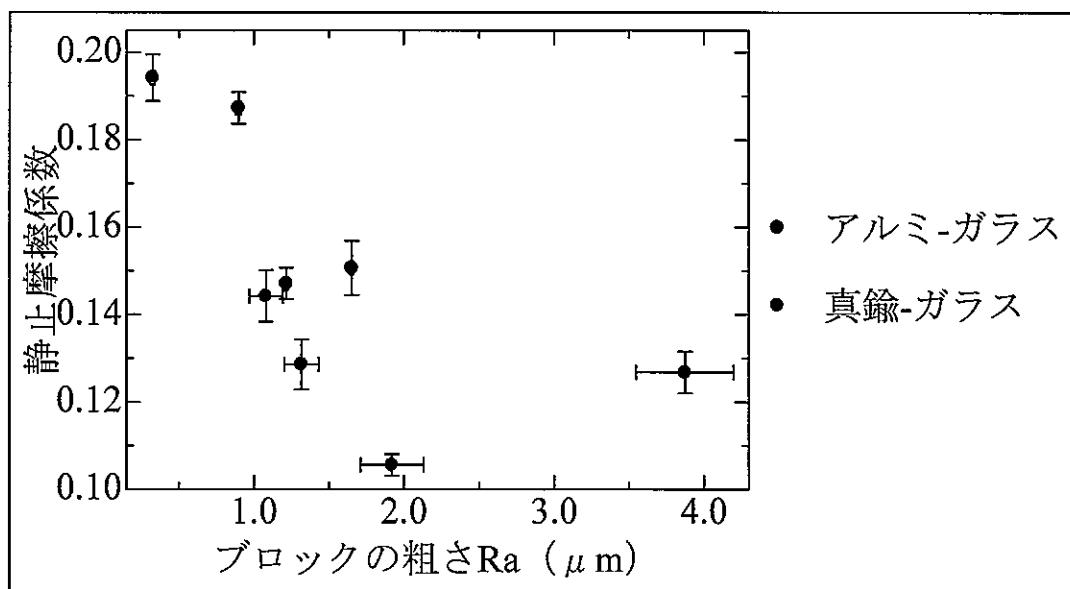
表.30 真鍮ブロック・スライドガラスにおける摩擦角 θ_s まとめ

真鍮・ガラス 摩擦角(度)	真鍮ブロック				
	#60 (2.3 μm)	#150 (1.0 μm)	#320 (0.9 μm)	#600 (0.3 μm)	
スライドガラス (0.02 μm)	そのまま	6.0±0.1	7.3±0.3	8.2±0.3	11.0±0.3

表.31 真鍮ブロック・スライドガラスにおける静止摩擦係数 ($\mu_s = \tan\theta_s$) まとめ

真鍮・ガラス 静止摩擦係数	アルミニウムブロック				
	#60 (2.3 μm)	#150 (1.0 μm)	#320 (0.9 μm)	#600 (0.3 μm)	
スライドガラス (0.02 μm)	そのまま	0.106 ±0.002	0.129 ±0.006	0.144 ±0.006	0.194 ±0.005

グラフ.12 アルミニウムブロック、真鍮ブロック・スライドガラスの静止摩擦係数



アルミニウム-ガラスの静止摩擦係数は、アルミニウムの Ra が 0.9 (μm) のとき 0.187 となった。Ra が大きくなると静止摩擦係数は 0.127 まで減少した。

真鍮-ガラスにおいて静止摩擦係数は、真鍮ブロックの Ra が 0.3 (μm) のとき、0.194 となった。アル

ミニウムのときと同様に R_a が大きくなると静止摩擦係数は 0.106 まで減少した。

(6) 実験VI 非金属における静止摩擦係数の測定

実験 I では、同種の金属における静止摩擦係数の粗さ依存性を求めた。実験VIでは非金属であるガラス・紙・アクリルの静止摩擦係数の測定を行う。ガラス・紙の研磨は難しいため、研磨は行わず、そのまま実験を行った。また、スライドガラス・紙をアルミニウムブロックと同程度の大きさにカットし、アルミニウムブロックに張り付けて実験を行った。

また、アクリルブロックは、自重が 7.0(g)と、とても小さいため円柱おもりを両面テープを用いて張り付けた。さらに、アクリルにおいては、ブロックと板の研磨紙の種類は同一とした。

(結果)

以下の表に摩擦角、静止摩擦係数についてまとめた。

10 回の測定を行ったそれぞれの測定値、誤差の数値は、9.付属資料 (6) 実験VI 非金属における静止摩擦係数 に示した。

表.32 ガラス・紙の摩擦角 θ_s まとめ

ガラス・紙		スライドガラス	板状紙
摩擦角(度)		そのまま (0.2 μm)	そのまま (3.0 μm)
ガラス付きブロック	そのまま (0.3 μm)	13.3 \pm 0.4	
紙付きブロック	そのまま (2.5 μm)		17.7 \pm 0.8

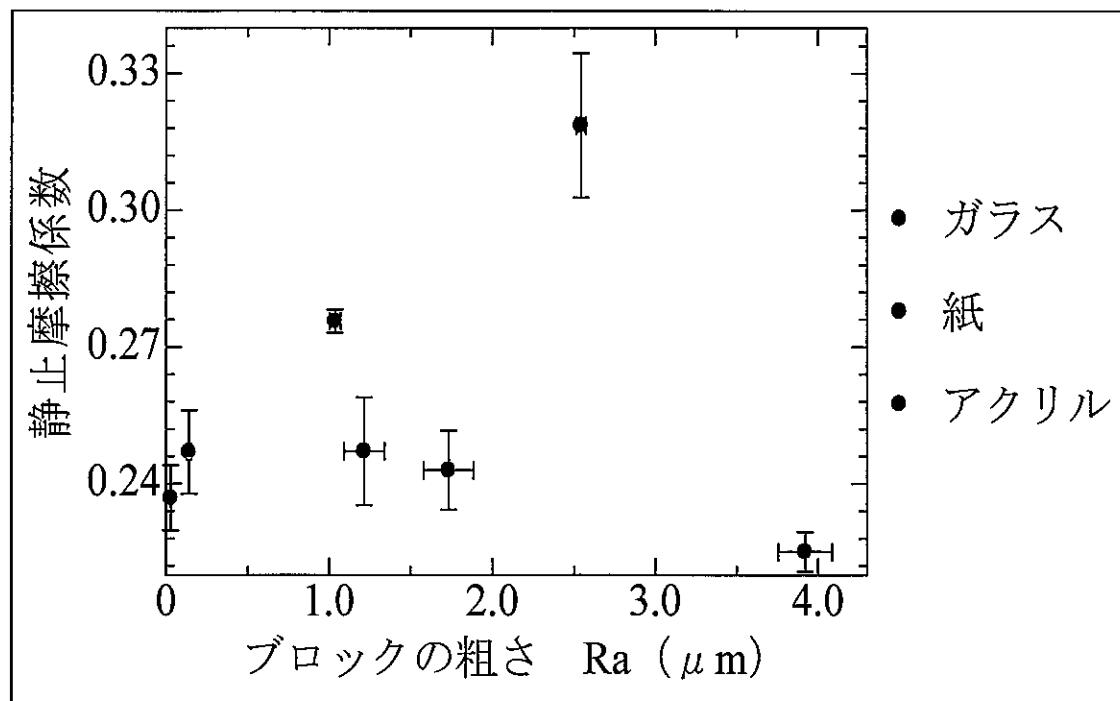
表.33 ガラス・紙の静止摩擦係数 ($\mu_s = \tan\theta_s$) まとめ

ガラス・紙		スライドガラス	板状紙
静止摩擦係数		そのまま (0.2 μm)	そのまま (3.0 μm)
ガラス付きブロック	そのまま (0.3 μm)	0.237 \pm 0.007	
紙付きブロック	そのまま (2.5 μm)		0.32 \pm 0.02

表.34 アクリルの摩擦角 θ_s 、静止摩擦係数 ($\mu_s = \tan\theta_s$) まとめ

研磨紙の種類 (板、ブロック)	そのまま ($0.01 \mu m$ 、 $0.1 \mu m$)	#60 ($2.2 \mu m$ 、 $3.9 \mu m$)	#150 ($1.0 \mu m$ 、 $1.7 \mu m$)	#320 ($0.8 \mu m$ 、 $1.2 \mu m$)	#600 ($0.5 \mu m$ 、 $1.0 \mu m$)
摩擦角(度)	13.9 ± 0.4	12.7 ± 0.2	13.7 ± 0.5	13.9 ± 0.6	15.4 ± 0.1
静止摩擦係数	0.247 ± 0.009	0.225 ± 0.004	0.243 ± 0.009	0.25 ± 0.01	0.276 ± 0.003

グラフ.13 ガラス・紙・アクリルの静止摩擦係数



粗さが $0.2(\mu m)$ のガラス同士の静止摩擦係数は 0.237 、粗さが $3.0(\mu m)$ の紙の静止摩擦係数は 0.32 となった。また、アクリルの静止摩擦係数はブロックの Ra が $0.1(\mu m)$ のとき 0.247 となった。その後、ブロックの Ra が大きくなると静止摩擦係数は $0.225 \sim 0.276$ となった。

アクリルの静止摩擦係数はブロックの粗さが変化してもアルミニウム・真鍮に比べてあまり変化しなかった。

ガラスの静止摩擦係数はアクリルの粗さによる静止摩擦係数の変動した値の中に入った。また、ガラス、アクリルに比べて紙の静止摩擦係数は約 0.07 大きくなった。

《III》潤滑剤の影響下の静止摩擦係数の測定

(1) 実験VII アルミニウム・真鍮の静止摩擦係数に対する

液体潤滑剤(純水・エタノール・グリセリン・菜種油)の効果

ブロック、板の間に液体潤滑剤(純水・エタノール・グリセリン・エタノール・菜種油)が存在すると静止摩擦係数は変化すると考えられる。また、液体潤滑剤の粘度や存在する厚さによっても静止摩擦係数が変化すると考えられる。

グリセリンは、粘度が 20°Cにおいて、1410(mPa·s)と大きい。さらに、水溶すると粘度が 1.005～1410(mPa·s)と大きく変化する。(表.35 参照)これより、グリセリンを潤滑剤として用いた場合、静止摩擦係数は大きく変化すると考えられる。

また、円柱形おもりを 1 分置くと、液体潤滑剤の厚さは薄くなりブロック、板の接触面が近づいてしまうと思われる。円柱形おもりを置かないと液体潤滑剤は厚く存在すると考えられる。

これらより、

①アルミニウム・真鍮の静止摩擦係数に対する液体潤滑剤(純水・エタノール)効果

②真鍮(#600)の静止摩擦係数に対するグリセリンの粘度依存性

③液体潤滑剤(純水・グリセリン・菜種油)の存在する厚さによる静止摩擦係数に対する効果

の測定をした。なお、ブロックと板の間の液体潤滑剤の量を一定に保つため、測定回ごとに、液体潤滑剤を塗った。また、①において測定したブロックの粗さの種類は、#60、#150、#320、#600とした。測定した板の粗さの種類は、#600とした。さらに、ブロック、板の種類は、アルミニウム・真鍮とした。②のときの、測定対象物は、真鍮ブロック#600、真鍮板#600とした。③において測定対象物は、アルミニウム・真鍮の#60、600で同じ物質、同じ粗さとした。さらに、1分間おもりを置くものを加重あり、1分間円柱形おもりを置かず、回転ステージを回転させたものを加重なしとした。

表.35 グリセリン粘度の濃度依存性[14]

粘度 (mPa·s)	濃度(%)	0	25	50	75	100
	20(°C)	1.005	2.09	6.00	35.5	1410

(結果)

以下の表に摩擦角、静止摩擦係数についてまとめた。

10 回の測定を行ったそれぞれの測定値、9.付属資料 (7)実験VII アルミニウム・真鍮の静止摩擦係数に対する液体潤滑剤(純水・エタノール・グリセリン・菜種油)の効果 に示した。

①アルミニウム・真鍮の静止摩擦係数に対する液体潤滑剤(純水・エタノール)の効果

〈1〉アルミニウムの静止摩擦係数に対する純水・エタノールの効果

表.36 アルミニウム・純水の摩擦角 θ_s まとめ

アルミニウム/純水/アルミニウム 摩擦角(度)		アルミニウムブロック			
		#60 (3.9 μ m)	#150 (1.7 μ m)	#320 (1.2 μ m)	#600 (0.9 μ m)
アルミニウム板	#600(0.5 μ m)	38±1	38±1	36±2	37±2

表.37 アルミニウム・純水の静止摩擦係数($\mu_s = \tan\theta_s$)まとめ

アルミニウム/純水/アルミニウム 静止摩擦係数		アルミニウムブロック			
		#60 (3.9 μ m)	#150 (1.7 μ m)	#320 (1.2 μ m)	#600 (0.9 μ m)
アルミニウム板	#600 (0.5 μ m)	0.78 ±0.04	0.79 ±0.04	0.72 ±0.05	0.74 ±0.06

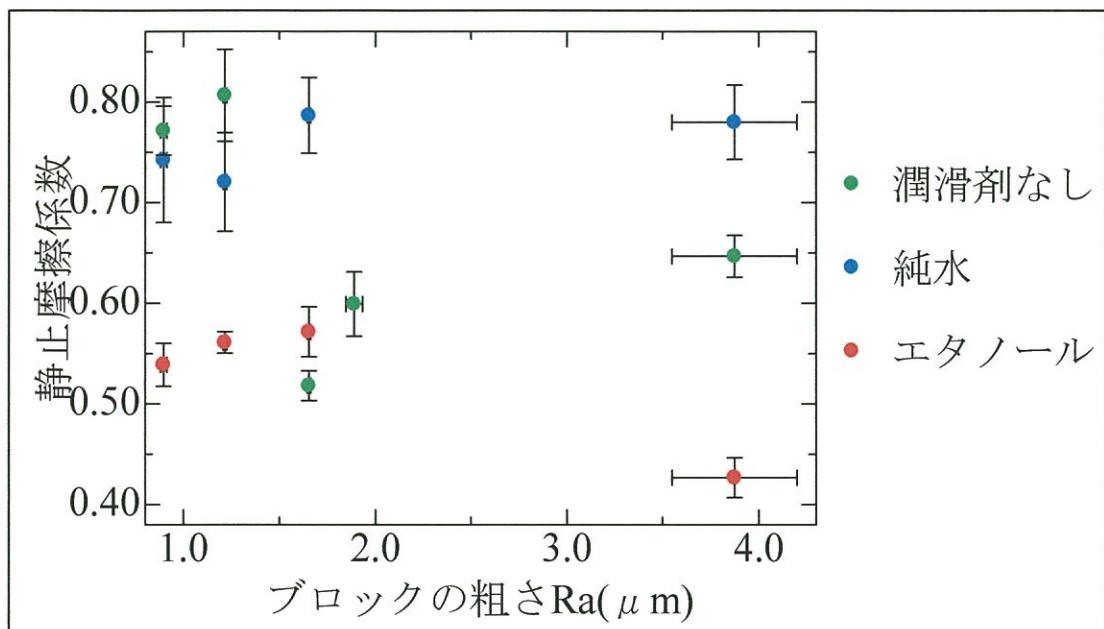
表.38 アルミニウム・エタノールの摩擦角 θ_s まとめ

アルミニウム/エタノール/アルミニウム 摩擦角(度)		アルミニウムブロック			
		#60 (3.9 μ m)	#150 (1.7 μ m)	#320 (1.2 μ m)	#600 (0.9 μ m)
アルミニウム板	#600(0.5 μ m)	23±1	30±1	29.3±0.5	28.3±0.9

表.39 アルミニウム・エタノールの静止摩擦係数($\mu_s = \tan\theta_s$)まとめ

アルミニウム/エタノール/アルミニウム 静止摩擦係数		アルミニウムブロック			
		#60 (3.9 μ m)	#150 (1.7 μ m)	#320 (1.2 μ m)	#600 (0.9 μ m)
アルミニウム板	#600(0.5 μ m)	0.43 ±0.02	0.57 ±0.02	0.56 ±0.01	0.54 ±0.02

グラフ.14 アルミニウムの静止摩擦係数に対する純水・エタノールの効果



アルミニウム・純水において静止摩擦係数は0.72～0.79、アルミニウム・エタノールにおいて静止摩擦係数は0.43～0.57となった。

アルミニウム・純水における静止摩擦係数は、ブロックの粗さが変化してもあまり変化しなかった。また、アルミニウム・エタノールにおける静止摩擦係数は、全体的に潤滑剤がない状態に比べて小さくなった。ただ、アルミニウム・純水と同様にブロックの粗さが変化してもあまり大きく静止摩擦係数は変化しなかった。

〈2〉真鍮の静止摩擦係数に対する純水・エタノールの効果

表.40 真鍮・純水の摩擦角 θ_s まとめ

真鍮/純水/真鍮 摩擦角(度)	真鍮ブロック			
	#60 (1.9 μm)	#150 (1.3 μm)	#320 (1.1 μm)	#600 (0.3 μm)
真鍮板 #600 (0.2 μm)	17.4 ± 0.5	22.0 ± 0.4	24.3 ± 0.8	19.4 ± 0.7

表.41 真鍮・純水の静止摩擦係数($\mu_s = \tan\theta_s$)まとめ

真鍮/純水/真鍮 静止摩擦係数		真鍮ブロック			
		#60 (1.9 μ m)	#150 (1.3 μ m)	#320 (1.1 μ m)	#600 (0.3 μ m)
真鍮板	#600 (0.2 μ m)	0.313 ± 0.009	0.404 ± 0.007	0.45 ± 0.02	0.35 ± 0.01

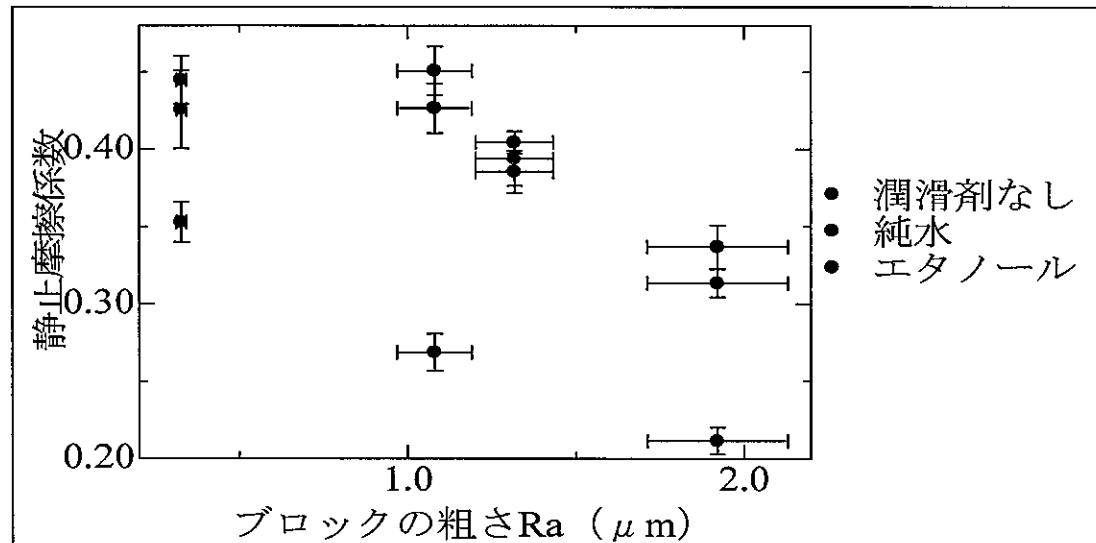
表.42 真鍮・エタノールの摩擦角 θ_s まとめ

真鍮/エタノール/真鍮 摩擦角(度)		真鍮ブロック			
		#60 (1.9 μ m)	#150 (1.3 μ m)	#320 (1.1 μ m)	#600 (0.3 μ m)
真鍮板	#600 (0.2 μ m)	18.6 \pm 0.7	21.1 \pm 0.7	23.1 \pm 0.8	24.0 \pm 0.7

表.43 真鍮・エタノールの静止摩擦係数($\mu_s = \tan\theta_s$)まとめ

真鍮/エタノール/真鍮 静止摩擦係数		真鍮ブロック			
		#60 (1.9 μ m)	#150 (1.3 μ m)	#320 (1.1 μ m)	#600 (0.3 μ m)
真鍮板	#600 (0.2 μ m)	0.34 ± 0.01	0.39 ± 0.01	0.43 ± 0.02	0.44 ± 0.02

グラフ.15 真鍮の静止摩擦係数に対する純水、エタノールの効果



真鍮・純水において静止摩擦係数は 0.313~0.45、真鍮・エタノールにおいて静止摩擦係数は 0.34~0.44 となった。潤滑剤がない状態に比べて真鍮・純水、エタノールにおいてブロックの粗さが変化しても静止摩擦係数は大きく変化しなかった。

また、真鍮・純水において、ブロックの粗さが $1.1(\mu\text{m})$ 以下のとき、ブロックの粗さが粗くなると静止摩擦係数は大きくなつた。 $1.1(\mu\text{m})$ 以上のとき、ブロックの粗さが粗くなると静止摩擦係数は小さくなつた。

真鍮・エタノールにおいて静止摩擦係数はブロックの粗さが粗くなると小さくなつた。ただ、その変化は約 0.10 となつたためあまり大きないと考えられる。

②真鍮(#600)の静止摩擦係数に対するグリセリンの粘度依存性

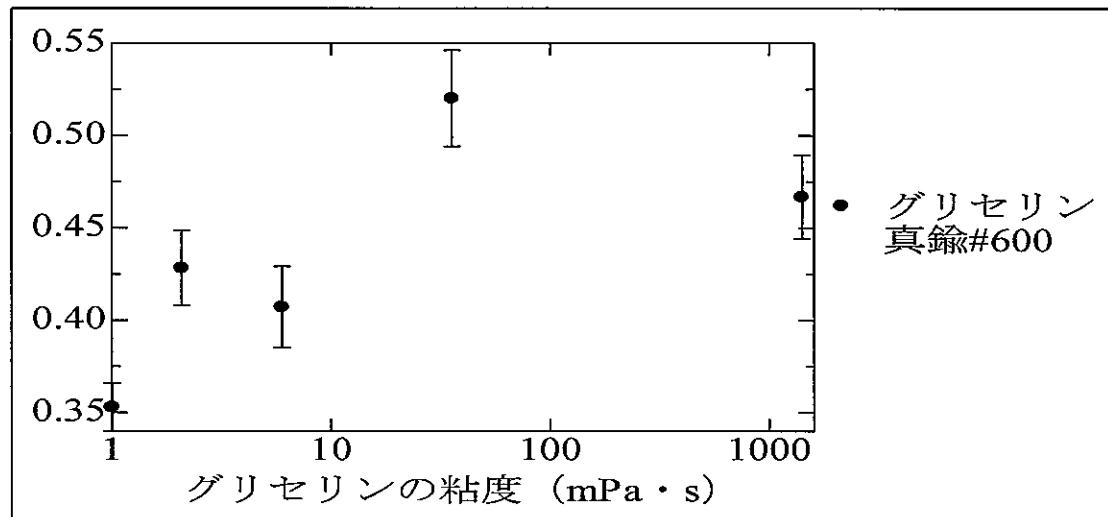
表.44 真鍮(#600)における摩擦角 θ_s のグリセリンの粘度による効果

真鍮/グリセリン/真鍮 摩擦角(度)		グリセリンの濃度(%)				
		0	25	50	75	100
真鍮 (板、ブロック)	#600 ($0.2\mu\text{m}$, $0.3\mu\text{m}$)	19.4 ± 0.7	23 ± 1	22 ± 1	27 ± 1	25 ± 1

表.45 真鍮(#600)における静止摩擦係数($\mu_s = \tan\theta_s$)のグリセリンの粘度による効果

静止摩擦係数	グリセリン	グリセリンの濃度(%)				
		0	25	50	75	100
真鍮 (板、 ブロック)	#600 ($0.2\mu\text{m}$, $0.3\mu\text{m}$)	0.35 ± 0.01	0.43 ± 0.02	0.41 ± 0.02	0.52 ± 0.03	0.47 ± 0.02

グラフ.16 真鍮(#600)における静止摩擦係数のグリセリンの粘度による効果



真鍮#600におけるグリセリンの影響下における静止摩擦係数は0.35～0.52となった。全体的にグリセリンの粘度が上昇するにつれて、静止摩擦係数は大きくなっていた。ただ、静止摩擦係数が最大となったのは、グリセリンの粘度が35.5(mPa·s)においてで、0.52となった。また、グリセリンが含まれていると静止摩擦係数は純水だけのときと比べて大きくなつた。

