

摩擦係数に寄与する要因の考察

～表面粗さ・物質・荷重・摩擦・潤滑剤による表面状態変化～

第1チャレンジ番号：
(※1)

1 5 3 1 0 0 7

(※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： 岡本直大

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： 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：

今西優果
中村史香
丹羽英人

学校名・学年：

三重県立四日市高等学校・3年
ニ
ニ

実験課題に取り組んだ感想を書いてください。

一見して簡単そうな「摩擦係数」であるが、その定数は様々な要因が複合的に絡み合って決定されるものであつた。実験をできて、よい経験となった。

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もできます。

参加申込書送付用ラベル

実験課題レポート提出用ラベル

摩擦係数に寄与する要因の考察

～表面粗さ・物質・荷重・摩耗・潤滑剤による表面状態変化～

三重県立四日市高等学校 3 年 岡本直大

<目次>

1.実験の目的	…P2
2.実験の原理と手法	…P2～P11
3.実験結果	…P12～P35
4.考察	…P35～P60
5.結論	…P60～P61
6.参考資料	…P62
7.共同実験者と役割分担	…P62
8.謝辞	…P62
付録資料	

摩擦係数に寄与する要因の考察

～表面粗さ・物質・荷重・摩耗・潤滑剤による表面状態変化～

三重県立四日市高等学校 3 年 岡本直大

1. 実験の目的

雨天時に自転車を運転すると車体を少し傾けただけで転倒することがある。一方、ジャムのびんを開けるときは手に水を少しつけることによって、びんのふたを開けやすくなる。これは、水によって、前者は摩擦係数が小さくなり後者は摩擦係数が大きくなったことを意味する。

この例は、摩擦係数が潤滑剤によって単純に摩擦係数が小さくなるのではなく条件に応じて大きくなることもあることを示す。このように、摩擦係数は粗さ・物質の組み合わせ・潤滑剤といった容易に想像しうる要因だけでなく様々な要因が絡み合って決定される。

この実験では、①表面粗さ②物質③荷重④摩耗⑤潤滑剤による表面状態変化に着目して摩擦係数に寄与する要因を調べることを目的とする。具体的には、(1)静止摩擦係数の滑り回数依存性を調べ、(2)表面粗さの状態(粗さの大きさや方向)を各物質で定量的に変え、(3)おもりを固定することで荷重を変え、(4)潤滑剤など表面状態を変化させるものを塗布した物質を使用し、(5)潤滑剤において加重待ち時間を変化させることによって実験をした。

摩擦係数の測定方法として、傾斜法を用いた。角度を 0.2 度の精度で測定でき、かつ、スケールの小さい回転ステージを用いることによって数 cm の小さな試料を用いて静止摩擦係数を精度よく測定することができる。さらに、この傾斜法にスマートフォンによる動画撮影を採用することによって動摩擦係数と静止摩擦係数を同時に測定できることを示すことも目的にする。

2. 実験の原理と手法

< 1 > 実験の原理

(1) 静止摩擦係数の測定

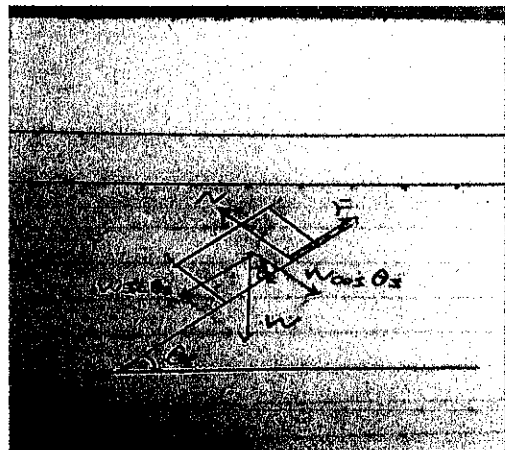
静止摩擦係数 μ_s と静止摩擦力 F_s の関係は、

垂直抗力を N とすると、

$$F_s = \mu_s \times N \quad (2,1)$$

と定義されている。[1] 滑り出す直前の斜面に平行方向の力は、静止摩擦力と等しい。斜面に

図 1 斜面上の静止している物体にかかる力



平行方向の力 F_s は滑り出す直前の角度(摩擦角)

を θ_s 、物体の重さを W 、とそれぞれすると、

$$F_s = W \sin \theta_s \quad (2,2)$$

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、

$$N = W \cos \theta_s \quad (2,3)$$

となる。ここで、とする。これらより静止摩擦係数は、

$$\mu_s = \frac{F_s}{N} = \frac{W \sin \theta_s}{W \cos \theta_s} = \tan \theta_s \quad (2,4)$$

となる。(1.4)式より、回転ステージを用いて滑り出す直前の角度を測定することによって、物体の質量より静止摩擦係数を測定する。

(2) 動摩擦係数の測定[参考文献(1)]

斜面を斜面上の物体が運動するように傾けた状態で固定すると物体にかかる力は図 2 のようになる。運動方程式より、 μ_k 動摩擦係数を物体の質量を m 、加速度を a 、摩擦角を θ_s とすると、

$$ma = mg \sin \theta_s - \mu_k mg \cos \theta_s$$

よって、
$$a = g(\sin \theta_s - \mu_k \cos \theta_s) \quad (2.5)$$

一方、 t 秒間に滑った距離を s とすると

$$s = \frac{1}{2} at^2 \quad (2.6)$$

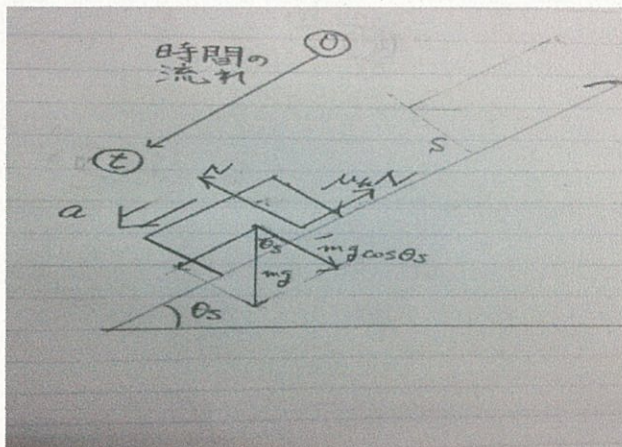
式(2.1),(2.2),(2.4)より、

$$\mu_k = \tan \theta_s - \frac{2s}{gt^2 \cos \theta_s} = \mu_s - \frac{2s}{gt^2 \cos \theta_s} \quad (2.7)$$

よって、(2.7)式から、摩擦角 θ_s とカメラの動画撮影により距離 s 滑ったときの時間 t を測

り、動摩擦係数を出す。また、式(2.7)より静止摩擦係数 μ_s も同時に測定できる。

図 2 動摩擦係数の測定においてはたらく力



<2>準備物

(1)回転ステージの設置

バーニア目盛りの最小読み取り精度が 0.2° であり、傾斜角を高精度で測定することができる。

・回転ステージ

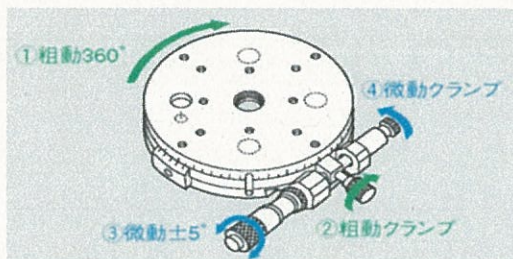
バーニア目盛の最小読み取り精度： 0.2°

マイクロメーターの最小読み取り精度： $55''$ (0.015°)

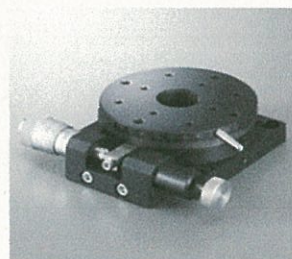
マイクロメーターによる微動範囲： $\pm 5^\circ$

図3 回転ステージの説明図(a)と実物(b)[参考文献(2)]

(a)



(b)



・マグネットベース、鉄板、L字型金属金具、L字型金属土台

(2)摩擦判定スイッチの作成

物質が離れるときに、電気接続が遮断され光が消えるようにすることで滑り始めを判断する装置を作った。

・緑色発光ダイオード

・L字型金属、導電性テープ、ニクロム線、ミノムシクリップ導線、トグルスイッチ

(3)動画撮影による動・静止摩擦係数の測定

・スマートフォン

また、スマートフォンによる動画撮影をするために以下のもので固定台を設置した

・スタンド、バルサ板

また、動画撮影には十分な滑る距離が必要だから、実験対象の板は長いものを使用すると良い。

(4)表面粗さの測定

- ・粗さ測定器 (ミットヨ SJ210)

測定範囲は $360\mu\text{m}$ 、分解能は $0.02\mu\text{m}$ である。

(5)静止摩擦係数測定の対象の物質

- ・アルミニウム板

#60,#320 縦 : 76.30mm 横 : 58.85mm、#150,#600 縦 : 76.40mm 横 54.50mm

#100 縦 : 101.95mm 横 : 62.25mm

- ・アルミニウムブロック

#60,#600 縦 : 30.10mm 横 : 30.05mm 高さ : 19.60mm

#150,#320 縦 : 30.20mm 横 : 30.20mm 高さ : 19.50mm

#100 縦 : 30.15mm 横 : 30.15mm 高さ : 19.80mm

- ・真鍮板

#60,#150 縦 : 94.45mm 横 : 66.75mm、板#320,#600 縦 : 99.90mm

#600 縦 : 205.5mm 横 : 100.50mm(動摩擦係数の測定に用いた)

- ・真鍮ブロック

#60,#320 縦 : 30.00mm 横 : 30.00mm 高さ : 19.00mm

#150,#600 縦 : 29.95mm 横 : 29.95mm 高さ : 19.65mm

- ・アクリル板

#60,#320 縦 : 75.30mm 横 : 50.45mm、#150,#600 縦 : 74.85mm 横 : 50.50mm

研磨なし 縦 : 74.70mm 横 : 49.45mm

- ・アクリルブロック

#60,#320 縦 : 18.30mm 横 : 17.45mm 高さ 18.05mm

#150,#600 縦 : 18.20mm 横 : 18.10mm 高さ 18.10mm

研磨なし 縦 : 18.20mm 横 : 18.10mm 高さ 17.50mm

- ・ガラス板

縦 : 70.10mm 横 70.00mm

(6)潤滑剤及びチョーク

- ・純水
- ・エタノール
- ・グリセリン
- ・6B 鉛筆
- ・ MoS_2 グリース
- ・チョーク(色は蛍光ピンク)

(7)その他

- ・円柱おもり(荷重をのせるため)
- ・水平器(板の水平を確認)
- ・筆(摩擦時の粉をはき取る)

<3>実験の手法

(1)実験装置の組み立て

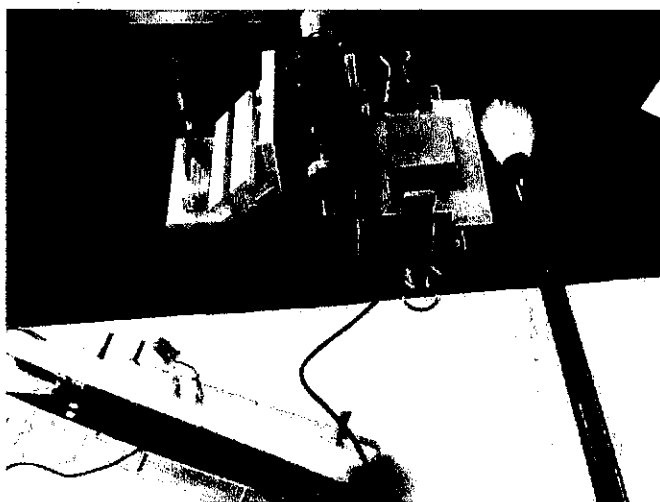
1)回転ステージの設置

- 1.マグネットベースを鉄板上に固定する。
- 2.マグネットベースに、L字型金属金具を設置する。
- 3.L字型金属土台を回転ステージに設置する。
- 4.2.、3.を固定する。

2)すべり判定スイッチの作成

- 1.L字型金属に伝導性テープを巻く。
- 2.1で作成したものをL字型金属土台に目玉クリップで設置する。
- 3.測定対象のブロックに伝導性テープを張り、テープとニクロム線をはんだで接続する。
- 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半田で接続する。
- 5.ミノムシクリップ導線を用いて3.、4.で作ったものを図.5のように接続する。