③液体潤滑剤の存在する厚さによる静止摩擦係数に対する効果

〈1〉アルミニウムの静止摩擦係数に対する液体潤滑剤の存在による効果

表.46 潤滑剤(純水・菜種油・グリセリン)の存在による効果におけるアルミニウムの摩擦角 θ_s

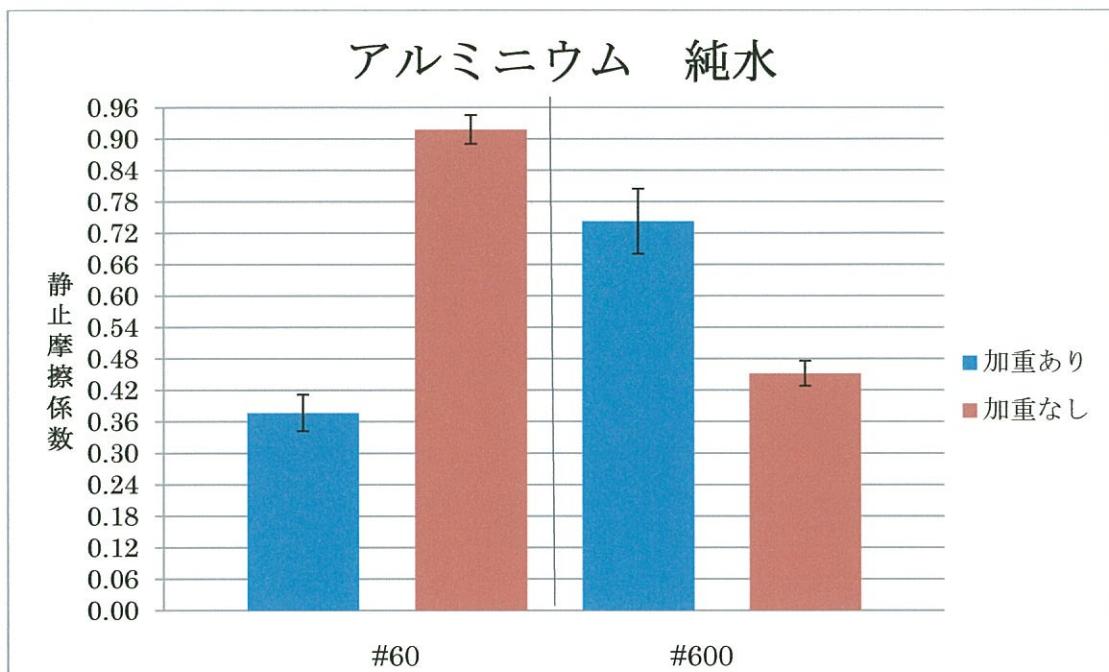
まとめ

アルミニウム/潤滑剤/ アルミニウム 摩擦角(度)		アルミニウム(板、ブロック)	
		#60(2.4 μm、3.9 μm)	#600(0.5 μm、0.9 μm)
潤滑剤 の 種類・ 状態	純水・加重あり	21±2	37±2
	純水・加重なし	42.5±0.9	24±1
	菜種油・加重あり	22±1	41±1
	菜種油・加重なし	16.2±0.6	32.6±0.9
	グリセリン・加重あり	17.4±0.7	40±1
	グリセリン・加重なし	16.6±0.7	1.4±0.2

表.47 潤滑剤(純水・菜種油・グリセリン)の存在による効果におけるアルミニウムの静止摩擦係数
($\mu_s = \tan \theta_s$) まとめ

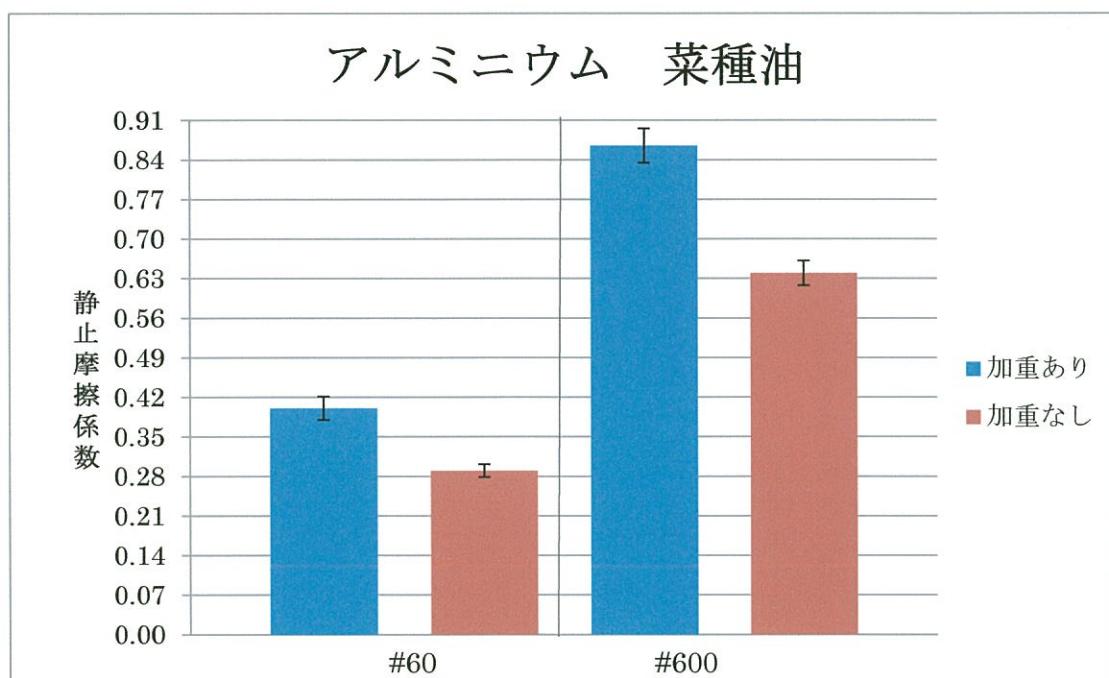
アルミニウム/潤滑剤/ アルミニウム 静止摩擦係数		アルミニウム(板、ブロック)	
		#60(2.4 μm、3.9 μm)	#600(0.5 μm、0.9 μm)
潤滑剤 の 種類・ 状態	純水・加重あり	0.38±0.03	0.74±0.06
	純水・加重なし	0.92±0.03	0.45±0.02
	菜種油・加重あり	0.40±0.02	0.87±0.03
	菜種油・加重なし	0.29±0.01	0.64±0.02
	グリセリン・加重あり	0.31±0.01	0.84±0.04
	グリセリン・加重なし	0.30±0.01	0.024±0.003

グラフ.17 アルミニウムの静止摩擦係数に対する純水の存在による効果



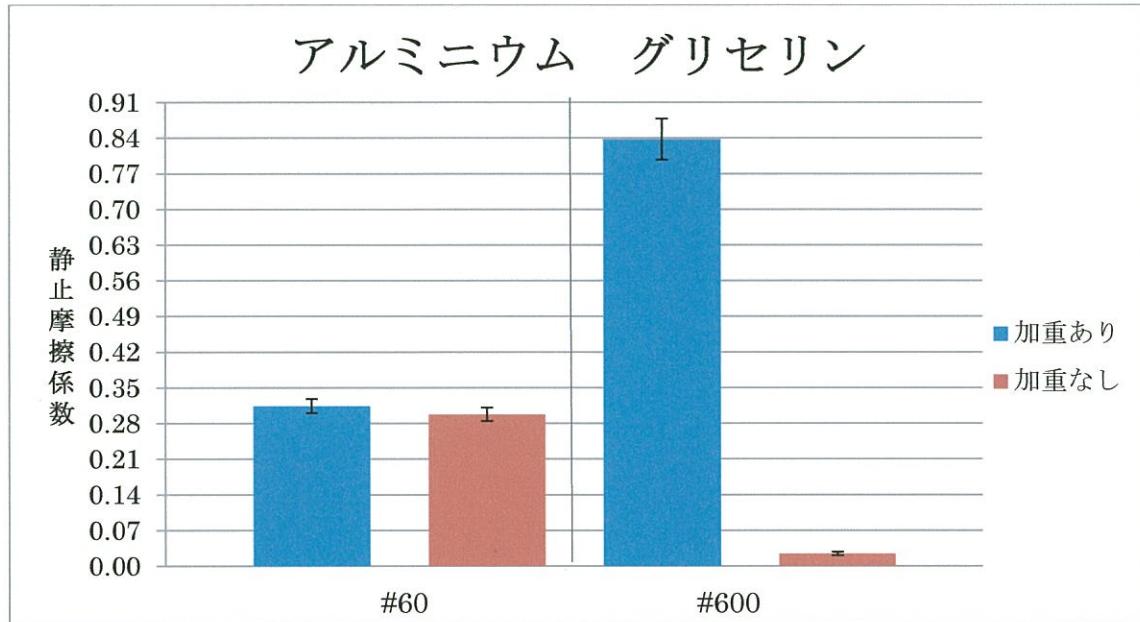
アルミニウム#60・純水において、加重なしのほうのが加重よりも静止摩擦係数は 0.54 大きくなつた。さらに、アルミニウム#600・純水においては、加重なしのほうのが加重よりも静止摩擦係数は 0.29 小さくなつた。

グラフ.18 アルミニウムの静止摩擦係数に対する菜種油の存在による効果



アルミニウム#60・菜種油において、加重なしのほうのが加重ありよりも静止摩擦係数は 0.11 小さくなつた。さらに、アルミニウム#600・菜種油においては、加重なしのほうのが加重ありよりも静止摩擦係数は 0.23 小さくなつた。

グラフ.19 アルミニウムの静止摩擦係数に対するグリセリンの存在による効果



アルミニウム#60・グリセリンにおいて、加重なしのほうのが加重ありよりも静止摩擦係数は 0.01 小さくなつた。さらに、アルミニウム#600・グリセリンにおいては、加重なしのほうのが加重ありよりも静止摩擦係数は 0.83 小さくなつた。

〈2〉真鍮の静止摩擦係数に対する液体潤滑剤の存在による効果

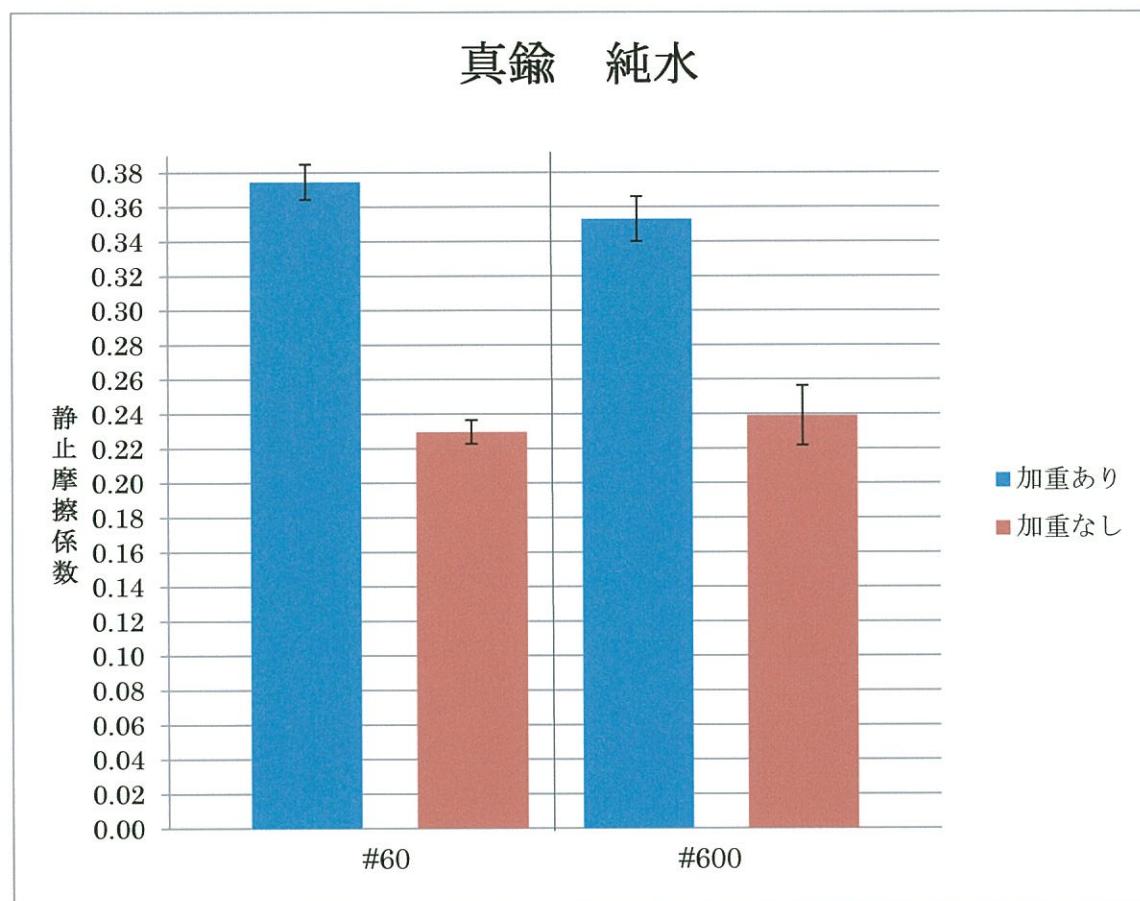
表.48 潤滑剤(純水・菜種油・グリセリン)の存在による効果における真鍮の摩擦角 θ_s まとめ

真鍮/潤滑剤/真鍮 摩擦角(度)		真鍮(板、ブロック)	
		#60(0.7 μ m, 1.9 μ m)	#600(0.2 μ m, 0.3 μ m)
潤滑剤 の 種類・ 状態	純水・加重あり	20.5 \pm 0.5	19.4 \pm 0.7
	純水・加重なし	12.9 \pm 0.4	13.4 \pm 0.9
	菜種油・加重あり	9.3 \pm 0.6	21.0 \pm 0.7
	菜種油・加重なし	10.5 \pm 0.6	12.3 \pm 0.5
	グリセリン・加重あり	22.3 \pm 0.7	25 \pm 1
	グリセリン・加重なし	21.1 \pm 0.6	0.9 \pm 0.2

表.49 潤滑剤(純水・菜種油・グリセリン)の存在による効果における真鍮の静止摩擦係数
($\mu_s = \tan \theta_s$) まとめ

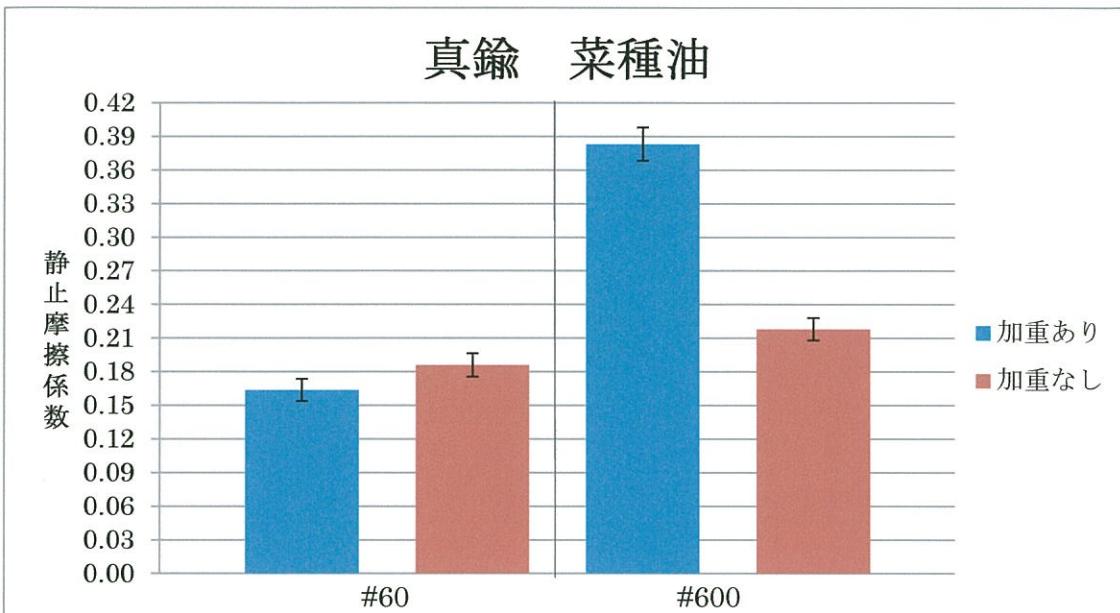
真鍮/潤滑剤/真鍮		真鍮(板、ブロック)	
静止摩擦係数		#60(0.7 μ m, 1.9 μ m)	#600(0.2 μ m, 0.3 μ m)
潤滑剤 の 種類・ 状態	純水・加重あり	0.37±0.01	0.35±0.01
	純水・加重なし	0.230±0.007	0.24±0.02
	菜種油・加重あり	0.16±0.01	0.38±0.01
	菜種油・加重なし	0.19±0.01	0.22±0.01
	グリセリン・加重あり	0.41±0.01	0.47±0.02
	グリセリン・加重なし	0.38±0.01	0.015±0.004

グラフ.20 真鍮の静止摩擦係数に対する純水の存在による効果



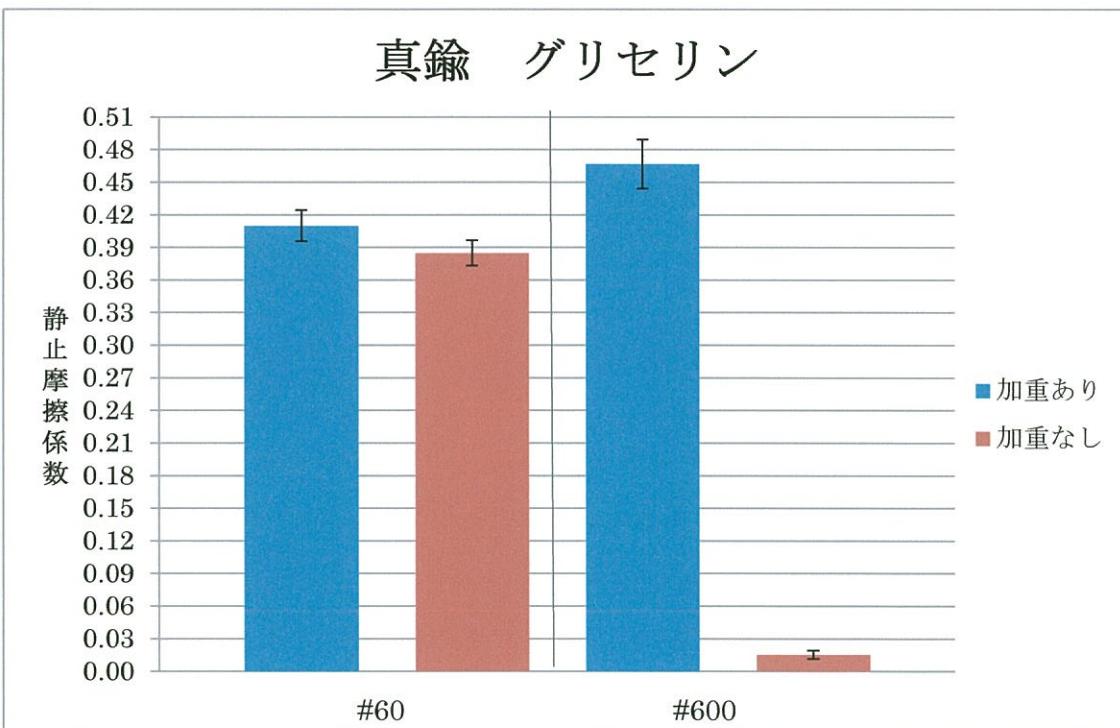
真鍮#60・純水において、加重なしのほうのが加重よりも静止摩擦係数は 0.14 小さくなった。さらに、真鍮#600・純水においては、加重なしのほうのが加重よりも静止摩擦係数は 0.11 小さくなつた。

グラフ.21 真鍮の静止摩擦係数に対する菜種油の存在による効果



真鍮#60・菜種油において、加重なしのほうのが加重よりも静止摩擦係数は 0.03 大きくなった。さらに、真鍮#600・菜種油においては、加重なしのほうのが加重よりも静止摩擦係数は 0.16 小さくなつた。

グラフ.22 真鍮の静止摩擦係数に対するグリセリンの存在による効果



真鍮#60・グリセリンにおいて、加重なしのほうのが加重ありよりも静止摩擦係数は 0.03 小さくなった。さらに、真鍮#600・グリセリンにおいては、加重なしのほうのが加重ありよりも静止摩擦係数は 0.45 小さくなった。

(2) 実験VII 静止摩擦係数に対する固体潤滑剤 (チョーク・鉛筆・極圧二硫化モリブデングリース)の効果

実験VIIにおいて、静止摩擦係数に対する液体潤滑剤の効果を測定した。潤滑剤には、液体のものその他に固体のものが存在する。液体のときと同様、ブロック、板の間に固体潤滑剤が入り込んだとき、静止摩擦係数は変化すると考えられる。実験VIIと同様に測定回ごとに潤滑剤を塗りなおした。

(結果)

以下の表に摩擦角、静止摩擦係数についてまとめた。

10回の測定を行ったそれぞれの測定値、誤差の数値は、9.付属資料 (8)実験VII 静止摩擦係数に対する固体潤滑剤(チョーク・鉛筆・極圧二硫化モリブデングリース)の効果 に示した。

表.50 固体潤滑剤(チョーク・鉛筆・極圧二硫化モリブデングリース)の効果下の摩擦角 θ_s まとめ

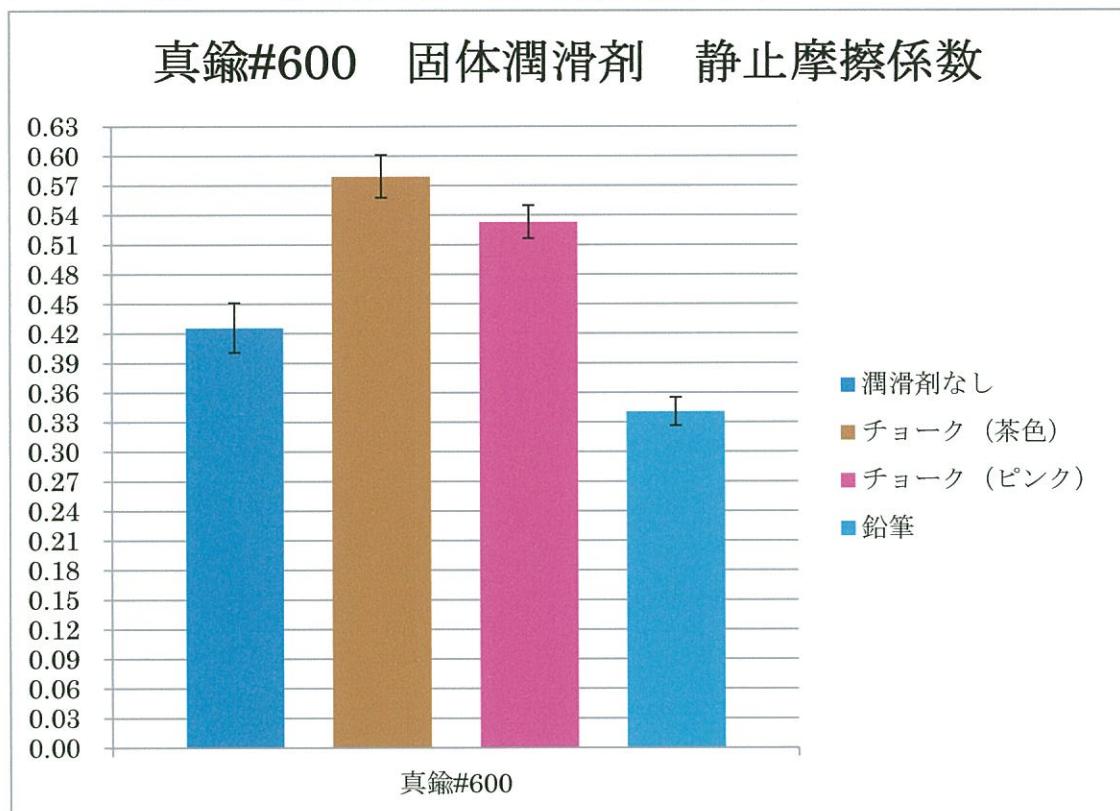
		真鍮(板、ブロック)		紙(板、ブロック)
固体潤滑剤 の 種類	摩擦角(度)	#600 (0.2 μ m、 0.3 μ m)	#60 (0.7 μ m、 1.9 μ m)	そのまま (3.0 μ m、 2.5 μ m)
	潤滑剤なし	23±1	8.0±0.4	17.7±0.8
	極圧二硫化 モリブデングリース		18.1±0.1	20.6±0.6
	チョーク(茶色)	30.1±0.9	41.0±0.7	39.1±0.6
	チョーク(ピンク)	28.1±0.7	30.4±0.9	36.9±0.8
	鉛筆(6B)	18.8±0.7	9.3±0.5	14.0±0.5

表.51 固体潤滑剤(チョーク・鉛筆・極圧二硫化モリブデングリース)の効果下の静止摩擦係数

 $(\mu_s = \tan\theta_s)$ まとめ

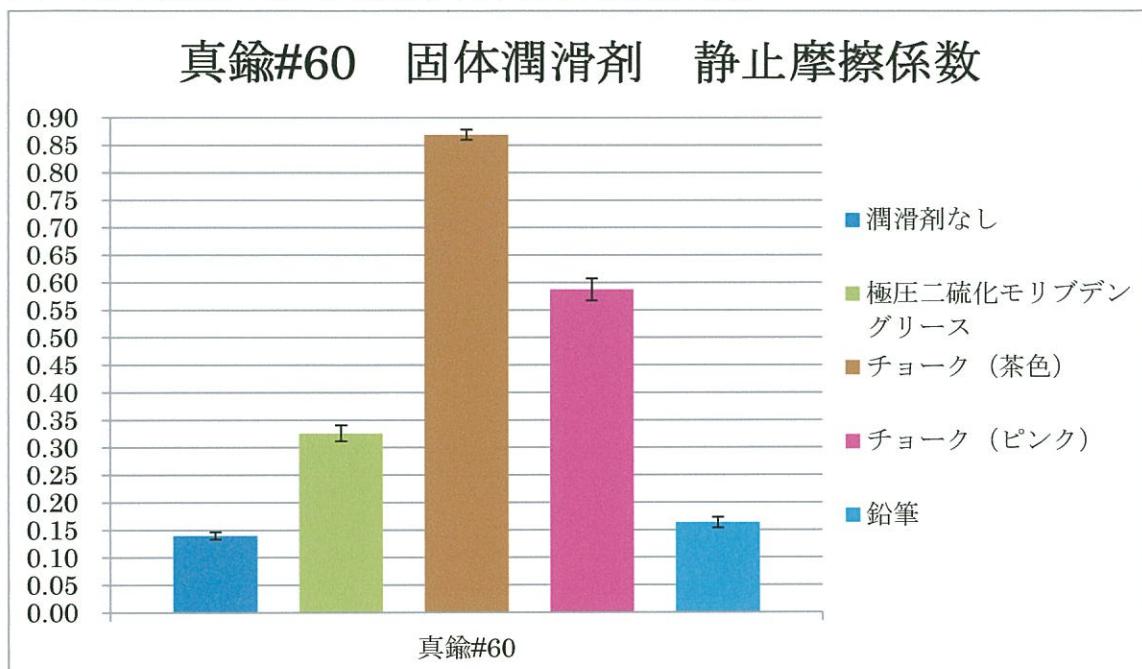
		真鍮(板、ブロック)		紙(板、ブロック)
固体潤滑剤 静止摩擦係数		#600 (0.2 μ m、 0.3 μ m)	#60 (0.7 μ m、 1.9 μ m)	そのまま (3.0 μ m、 2.5 μ m)
固体潤滑剤 の 種類	潤滑剤なし	0.43±0.03	0.140±0.007	0.32±0.02
	極圧二硫化 モリブデングリース		0.33±0.01	0.38±0.01
	チョーク(茶色)	0.58±0.02	0.869±0.009	0.81±0.02
	チョーク(ピンク)	0.53±0.02	0.59±0.02	0.75±0.02
	鉛筆(6B)	0.34±0.01	0.16±0.01	0.25±0.01

グラフ.23 真鍮#600 の静止摩擦係数に対する固体潤滑剤の効果



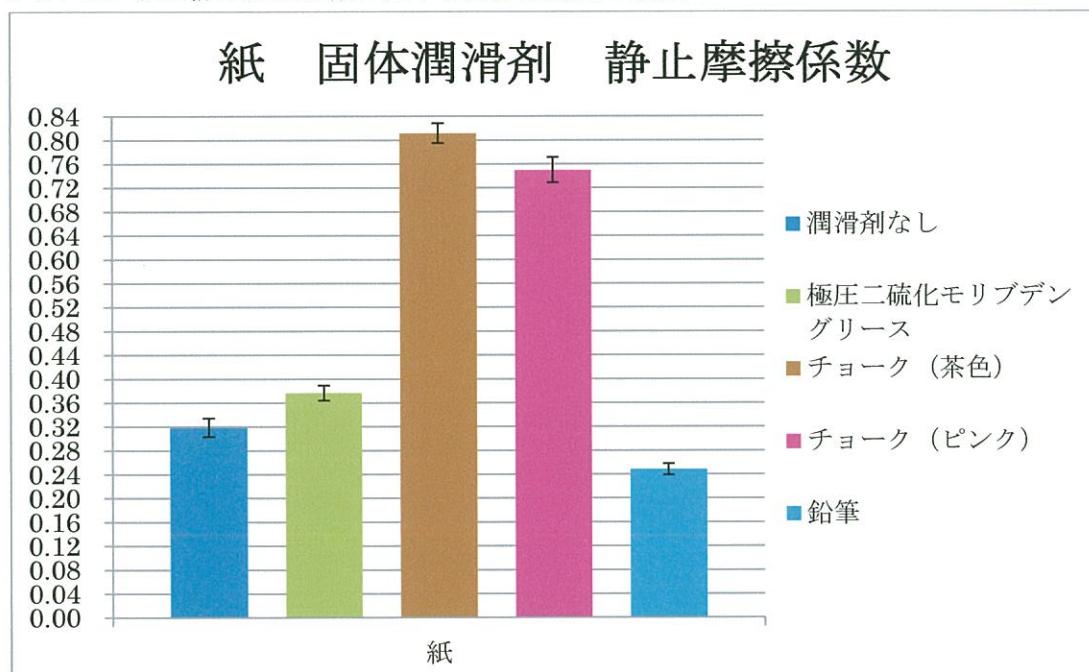
真鍮板、ブロック#600において固体潤滑剤がチョークのとき、潤滑剤なしの状態よりも静止摩擦係数は 0.10~0.15 大きくなった。一方で固体潤滑剤が鉛筆のとき静止摩擦係数は 0.09 小さくなつた。

グラフ.24 真鍮#60 の静止摩擦係数に対する固体潤滑剤の効果



真鍮板、ブロック#60において固体潤滑剤がチョーク(茶色)のとき静止摩擦係数が 0.87 と一番大きくなった。また、固体潤滑剤が存在するとすべての場合において潤滑剤なしの状態よりも静止摩擦係数は大きくなつた。

グラフ.25 紙の静止摩擦係数に対する固体潤滑剤の効果



紙においても同様に固体潤滑剤がチョーク(茶色)のとき、静止摩擦係数が 0.81 と一番大きくなつた。また、潤滑剤なしの状態と比較して固体潤滑剤が鉛筆のときに静止摩擦係数は 0.07 小さくなつた。

《IV》動摩擦係数の測定

(1) 実験IX 真鍮(#60)の動摩擦係数に対する

潤滑剤(純水・グリセリン・菜種油・極圧二硫化モリブデングリース)の効果

2-1 実験の原理 にも示したように、静止摩擦係数の測定を行った回転ステージを用いて、滑走距離、滑走時間、滑った角度を測定することにより、動摩擦係数の測定を行うことができる。スマートフォンのカメラアプリを用いて、滑る瞬間を撮影し、摩擦角、滑走距離の測定結果より動摩擦係数の測定を行った。測定を行った板、ブロックは、ともに真鍮#60 とした。また、測定に用いた潤滑剤は、純水、グリセリン、菜種油、極圧二硫化モリブデングリースとした。

(結果)

以下の表に摩擦角、静止摩擦係数、動摩擦係数についてまとめた。

また、動摩擦係数の算出において、重力加速度 $g : 9.7969 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 、滑走距離 $x : 0.1332 \text{ (m)}$ となつた。また、滑走時間 t は約 0.5~1.5 秒となつた。

10 回の測定を行ったそれぞれの測定値、誤差の数値は、9.付属資料 (9)実験IX 真鍮(#60)の動摩擦係数に対する潤滑剤(純水・グリセリン・菜種油・極圧二硫化モリブデングリース)の効果 に示した。また、各測定回の測定動画は Youtube「四日市高校 SSH 科学部」において作成した下記 URL の再生リストにアップロードした。

潤滑剤なし;https://www.youtube.com/playlist?list=PLgGiQPEBxotf9k-IP_GxL-IwsJFiA38Gp

純水;<https://www.youtube.com/playlist?list=PLgGiQPEBxoteZZYubJmWGHllF2-NYpg8C>

菜種油;<https://www.youtube.com/playlist?list=PLgGiQPEBxoteaIP1f1ZqWpsF9beNxKjgg>

極圧二硫化モリブデングリース;

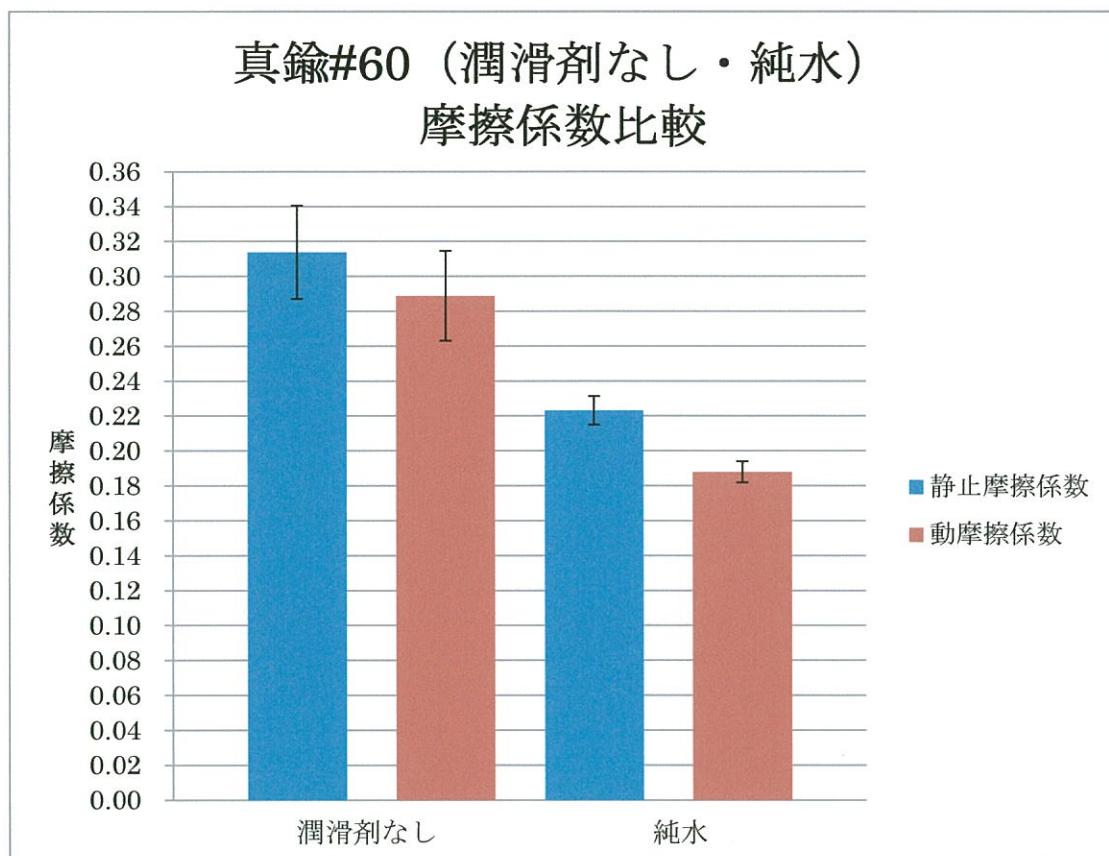
<https://www.youtube.com/playlist?list=PLgGiQPEBxotfOX4TpXotn5QsAhHodule>

表.52 潤滑剤(純水・グリセリン・菜種油・極圧二硫化モリブデングリース)における摩擦角 θ_s 、

静止摩擦係数($\mu_s = \tan\theta_s$)、動摩擦係数の測定結果 まとめ

真鍮 #60 (板:0.7 μm、 プロック:1.9 μm)		摩擦角(度)	静止摩擦係数	動摩擦係数
潤滑剤 の 種類	潤滑剤なし	17±1	0.31±0.03	0.29±0.03
	純水	12.6±0.4	0.223±0.008	0.188±0.006
	グリセリン	16.9±0.7	0.30±0.01	0.29±0.01
	菜種油	13.6±0.9	0.24±0.02	0.22±0.02
	二硫化モリブデン グリース	17.0±0.6	0.30±0.01	0.281±0.008

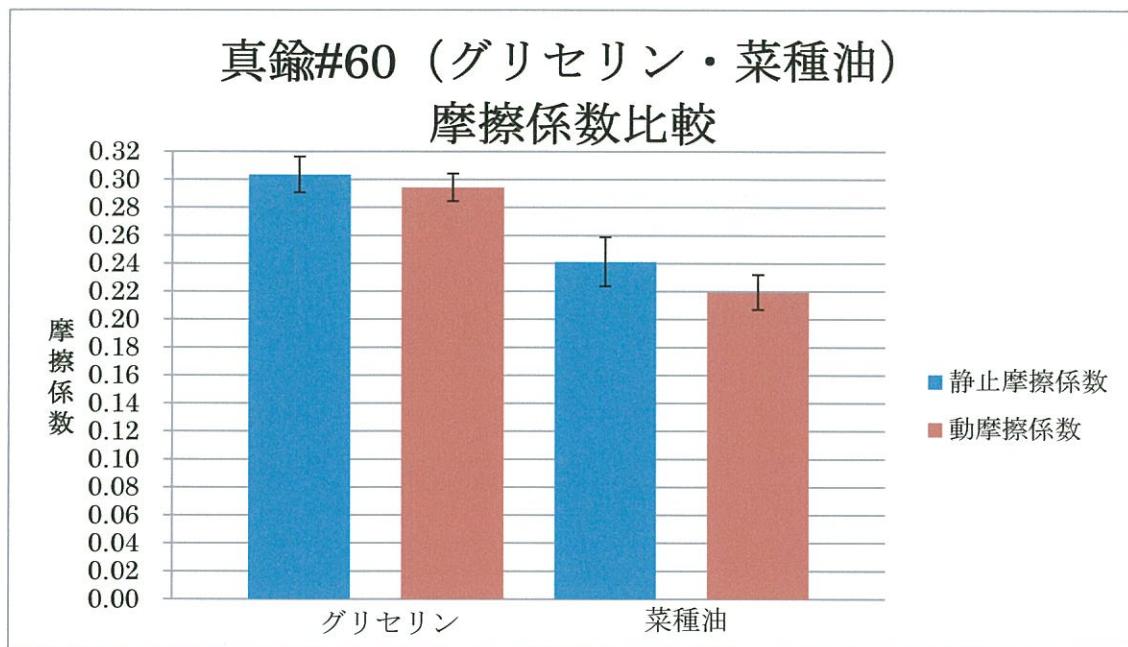
グラフ.26 真鍮#60(潤滑剤なし・純水)における静止摩擦係数・動摩擦係数の測定結果



潤滑剤なしにおいて静止摩擦係数よりも動摩擦係数のほうが 0.02 小さくなった。

また、純水の影響下において静止摩擦係数よりも動摩擦係数のが 0.035 小さくなつた。

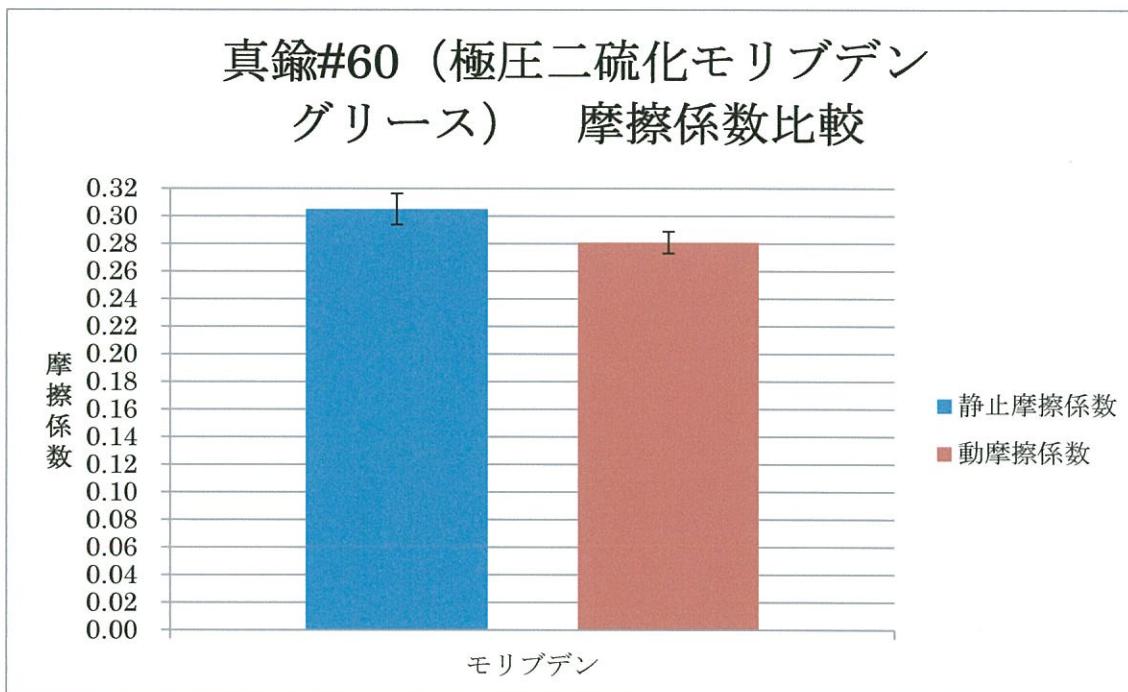
グラフ.27 真鍮#60(グリセリン・菜種油)における静止摩擦係数・動摩擦係数の測定結果



潤滑剤がグリセリンのとき、静止摩擦係数よりも動摩擦係数の方が 0.01 小さくなった。

また、菜種油のとき、静止摩擦係数よりも動摩擦係数の方が 0.02 小さくなった。

グラフ.28 真鍮#60(極圧二硫化モリブデングリース)における静止摩擦係数・動摩擦係数の測定結果



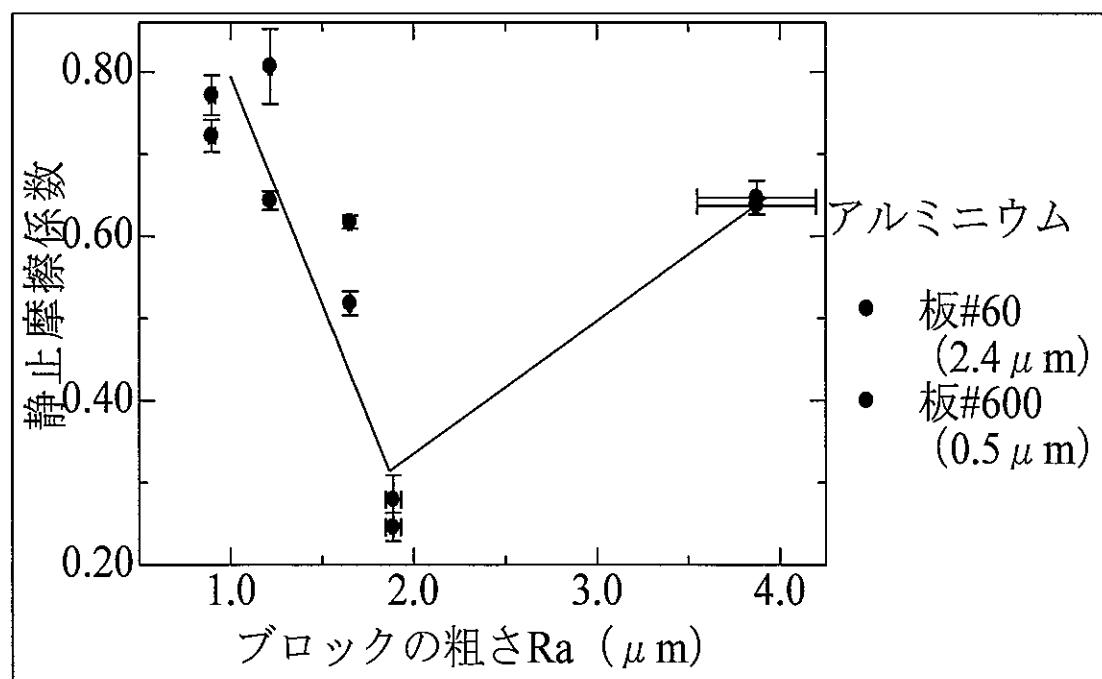
極圧二硫化モリブデングリースの影響下において動摩擦係数は静止摩擦係数よりも 0.019 小さくなつた。

4. 考察

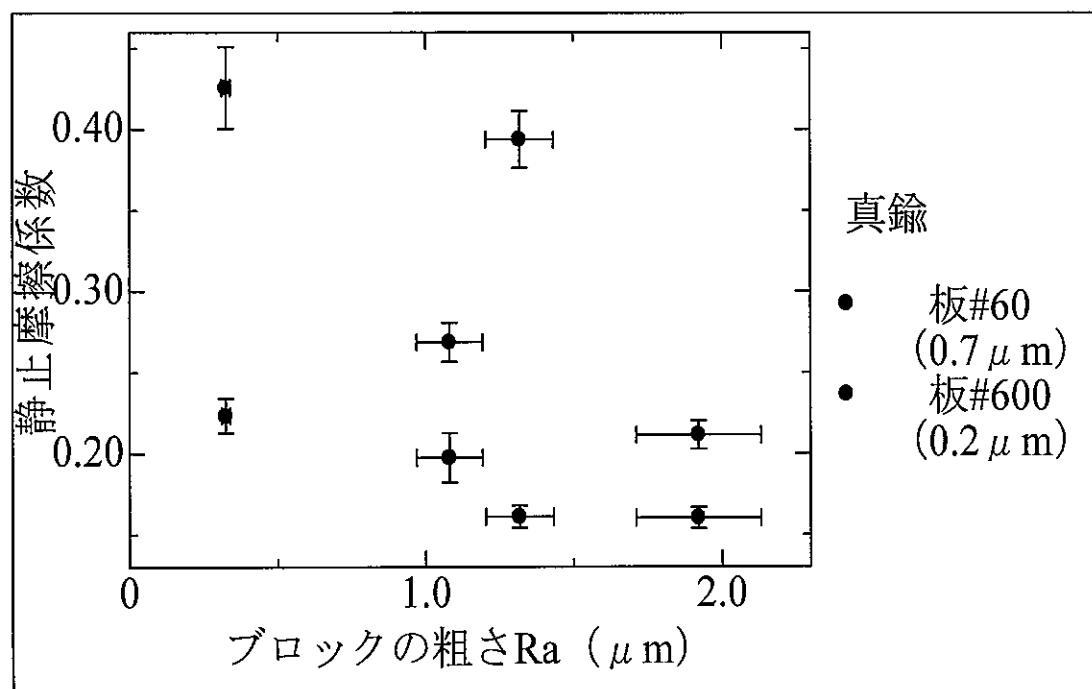
(1) 静止摩擦係数の粗さ依存性

実験 I、実験 V、実験 VIにおいて、アルミニウム・真鍮・アクリルの表面を研磨紙で表面研磨し、粗さ変えて静止摩擦係数の測定を行った。それらの結果より、アルミニウム、真鍮における板が #60、#600 のときの静止摩擦係数の粗さ依存性のグラフを示すと以下のようになつた。すると、アルミニウムにおいては、板 #60 と板 #600 の静止摩擦係数はほぼ同じ大きさになつた。また、ブロックの粗さが 2.0 (μm) の付近において静止摩擦係数は極小を示した。また、真鍮においては、板が #60 のとき静止摩擦係数はあまり変化しなかつた。一方で板 #600 のときは表面粗さに対して静止摩擦係数は大きく変化し、ブロックの粗さが粗くなると静止摩擦係数は小さくなつた。

グラフ.29 アルミニウム (#60, #600) 静止摩擦係数の粗さ依存性



グラフ.30 真鍮(#60, #600)静止摩擦係数の粗さ依存性

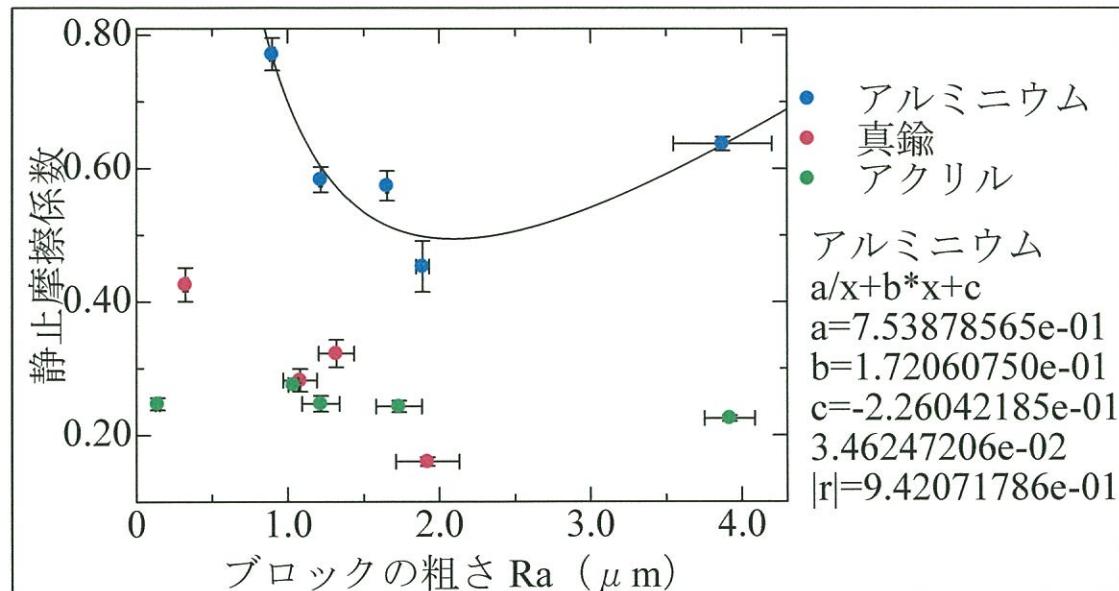


これらより、静止摩擦係数がブロックの表面粗さ R_a に依存することが分かったので、アルミニウム・真鍮・アクリルの板とブロックと同じ粗さのときの静止摩擦係数をまとめた。すると、以下のグラフのようになつた。アルミニウムに関しては、グラフにも示した様に反比例と比例を組み合わせた式によつて近似できた。このことより、静止摩擦係数に対してブロックの表面粗さ R_a が $2.0(\mu m)$ 以上の区間においては、ブロックの粗さが細かくなると静止摩擦係数が大きくなつた。また、 $2.0(\mu m)$ 以下の区間においてはブロックの粗さが大きくなると静止摩擦係数が大きくなつた。

真鍮においては、同じ粗さのとき、測定した範囲である R_a が $2.0(\mu m)$ 以下において、表面粗さが大きくなると、静止摩擦係数が小さくなつた。

アクリルにおいては、表面の粗さが測定した範囲である R_a が $4.0(\mu m)$ 以下において、表面の粗さが変化しても静止摩擦係数はあまり大きく変化なかつた。

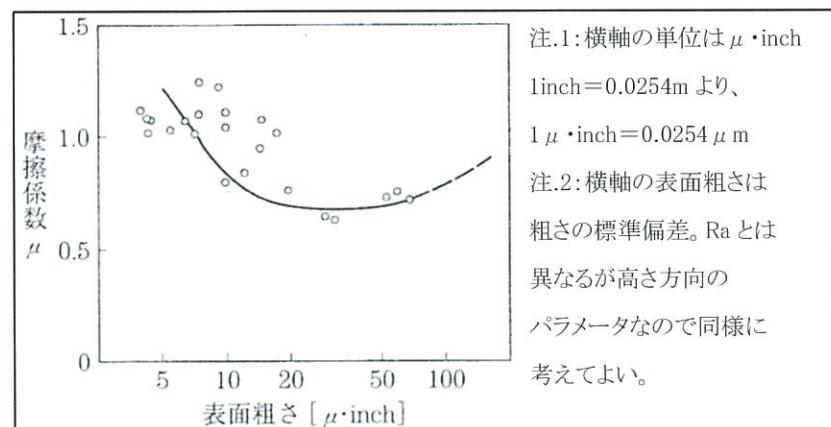
グラフ.31 アルミニウム・真鍮・アクリルの静止摩擦係数の粗さ依存性まとめ(同じ粗さ)