図 4 実験装置全体図



(2) 実験対象物質の加工

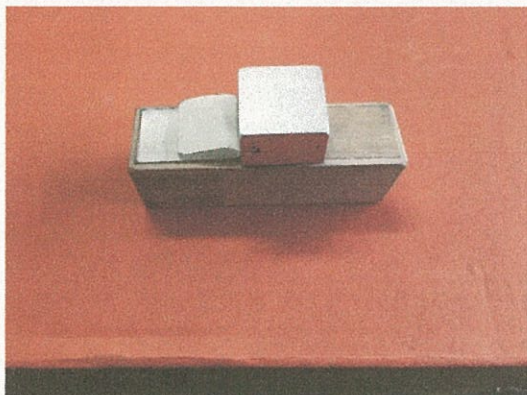
1)ブロックの研磨

- 1.むらが出ないようにブロックを図6のように木片に貼り付けて円を描き研磨する。
- 2.表面が均一になるまで研磨して、その後、水で研磨により出た削りかすを洗い流し、乾いた布でふく。

2)板の研磨

- 1.むらが出ないように板を図7のような木片に固定した紙やすりで研磨する。
- 2.ブロックの研磨の2と同様の作業を行う。

図5 木片に貼り付けたブロック



3) ガラスブロックの作り方(実験Ⅲ)

1. 正方形に切り取ったガラスをアルミニウムブロックに両面テープで貼り付ける。

図6 ガラスブロックとガラス板



4) ブロックへのおもりの取り付け方(実験Ⅳとアクリルブロック)

1. おもりをブロックの上に両面テープで貼り付ける。

注：アクリルブロックは荷重が小さいため、おもりを取り付けた。

図7 おもりを貼り付けたブロック



5) 特定方向への研磨の仕方(実験Ⅴ)

1. 木片をガイドとして研磨する。

(3) 潤滑剤の塗り方(実験Ⅵ～実験Ⅷ)

潤滑剤を塗る際に注意することは、

- ・塗りすぎず、薄く塗る
- ・薄くなったら潤滑剤を追加する

ことである。

1)鉛筆

板とブロックそれぞれに塗る。

2)MoS₂ グリース

板とブロックそれぞれに薄く塗る。

注:塗りすぎると板とブロックが引っ付いてしまう。

3)チョーク (蛍光ピンク)

チョークの粉をブロックと板に貼り付ける

注:塗るとのりのような成分が出てこれがすべりを止めるので塗らない。

4)液体潤滑剤

板とブロックに筆を用いて薄く塗る。

(4)傾斜法による静止摩擦係数の測定(実験Ⅰ～実験Ⅶ)

1) 水平の角度 θ_h の測定

1.水準器を L 字型金属土台中心部分に設置する。

2. 回転ステージを回転させ、バーニア目盛りの読みの角度が 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、水準器の気泡が、中心に来るように調整する。そして、マイクロメーターの目盛を読み取る。

4.式(1.1)を用いて、水平の角度 θ_h を計算する。

5.これらを 10 回繰り返し、平均値、誤差 ((2.9) 式より) を求める。

注 1: 水平の角度 θ_h 、マイクロメーターの目盛を M とすると、

$$\theta_h = 90^\circ - \frac{55}{3600} M \quad (2.8)$$

と表される。

注 2: 誤差の値は、標準誤差の式

$$\delta y = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.9)$$

を用いた。ただし、標準誤差 δy 、測定回数 n 、測定値 y_i 、測定値の平均値を $\bar{y}$ とする。

2) 摩擦角 θ_s の測定

- 1.粗動ねじを用いて回転ステージを水平の位置で固定する。
- 2.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に、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.その後、粗動クランプを用いて、ブロックが滑り落ちるまで回転ステージを回転させる。
この際、わずかにずれ落ちることで発光ダイオードの光は消えるので、発光ダイオードの光の消滅によるすべり判定はあくまでも目安である。
- 5.すべり落ちた際の角度、終点角度 θ_t をバーニヤ目盛りで読み取る。
- 6.筆を用いて摩耗粒子を払い落とす。
- 7.1～5 を 10 回繰り返す、式(2.9)より、 θ_t の平均値、誤差を求める。
8. θ_h 、 θ_t の平均から、式(2.10)、式(2.13)から摩擦角 θ_s と誤差 $\delta\theta_s$ を求める。
- 9.式(2.4)、(2.14)より静止摩擦係数 μ_s と誤差 $\delta\mu_s$ を求める。

注.1：終点角度 θ_t 、水平の角度 θ_h より、摩擦角 θ_s は

$$\theta_s = \theta_t - \theta_h \quad (2.10)$$

と表される。

注.2：誤差の伝搬の一般式は、[参考文献(3)(4)]

$$\delta z = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial y_1}\right)^2_{y_1=\bar{y}_1, \dots, y_n=\bar{y}_n} (\delta y_1)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial y_n}\right)^2_{y_1=\bar{y}_1, \dots, y_n=\bar{y}_n} (\delta y_n)^2} \quad (2.11)$$

である。よって、上限を与える近似式は、

$$\delta z = \left| \left(\frac{\partial f}{\partial y_1} \right)_{y_1=\bar{y}_1, \dots, y_n=\bar{y}_n} \right| \delta y_1 + \dots + \left| \left(\frac{\partial f}{\partial y_n} \right)_{y_1=\bar{y}_1, \dots, y_n=\bar{y}_n} \right| \delta y_n \quad (2.12)$$

である。今回は、式(2.12)を用いる。

ここで、式(2.10)、(2.12)より

$$\delta\theta_s = \delta\theta_h + \delta\theta_t \quad (2.13)$$

よって、式(1.4)、(2.10)、(2.12)、(2.13)より、静止摩擦係数の誤差 $\delta\mu_s$ は

$$\delta\mu_s = \frac{\delta\theta_h + \delta\theta_l}{\cos^2(\theta_h - \theta_l)} = \frac{\delta\theta_s}{\cos^2 \theta_s} \quad (2.14)$$

と表される。

(5) 動画撮影による動・静止摩擦係数の測定(実験Ⅷ)

1. バルサ板を加工してスマートフォンケースを作り、そこにスマートフォンを入れる。
2. スタンドを用いて 1 で作成したものを撮影位置にセットする。
3. 実験対象の板の長さ s を測る。
4. 回転と同時に撮影を開始して、(3)と同様にして摩擦角 θ_s と誤差 $\delta\theta_s$ を測定し、動画解析より滑った時間 t を求める。
5. 式(2.4)、(2.14)より静止摩擦係数 μ_s と誤差 $\delta\mu_s$ を求め、式(2.7)、(2.15)より動摩擦係数 μ_k と誤差 $\delta\mu_k$ を求める。