「摩擦の物理」[10]より、以下の図.19 にも示したように、銅の間の静止摩擦係数は表面が細かい範囲では表面粗さが粗くなると静止摩擦係数は小さくなる。そして、ある一定の表面粗さで極小を示した後、表面粗さが粗くなるにつれ静止摩擦係数は大きくなる。

「トライボロジー入門 摩擦・摩耗・潤滑の基礎」[8]によると静止摩擦係数の粗さに関する説には凹凸説、凝着説の2種類が存在するという。

凹凸説とは、凹凸の引っ掛けりによって静止摩擦力が生れるといったものである。凝着説は摩擦が起こっている接触面同士の凝着によって静止摩擦力が起こるものとされている。



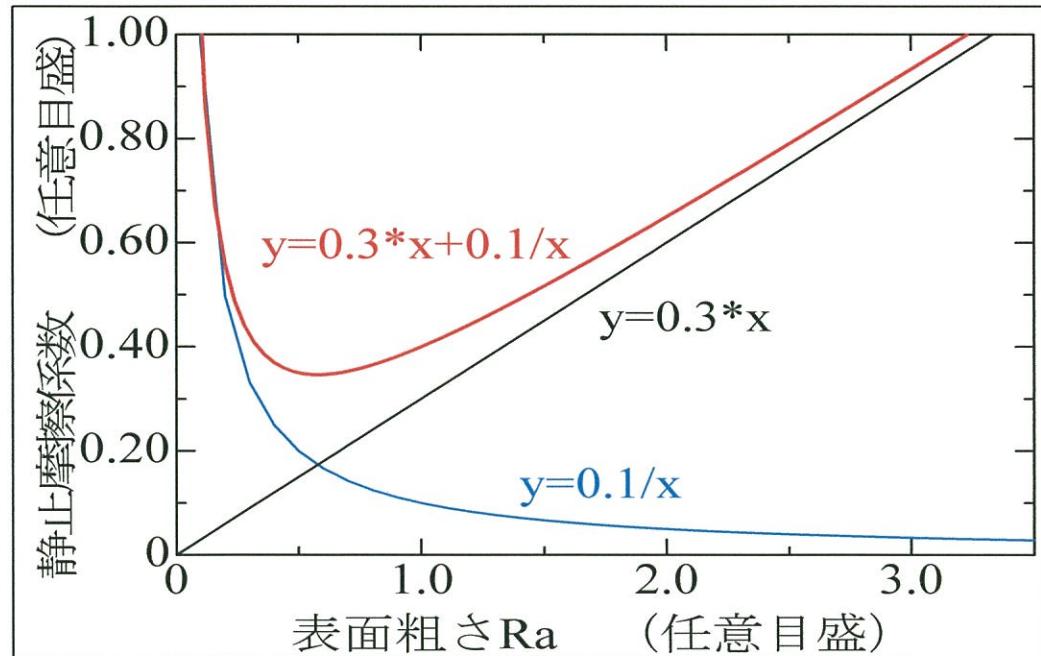
接觸面間の粗さが大きくなると凹凸が大きくなり、引っ掛けりが起こりやすくなる。また、表面の凹凸に引っかかった後、物体は凹凸を越えようとする。凹凸を超えるとき、接觸面間で物体を変形させると思われる。その物体を変形させために、降伏応力が小さいほうが接觸面が変形しやすいため、接觸面が増える。すると接觸面での凝着が大きくなり、静止摩擦力が大きくなると考えられる。これらより、表面粗さが粗くなると静止摩擦力が大きくなり、静止摩擦係数も大きくなることの説明がつく。また、アモンタン・クーロンの法則において、静止摩擦力は見かけの表面積によらないこととなっている。[8]しかし、表面粗さが変化すると真の接觸面積も変化する。さらに、下の図.20 に示す用

に、上の物質と下の物質が接触し、凝着している状態において、上からの荷重によって接触面同士が凝着し、引っ張られる。すると引っ張られる力に耐え切れなくなり、固定されていない上の物体だけ動き出す。これが凝着による静止摩擦力のメカニズムとなると考えられる。

つまり、板、ブロックの山となっている部分が接触していてその面積が真の接触面積となる。凝着説は、その真の接触点の凝着によって摩擦力が生まれている。表面粗さが小さくなると真の接触点が増加し、真の接触面積も増加し、凝着しやすくなる。このことより、表面粗さが細かくなると静止摩擦力が大きくなり、静止摩擦係数も大きくなることの説明がつく。

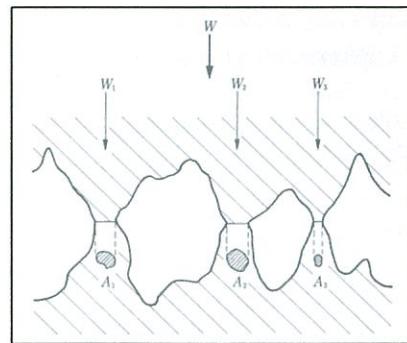
ここで表面の凹凸と凝着の寄与による静止摩擦係数の粗さ依存性について図.21 で示す。表面の凹凸による静止摩擦係数は表面粗さ Ra に対して黒色の直線で示したように比例の関係で大きくなるとする。表面の凝着による静止摩擦係数は表面粗さ Ra に対して青色の曲線で示すように反比例の関係となっているとする静止摩擦係数に対する寄与はこれらの和であるので、静止摩擦係数は赤色の曲線のような関係になる。これより、アルミニウムは極小付近の振る舞い、真鍮は極小点よりも小さい範囲に対応していることが分かる。

図.21 表面の凝着と表面の凹凸による静止摩擦係数



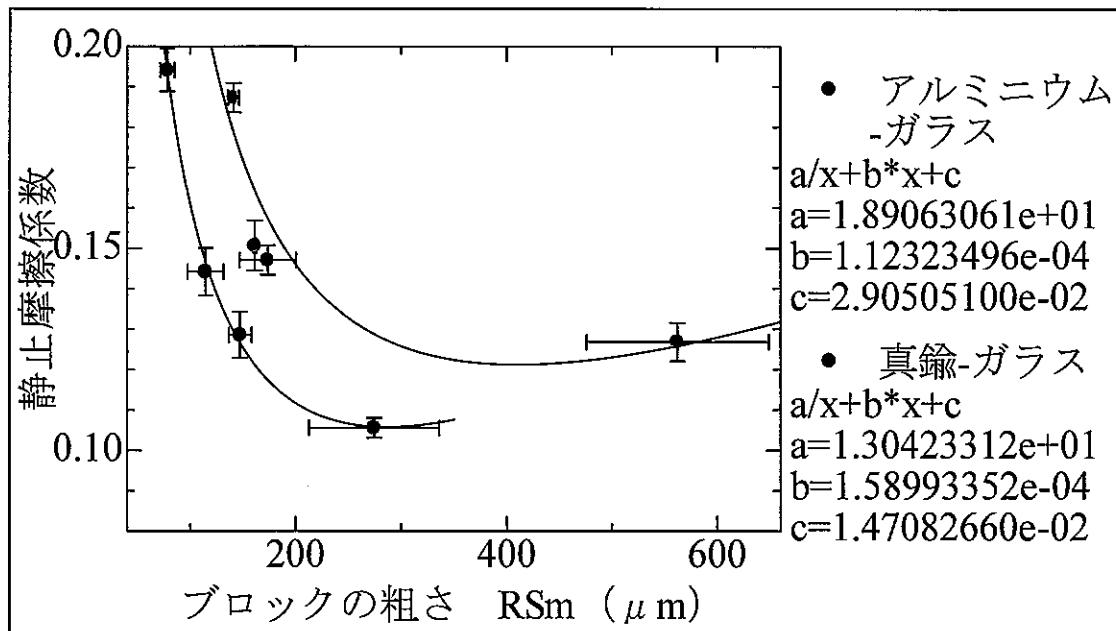
実験 V においてアルミニウム・真鍮とガラスの静止摩擦係数の測定を行った。ガラスは、凹凸が少なく表面が滑らかであることが Ra の測定結果 ($0.019 \mu m$) より分かった。表面の凝着は真実接触面積によって決まるので、表面の接触面積を決める水平方向の粗さのパラメータである RSm で考える

図.20 荷重と真実接触点の関係



ほうが良い。ブロックの要素の平均長さ RSmと静止摩擦係数の関係性をまとめると以下のグラフ.32 のようになった。静止摩擦係数に対してブロックの粗さ RSmに対して、RSmが小さくなると静止摩擦係数は大きくなった。 $y = \frac{a}{x} + bx + c$ の関数形で実験結果をフィッティングしたのが、グラフ.32 の曲線である。どちらの結果もこの曲線で合わせることができることから、摩擦係数が表面の凝着と凹凸による寄与の和で表せることがわかった。

グラフ.32 アルミニウムブロック、真鍮ブロック・スライドガラスの静止摩擦係数の RSm依存性



(2) 静止摩擦係数に対する接触面の摩耗の影響

実験IVにおいて測定回ごとの静止摩擦係数の変化の測定を行った。

測定回ごとに研磨を行ったものは初回のみしか研磨を行わなかったものより#60において静止摩擦係数が 0.15 大きくなった。これは測定回ごとに研磨したことにより表面の粗さが一定に保たれたのだと思われる。ただ、#600においては静止摩擦係数が 0.02 小さくなった。#60 に比べて表面が滑らかであるため測定によって表面が削れにくく、初回に研磨した状態とあまり変化しなかったと思われる。

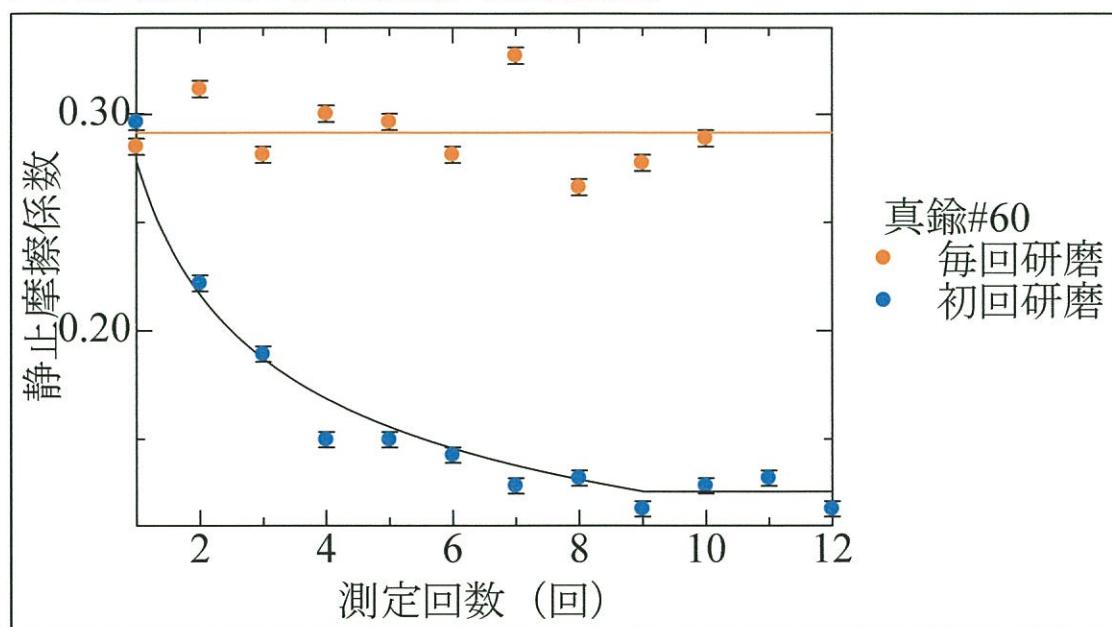
以下のグラフに、測定回ごとの静止摩擦係数の変化をまとめた。これより、明らかに初回のみ研磨を行ったものでは静止摩擦係数が一定にの割合で小さくなつて、5 回目ぐらいの測定で値が安定し始めた。

一方で、#600においては、毎回研磨を行つたほうが値の散らばりが小さくなつたと思われる。しかし、#600 ぐらいの細かい研磨紙となるとわずかな力の入れ具合で表面の粗さが変化しやすいた

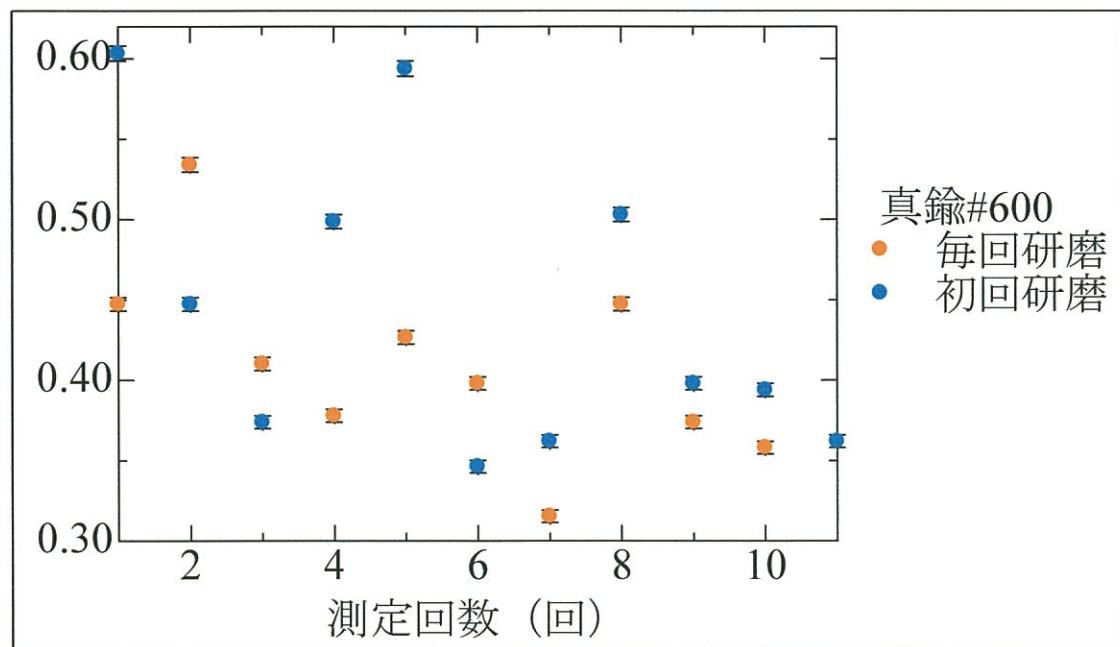
め、毎回研磨の#60に比べて値の散らばりが大きくなっていると考えられる。

これらのことより、測定面が粗いときは測定面の研磨を測定回ごとに行い、面の状態を一定に保つ必要があると考えられる。

グラフ.33 測定回ごとの静止摩擦係数の変化(真鍮#60)



グラフ.34 測定回ごとの静止摩擦係数の変化(真鍮#600)

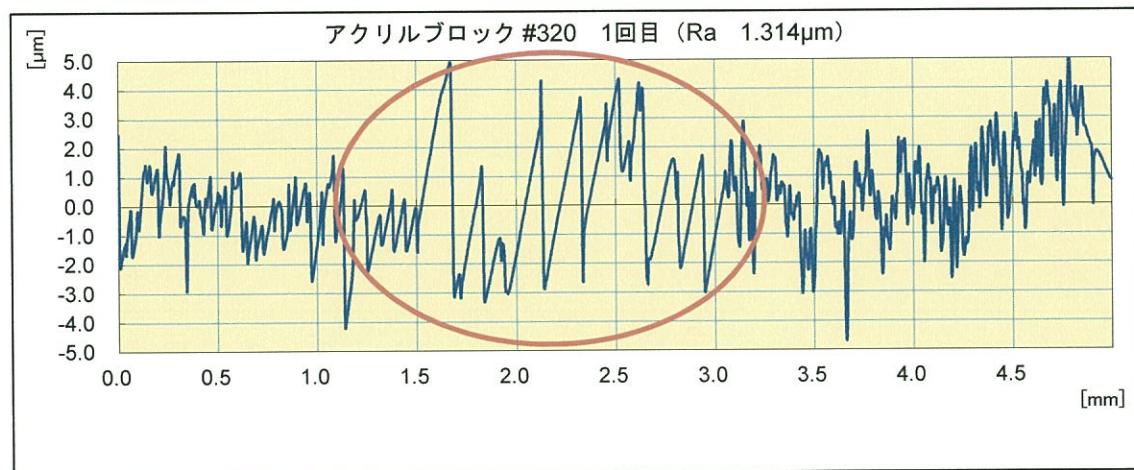


アクリルは、アルミニウム・真鍮と比較してブロック、板が同じ粗さのとき、表面粗さ Ra に対して静止

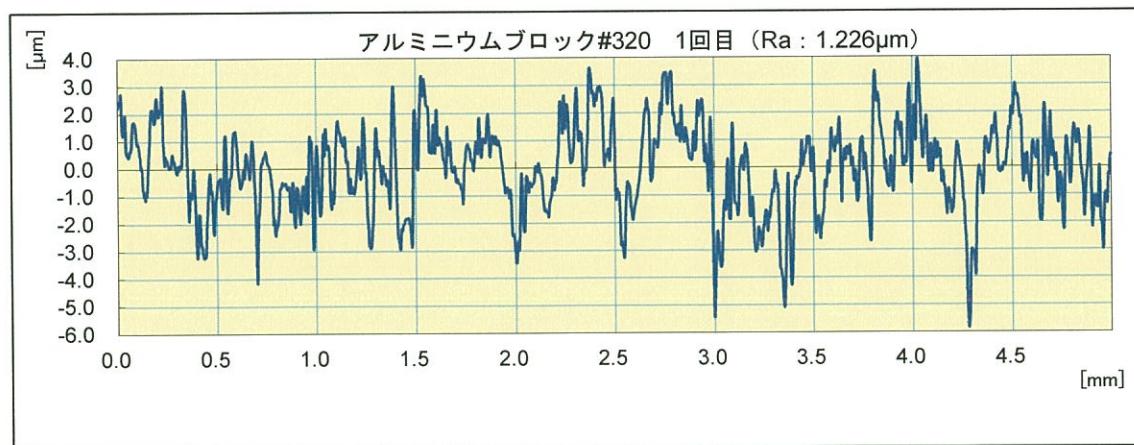
摩擦係数はあまり変化しなかった。以下に示したアクリルブロック#320 1回目の表面粗さの測定結果のグラフにおいて赤色の円で囲んだのように研磨にむらがみらる表面粗さの測定結果が多数存在した。目視で研磨終了後、ブロック・板に傷がついていないか研磨が均一に行われているかの確認を行った。だが、アルミニウム・真鍮と比較してアクリルは元が透明であり、研磨終了後には白く霞んでしまうため確認が難しかった。このことより、研磨によるむらの存在がアクリルの凹凸や凝着による影響よりも大きかったため静止摩擦係数はブロックの粗さによってあまり変化しなかったのだと考えられる。また、アルミニウム・真鍮と比較してアクリルは柔らかいため摩耗しやすかったのだと考えられる。

さらにアクリルの表面の形状は山の幅が広いのに対して金属では狭い。つまり、尖った突起である。そのために滑りによって突起が破壊・摩耗して摩擦係数が回数によって小さくなると解釈できる。つまり折れやすい突起が2~3回の測定回で折れるので、その後、あまり摩擦係数は変化しないと考えられる。

グラフ.35 アクリルブロック#320 1回目 表面の様子



グラフ.36 アルミニウムブロック#320 1回目 表面の様子



(3) 静止摩擦係数に対する表面の溝の影響

実験Ⅲにおいて研磨の方向を一定にして、表面に一定方向の溝をつけ静止摩擦係数の測定を行った、すると、研磨の方向がブロックと板で垂直のときより、同一のときに静止摩擦係数は大きくなつた。先ほどの考察で述べたが真鍮#60においては静止摩擦係数に対して表面の凹凸よりも表面の凝着による効果が大きい。図.22,23 に示したようにブロックと板では溝の周期がわずかに違うため研磨の方向が同一のときよりも研磨の方向が垂直のときのほうが真実接触点が増加すると考えられる。

また、溝をつけたほうがランダムに研磨を行った状態よりも大きくなつた。これは、ランダムに研磨した状態では図.24,25 に示したように表面の凹凸が一致した状態でのみ凝着が発生する。一方で、研磨の方向をそろえると図.22,23 のように山が一致する部分が増加し、真実接触面積が広くなるのだと考えられる。

グラフ.37 研磨の方向による静止摩擦係数の変化

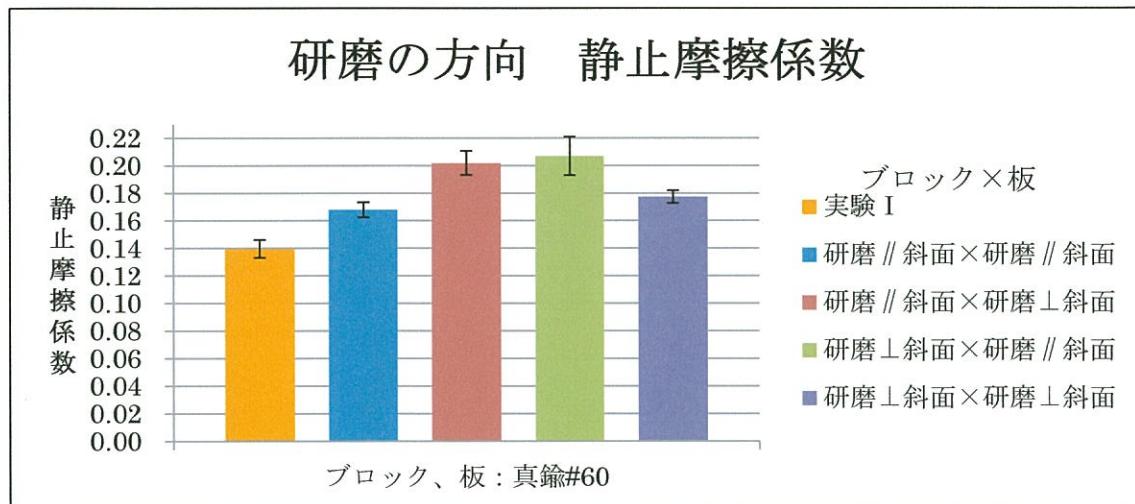


図.22 研磨の方向が同一のときの真実接触点 図.23 研磨の方向が垂直のときの真実接触点

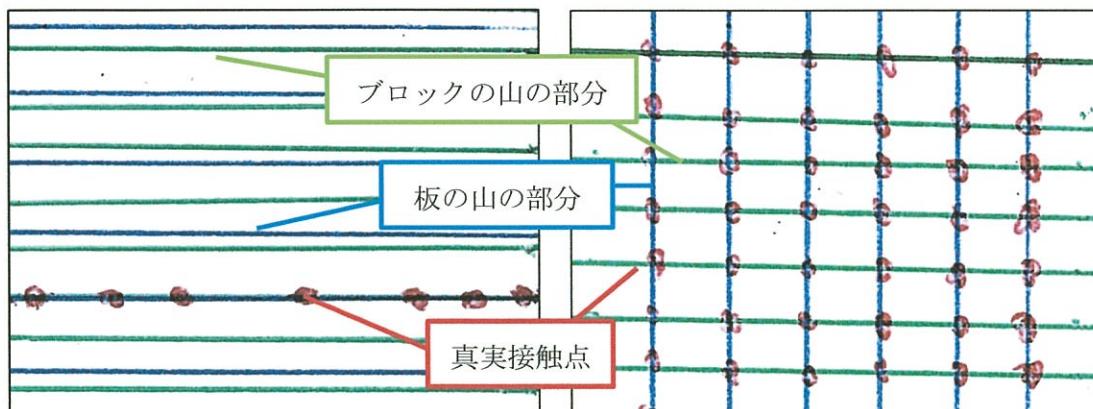


図.24 ランダム研磨時の真実接触点(俯瞰)

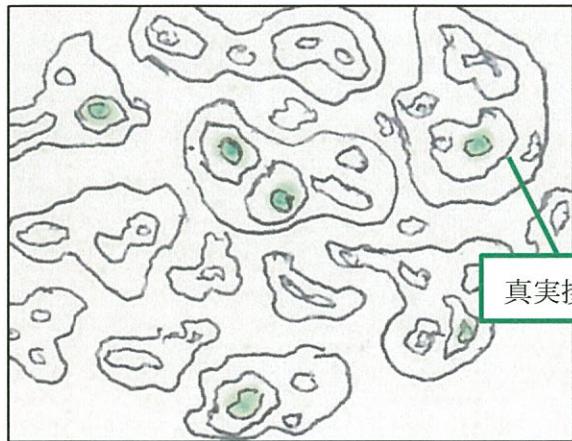
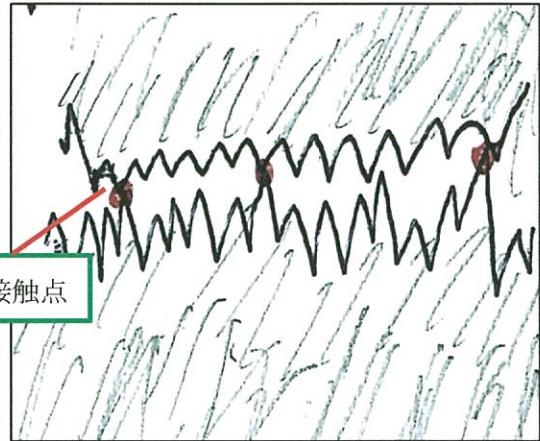


図.25 真実接触点と表面の凹凸の関係(断面)



(上記の図において山の高さは等高線にして表した。)