図 8 動摩擦係数測定の実験全体図



注：

式(2.7)、(2.12)、(2.13)より、動摩擦係数の誤差 $\delta\mu_k$ は、 $\delta s = \delta t = 0$ とすると、

$$\delta\mu_k = \frac{1}{\cos^2 \theta_s} \left(1 - \frac{2s \sin \theta_s}{gt^2} \right) \delta\theta_s \quad (2.15)$$

となる。

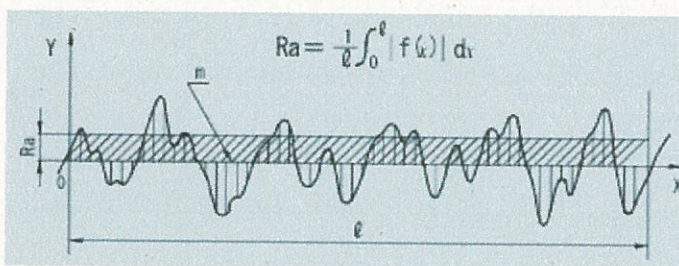
(6)測定物の粗さ

- 1.表面粗さ測定機の測定部分を、測定対象と同じ高さにする。
- 2.表面粗さ測定機を駆動させ、算術平均粗さ R_a を測定する。
- 3.上記を 3 回繰り返し平均値、誤差を求める。(誤差は、式(2.12)により求める。)

注.1：算術平均粗さ R_a ；粗さ曲線からその平均線の方に基準長さだけを抜き取り、この抜き取り部分の平均線の方に X 軸を、縦倍率の方に Y 軸を取り、粗さ曲線を $y=f(x)$ で表したときに、次式 (2.16) 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。[参考文献(5)]

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (2.16)$$

図 9 算術表面粗さの概念図



注 2：粗さ曲線要素の平均長さ (RS_m) [参考文献(6)]

基準長さにおいて、輪郭曲線要素の長さ X_s の平均を表す。

山（谷）と識別する最小高さと最小長さ

最小高さの識別： R_z の 10%

最小長さの識別：基準長さの 1%

図 10 粗さ曲線要素の平均長さの概念図

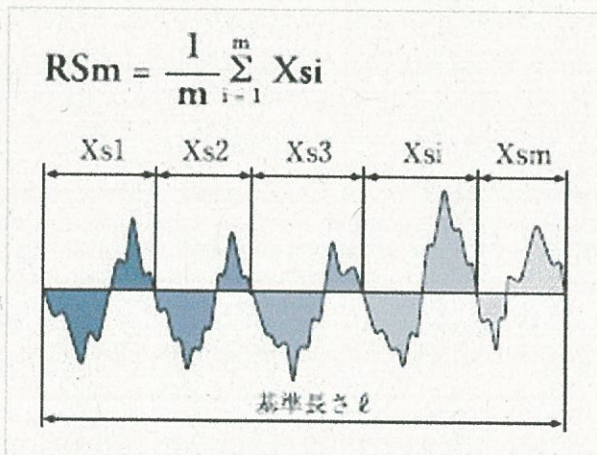


表 1 表面粗さ測定機の測定条件

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

3. 実験結果

実験Ⅰ 表面粗さの測定

注：以下の実験Ⅰ～Ⅴにおいて、「A-B」は、Aをブロック、Bを板として測定したことを意味する。

(目的)

表面粗さ測定機により算術平均粗さ R_a を測定し、以降の章で表面粗さを定量的に扱うことを目的とした。

(結果)

A-Bは、Aをブロック、Bを板として測定したという意味である。また、#60は研磨紙の粗さを表す。

毎回研磨

表 2 真鍮ブロック#60 毎回研磨の算術平均粗さ R_a

回数(回)	1回目前	1回目後	5回目前	5回目後	10回目前	10回目後
	2.166	2.175	2.519	2.268	2.187	2.202
2	1.958	2.125	2.402	2.352	2.631	2.269
3	1.898	2.085	2.281	2.333	2.732	2.398
$R_a(\mu m)$	2.01 ± 0.07	2.13 ± 0.02	2.40 ± 0.06	2.32 ± 0.02	2.5 ± 0.1	2.29 ± 0.05

表 3 真鍮板#60 毎回研磨の算術平均粗さ R_a

回数(回)	1回目前	1回目後	5回目前	5回目後	10回目前	10回目後
1	1.069	1.015	1.098	0.855	0.940	1.041
2	0.822	0.675	1.094	1.134	1.017	1.268
3	0.679	0.842	0.951	1.064	1.148	1.064
$R_a(\mu m)$	0.9 ± 0.1	0.84 ± 0.09	1.05 ± 0.04	1.02 ± 0.07	1.04 ± 0.05	1.12 ± 0.06

(1)アルミニウム-アルミニウム

表 4 アルミニウムブロックの算術平均粗さ R_a

回数(回)	#60(μm)	#100(μm)	#150(μm)	#320(μm)	#600(μm)
1	3.667	1.970	1.518	1.226	0.882
2	3.443	1.826	1.518	1.226	0.879
3	4.512	1.872	1.510	1.198	0.931
$R_a(\mu m)$	3.9 ± 0.3	1.89 ± 0.04	1.515 ± 0.003	1.217 ± 0.009	0.90 ± 0.02

表 5 アルミニウム板の算術平均粗さ R_a

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
$R_a(\mu m)$	2.4 ± 0.1	2.03 ± 0.03	1.74 ± 0.08	0.77 ± 0.07	0.51 ± 0.03

・真鍮-真鍮

表 6 真鍮ブロックの算術平均粗さ R_a

回数(回)	#60(μm)	#150(μm)	#320(μm)	#600(μm)
1	2.531	0.796	0.989	0.394
2	2.208	1.243	0.895	0.415
3	2.226	0.870	0.779	0.385
$R_a(\mu\text{m})$	2.3 ± 0.1	1.0 ± 0.1	0.89 ± 0.06	0.398 ± 0.009

表 7 真鍮板の算術平均粗さ R_a

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	0.71	0.521	0.309	0.200
$R_a(\mu\text{m})$	0.73 ± 0.01	0.57 ± 0.02	0.35 ± 0.03	0.18 ± 0.01

表 8 ガラスブロック(左)とガラス板(右)の算術平均粗さ R_a

回数(回)	そのまま(μm)	回数(回)	そのまま
1	0.028	1	0.023
2	0.023	2	0.016
3	0.035	3	0.018
$R_a(\mu\text{m})$	0.029 ± 0.003	$R_a(\mu\text{m})$	0.019 ± 0.002

表 9 アルミ-ガラスのときのアルミニウムブロックの算術平均粗さ R_a

回数(回)	#60(μm)	#150(μm)	#320(μm)	#600(μm)
1	2.581	1.66	1.454	0.589
2	2.769	1.637	1.542	0.879
3	2.769	1.665	1.462	0.711
$R_a(\mu\text{m})$	2.71 ± 0.06	1.654 ± 0.009	1.49 ± 0.03	0.73 ± 0.08

表 10 真鍮-ガラスのときの真鍮ブロックの算術平均粗さ R_a

回数(回)	#60(μm)	#150(μm)	#320(μm)	#600(μm)
1	2.531	0.796	0.989	0.297
2	2.208	1.243	0.895	0.336
3	2.226	0.870	0.779	0.344
$R_a(\mu\text{m})$	2.3 ± 0.1	1.0 ± 0.1	0.89 ± 0.06	0.33 ± 0.01

表 11 アクリルブロックの算術平均粗さ R_a

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	4.2	1.587	0.971	1.103
$R_a(\mu\text{m})$	0.14 ± 0.01	3.9 ± 0.2	1.7 ± 0.3	1.2 ± 0.1	1.04 ± 0.03

表 12 アクリル板の算術平均粗さ R_a

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	1.07	0.755	0.499
$R_a(\mu\text{m})$	0.0107 ± 0.0007	2.24 ± 0.05	0.98 ± 0.05	0.8 ± 0.1	0.53 ± 0.02

表 13 紙ブロック(左)と紙板(右)の算術平均粗さ R_a

回数(回)	そのまま(μm)	回数(回)	そのまま(μm)
1	2.542	1	3.017
2	2.449	2	2.823
3	2.444	3	3.117
Ra(μm)	2.48 ± 0.03	Ra(μm)	2.99 ± 0.08

実験Ⅱ 静止摩擦係数の測定

(1) 滑りによる摩耗の効果

滑り角度、摩擦係数、標準誤差のデータは、付属資料に示す。

(目的)

実験Ⅱの付属資料から分かるように1回目の値が大きいことがある。この原因を物質が通り過ぎた際に、「軌跡」が残ることが原因ではないかと考えた。それを確かめるために、毎回研磨することにより「軌跡」を消して実験することを考えた。

(結果)

表 14 毎回研磨における摩擦の前後の真鍮ブロック#60(a)と真鍮板#60(b)の Ra

(a)

Ra(μm)	摩擦前	摩擦後
傾斜法の 実験回数		
1回目	2.01 ± 0.07	2.13 ± 0.02
5回目	2.40 ± 0.06	2.32 ± 0.02
10回目	2.5 ± 0.1	2.29 ± 0.05

(b)

Ra(μm)	摩擦前	摩擦後
傾斜法の 実験回数		
1回目	0.9 ± 0.1	0.84 ± 0.09
5回目	1.05 ± 0.04	1.02 ± 0.07
10回目	1.04 ± 0.05	1.12 ± 0.06

表 15 真鍮#60-60 の初回研磨のデータ(a)と毎回研磨のデータ(b)

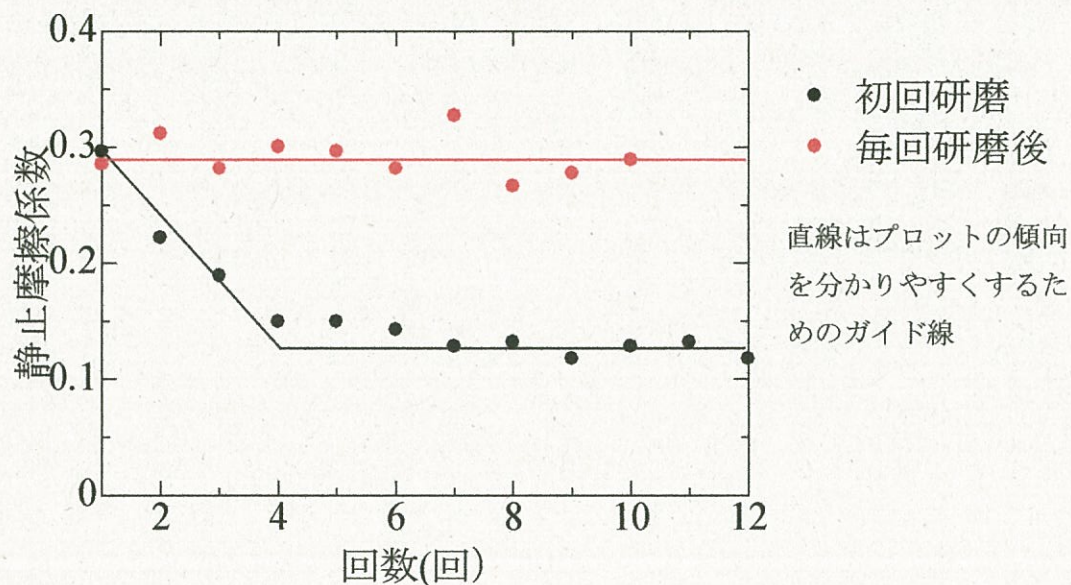
(a)

回数(回)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	16.5	0.30
2	12.5	0.22
3	10.7	0.19
4	8.5	0.15
5	8.5	0.15
6	8.1	0.14
7	7.3	0.13
8	7.5	0.13
9	6.7	0.12
10	7.3	0.13
11	7.5	0.13
12	6.7	0.12

(b)

回数(回)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	15.9	0.29
2	17.3	0.31
3	15.7	0.28
4	16.7	0.30
5	16.5	0.30
6	15.7	0.28
7	18.1	0.33
8	14.9	0.27
9	15.5	0.28
10	16.1	0.29

グラフ 1 真鍮#60-60 の初回研磨と毎回研磨後の静止摩擦係数の回数依存性



・ 静止摩擦係数は、初回研磨では、静止摩擦係数が 1~4 回目までは減少して 4 回目以降は一定値を取るが、毎回研磨をすると、常に一定値を取り、かつ、その値は初回研磨の 1 回目に等しい。

・ 毎回研磨において摩擦の前後で Ra はあまり変化しない。
ことが分かる。

また、この事実より、1,2 回目に現れる摩擦角(すなわち静止摩擦係数)の大きいデータは平均には入れないことにした。

(2) 金属における表面粗さの静止摩擦係数への寄与

滑り角度、摩擦係数、標準誤差のデータは、付属資料に示す。

(目的)