(4) 最大静止摩擦力の荷重依存性

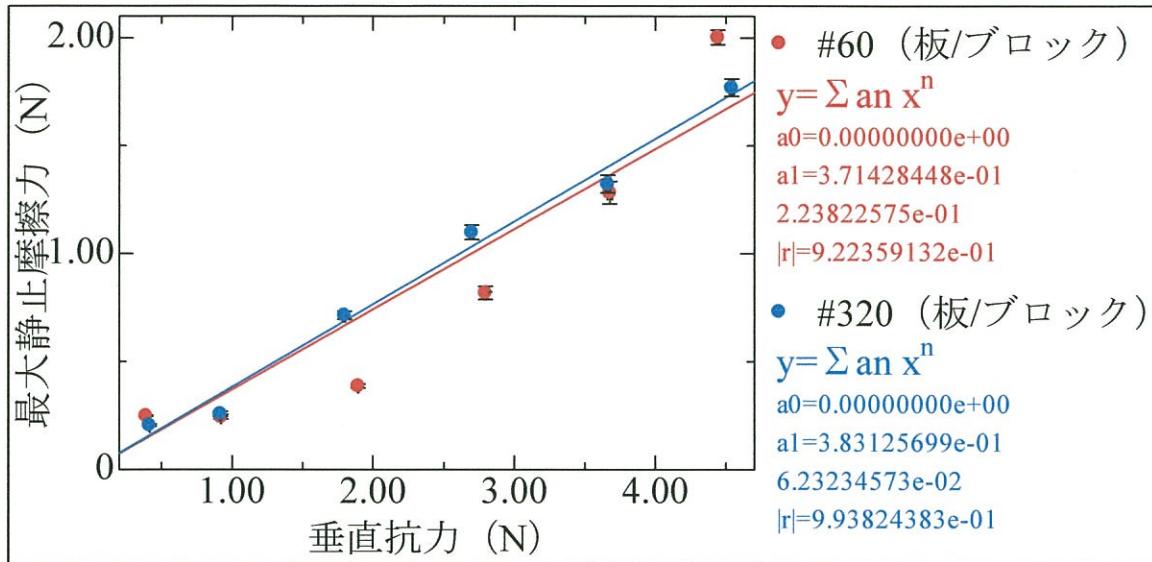
アモントン・クーロンの法則より、静止摩擦係数は荷重によらないとされている。しかし、実験Ⅱにおいてアルミニウム最大静止摩擦力の荷重依存性について測定を行うと、荷重によって静止摩擦係数は変化した、板/ブロック#60においては、荷重が 0.047(kg)のときと、0.197(kg)のときでは、静止摩擦係数はおよそ 0.40 变化した。それらの測定結果より、最大静止摩擦力の荷重依存性は、アルミニウム#320において、教科書に書かれるような、静止摩擦力と垂直抗力の関係の式(1,1)が成り立つような 1 次式で近似されるようになった。[6]

しかし、アルミニウム#60においては、式(1,1)で書かれるような静止摩擦力の式で近似を行うと、大きく離れてしまった。

これは、ブロック、板の表面が#320 と比較して#60 のほうのが粗いため最大静止摩擦力に対する表面の凹凸の寄与が大きくなつたためアモントン・クーロンの法則に当てはまらずに近似直線から離れたのだと思われる。

また、#320においては表面の凹凸による最大静止摩擦力に対する寄与が小さいためアモントン・クーロンの法則が当てはまり近似直線を引いたようになつたのだと考えられる。

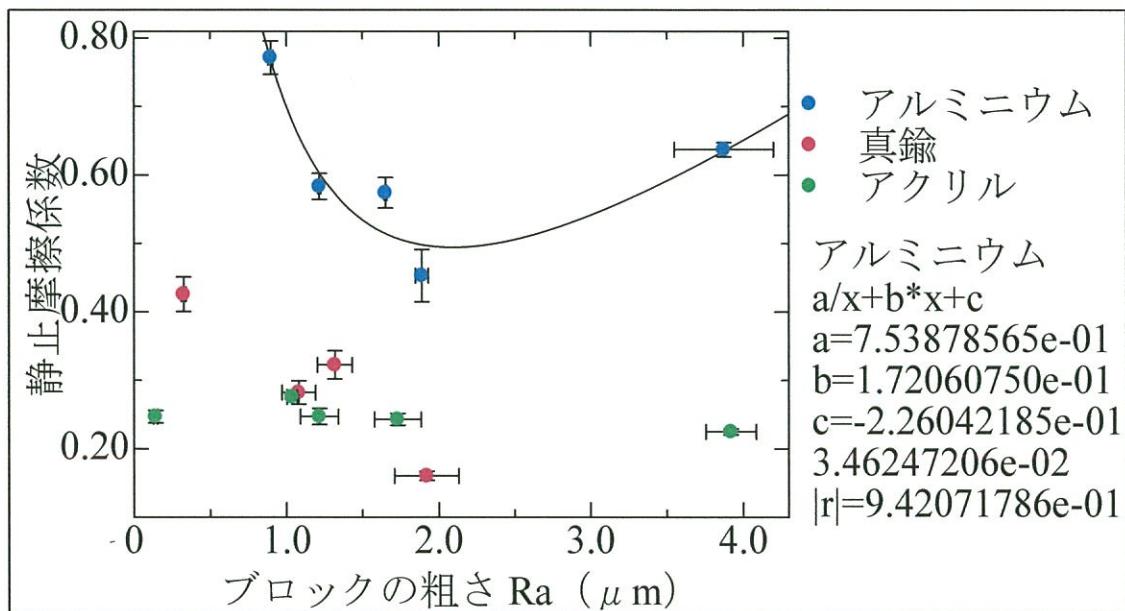
グラフ.38 アルミニウム(#60、#320)の静止摩擦力と垂直抗力の関係性



(5) 静止摩擦係数の物質依存性

ブロックと板の粗さ・素材が同じものでアルミニウム・真鍮・アクリルの比較をすると、アルミニウムに比べて真鍮のほうが静止摩擦係数は大きくなつた。また、真鍮とアクリルは、表面粗さが 1.0 (μm) 以下のときは真鍮のほうが、2.0 (μm) 以上のときはアクリルのほうが静止摩擦係数が大きくなつた。ブロックの粗さが 1.0~2.0 (μm) においては真鍮とアクリルの静止摩擦係数がほぼ等しくなつた。

グラフ.39 アルミニウム・真鍮・アクリルの静止摩擦係数の粗さ依存性(同じ粗さ)



「摩擦の物理」[10]より、静止摩擦係数の物質依存性は次のように求まるという。このとき、粗さを模した半径を R 、粗さの標準偏差を δz とする。

(1) 表面が粗く、 $R < 500\delta z$ となり、塑性変形となる場合

せん断強さを σ_s 、降伏応力を σ_y とそれぞれすると、静止摩擦係数は、

$$\mu_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_y} \quad (12,1)$$

で求められる。なお、引っ張り強さを σ_T とすると、ミーゼズの剪断ひずみエネルギー説の降伏理論[19]より、せん断強さとの関係は、

$$\sigma_s = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} \quad (12,2)$$

となる。このことより、式(12,1)を変形した、

$$\mu_s = \frac{\sigma_T}{\sigma_y \sqrt{3}} \quad (12,3)$$

を用いて、静止摩擦係数の計算値を求めた。

(2) 表面が平坦で $R > 1000\delta z$ となり、弾性変形となる場合

ヤング率を E 、ポアソン比を ν 、最大高さを d とそれぞれすると、

$$\mu_s = (1 - \nu^2) \frac{\sigma_s d}{E \delta z} \sqrt{\pi R} \quad (12,4)$$

で求められる。これらの式を用いて、静止摩擦係数を求めた。なお、式(12,4)中の d , δz , R に関しては、表面粗さに起因する値であるため定値として扱い以下の式を用いて求めた。

$$\mu_s' = \frac{\mu_s \times \delta z}{d \sqrt{R}} = (1 - \nu^2) \frac{\sigma_s}{E} \sqrt{\pi} \quad (12,5)$$

すると、表のようになった。塑性変形下の計算値は、アルミニウムより真鍮の静止摩擦係数のほうのが小さく、さらにアクリルのほうのが小さい値になり、実験結果に対応している。つまり、測定対象物の引っ張り強さ、降伏応力に静止摩擦係数は関係し、引っ張り強さの大きく、降伏応力が小さい物質ほど静止摩擦係数が大きくなることがわかる。

表.53 同種物質間の静止摩擦係数の計算値と機械的物性値

機械的物性値・計算値	アルミニウム	真鍮	アクリル
塑性変形下の静止摩擦係数 μ_s	2.89	1.90	0.67
弾性変形下の静止摩擦係数 μ_s' ($\times 10^{-3}$)	2.56	2.05	19.81～42.09
引っ張り強さ σ_T ($\times 10^6$ (N/m ²))[15]	200	230	75
降伏抗力 σ_y ($\times 10^6$ (N/m ²))[15]	40	70	65～77
ヤング率 E ($\times 10^9$ (N/m ²))[16]	70.3	100.6	1.6～3.4
ポアソン比 ν [16]	0.345	0.350	0.350

(6) 静止摩擦係数に対する潤滑剤の効果

実験VIIにおいてアルミニウム・真鍮の静止摩擦係数に対する液体潤滑剤(純水・エタノール・グリセリン・菜種油)の効果を、実験VIIIにおいて静止摩擦係数に対する固体潤滑剤(チョーク・鉛筆・極圧二硫化モリブデングリース)の効果を測定した。

液体潤滑剤のうち菜種油は、オレイン酸、リノール酸といった高級脂肪酸によって構成されている。これら高級脂肪酸は炭素の数が多い直鎖状の物質である。「トライボロジー入門 摩擦・摩耗・潤滑の基礎」[8]によると、これら高級脂肪酸はファンデルワールス力により金属表面に、単分子膜や多分子膜を形成するという。これらの膜が形成されると、脱離しにくいため摩擦を減少させる効果が存在するという。そのため菜種油において静止摩擦係数が小さくなったのだと考えられる。

また、液体潤滑剤による潤滑の形態には乾燥潤滑、境界潤滑、液体潤滑の3種類存在する。そして潤滑剤の厚さがもの薄いと境界潤滑状態となり静止摩擦係数は大きくなるという。[8]実験VII③液体潤滑剤の存在する厚さによる静止摩擦係数に対する効果において、加重をかけたものと1分間円柱形おもりを置かなかった加重なしを測定し潤滑剤の厚さを変化させた。

すると、アルミニウム#60 純水なし、真鍮#60 菜種油においては加重なしよりも加重ありのほうのが静止摩擦係数が大きくなつた。それ以外においては加重なしよりも加重ありのほうのが静止摩擦係数が小さくなつた。加重ありの静止摩擦係数 μ_L 、加重なしの静止摩擦係数 μ_n それぞれより、静止摩擦係数の差 μ_g を、

$$\mu_g = \mu_n - \mu_L \quad (13)$$

を用いて求めた。すると以下の表.54、グラフ.40 のようになった。

すると、アルミニウム、真鍮においてほぼすべての潤滑剤で静止摩擦係数の差が大きくなつたのは#600 のときとなつた。これは、表面の粗さが小さいため、円柱形おもりを 1 分間置くと、表面の凹凸に十分に潤滑剤がたまらず流れ出てしまうことが起きていたのだと思われる。

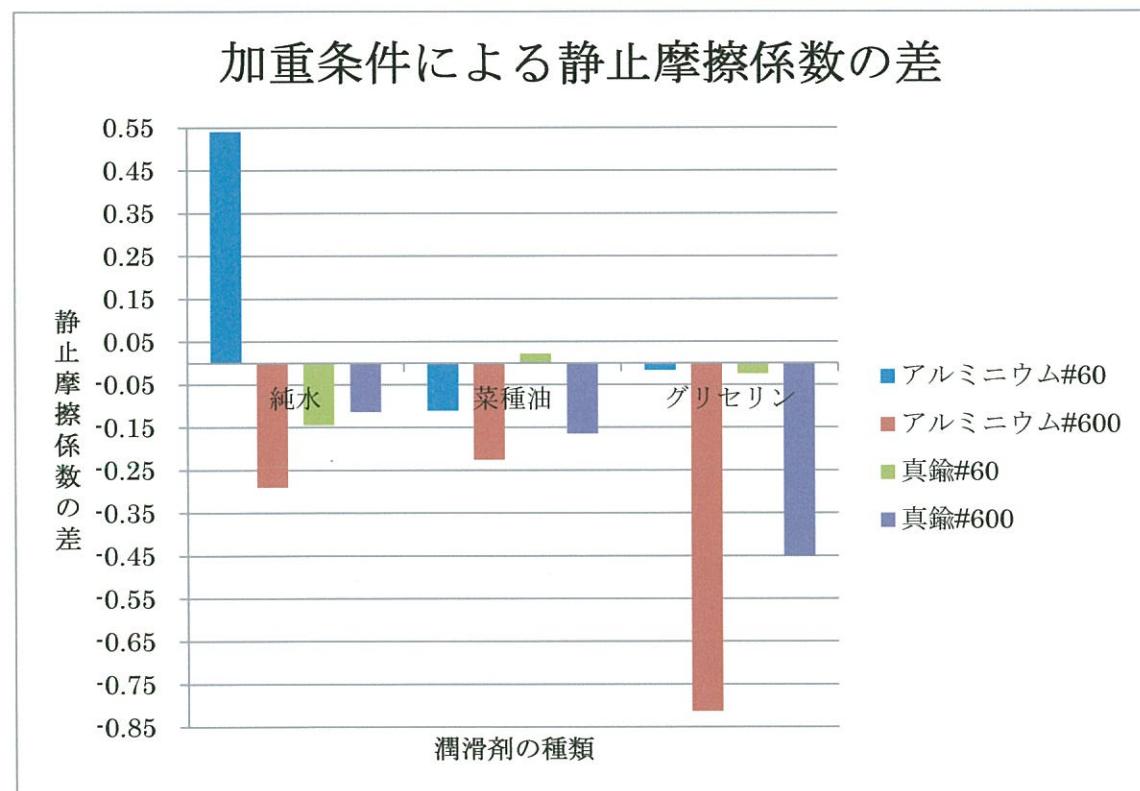
ブロック、板の間の潤滑剤が薄くなると、境界潤滑状態となり、ブロック、板が接近したため表面の凹凸や凝着による摩擦力が発生し、静止摩擦係数が大きくなると思われる。

加重ありの状態では、円柱形おもりを 1 分間乗せたことにより、ブロックと板の間の潤滑剤が少なくなり、境界潤滑状態になつてゐたと考えられる。そのため加重なしと比べて静止摩擦係数が大きくなつたのだと思われる。

表.54 潤滑剤の存在による静止摩擦係数の差

静止摩擦係数の差		アルミニウム(板、ブロック)		真鍮(板、ブロック)	
		#60 (3.9 μ m、 2.4 μ m)	#600 (0.5 μ m、 0.9 μ m)	#60 (0.7 μ m、 1.9 μ m)	#600 (0.2 μ m、 0.3 μ m)
潤滑剤 の種類	純水	0.54	-0.29	-0.14	-0.11
	菜種油	-0.11	-0.23	0.02	-0.17
	グリセリン	-0.02	-0.81	-0.03	-0.45

グラフ.40 加重条件による静止摩擦係数の差



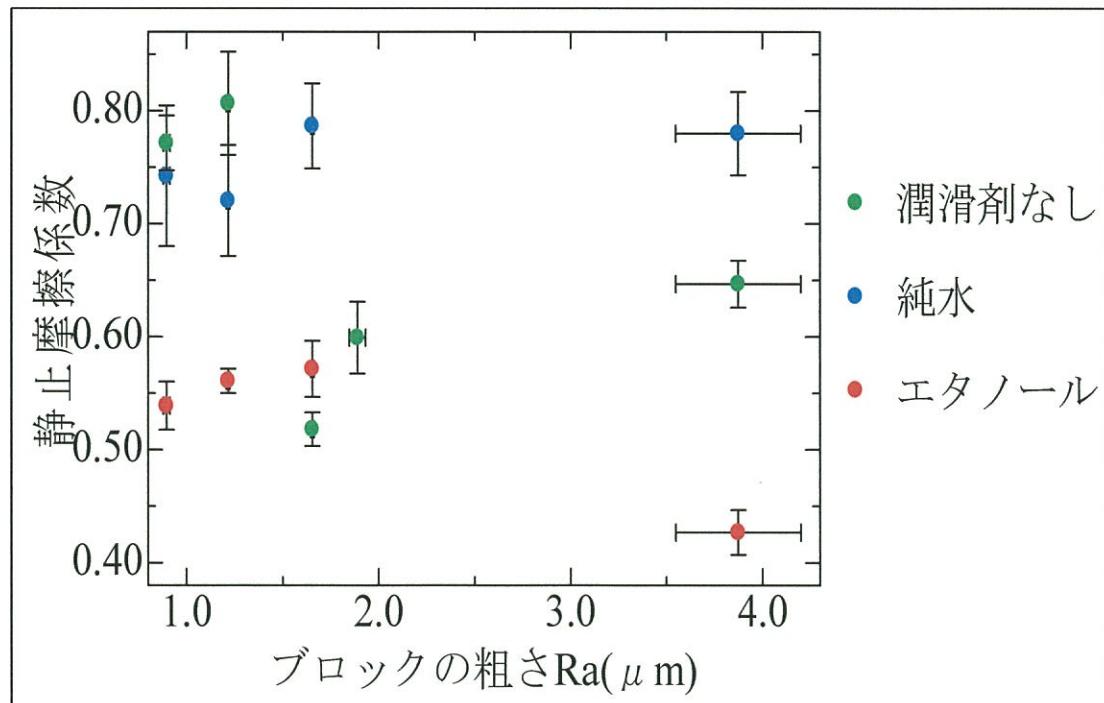
実験VII①アルミニウム・真鍮の静止摩擦係数に対する液体潤滑剤(純水・エタノール)の効果より、アルミニウムの間に純水が存在する状態において、純水がない状態と比べて静止摩擦係数はあまり大きく変化しなかった。一方で、アルミニウムの間にエタノールが存在するときは静止摩擦係数が0.2程小さくなつた。これは、以下の表に示したように、純水に比べてエタノールの表面張力が小さいため(表.55 参照)、アルミニウムブロックと板の隙間にエタノールが入り込めたためだと思われる。

また、真鍮の間に純水が存在する状態においては、純水がない状態に比べて静止摩擦係数は同程度か、やや大きくなつた。また、真鍮の間にエタノールが存在する状態に関しても純水がある状態と同様のようであった。これは、真鍮がアルミニウムに比べて、真鍮とアルミニウムがほぼ同じ面積で斜面に接しているのにもかかわらず真鍮のほうのが重いため、斜面にかかる圧力が大きくなり、純水やエタノールが板とブロックの間に入り込みにくかつたからだと考えられた。ただ、純水やエタノールどちらにおいてもブロックの粗さが粗くなると静止摩擦係数は小さくなつた。これは、液体が接触面間に存在しない場合と同じ振る舞いである。

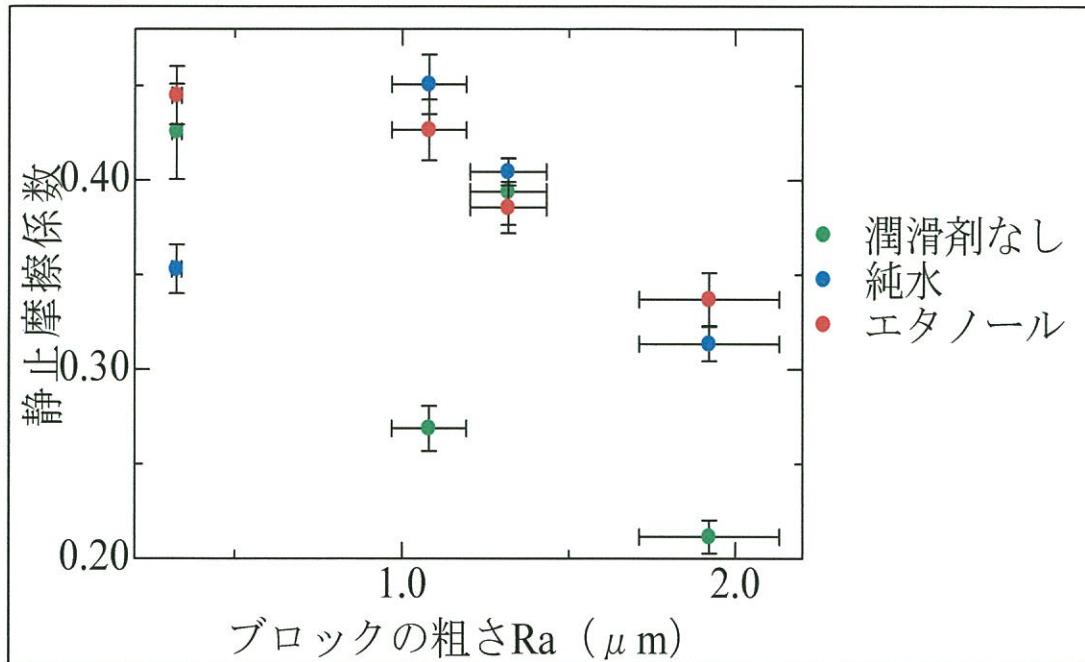
表.55 純水、エタノールの表面張力 [12]

液体の種類	純水	エタノール
表面張力(mN/m)	72.75	22.40

グラフ.41 アルミニウムの静止摩擦係数に対する純水・エタノールの効果

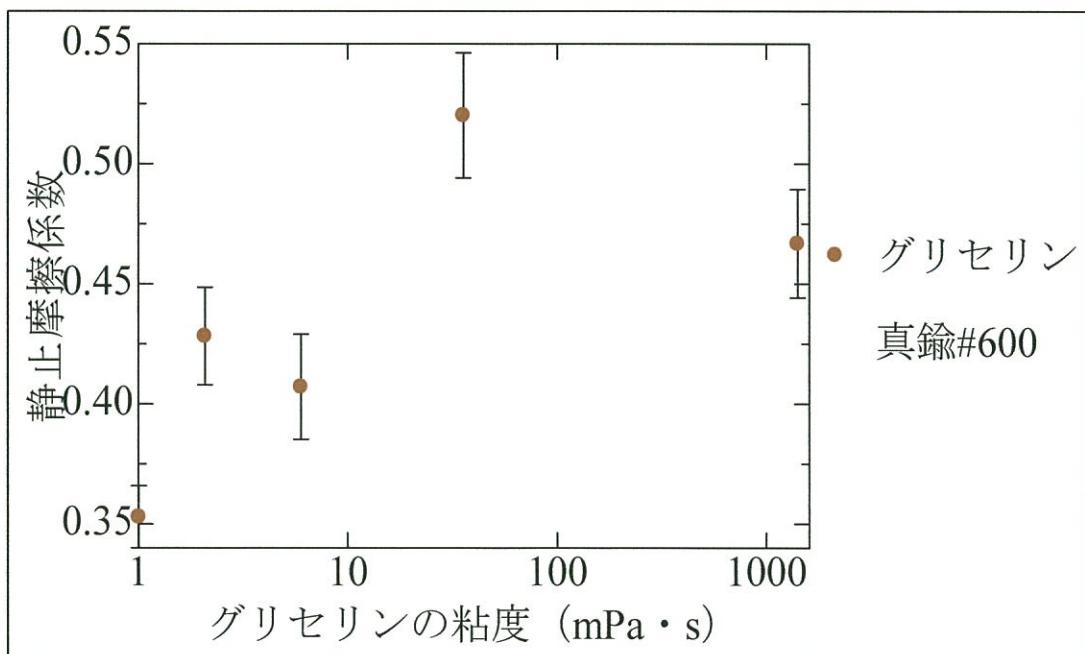


グラフ.42 真鍮の静止摩擦係数に対する純水、エタノールの効果



実験VII②真鍮(#600)の静止摩擦係数に対するグリセリンの粘度依存性の測定結果よりグリセリンの粘度と真鍮#600における静止摩擦係数をまとめると以下のグラフ.43 のようになった。粘度が大きくなると静止摩擦係数は大きくなった。これは、グリセリンの粘度が大きくなると、粘性による抵抗力が大きくなるために静止摩擦係数が大きくなったと考えられる。

グラフ.43 静止摩擦係数(真鍮#600)とグリセリンの粘度の関係性

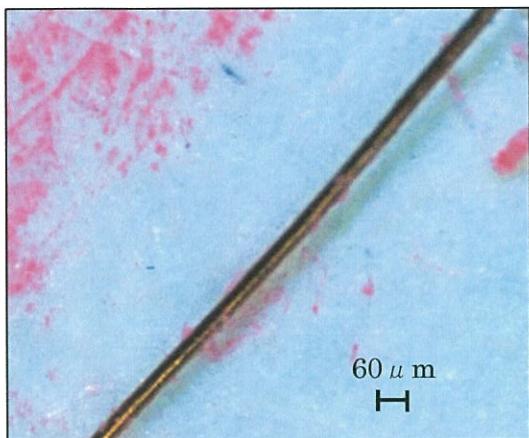


実験VIIIにおいて、静止摩擦係数に対する固体潤滑剤(チョーク・鉛筆。極圧二硫化モリブデングリース)の効果の測定を行った。これより、チョークには静止摩擦係数をとても大きくする効果が存在し、鉛筆には静止摩擦係数を小さくさせる効果がみられた。

極圧二硫化モリブデングリースは粘度が大きく粘度によって斜面方向した向きの力を粘度で支えてしまったため静止摩擦係数が大きくなつたのだと考えられる。また、ブロックや板の凹凸に極圧二硫化モリブデングリースが入り込み、接触面積が増えたため静止摩擦係数が大きくなつたのだと考えられる。

光学顕微鏡を用いてチョークの粉・鉛筆の粉を写真撮影し、銅線(直径 $60 \mu m$)と比較観察することによって粉の大きさを推定した。撮影した結果、以下の図.26,29 のような画像が得られた。それより、チョークの粉のは、 $2\sim 3 \mu m$ ないしはそれ以下の細かい粉が集まり $30 \mu m$ ほどになっているも