金属において、軟らかいアルミニウムと硬い真鍮におけるそれぞれの静止摩擦係数を粗さの違いに注目して測定する。

<結果>

1)アルミニウムーアルミニウムの静止摩擦係数

摩擦角 θ_s は表 16 のようになる。

表 16 アルミニウムーアルミニウムの摩擦角 θ_s

アルミニウムの θ s(度)		アルミニウム板				
		#60(Ra=2.4(μ m))(度)	#100(Ra=2.03(μ m))(度)	#150(Ra=1.74(μ m))(度)	#320(Ra=0.77(μ m))(度)	#600(Ra=0.51(μ m))(度)
アルミニウム ブロック	#60(Ra=3.9(μ m))(度)	32.5 $\pm$ 0.4		34 $\pm$ 1	29.3 $\pm$ 0.6	32.9 $\pm$ 0.8
	#100(Ra=1.89(μ m))(度)	13.8 $\pm$ 0.9	25 $\pm$ 2	74 $\pm$ 1	69.5 $\pm$ 0.5	59 $\pm$ 1
	#150(Ra=1.515(μ m))(度)	31.7 $\pm$ 0.3		30 $\pm$ 1	33.9 $\pm$ 0.3	27.4 $\pm$ 0.7
	#320(Ra=1.217(μ m))(度)	32.8 $\pm$ 0.5		31.5 $\pm$ 0.8	30.3 $\pm$ 0.8	39 $\pm$ 1
	#600(Ra=0.90(μ m))(度)	36.0 $\pm$ 0.5		33.7 $\pm$ 0.9	33 $\pm$ 1	37.7 $\pm$ 0.9

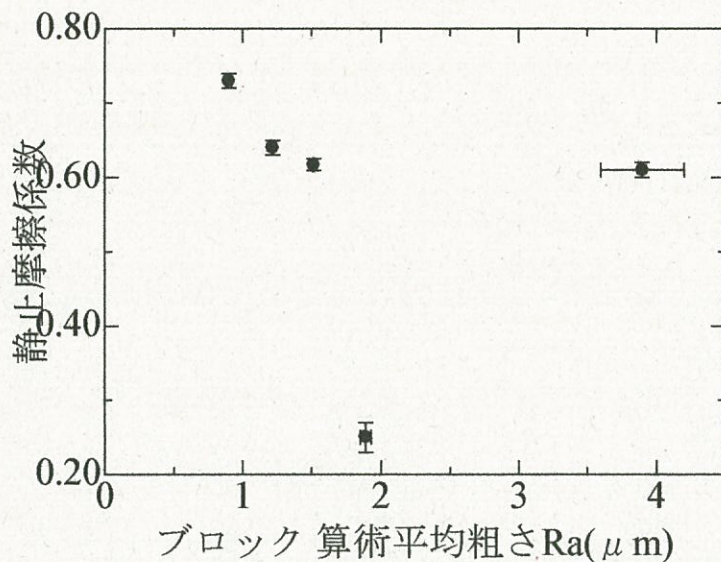
よって、アルミニウムの静止摩擦係数は表 17 のようになる

表 17 アルミニウム-アルミニウムの静止摩擦係数

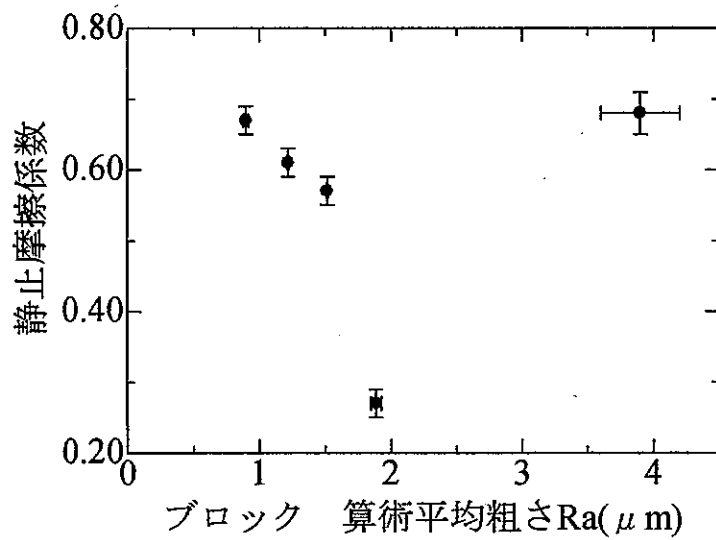
アルミニウムの 静止摩擦係数		アルミニウム板				
		#60(Ra=2.4(μ m))	#100(Ra=2.03(μ m))	#150(Ra=1.74(μ m))	#320(Ra=0.77(μ m))	#600(Ra=0.51(μ m))
アルミニウム ブロック	#60(Ra=3.9(μ m))	0.61 $\pm$ 0.01		0.68 $\pm$ 0.03	0.56 $\pm$ 0.01	0.65 $\pm$ 0.02
	#100(Ra=1.89(μ m))	0.25 $\pm$ 0.02	0.45 $\pm$ 0.04	0.27 $\pm$ 0.02	0.37 $\pm$ 0.01	0.60 $\pm$ 0.03
	#150(Ra=1.515(μ m))	0.617 $\pm$ 0.008		0.57 $\pm$ 0.02	0.67 $\pm$ 0.01	0.52 $\pm$ 0.01
	#320(Ra=1.217(μ m))	0.64 $\pm$ 0.01		0.61 $\pm$ 0.02	0.58 $\pm$ 0.02	0.64 $\pm$ 0.04
	#600(Ra=0.90(μ m))	0.73 $\pm$ 0.01		0.67 $\pm$ 0.02	0.65 $\pm$ 0.03	0.77 $\pm$ 0.02

ただし、黄色に着色したセルは、同じ研磨紙で研磨した板とブロックの組み合わせである。
(注：同じ番号の研磨紙で研磨しても板とブロックで Ra 値が異なるが、Ra は近い値となる)
以上より粗さと静止摩擦係数の関係は以下のグラフで表される。