図.26 チョークの粉の顕微鏡写真[11]



のも存在した。これは、チョークの主成分である炭酸カルシウムは、湿気を吸い込みやすく湿気を吸い込むと塊になりやすい。また、鉛筆の粉のも、 $2\sim 3 \mu m$ ないしはそれ以下の粉が集まり、 $35 \mu m$ ほどになつていた。どちらも表面粗さ Ra よりも粉の大きさが小さいため、下記の図.27,28 のようにブロックや板の凹凸に入り込み接触面積を大きくしたために、静止摩擦係数が大きくなつたのだと、考えられる。

しかし、鉛筆の粉の主成分である黒鉛は、図.30 に示したように共有結合による正六角形の平面構造と、ファンデルワールス力で結合した面が存在する。ファンデルワールス力は共有結合に比べてとても弱い結合であるため一方方向の層状にはがれやすい。この効果が存在するため、静止摩擦係数が小さくなつたのだと考えられる。

図.27 表面をチョークの粉が覆った
状態の模式図

図.28 表面をチョークの粉で覆われて
接触した状態の模式図

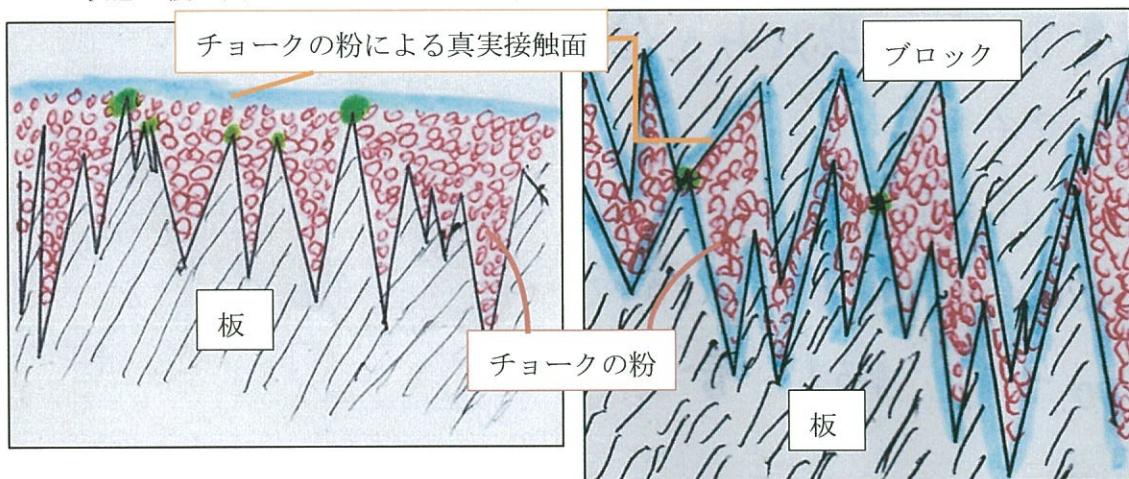


図.29 鉛筆の粉の顕微鏡写真[11]

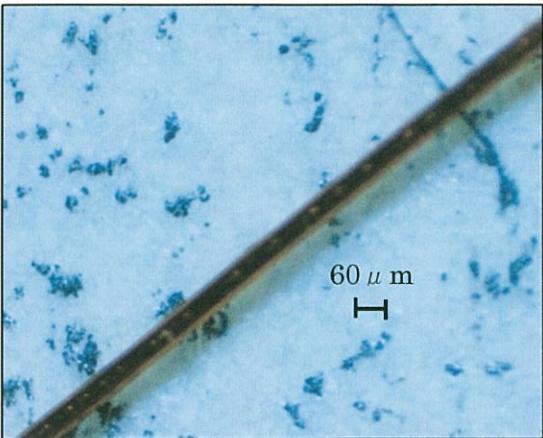
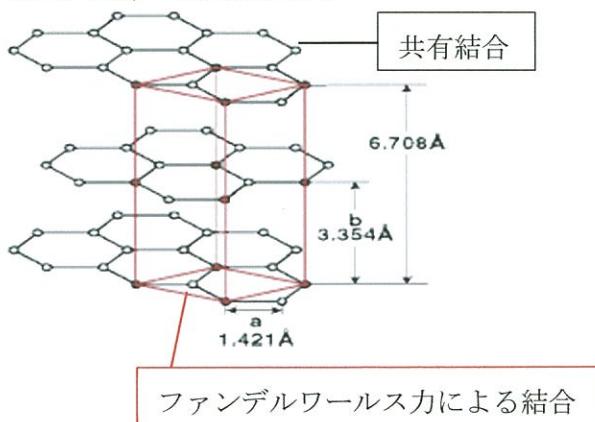


図.30 黒鉛の結晶構造[13]



(7) 傾斜法による動摩擦係数の測定結果について

① 静止摩擦係数と動摩擦係数の値

一般に静止摩擦係数よりも動摩擦係数のほうが大きいことが知られている。[1,6]これは、ブロック、板の運動しているため、真実の接触点の接触時間が短くなる。すると真実接触面積が小さくなるため、静止摩擦係数より動摩擦係数のが小さくなったのだと考えられる。

また、静止摩擦係数と動摩擦係数の差 f を求めるため、

$$f = \mu - \mu_0 \quad (18)$$

といった式を用いた。すると以下の表、グラフのようになった。

真鍮#60(潤滑剤なし)において静止摩擦係数と動摩擦係数の差は 0.01 となった。その差は、とても小さくそれぞれの誤差範囲が被った。これは潤滑剤の影響下においても同様のことが言えた。潤滑剤影響下における、静止摩擦係数と動摩擦係数の差は 0.01~0.04 となった。

ここでこの実験の妥当性を確かめるために他の測定方法で測定した結果と比較する。

四日市高校の他の班が行った引っ張り法の実験において、同じような表面での粗さ静止摩擦係数と動摩擦係数の測定値は以下の表のようになった。[17]回転ステージを用いた斜面法と同様に静止摩擦係数より動摩擦係数のほうが 0.02~0.05 小さい。のことより、回転ステージを用いた斜面法において精度高く測定されたのだと思われる。

また、動摩擦力の発生理由も静止摩擦力のときと同様、表面の凝着、表面の凹凸が主に考えられる。

物体が運動している最中には引っ張り法においてスティックスリップ現象が確認された。以下の図.31において緑色の線で示した動摩擦力は最大静止摩擦力でピークをとった後、滑り出してピークをとる場合、もしくは、青色の線で示したピークをとらずにほぼ同じ動摩擦力でブロックが動く場合の 2 つのパターンがあった。このことが静止摩擦係数と動摩擦係数の差が小さい原因となっている

と考えられる。

表.56 斜面法における静止摩擦係数と動摩擦係数の差

真鍮#60 (板:0.7 μm、ブロック:1.9 μm)		静止摩擦係数	動摩擦俫数	静止摩擦係数と 動摩擦俫数の差
潤滑剤 の 種類	潤滑剤なし	0.31±0.03	0.29±0.03	0.02
	純水	0.223±0.008	0.188±0.006	0.04
	グリセリン	0.30±0.01	0.29±0.01	0.01
	菜種油	0.24±0.02	0.22±0.01	0.02
	モリブデン	0.30±0.01	0.281±0.008	0.02

グラフ.44 斜面法における静止摩擦係数と動摩擦係数の差

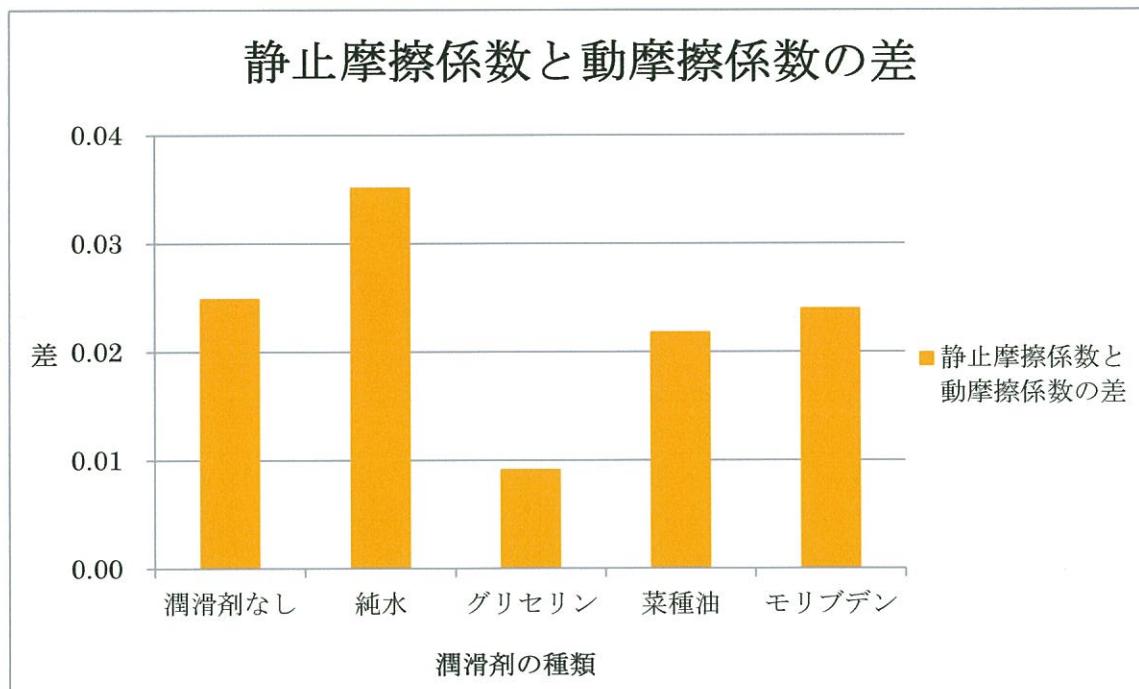
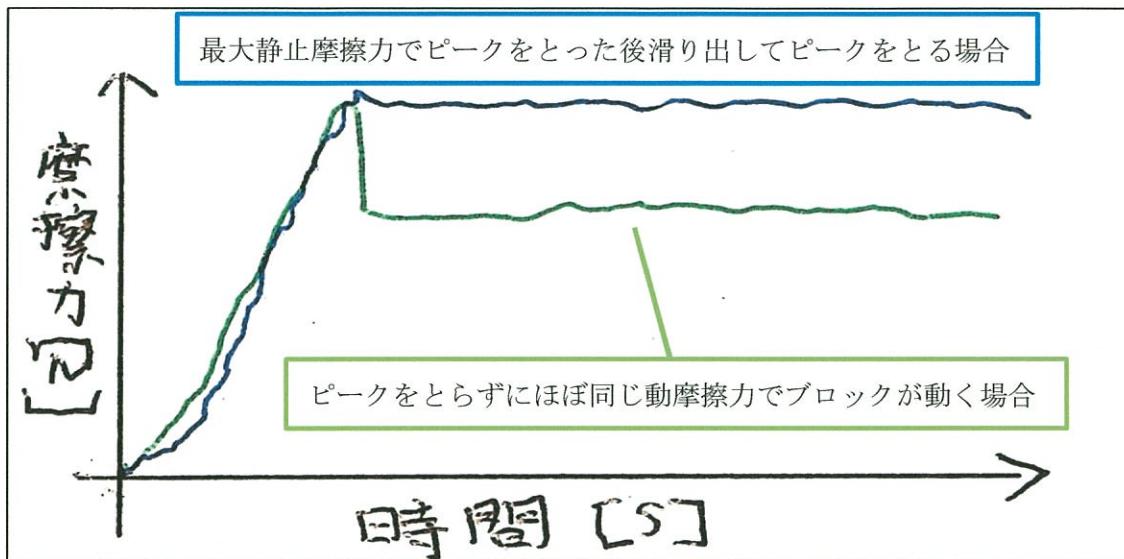


表.57 引っ張り法による静止摩擦係数、動摩擦係数の測定結果[17]

Ra (μm)	静止摩擦係数	動摩擦俫数	静止摩擦係数と 動摩擦俫数の差
0.786	0.22±0.03	0.173±0.006	0.05
0.599	0.24±0.01	0.214±0.008	0.03
0.400	0.27±0.03	0.25±0.02	0.02
0.058	0.32±0.06	0.28±0.06	0.04

図.31 引っ張り法における2つの測定パターン



② 動摩擦係数に対する潤滑剤の効果

実験IXにおいて動摩擦係数に対する液体潤滑剤の効果の測定を行った。動摩擦係数に対して液体潤滑剤は、静止摩擦係数のときと同様に、純水、菜種油のときに動摩擦係数が大きく減少した。一方で、グリセリン、極圧二硫化モリブデングリースを塗ったときに動摩擦係数は潤滑剤を塗らなかった潤滑剤なしの状態に比べてあまり変化しなかった。

グリセリン、極圧二硫化モリブデングリースに比べて、純水、菜種油のほうが粘度が小さい。極圧二硫化モリブデングリースの3回目のそくてい映像より滑り出した瞬間から、0.5秒ずつ画像を切り出して以下に示した。すると、中間地点まで、ブロックの加速が遅く、中間地点を過ぎたくらいから再び加速した。これは、潤滑剤である極圧二硫化モリブデングリースの粘度が大きいため、ブロックの加速が阻害されたためだと考えられる。一方で、潤滑剤自身が粘度によって、ブロックと板の間に存在できなくなると、ブロックは潤滑剤から解放され動摩擦力が小さくなり、加速度が大きくなつたと考えられる。

さらに、潤滑剤の塗る量が多いと動摩擦係数もある一定の速度まで潤滑剤の粘度に大きく依存してしまう。これは、潤滑剤の粘性によって、ブロックが滑ろうとするのを妨げる力が板とブロックの間に発生したためだと考えられる。

グラフ.45 動摩擦係数に対する潤滑剤の効果

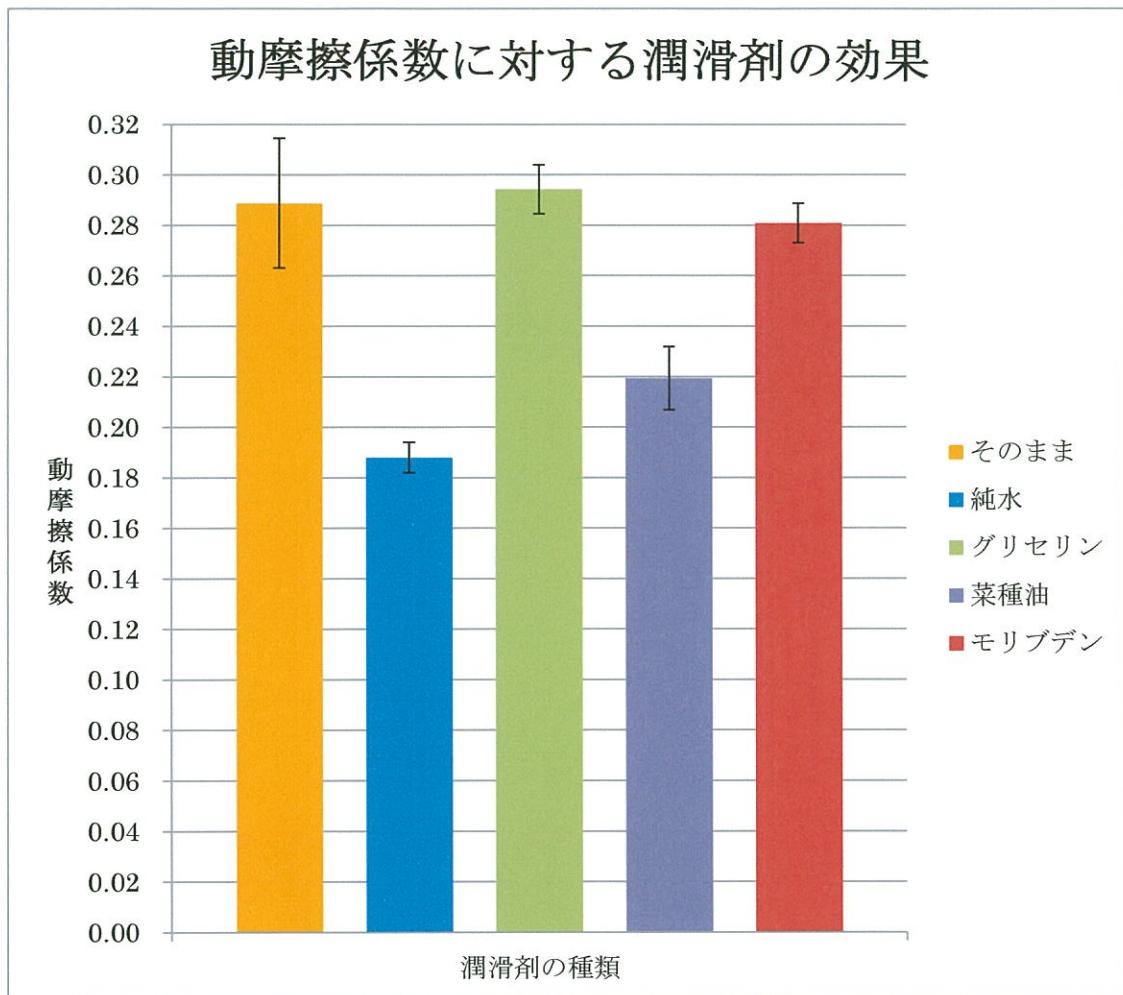


図.32 極圧二硫化
モリブデングリース
3回目 0秒

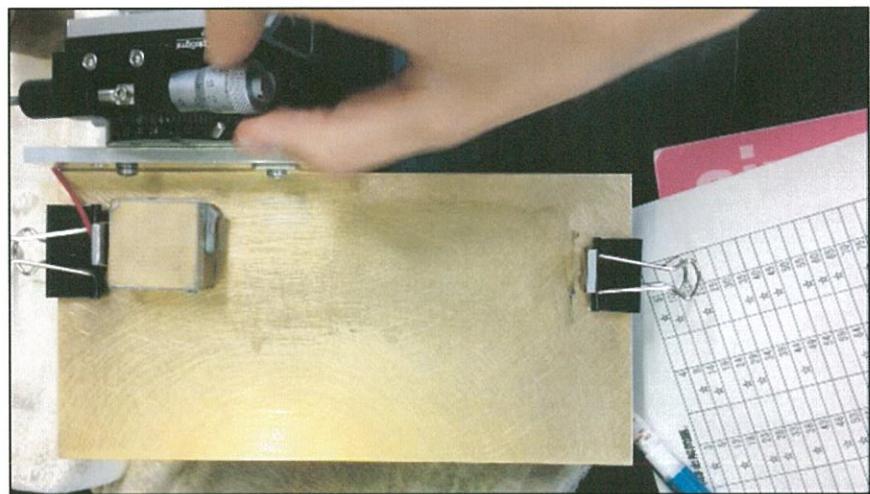


図.33 極圧二硫化
モリブデングリース
3回目 0.5秒



図.34 極圧二硫化
モリブデングリース
3回目 1.0秒



図.35 極圧二硫化
モリブデングリース
3回目 1.5秒



図.36 極圧二硫化モリブデングリース
3回目 2.0秒



5. 結論

この実験では、静止摩擦係数の粗さ依存性、荷重依存性、物質依存性、接触面の摩耗および、静止摩擦係数に対する潤滑剤の影響について調べること、そしてスマートフォンを用いて傾斜法によって静止摩擦係数と同時に動摩擦係数を測定することを目的として行った。

・粗さ依存性から分かったこと

表面粗さ R_a が小さい範囲では、表面粗さ R_a が大きくなると静止摩擦係数は小さくなり、 R_a が大きい範囲では、 R_a が大きくなると静止摩擦係数も大きくなる下向きに凸の形となった。摩擦は表面の凹凸の引っ掛かりで起こる凹凸説と、真実接触点における表面の凝着によって起こる凝着説で、この結果を解釈した。凹凸による静止摩擦係数は R_a に対して比例の関係、凝着による静止摩擦係数は R_a に対して反比例の関係を示すと仮定し、静止摩擦係数はそれらの和であるとした解析で実験結果はうまく説明できた。つまり、真実接触面積と凹凸の高さが静止摩擦係数を決める要因であることが分かった。

・荷重依存性から分かったこと

アモントン・クーロンの法則が示すように、最大静止摩擦力は垂直抗力に対して、多くの場合比例関係を示した。しかし、表面の粗さが大きいと表面の凹凸による静止摩擦係数に対する寄与が大きくなるため、そして荷重が小さいと真実接触面積が小さいために、最大静止摩擦力は荷重に対して比例しない場合もあることが分かった。

・物質依存性から分かったこと

アルミニウム、真鍮、アクリルの順に静止摩擦係数は小さくなつた。これは、真実接触点で塑性変

形するために、静止摩擦係数は引っ張り強さと降伏応力の比によって決まるためであることが分かった。引っ張り強さが大きく、降伏応力が小さい物質で静止摩擦係数が大きくなる。

- ・静止摩擦係数に対する摩耗の効果から分かったこと

表面粗さが粗いとき、そして柔らかい物質であるとき、滑り回数によって静止摩擦係数は小さくなり、摩耗効果が見られた。表面粗さの形状の実験結果から、突起の形や粗さのむらに関係していることが分かった。

- ・静止摩擦係数に対する潤滑剤の効果から分かったこと

接触面に存在する液体潤滑剤の量が多いときや表面張力が小さい潤滑剤のとき、流体潤滑状態となり、静止摩擦係数は小さくなるが、液体の粘度が大きくなると、その粘性による抵抗力によって静止摩擦係数は大きくなる。ファンデルワール力で結合した面が存在する黒鉛、は静止摩擦係数を小さくし、小さい粉になっているチョークは表面の凹凸に入り込み、真実接触面積が大きくなるので、静止摩擦係数を大きくすることが分かった。

- ・傾斜法による動摩擦係数の測定

身近に使われるスマートフォンを用いて動画撮影した映像を解析することで、傾斜法でも動摩擦係数と静止摩擦係数を同時に測定できた。測定した動摩擦係数と静止摩擦係数の値の差は、文献値と比べて小さかったが、引っ張り法による測定値と一致したので、この実験の表面粗さでは妥当な値であることが分かった。小型回転ステージに載せた板での滑り距離が 13cm 程度なので、スマートフォンのカメラで動画撮影ができたといえる。

6. 共同実験者

今西優果(器具組み立て、データ入力)

岡本直大(器具組み立て、実験測定)

中村史香(器具組み立て、データ入力、実験測定、研磨)

丹羽英人(器具組み立て、データ処理、表面粗さ測定)

実験指導及び助言

公益財団法人豊田理化学研究所フェロー 中村新男先生(実験指導)

三重県立四日市高等学校教諭 桜井景子先生(助言)

7. 参考文献

- [1] チャート式シリーズ新物理 著者:都築 嘉弘 数研出版
- [2] 駿河精機 HP 手動傾斜・ゴニオ・回転ステージ 回転ステージ すり合わせタイプ
<http://jpn.surugaost.jp/product.php?n=020300609>
- [3] 実験データを正しく扱うために 化学同人編集部 2007年 化学同人
- [4] 実験データ解析法 吉澤康和著 1989年 共立出版
- [5] MiSUMI C ナビ
http://www.misumi.co.jp/assy/tech/book_173.htm
- [6] 物理 著者:高木 堅太郎 植松 恒夫 編 2014年 啓林館
- [7] 地上観測所施設情報 2007年位置情報&施設機器の高さ 重力加速度
http://www.roy.hi-ho.ne.jp/ssai/mito_gis/gwos2007.htm
- [8] トライボロジー入門 摩擦・摩耗・潤滑の基礎 岡本純三 中山景次 佐藤昌夫 共著 2003年 幸書房
- [9] RSm、PSm、WSm 要素の平均長さ | 線粗さのパラメータ | 線粗さとは | 形状測定や表面の粗さに関する疑問を解決！「粗さ」入門.com:株式会社キーエンス
http://www.keyence.co.jp/microscope/special/arasa/line/tab04_a.jsp
- [10] 摩擦の物理 松川宏 著 岩波書店
- [11] チョーク・鉛筆(6B)の粉の顕微鏡写真 公益財団法人豊田理化学研究所中村新男先生による。
- [12] 一般社団法人アルコール協会 エタノール水溶液の表面張力・粘度
http://www.alcohol.jp/expert/list/03chouryoku0_50.html
http://www.alcohol.jp/expert/list/03chouryoku60_100.html
http://www.alcohol.jp/expert/list/02nenchaku0_50.html
- [13] 日本黒鉛 黒鉛とは?
http://www.n-kokuen.com/j/whatis/wht_keshou.gif
- [14] Dow OPTIM™ Creating Performance Synthetic Glycerine Viscosity
<http://www.dow.com/optim/optim-advantage/physical-properties/viscosity.htm>
- [15] 京都工芸繊維大学 HP
<http://www.kit.ac.jp/>
- [16] 理科年表 平成20年 丸善株式会社 国立天文台編
- [17] 三重県立四日市高等学校 SSH 科学部3年生引っ張り法班の測定による。
- [18] 基礎から学ぶトライボロジー 橋本 巨 著 森北出版
- [19] 降伏条件-RENANDI
<https://renandi.ipc.ibaraki.ac.jp/renandi/materialcontents/121749/111762/>

8. 謝辞

このレポートの執筆において実験指導、チョーク・鉛筆(6B)の粉の顕微鏡観察写真の撮影をして頂いた、公益財団法人豊田理化学研究所フェローの中村新男先生に感謝いたします。

9. 付属資料(元データ集)

黄色に塗られている回の結果は、外れ値として平均値、静止摩擦係数・動摩擦係数、誤差の計算から除外した。

(1) 実験 I アルミニウム・真鍮における静止摩擦係数の粗さ依存性

<1> アルミニウム

①板の粗さ:#60、ブロックの粗さ:#60

表.58 板#60、ブロック#60 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	33.8
2	30.6
3	33.0
4	29.8
5	31.8
6	31.6
7	31.0
8	30.4
9	31.4
10	29.8
平均値(度)	32.5
誤差(度)	0.4
平均値(rad)	0.567
誤差(rad)	0.007