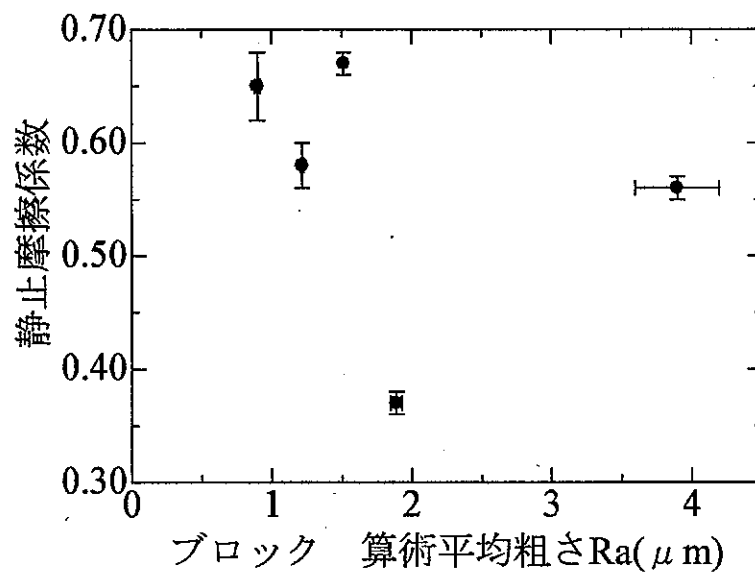
グラフ 2 アルミニウムの静止摩擦係数のブロック粗さ依存性 (板#60, Ra=2.4(μ m))



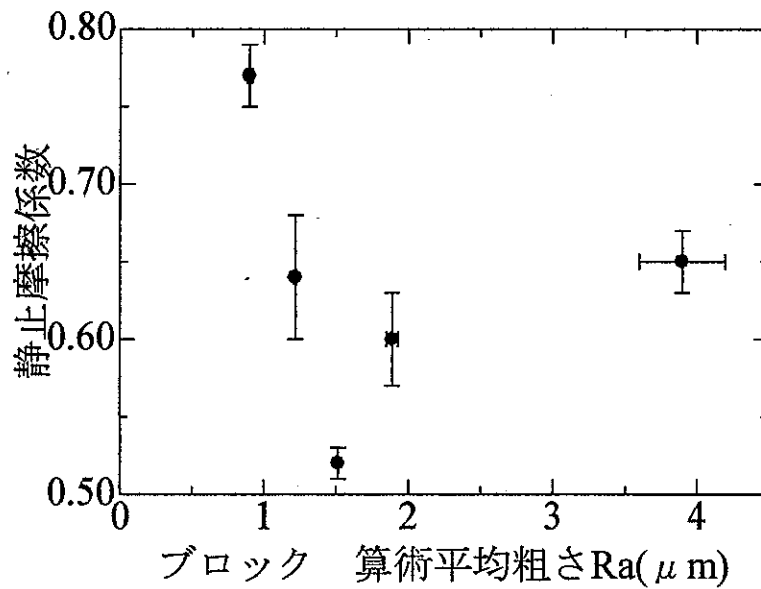
グラフ 3 アルミニウムの静止摩擦係数のブロック粗さ依存性 (板#150, Ra=1.74(μ m))



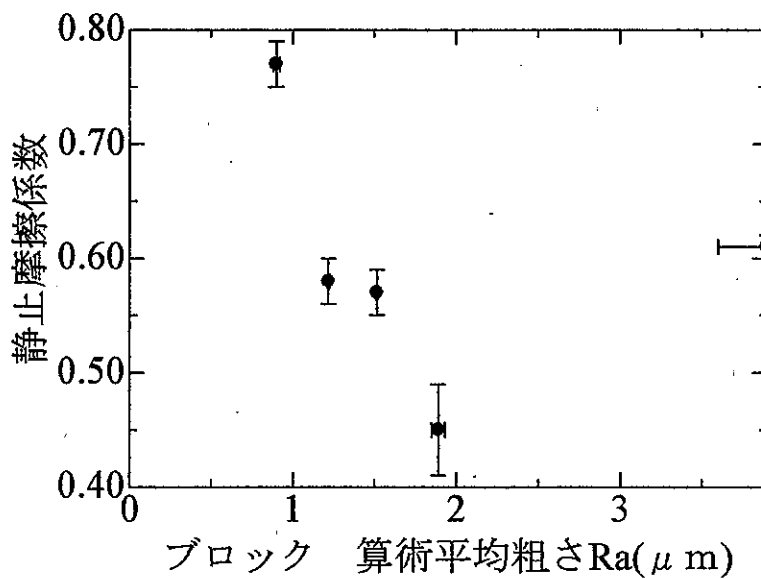
グラフ 4 アルミニウムの静止摩擦係数のブロック粗さ依存性 (板#320, $R_a=0.77(\mu\text{m})$)



グラフ 5 アルミニウムの静止摩擦係数のブロック粗さ依存性 (板#600, $R_a=0.51\mu\text{m}$)



グラフ 6 アルミニウムにおける同じ研磨紙における静止摩擦係数のブロック粗さ依存性



- ・アルミニウムの静止摩擦係数のプロットは、 Ra が $1.5 \sim 2.0(\mu m)$ の範囲で極小点をとる下に凸な曲線を描く。
- ・板とブロックとで算術平均粗さ Ra が近い値をとる組み合わせも、表面粗さに対して静止摩擦係数が同じふるまいをする。

2) 真鍮－真鍮の静止摩擦係数

摩擦角 θ_s は表 18 のようになる。

表 18 真鍮－真鍮の摩擦角 θ_s

真鍮の θ_s (度)		真鍮板			
		#60(Ra=0.73(μm))(度)	#150(Ra=0.57(μm))(度)	#320(Ra=0.35(μm))(度)	#600(Ra=0.18(μm))(度)
真鍮の ブロック	#60(Ra=2.3(μm))(度)	7.9±0.4	9.8±0.5	14.9±0.7	11.9±0.5
	#150(Ra=1.0(μm))(度)	9.2±0.4	18±1	15.2±0.7	21.5±0.9
	#320(Ra=0.89(μm))(度)	11.2±0.8	14.9±0.8	15.8±0.9	15.0±0.6
	#600(Ra=0.398(μm))(度)	12.6±0.6	19.3±0.7	19.6±0.8	23±1