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.64 ± 0.01 となつた。

②板の粗さ:#60、ブロックの粗さ:#100

表.59 板#60、ブロック#100 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	16.6
2	19.4

3	14.2
4	11.4
5	13.6
6	10.4
7	13.2
8	10.0
9	16.4
10	12.6
平均値(度)	13.8
誤差(度)	0.94
平均値(rad)	0.24
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は 0.25 ± 0.02 となつた。

③板の粗さ:#60、ブロックの粗さ:#150

表.60 板#60、ブロック#150 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	32.0
2	31.8
3	30.4
4	32.6
5	31.2
6	30.6
7	31.4
8	30.4
9	33.0
10	33.0

平均値(度)	31.7
誤差(度)	0.3
平均値(rad)	0.553
誤差(rad)	0.006

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.617 ± 0.008 となつた。

④板の粗さ:#60、ブロックの粗さ:#320

表.61 板#60、ブロック#320 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	34.4
2	33.2
3	32.6
4	33.0
5	33.2
6	29.6
7	33.0
8	31.0
9	33.8
10	33.4
平均値(度)	32.8
誤差(度)	0.5
平均値(rad)	0.572
誤差(rad)	0.008

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.64 ± 0.01 となつた。

⑤板の粗さ:#60、ブロックの粗さ:#600

表.62 板#60、ブロック#600 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	35.0
2	36.0
3	36.4

4	34.0
5	37.0
6	39.0
7	36.4
8	36.6
9	34.2
10	35.4
平均値(度)	36.0
誤差(度)	0.3
平均値(rad)	0.629
誤差(rad)	0.008

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.73 ± 0.01 となつた。

⑥板の粗さ:#100、ブロックの粗さ:#60

表.63 板#100、ブロック#60 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	22.4
2	17.6
3	17.8
4	15.2
5	16.4
6	14.8
7	15.4
8	13.0
9	16.2
10	16.2
平均値(度)	16.5
誤差(度)	0.8
平均値(rad)	0.29
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は 0.30 ± 0.02 となつた。

⑦板の粗さ:#100、ブロックの粗さ:#100

平均値(rad)	0.60
誤差(rad)	0.02

表.64 板#100、ブロック#100 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	34.1
2	26.9
3	30.9
4	28.9
5	24.1
6	18.9
7	21.5
8	16.7
9	21.1
10	20.1
平均値(度)	24
誤差(度)	2
平均値(rad)	0.43
誤差(rad)	0.03

式(1,4)より、静止摩擦係数は 0.45 ± 0.04 となつた。

⑧板の粗さ:#150、ブロックの粗さ:#60

表.65 板#150、ブロック#60 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	38.6
2	36.2
3	31.6
4	38.8
5	31.6
6	33.4
7	32.8
8	29.2
9	36.4
10	32.2
平均値(度)	34
誤差(度)	1

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.68 ± 0.03 となつた。

⑨板の粗さ:#150、ブロックの粗さ:#100

表.66 板#100、ブロック#100 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	30.9
2	24.9
3	20.9
4	18.7
5	18.3
6	14.3
7	16.5
8	13.9
9	12.5
10	12.5
11	11.5
12	11.5
平均値(度)	15
誤差(度)	1
平均値(rad)	0.26
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は 0.27 ± 0.02 となつた。

⑩板の粗さ:#150、ブロックの粗さ:#150

表.67 板#150、ブロック#150 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	28.9
2	28.7
3	30.7

4	33.3
5	29.3
6	29.7
7	35.9
8	24.9
9	27.9
10	29.5
平均値(度)	30
誤差(度)	1
平均値(rad)	0.52
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.57 ± 0.02 となつた。

⑪板の粗さ:#150、ブロックの粗さ:#320

表.68 板#150、ブロック#320 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	32.3
2	36.1
3	33.5
4	28.1
5	31.7
6	28.7
7	33.1
8	32.3
9	29.7
10	29.5
平均値(度)	31.5
誤差(度)	0.8
平均値(rad)	0.55
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.61 ± 0.02 となつた。

⑫板の粗さ:#150、ブロックの粗さ:#600

表.69 板#150、ブロック#600 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	35.3
2	36.9
3	39.9
4	32.3
5	31.9
6	31.1
7	31.9
8	31.5
9	34.1
10	32.7
平均値(度)	33.7
誤差(度)	0.9
平均値(rad)	0.59
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.67 ± 0.02 となつた。

⑬板の粗さ:#320、ブロックの粗さ:#60

表.70 板#320、ブロック#60 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	29.9
2	29.9
3	27.9
4	28.5
5	25.5
6	29.9
7	26.7
8	25.5
9	24.7
10	25.9
平均値(度)	29.3
誤差(度)	0.7

平均値(rad)	0.51
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.56 ± 0.01 となつた。

⑭板の粗さ:#320、ブロックの粗さ:#100

表.71 板#320、ブロック#100 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	20.1
2	18.1
3	20.5
4	21.7
5	22.1
6	18.5
7	17.3
8	19.5
9	22.1
10	20.5
平均値(度)	20.1
誤差(度)	0.53
平均値(rad)	0.35
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.37 ± 0.01 となつた。

⑮板の粗さ:#320、ブロックの粗さ:#150

表.72 板#320、ブロック#150 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	33.1
2	32.9
3	33.9
4	35.5
5	33.3

6	35.5
7	34.1
8	33.7
9	34.1
10	33.1
平均値(度)	33.9
誤差(度)	0.3
平均値(rad)	0.592
誤差(rad)	0.005

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.673 ± 0.008 となつた。

⑯板の粗さ:#320、ブロックの粗さ:#320

表.73 板#320、ブロック#320 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	34.9
2	30.7
3	30.5
4	33.5
5	28.1
6	31.7
7	27.9
8	29.5
9	28.3
10	27.3
平均値(度)	30.3
誤差(度)	0.8
平均値(rad)	0.53
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.58 ± 0.02 となつた。

⑯板の粗さ:#320、ブロックの粗さ:#600

表.74 板#320、ブロック#600 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	36.3
2	33.1
3	30.1
4	35.7
5	31.5
6	29.3
7	28.9
8	31.5
9	37.5
10	29.7
平均値(度)	33
誤差(度)	1
平均値(rad)	0.58
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.65 ± 0.03 となつた。

⑰板の粗さ:#600、ブロックの粗さ:#60

表.75 板#600、ブロック#60 の測定結果

回数(回)	摩擦角
1	27.5
2	32.9
3	33.7
4	30.1
5	35.7
6	31.9
7	36.1
8	32.7
9	33.7
10	34.7
平均値(度)	32.9
誤差(度)	0.8

平均値(rad)	0.57
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.65 ± 0.02 となつた。

⑲板の粗さ:#600、ブロックの粗さ:#100

表.76 板#600、ブロック#100 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	29.3
2	40.5
3	25.9
4	18.5
5	15.3
6	12.1
7	12.5
8	21.9
9	11.5
10	10.9
11	13.5
12	14.1
平均値(度)	16
誤差(度)	1
平均値(rad)	0.27
誤差(rad)	0.03

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.28 ± 0.03 となつた。

⑳板の粗さ:#600、ブロックの粗さ:#150

表.77 板#600、ブロック#150 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	30.7
2	27.7
3	27.5

4	30.5
5	28.7
6	25.9
7	24.5
8	25.5
9	26.5
10	26.5
平均値(度)	27.4
誤差(度)	0.7
平均値(rad)	0.48
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.52 ± 0.01 となつた。

②板の粗さ:#600、ブロックの粗さ:#320

表.78 板#600、ブロック#320 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	37.5
2	43.3
3	43.3
4	35.9
5	29.7
6	31.5
7	29.3
8	32.7
9	29.1
10	29.5
11	27.1
平均値(度)	39
誤差(度)	2
平均値(rad)	0.68
誤差(rad)	0.03

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.81 ± 0.05 となつた。

②板の粗さ:#600、ブロックの粗さ:#600

表.79 板#600、ブロック#600 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	42.1
2	37.3
3	39.3
4	40.9
5	39.3
6	36.5
7	37.1
8	35.1
9	35.5
10	33.5
平均値(度)	37.7
誤差(度)	0.9
平均値(rad)	0.66
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.77 ± 0.02 となつた。

〈2〉真鍮

①板の粗さ:#60、ブロックの粗さ:#60

表.80 板#60、ブロック#60 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	10.3
2	8.5
3	8.5
4	8.5
5	7.5
6	7.9
7	8.1
8	6.7
9	6.7

10	6.7
平均値(度)	8.0
誤差(度)	0.4
平均値(rad)	0.139
誤差(rad)	0.006

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.140 ± 0.007 となった。

②板の粗さ:#60、ブロックの粗さ:#150

表.81 板#60、ブロック#150 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	11.7
2	10.3
3	9.1
4	9.3
5	9.3
6	7.5
7	8.1
8	8.9
9	8.5
10	8.7
平均値(度)	9.2
誤差(度)	0.4
平均値(rad)	0.160
誤差(rad)	0.007

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.161 ± 0.007 となった。

③板の粗さ:#60、ブロックの粗さ:#320

表.82 板#60、ブロック#320 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	15.1
2	13.9

3	11.5
4	14.3
5	11.9
6	10.5
7	9.7
8	8.7
9	8.3
10	7.7
平均値(度)	11.2
誤差(度)	0.8
平均値(rad)	0.19
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.20 ± 0.02 となった。

④板の粗さ:#60、ブロックの粗さ:#600

表.83 板#60、ブロック#600 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	13.7
2	13.3
3	12.7
4	14.5
5	14.5
6	13.9
7	12.7
8	10.7
9	9.5
10	10.3
平均値(度)	12.6
誤差(度)	0.6
平均値(rad)	0.22
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.22 ± 0.01 となった。

⑤板の粗さ:#150、ブロックの粗さ:#60

表.84 板#150、ブロック#60 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	22.0
2	14.0
3	16.4
4	9.8
5	9.6
6	9.4
7	9.8
8	8.4
9	9.6
10	9.0
11	13.4
12	11.2
13	8.4
平均値(度)	9.8
誤差(度)	0.5
平均値(rad)	0.170
誤差(rad)	0.008

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.172 ± 0.009 となった。

⑥板の粗さ:#150、ブロックの粗さ:#150

表.85 板#150、ブロック#150 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	20.0
2	19.4
3	18.0
4	21.4
5	21.0
6	14.0
7	21.4
8	15.2
9	12.0

10	16.6
平均値(度)	18
誤差(度)	1
平均値(rad)	0.31
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.32 ± 0.02 となつた。

⑦板の粗さ:#150、ブロックの粗さ:#320 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	27.0
2	19.4
3	13.8
4	14.2
5	16.6
6	14.6
7	17.8
8	15.4
9	11.8
10	12.6
11	13.0
平均値(度)	14.9
誤差(度)	0.8
平均値(rad)	0.26
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.27 ± 0.01 となつた。

⑧板の粗さ:#150、ブロックの粗さ:#600 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	20.6

2	18.2
3	17.0
4	18.4
5	16.8
6	20.6
7	19.2
8	20.4
9	18.2
10	23.8
平均値(度)	19.3
誤差(度)	0.7
平均値(rad)	0.34
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.35 ± 0.01 となつた。

⑩板の粗さ:#320、ブロックの粗さ:#60

表.88 板#320、ブロック#60 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	15.9
2	15.1
3	15.1
4	13.7
5	12.3
6	13.1
7	14.7
8	19.9
9	15.9
10	13.3
平均値(度)	14.9
誤差(度)	0.7
平均値(rad)	0.26
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.27 ± 0.01 となつた。

⑪板の粗さ:#320、ブロックの粗さ:#150

表.89 板#320、ブロック#150 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	12.7
2	17.1
3	14.1
4	16.9
5	13.9
6	12.1
7	14.3
8	15.7
9	19.3
10	15.7
平均値(度)	15.2
誤差(度)	0.7
平均値(rad)	0.27
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.27 ± 0.01 となつた。

⑫板の粗さ:#320、ブロックの粗さ:#320

表.90 板#320、ブロック#320 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	19.9
2	17.9
3	16.5
4	13.5
5	18.9
6	11.5
7	17.7
8	13.5
9	14.5
10	13.3
平均値(度)	15.8
誤差(度)	0.9

平均値(rad)	0.28
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.28 ± 0.02 となつた。

⑫板の粗さ:#320、ブロックの粗さ:#600

表.91 板#320、ブロック#600 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	23.5
2	17.3
3	16.5
4	21.1
5	16.1
6	21.3
7	21.3
8	17.1
9	20.3
10	21.5
平均値(度)	19.6
誤差(度)	0.8
平均値(rad)	0.34
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.36 ± 0.02 となつた。

⑬板の粗さ:#600、ブロックの粗さ:#60

表.92 板#600、ブロック#60 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	17.6
2	12.0
3	10.6
4	10.8
5	14.6

6	12.8
7	12.4
8	13.0
9	9.4
10	12.6
11	11.4
平均値(度)	11.9
誤差(度)	0.5
平均値(rad)	0.208
誤差(rad)	0.008

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.211 ± 0.009 となつた。

⑭板の粗さ:#600、ブロックの粗さ:#150

表.93 板#600、ブロック#150 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	28.2
2	22.6
3	22.2
4	19.4
5	27.4
6	21.4
7	19.4
8	19.6
9	18.6
10	24.2
11	20.4
平均値(度)	21.5
誤差(度)	0.9
平均値(rad)	0.38
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.39 ± 0.02 となつた。

⑯板の粗さ:#600、ブロックの粗さ:#320

表.94 板#600、ブロック#320 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	25.7
2	18.7
3	16.5
4	15.1
5	12.9
6	15.5
7	16.9
8	13.3
9	14.5
10	14.7
11	12.3
平均値(度)	15.0
誤差(度)	0.6
平均値(rad)	0.26
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.27 ± 0.01 となつた。

⑰板の粗さ:#600、ブロックの粗さ:#600

表.95 板#600、ブロック#600 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	31.1
2	24.1
3	20.5
4	26.5
5	30.7
6	19.1
7	19.9
8	26.7
9	21.7
10	21.5
11	19.9
平均値(度)	22
誤差(度)	1
平均値(rad)	0.40
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.43 ± 0.03 となつた。

(2) 実験 II アルミニウムにおける最大静止摩擦力の荷重依存性

①板,ブロックの粗さ:#60、荷重:0.097kg

表.96 粗さ:#60、荷重:0.097kg の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	17.2
2	17.6
3	16.0
4	17.0
5	15.2
6	13.8
7	14.0
8	12.6

9	12.4
10	12.4
平均値(度)	14.9
誤差(度)	0.7
平均値(rad)	0.26
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は 0.27 ± 0.01 となつた。

②板,ブロックの粗さ:#60、荷重:0.197kg

表.97 粗さ:#60、荷重:0.197kg の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	19.2
2	16.4
3	15.6
4	16.8
5	13.0
6	12.4
7	12.2
8	11.8
9	11.4
10	11.4
11	11.6
12	10.6
13	10.4
14	10.4
平均値(度)	11.6
誤差(度)	0.3
平均値(rad)	0.202
誤差(rad)	0.005

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.204 ± 0.005 となつた。

③板,ブロックの粗さ:#60、荷重:0.297kg

表.98 粗さ:#60、荷重:0.297kg の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	21.0
2	18.0
3	20.4
4	16.4
5	17.2
6	16.6
7	15.2
8	16.2

9	14.0
10	14.2
11	14.6
平均値(度)	16.3
誤差(度)	0.6
平均値(rad)	0.28
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.32 ± 0.02 となつた。

④板,ブロックの粗さ:#60、荷重:0.398kg

表.99 粗さ:#60、荷重:0.398kg の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	24.2
2	20.2
3	21.0
4	21.0
5	16.8
6	22.6
7	17.8
8	14.4
9	13.4
10	17.8
11	21.4
12	19.8
13	16.4
14	15.0
平均値(度)	19.2
誤差(度)	0.8
平均値(rad)	0.34
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.32 ± 0.02 となつた。

⑤板,ブロックの粗さ:#60、荷重:0.497kg

平均値(rad)	0.46
誤差(rad)	0.01

表.100 粗さ:#60、荷重:0.497kg の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	23.2
2	26.2
3	23.6
4	22.4
5	25.0
6	26.0
7	22.8
8	24.6
9	23.2
10	25.4
平均値(度)	24.3
誤差(度)	0.4
平均値(rad)	0.424
誤差(rad)	0.008

静止摩擦係数は、 0.451 ± 0.009 となった。

⑥板,ブロックの粗さ:#320、荷重:0.047kg

表.101 粗さ#320、荷重 0.047kg の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	34.7
2	28.5
3	28.3
4	28.3
5	27.1
6	27.1
7	25.7
8	24.1
9	25.1
10	22.1
11	26.5
平均値(度)	26.3
誤差(度)	0.7

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.49 ± 0.01 となつた。

⑦板,ブロックの粗さ:#320、荷重:0.097kg

表.102 粗さ#320、荷重 0.097kg の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	25.7
2	26.7
3	25.7
4	19.3
5	20.5
6	17.1
7	15.5
8	17.3
9	13.9
10	14.5
11	14.1
12	17.1
13	14.7
平均値(度)	16.4
誤差(度)	0.7
平均値(rad)	0.29
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.28 ± 0.01 となつた。

⑧板,ブロックの粗さ:#320、荷重:0.197kg

表.103 粗さ#320、荷重 0.197kg の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	26.1
2	23.7
3	24.9

4	27.7
5	22.3
6	23.5
7	24.1
8	23.9
9	22.7
10	20.5
11	20.1
12	19.7
平均値(度)	22.6
誤差(度)	0.6
平均値(rad)	0.39
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.40 ± 0.01 となつた。

⑨板,ブロックの粗さ:#320、荷重:0.297kg

表.104 粗さ:#320、荷重:0.297kgの測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	22.3
2	27.9
3	25.7
4	21.7
5	24.7
6	26.5
7	20.5
8	21.3
9	23.9
10	25.1
11	22.5
12	18.3
平均値(度)	22.7
誤差(度)	0.8
平均値(rad)	0.40
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.361 ± 0.009 となつた。

⑩板,ブロックの粗さ:#320、荷重:0.398kg

表.105 粗さ:#320、荷重:0.398kgの測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	26.3
2	23.1
3	23.1
4	22.5
5	20.7
6	21.3
7	21.7
8	21.7
9	17.7
10	20.3
11	20.7
平均値(度)	21.3
誤差(度)	0.5
平均値(rad)	0.372
誤差(rad)	0.009

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.39 ± 0.01 となつた。

⑪板,ブロックの粗さ:#320、荷重:0.497kg

表.106 粗さ:#320、荷重:0.497kgの測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	28.5
2	24.1
3	29.1
4	25.5
5	26.7
6	28.3
7	25.7
8	22.9

9	25.1
10	24.7
平均値(度)	26.1
誤差(度)	0.6
平均値(rad)	0.46

誤差(rad)	0.01
---------	------

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.45 ± 0.01 となつた。

(3) 実験III 研磨の方向による静止摩擦係数の変化

①板 // 斜面、ブロック // 斜面

表.107 板 // 斜面、ブロック // 斜面 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	18.1
2	10.5
3	9.7
4	9.5
5	11.3
6	9.3
7	9.9
8	8.1
9	8.3
10	9.5
11	9.1
平均値(度)	9.5
誤差(度)	0.3
平均値(rad)	0.166
誤差(rad)	0.005

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.168 ± 0.006 となつた。

②板 // 斜面、ブロック上斜面

表.108 板 // 斜面、ブロック上斜面 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	17.3
2	13.1
3	12.1

4	11.7
5	12.7
6	13.5
7	10.1
8	10.3
9	10.3
10	8.9
11	11.3
平均値(度)	11.4
誤差(度)	0.5
平均値(rad)	0.199
誤差(rad)	0.008

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.202 ± 0.009 となつた。

③板上斜面、ブロック // 斜面

表.109 板上斜面、ブロック // 斜面 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	15.9
2	15.5
3	12.7
4	11.3
5	11.3
6	11.5
7	9.7
8	10.3
9	9.5
10	9.1

平均値(度)	11.7
誤差(度)	0.8
平均値(rad)	0.20
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は 0.21 ± 0.01 となつた。

④板上斜面、ブロック上斜面

表.110 板上斜面、ブロック上斜面 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	20.7
2	14.5
3	10.3
4	9.5

5	10.9
6	9.5
7	8.9
8	9.3
9	9.7
10	10.3
11	10.7
12	14.1
13	11.3
平均値(度)	10.1
誤差(度)	0.2
平均値(rad)	0.175
誤差(rad)	0.004

式(1,4)より、静止摩擦係数は 0.177 ± 0.005 となつた。

(4) 実験IV 研磨による測定回ごとの静止摩擦係数の変化(摩耗効果)

①板、ブロックの粗さ:#60

誤差(rad)	0.005
---------	-------

表.111 粗さ:#60、毎回研磨の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	15.9
2	17.3
3	15.7
4	16.7
5	16.5
6	15.7
7	22.5
8	18.1
9	14.9
10	15.5
11	16.1
平均値(度)	16.3
誤差(度)	0.3
平均値(rad)	0.284

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.292 ± 0.006 となつた。

②板、ブロックの粗さ:#600

表.112 粗さ:#600、毎回研磨の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	24.1
2	28.1
3	22.3
4	20.7
5	23.1
6	21.7
7	17.5
8	24.1

9	20.5
10	19.7
平均値(度)	22
誤差(度)	1
平均値(rad)	0.39

誤差(rad)	0.02
---------	------

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.41 ± 0.02 となつた。

(5) 実験V アルミニウム・真鍮とガラスの静止摩擦係数の粗さ依存性

①アルミニウム-ガラス

①ブロックの粗さ:#60

表.113 ブロック#60 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	8.5
2	8.1
3	6.9
4	6.7
5	7.1
6	6.5
7	7.5
8	6.5
9	6.1
10	7.9
平均値(度)	7.2
誤差(度)	0.3
平均値(rad)	0.126
誤差(rad)	0.005

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.127 ± 0.005 となつた。

表.114 ブロック#150 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	7.9
2	7.3
3	9.9
4	7.5
5	8.5
6	8.7
7	9.9
8	7.7
9	7.9
10	9.9
平均値(度)	8.6
誤差(度)	0.3
平均値(rad)	0.150
誤差(rad)	0.006

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.151 ± 0.006 となつた。

③ブロックの粗さ:#320

表.115 ブロック#320 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	9.1
2	7.7

3	8.5
4	9.1
5	7.7
6	8.1
7	8.3
8	8.9
9	8.3
10	7.5
平均値(度)	8.4
誤差(度)	0.2
平均値(rad)	0.146
誤差(rad)	0.004

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.147 ± 0.004 となつた。

④ブロックの粗さ:#600

表.116 ブロック#600 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	11.3
2	10.1
3	10.3
4	11.1
5	10.3
6	9.9
7	10.5
8	9.9
9	11.5
10	10.7
平均値(度)	10.6
誤差(度)	0.2
平均値(rad)	0.185
誤差(rad)	0.003

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.187 ± 0.004 となつた。

②真鍮-ガラス

①ブロックの粗さ:#60

表.117 ブロック#60 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	5.7
2	5.7
3	5.7
4	6.5
5	6.3
6	6.5
7	5.9
8	5.7
9	5.5
10	6.3
平均値(度)	6.0
誤差(度)	0.4
平均値(rad)	0.105
誤差(rad)	0.002

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.106 ± 0.002 となつた。

②ブロックの粗さ:#150

表.118 ブロック#150 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	6.5
2	6.5
3	7.1
4	6.5

5	6.7
6	7.5
7	8.9
8	6.9
9	9.1
10	7.1
平均値(度)	7.3
誤差(度)	0.3
平均値(rad)	0.128
誤差(rad)	0.006

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.129 ± 0.006 となつた。

③ブロックの粗さ:#320

表.119 ブロック#320 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	7.3
2	8.9
3	7.3
4	7.3
5	7.3
6	8.5
7	8.5
8	9.3
9	9.9
10	7.3
平均値(度)	8.2
誤差(度)	0.3
平均値(rad)	0.143
誤差(rad)	0.006

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.144 ± 0.006 となつた。

④ブロックの粗さ:#600

表.120 ブロック#600 の静止摩擦係数

回数(回)	摩擦角(度)
1	7.1
2	8.1
3	12.5
4	11.1
5	11.5
6	11.7
7	11.1
8	10.5
9	10.9
10	10.7
11	9.9
12	9.5
平均値(度)	11.0
誤差(度)	0.3
平均値(rad)	0.192
誤差(rad)	0.005

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.194 ± 0.005 となつた。

(6) 実験VI 非金属における静止摩擦係数の測定

〈1〉ガラス

①板、ブロックの粗さ:そのまま

表.121 ガラス(そのまま)の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	13.0
2	14.6
3	13.2
4	12.6
5	12.4
6	12.4
7	12.8
8	16.0
9	14.0
10	12.4
平均値(度)	13.3
誤差(度)	0.4
平均値(rad)	0.233
誤差(rad)	0.007

式(1,4)より、静止摩擦係数は。 0.237 ± 0.007 となつた。

〈2〉紙

①板、ブロックの粗さ:そのまま

表.122 紙(そのまま)の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	15.9
2	16.9
3	21.5

4	19.5
5	18.1
6	14.7
7	17.5
8	15.5
9	21.9
10	15.3
平均値(度)	17.7
誤差(度)	0.8
平均値(rad)	0.31
標準誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.32 ± 0.02 となつた。

〈3〉アクリル

①板、ブロックの粗さ:そのまま

表.123 板、ブロック そのままの測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	14.1
2	17.1
3	13.3
4	13.3
5	13.7
6	12.5
7	14.3
8	13.5
9	13.5
10	13.7
平均値(度)	13.9
誤差(度)	0.5

平均値(rad)	0.242
誤差(rad)	0.008

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.247 ± 0.009 となった。

②板、ブロックの粗さ:#60

表.124 板、ブロック#60 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	13.6
2	11.6
3	11.6
4	13.4
5	13.2
6	13.2
7	12.2
8	12.6
9	12.8
10	13.0
平均値(度)	12.7
誤差(度)	0.2
平均値(rad)	0.221
誤差(rad)	0.004

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.225 ± 0.004 となった。

③板、ブロックの粗さ:#150

表.125 板、ブロック#150 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	16.5
2	15.5
3	14.1

4	13.9
5	11.9
6	13.1
7	12.9
8	12.7
9	13.5
10	12.1
平均値(度)	13.7
誤差(度)	0.5
平均値(rad)	0.238
誤差(rad)	0.008

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.276 ± 0.009 となった。

④板、ブロックの粗さ:#320

表.126 板、ブロック#320 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	15.3
2	14.1
3	15.9
4	12.5
5	9.5
6	12.5
7	15.3
8	15.9
9	14.1
10	13.5
平均値(度)	13.9
誤差(度)	0.6
平均値(rad)	0.24
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.28 ± 0.01 と

なった。

⑤板、ブロックの粗さ:#600

表.127 板、ブロック#600 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	16.0
2	15.0
3	15.6
4	15.6
5	14.8
6	15.6

7	15.6
8	15.6
9	15.0
10	15.8
平均値(度)	15.4
誤差(度)	0.1
平均値(rad)	0.269
誤差(rad)	0.002

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.277 ± 0.003 となった。

(7) 実験VII アルミニウム・真鍮の静止摩擦係数に対する 液体潤滑剤(純水・エタノール・グリセリン・菜種油)の効果

①アルミニウム・真鍮の静止摩擦係数に対する液体潤滑剤(純水・エタノール)の効果

〈1〉アルミニウム・純水

①ブロックの粗さ:#60

誤差(度)	1
平均値(rad)	0.66
誤差(rad)	0.02

表.128 ブロック#60 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	33.1
2	41.7
3	38.5
4	37.5
5	39.5
6	41.7
7	38.3
8	44.1
9	33.5
10	31.7
平均値(度)	38

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.78 ± 0.04 となつた。

②ブロックの粗さ:#150

表.129 ブロック#150 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	32.7
2	40.3
3	44.3
4	45.3
5	38.7
6	36.3

7	34.9
8	36.9
9	34.1
10	38.5
平均値(度)	38
誤差(度)	1
平均値(rad)	0.67
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.79 ± 0.04 となつた。

③ブロックの粗さ:#320

表.130 ブロック#320 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	24.7
2	37.1
3	36.5
4	31.5
5	38.1
6	48.1
7	40.5
8	46.5
9	30.9
10	32.1
平均値(度)	37
誤差(度)	2
平均値(rad)	0.74
誤差(rad)	0.06

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.72 ± 0.05 となつた。

④ブロックの粗さ:#600

表.131 ブロック#600 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	24.7
2	37.1
3	36.5
4	31.5
5	38.1
6	48.1
7	40.5
8	46.5
9	30.9
10	32.1
平均値(度)	37
誤差(度)	2
平均値(rad)	0.74
誤差(rad)	0.06

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.74 ± 0.06 となつた。

〈2〉アルミニウム・エタノール

①ブロックの粗さ:#60

表.132 ブロック#60 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	22.3
2	21.9
3	22.1
4	23.3
5	29.1
6	22.5
7	21.3

8	27.5
9	22.3
10	18.9
平均値(度)	23
誤差(度)	1
平均値(rad)	0.40
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は 0.43 ± 0.02 となつた。

②ブロックの粗さ:#150

表.133 ブロック#150 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	32.5
2	31.7
3	31.1
4	26.7
5	33.9
6	31.5
7	29.9
8	23.5
9	31.1
10	25.7
平均値(度)	30
誤差(度)	1
平均値(rad)	0.52
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.57 ± 0.02 となつた。

③ブロックの粗さ:#320

表.134 ブロック#320 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	27.5
2	28.3
3	29.5
4	28.7
5	29.1
6	28.7
7	32.7
8	30.5
9	28.9
10	29.1
平均値(度)	29.3
誤差(度)	0.5
平均値(rad)	0.511
誤差(rad)	0.008

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.56 ± 0.01 となつた。

④ブロックの粗さ:#600

表.135 ブロック#600 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	29.9
2	26.5
3	21.9
4	30.1
5	27.5
6	32.5
7	28.7
8	31.0
9	26.9

10	28.3
平均値(度)	28.3
誤差(度)	0.9
平均値(rad)	0.49
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.54 ± 0.02 となつた。

(3) 真鍮・純水

① ブロックの粗さ:#60

表.136 ブロック#60 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	18.3
2	15.5
3	14.5
4	16.9
5	17.1
6	18.5
7	18.7
8	18.9
9	17.9
10	17.7
平均値(度)	17.4
誤差(度)	0.5
平均値(rad)	0.304
誤差(rad)	0.008

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.313 ± 0.009 となつた。

② ブロックの粗さ:#150

表.137 ブロック#150 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	24.3
2	21.5
3	21.5
4	22.7
5	22.5
6	21.5
7	22.7
8	21.7
9	20.5
10	21.3
平均値(度)	22.0
誤差(度)	0.4
平均値(rad)	0.384
誤差(rad)	0.006

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.404 ± 0.007 となつた。

③ ブロックの粗さ:#320

表.138 ブロック#320 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	28.3
2	22.3
3	22.5
4	21.1
5	25.5
6	27.3
7	24.5
8	25.1
9	23.5

10	22.5
平均値(度)	24.3
誤差(度)	0.8
平均値(rad)	0.42
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.45 ± 0.02 となった。

④ブロックの粗さ:#600

表.139 ブロック#600 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	14.9
2	21.7
3	20.9
4	20.5
5	19.9
6	21.1
7	19.9
8	19.7
9	18.1
10	17.7
平均値(度)	19.4
誤差(度)	0.7
平均値(rad)	0.34
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.35 ± 0.01 となった。

④真鍮・エタノール

①ブロックの粗さ:#60

表.140 ブロック#60 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	21.7
2	19.7
3	17.5
4	21.3
5	18.7
6	19.5
7	20.1
8	15.5
9	16.3
10	15.9
平均値(度)	18.6
誤差(度)	0.7
平均値(rad)	0.33
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.34 ± 0.01 となった。

②ブロックの粗さ:#150

表.141 ブロック#150 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	25.9
2	19.3
3	19.9
4	18.1
5	21.1
6	21.9
7	20.9

8	21.3
9	22.1
10	20.3
平均値(度)	21.1
誤差(度)	0.7
平均値(rad)	0.37
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.39 ± 0.01 となつた。

③ブロックの粗さ:#320

表.142 ブロック#320 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	22.7
2	28.7
3	26.1
4	22.9
5	22.3
6	21.5
7	22.1
8	21.1
9	21.5
10	22.1
平均値(度)	23.1
誤差(度)	0.8
平均値(rad)	0.40
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.43 ± 0.02 となつた。

④ブロックの粗さ:#600

表.143 ブロック#600 の測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	24.1
2	20.3
3	21.7
4	26.5
5	21.5
6	23.7
7	27.5
8	24.1
9	25.5
10	24.9
平均値(度)	24.0
誤差(度)	0.7
平均値(rad)	0.42
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.44 ± 0.02 となつた。

②真鍮(#600)の静止摩擦係数に対するグリセリンの粘度依存性

①グリセリン 25%

表.144 グリセリン 25%における測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	18.1
2	20.5
3	21.9
4	22.3
5	22.3
6	23.9
7	24.3
8	27.1
9	22.7
10	28.7
平均値(度)	23.2
誤差(度)	1.0
平均値(rad)	0.40
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.41 ± 0.02 となった。

②グリセリン 50%

表.145 グリセリン 50%における測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	25.7
2	15.1
3	19.9
4	23.3
5	21.3
6	21.1
7	27.3

8	22.0
9	21.7
10	24.1
平均値(度)	22.2
誤差(度)	1.1
平均値(rad)	0.39
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.41 ± 0.02 となった。

③グリセリン 75%

表.146 グリセリン 75%における測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	23.1
2	25.5
3	30.7
4	34.7
5	26.5
6	28.5
7	25.5
8	22.5
9	28.5
10	29.3
平均値(度)	27
誤差(度)	1
平均値(rad)	0.52
誤差(rad)	0.03

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.52 ± 0.03 となった。

④グリセリン 100%

表.147 グリセリン 100%における測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	20.3
2	23.9
3	25.1
4	28.5
5	19.7
6	23.7
7	29.5
8	28.1

9	26.7
10	18.5
11	33.3
12	24.7
平均値(度)	25
誤差(度)	1
平均値(rad)	0.44
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.47 ± 0.02 となつた。

③液体潤滑剤(純水・グリセリン・菜種油)の存在する厚さによる静止摩擦係数に対する効果

<1>純水

誤差(rad)	0.01
---------	------

①板、ブロック:アルミニウム#60 加重あり

表.148 アルミニウム#60 加重あり 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	29.4
2	26.8
3	19.4
4	24.4
5	18.6
6	19.4
7	14.4
8	16.2
9	14.0
10	22.4
11	16.0
平均値(度)	21
誤差(度)	2
平均値(rad)	0.74

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.38 ± 0.03 となつた。

②板、ブロック:アルミニウム#60 加重なし

表.149 アルミニウム#60 加重なし 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	46.4
2	41.4
3	40.0
4	45.2
5	42.0
6	35.4
7	38.8
8	49.6
9	45.8
10	41.6
11	44.0

12	39.8
平均値(度)	42.5
誤差(度)	0.9
平均値(rad)	0.74
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.92 ± 0.03 と
なった。

③板、ブロック：アルミニウム#600 加重なし

表.150 アルミニウム#600 加重なし測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	26.1
2	18.5
3	25.9
4	25.1
5	20.9
6	28.9
7	29.5
8	23.5
9	21.1
10	23.9
平均値(度)	24
誤差(度)	1
平均値(rad)	0.74
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.45 ± 0.02 と
なった。

④板、ブロック：真鍮#60 加重あり

表.151 真鍮#60 加重あり 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	22.3
2	20.5
3	18.5
4	21.7
5	22.9
6	20.1
7	21.7
8	19.7
9	19.5
10	18.3
平均値(度)	20.5
誤差(度)	0.5
平均値(rad)	0.358
誤差(rad)	0.009

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.37 ± 0.01 と
なった。

⑤板、ブロック：真鍮#60 加重なし

表.152 真鍮#60 加重なし 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	19.5
2	19.3
3	16.3
4	14.5
5	12.5
6	13.1
7	12.7
8	12.3
9	11.3

10	13.9
11	11.5
12	12.7
13	14.7
平均値(度)	12.9
誤差(度)	0.4
平均値(rad)	0.23
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.230 ± 0.007 となつた。

⑥板、ブロック：真鍮#600 加重なし

表.153 真鍮#600 加重なし 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	20.7
2	12.1
3	14.5
4	9.5
5	12.7
6	10.3
7	10.9
8	18.9
9	14.1
10	16.1
11	15.3
平均値(度)	13.4
誤差(度)	0.9
平均値(rad)	0.23
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.24 ± 0.02 となつた。

<2>グリセリン

①板、ブロック：アルミニウム#60 加重あり

表.154 アルミニウム#60 加重あり 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	16.4
2	20.4
3	20.4
4	14.6
5	18.4
6	17.8
7	13.4
8	16.6
9	18.6
10	17.4
平均値(度)	17.4
誤差(度)	0.7
平均値(rad)	0.30
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.31 ± 0.01 となつた。

②板、ブロック：アルミニウム#60 加重なし

表.155 アルミニウム#60 加重なし 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	14.4
2	17.4
3	18.2
4	20.6
5	26.6
6	16.4
7	14.0

	8	25.8
	9	18.4
	10	13.8
	11	15.4
	12	16.8
平均値(度)		16.6
誤差(度)		0.7
平均値(rad)		0.29
誤差(rad)		0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.30 ± 0.01 となつた。

③板、ブロック:アルミニウム#600 加重あり

表.156 アルミニウム#600 加重あり 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	36.5
2	36.9
3	36.5
4	32.1
5	43.5
6	53.9
7	38.7
8	37.5
9	30.9
10	35.5
11	41.7
12	46.5
13	46.3
平均値(度)	40
誤差(度)	1
平均値(rad)	0.70
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.84 ± 0.04 となつた。

④板、ブロック:アルミニウム#600 加重なし

表.157 アルミニウム#600 加重なし 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	1.5
2	0.9
3	0.9
4	0.9
5	1.3
6	1.1
7	1.5
8	1.7
9	1.5
10	2.7
平均値(度)	1.4
誤差(度)	0.2
平均値(rad)	0.024
誤差(rad)	0.003

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.024 ± 0.003 となつた。

⑤板、ブロック:真鍮#60 加重あり

表.158 真鍮#60 加重あり 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	21.3
2	25.3
3	24.5
4	28.5
5	24.3
6	20.3

7	19.5
8	21.7
9	19.7
10	21.7
11	24.5
平均値(度)	22.3
誤差(度)	0.7
平均値(rad)	0.39
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.41 ± 0.01 となつた。

⑥板、ブロック:真鍮#60 加重なし

表.159 真鍮#60 加重なし 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	18.7
2	20.9
3	22.7
4	23.1
5	23.1
6	20.5
7	21.3
8	20.5
9	17.7
10	21.9
平均値(度)	21.1
誤差(度)	0.6
平均値(rad)	0.37
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.38 ± 0.01 となつた。

⑦板、ブロック:真鍮#600 加重なし

表.160 真鍮#600 加重なし 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	0.5
2	0.5
3	0.7
4	8.7
5	0.7
6	2.7
7	0.7
8	1.1
9	7.5
10	0.7
11	0.5
12	13.9
13	0.7
平均値(度)	0.9
誤差(度)	0.2
平均値(rad)	0.015
誤差(rad)	0.004

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.0015 ± 0.004 となつた。

<3>菜種油

①板、ブロック:アルミニウム#60 加重あり

表.161 アルミニウム#60 加重あり 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	19.0
2	13.4
3	9.4
4	14.6

5	10.2
6	12.4
7	19.2
8	18.0
9	23.4
10	20.6
11	23.4
12	28.4
13	19.0
14	23.4
15	23.6
平均値(度)	22
誤差(度)	1
平均値(rad)	0.38
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.40 ± 0.02 となつた。

②板、ブロック:アルミニウム#60 加重なし

表.162 アルミニウム#60 加重なし 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	13.4
2	16.6
3	29.4
4	18.4
5	15.0
6	17.4
7	16.4
8	19.0
9	13.8
10	16.2
11	15.2
平均値(度)	16.2

誤差(度)	0.6
平均値(rad)	0.28
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.29 ± 0.01 となつた。

③板、ブロック:アルミニウム#600 加重あり

表.163 アルミニウム#600 加重あり 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	22.1
2	58.5
3	38.5
4	39.7
5	42.1
6	35.9
7	42.9
8	41.5
9	43.9
10	36.5
11	47.5
12	44.9
13	42.9
平均値(度)	41
誤差(度)	1
平均値(rad)	0.71
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.87 ± 0.03 となつた。

④板、ブロック:アルミニウム#600 加重なし

表.164 アルミニウム#600 加重なし 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	37.7
2	34.9
3	29.7
4	34.5
5	32.9
6	32.5
7	31.7
8	28.7
9	40.9
10	39.7
11	50.3
12	41.7
13	33.7
14	29.9
平均値(度)	32.6
誤差(度)	0.9
平均値(rad)	0.57
誤差(rad)	0.02

静止摩擦係数は、 0.64 ± 0.02 となった。

⑤板、ブロック:真鍮#60 加重あり

表.165 真鍮#60 加重あり 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	13.9
2	11.3
3	11.3
4	10.7
5	9.5
6	10.9

7	8.7
8	8.9
9	15.1
10	7.3
11	7.1
12	7.1
平均値(度)	9.3
誤差(度)	0.6
平均値(rad)	0.16
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.16 ± 0.01 となつた。

⑥板、ブロック:真鍮#60 加重なし

表.166 真鍮#60 加重なし 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	12.9
2	9.3
3	10.7
4	11.1
5	12.5
6	8.1
7	8.3
8	12.1
9	11.5
10	8.7
平均値(度)	10.5
誤差(度)	0.6
平均値(rad)	0.18
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.19 ± 0.01 となつた。

⑦板、ブロック:真鍮#600 加重あり

表.167 真鍮#600 加重あり 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	28.1
2	21.7
3	27.9
4	19.1
5	18.5
6	21.5
7	21.5
8	21.5
9	25.7
10	17.7
11	22.5
12	19.9
平均値(度)	21.0
誤差(度)	0.7
平均値(rad)	0.37
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は 0.38 ± 0.01 となつた。

⑧板、ブロック:真鍮#600 加重なし

表.168 真鍮#600 加重なし 測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	11.5
2	9.1
3	11.5
4	12.5
5	13.5
6	17.1
7	14.7
8	14.7
9	17.3
10	17.9
11	11.7
12	11.7
13	12.1
平均値(度)	12.3
誤差(度)	0.5
平均値(rad)	0.21
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は 0.21 ± 0.01 となつた。

(8) 実験Ⅷ 静止摩擦係数に対する固体潤滑剤(チョーク・鉛筆
・極圧二硫化モリブデングリース)の効果

①板、ブロック:真鍮#600

①チョーク(茶色)

表.169 チョーク(茶色)における測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	29.5
2	26.1
3	29.7
4	28.5
5	27.9
6	27.3
7	31.9
8	31.5
9	35.5
10	32.9
平均値(度)	30.1
誤差(度)	0.9
平均値(rad)	0.53
誤差(rad)	0.02

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.53 ± 0.02 となつた。

②チョーク(ピンク)

表.170 チョーク(ピンク)における測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	29.1
2	30.7
3	28.5
4	25.7

5	29.9
6	27.7
7	23.7
8	26.5
9	31.1
10	27.7
平均値(度)	28.1
誤差(度)	0.7
平均値(rad)	0.49
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.53 ± 0.02 となつた。

③鉛筆

表.171 鉛筆における測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	20.9
2	21.5
3	18.9
4	15.9
5	19.5
6	20.7
7	17.3
8	18.9
9	20.1
10	14.5
平均値(度)	18.8
誤差(度)	0.7
平均値(rad)	0.33
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.34 ± 0.01 となつた。

②板、ブロック:真鍮#60

①極圧二硫化モリブデングリース

表.172 極圧二硫化モリブデングリースにおける測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	19.5
2	18.3
3	19.1
4	17.3
5	15.7
6	17.5
7	17.3
8	19.5
9	25.5
10	22.5
11	13.7
平均値(度)	18.1
誤差(度)	0.8
平均値(rad)	0.32
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.32 ± 0.01 となつた。

②チョーク(茶色)

表.173 チョーク(茶色)における測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	31.3

2	37.5
3	31.5
4	30.5
5	29.9
6	39.1
7	40.7
8	41.3
9	41.1
10	40.5
11	40.5
12	42.5
13	41.5
14	41.1
15	41.7
平均値(度)	41.0
誤差(度)	0.3
平均値(rad)	0.716
誤差(rad)	0.005

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.869 ± 0.009 となつた。

③チョーク(ピンク)

表.174 チョーク(ピンク)における測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	21.7
2	24.9
3	31.7
4	27.7
5	30.1
6	29.7
7	32.5
8	34.5
9	30.5

10	30.5
11	32.1
平均値(度)	30.4
誤差(度)	0.9
平均値(rad)	0.53
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.59 ± 0.02 となつた。

④鉛筆

表.175 鉛筆における測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	11.3
2	9.5
3	8.5
4	7.7
5	9.1
6	7.5
7	8.7
8	7.7
9	10.3
10	12.5
平均値(度)	9.3
誤差(度)	0.5
平均値(rad)	0.162
誤差(rad)	0.009

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.16 ± 0.01 となつた。

③板、ブロック:紙

①極圧二硫化モリブデングリース

表.176 極圧二硫化モリブデングリースにおける測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	27.9
2	30.1
3	38.1
4	29.1
5	24.7
6	22.1
7	19.7
8	19.5
9	23.1
10	19.9
11	19.9
12	19.1
13	19.1
14	19.3
平均値(度)	20.6
誤差(度)	0.6
平均値(rad)	0.36
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.38 ± 0.01 となつた。

②チョーク(茶色)

表.177q チョーク(茶色)における測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	38.5
2	38.9

3	37.5
4	39.7
5	38.9
6	38.5
7	35.7
8	41.7
9	41.5
10	39.9
平均値(度)	39.1
誤差(度)	0.6
平均値(rad)	0.68
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.75 ± 0.02 となつた。

③チョーク(ピンク)

表.178 チョーク(ピンク)における測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	33.1
2	36.9
3	32.5
4	36.5
5	37.3
6	37.5
7	40.5
8	38.5
9	37.5

10	38.5
平均値(度)	36.9
誤差(度)	0.8
平均値(rad)	0.64
誤差(rad)	0.01

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.75 ± 0.02 となつた。

④鉛筆

表.179 鉛筆における測定結果

回数(回)	摩擦角(度)
1	12.9
2	14.1
3	13.5
4	13.9
5	13.1
6	13.1
7	18.1
8	14.9
9	13.3
10	12.7
平均値(度)	13.95
誤差(度)	0.52
平均値(rad)	0.243
誤差(rad)	0.009

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.25 ± 0.01 となつた。

(9) 実験IX 真鍮(#60)の動摩擦係数に対する潤滑剤(純水・グリセリン・菜種油・極圧二硫化モリブデングリース)の効果

以下の測定結果において動摩擦係数の算出において、重力加速度 $g : 9.7969 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 、滑走距離 $x : 0.1332 \text{ (m)}$ といった値を用いた。

①板、ブロック:真鍮#60 潤滑剤なし

表.180 真鍮#60(潤滑剤なし) 測定結果

回数(回)	滑走時間(s)	摩擦角(度)	動摩擦係数
1	0.70	9.1	0.10
2	1.37	22.1	0.39
3	0.77	12.3	0.17
4	3.30	11.5	0.20
5	1.86	11.5	0.20
6	0.96	21.7	0.37
7	2.50	17.5	0.31
8	1.00	23.1	0.40
9	0.77	17.5	0.27
10	0.80	18.7	0.29
11	0.90	18.3	0.30
平均値	1.4	17	0.29
誤差	0.3	1	0.03
平均値(rad)		0.30	
誤差(rad)		0.02	

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.29 ± 0.03 となつた。また、式(2,5)より、動摩擦係数は、 0.29 ± 0.03 となつた。

②板、ブロック:真鍮#60 純水

表.181 真鍮#60(純水) 測定結果

回数(回)	滑走時間(s)	摩擦角(度)	動摩擦係数
1	1.00	10.9	0.16
2	0.87	11.3	0.16
3	0.97	13.3	0.21
4	1.00	11.7	0.18
5	0.90	11.9	0.18
6	0.77	12.7	0.18
7	0.80	13.3	0.19
8	1.07	12.3	0.19

9	1.07	12.7	0.20
10	0.70	15.7	0.22
平均値	0.92	12.6	0.188
誤差	0.04	0.4	0.006
平均値(rad)		0.220	
誤差(rad)		0.008	

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.223 ± 0.008 となった。また、式(2,5)より、動摩擦係数は、 0.188 ± 0.006 となった。

③板、ブロック:真鍮#60 菜種油

表.182 真鍮#60(菜種油) 測定結果

回数(回)	滑走時間(s)	摩擦角(度)	動摩擦係数
1	0.78	19.7	0.31
2	0.67	18.1	0.26
3	1.90	12.9	0.22
4	1.56	12.1	0.20
5	0.94	14.1	0.22
6	1.14	13.1	0.21
7	1.23	11.7	0.19
8	1.63	10.7	0.18
9	1.90	11.7	0.20
10	2.28	11.5	0.20
平均値	1.4	13.6	0.22
誤差	0.2	0.9	0.01
平均値(rad)		0.24	
誤差(rad)		0.02	

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.24 ± 0.02 となった。また、式(2,5)より、動摩擦係数は、 0.22 ± 0.01 となった。

④板、ブロック:真鍮#60 グリセリン

表.183 真鍮#60(グリセリン) 測定結果

回数(回)	滑走時間(s)	摩擦角(度)	動摩擦係数
1	2.80	14.7	0.26
2	1.73	17.5	0.31
3	0.93	21.3	0.36
4	1.54	17.3	0.30
5	1.24	18.5	0.32
6	1.56	16.7	0.29
7	4.84	16.7	0.30
8	4.70	16.9	0.30
9	3.37	15.1	0.27
10	4.13	14.1	0.25
平均値	2.7	16.9	0.29
誤差	0.5	0.7	0.01
平均値(rad)		0.29	
誤差(rad)		0.01	

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.30 ± 0.01 となった。また、式(2,5)より、動摩擦係数は、 0.29 ± 0.01 となった。

⑤板、ブロック:真鍮#60 極圧二硫化モリブデングリース

表.184 真鍮#60(極圧二硫化モリブデングリース) 測定結果

回数(回)	滑走時間(s)	摩擦角(度)	動摩擦係数
1	0.41	21.5	0.22
2	2.14	15.9	0.28
3	1.96	15.9	0.28
4	2.11	17.5	0.31
5	1.47	15.1	0.26
6	2.20	17.7	0.31
7	1.70	14.7	0.25
8	2.27	17.7	0.31
9	2.03	16.7	0.29

10	1.17	22.9	0.40
11	1.77	16.9	0.29
平均値	1.8	17.0	0.281
誤差	0.1	0.6	0.008
平均値(rad)		0.30	
誤差(rad)		0.01	

式(1,4)より、静止摩擦係数は、 0.30 ± 0.01 となった。また、式(2,5)より、動摩擦係数は、 0.289 ± 0.008 となった。