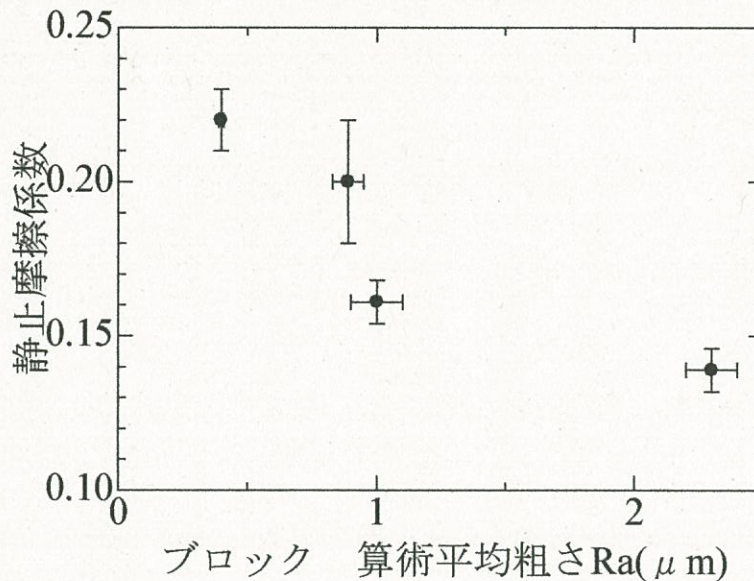
よって、アルミニウムの静止摩擦係数は表 19 のようになる

表 19 真鍮－真鍮の静止摩擦係数

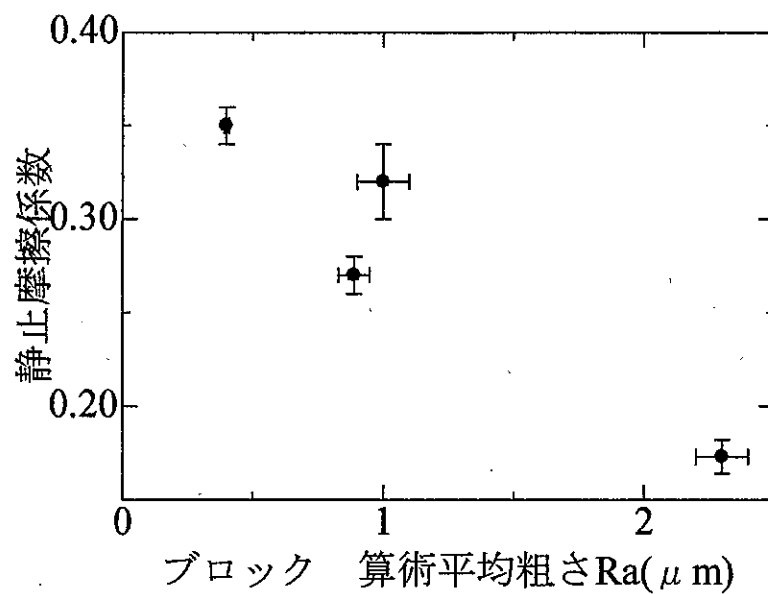
真鍮の 静止摩擦係数		真鍮板			
		#60(Ra=0.73(μm))	#150(Ra=0.57(μm))	#320(Ra=0.35(μm))	#600(Ra=0.18(μm))
真鍮 ブロック	#60(Ra=2.3(μm))	0.139±0.007	0.173±0.009	0.27±0.01	0.21±0.01
	#150(Ra=1.0(μm))	0.161±0.007	0.32±0.02	0.27±0.01	0.39±0.02
	#320(Ra=0.89(μm))	0.20±0.02	0.27±0.01	0.28±0.02	0.27±0.01
	#600(Ra=0.398(μm))	0.22±0.01	0.35±0.01	0.36±0.02	0.43±0.03

ただし、黄色に着色したセルは、同じ研磨紙で研磨した板とブロックの組み合わせである。
(注：同じ番号の研磨紙で研磨しても板とブロックで Ra 値が異なるが、Ra は近い値となる)
以上より粗さと静止摩擦係数の関係は以下のグラフで表される。

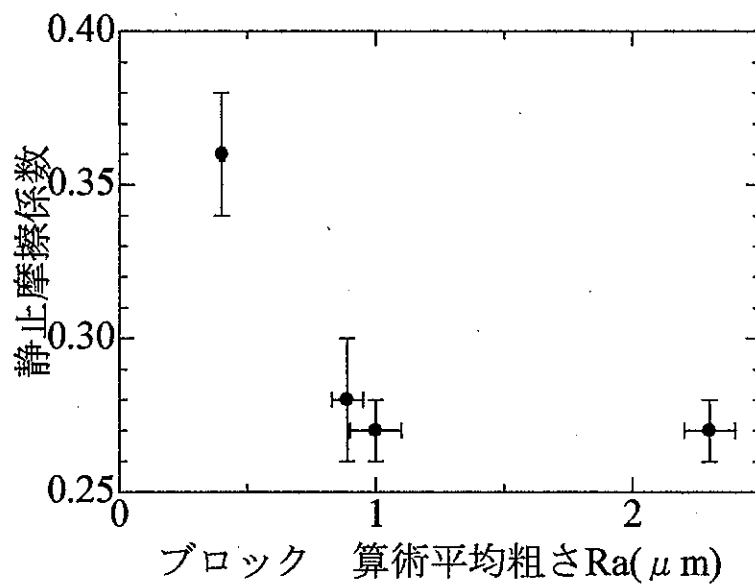
グラフ 7 真鍮の静止摩擦係数のブロック粗さ依存性 (板#60, Ra=0.73(μm))



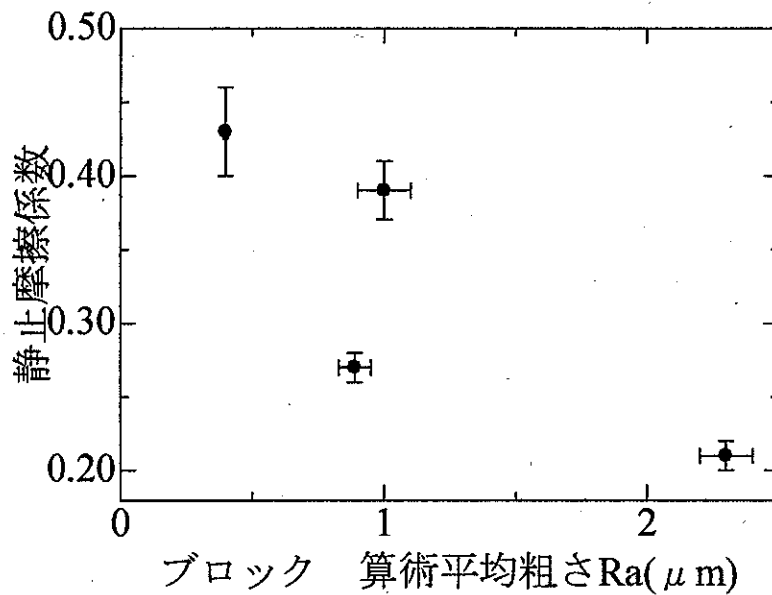
グラフ 8 真鍮の静止摩擦係数のブロック粗さ依存性(板#150, Ra=0.57(μm))



グラフ 9 真鍮の静止摩擦係数のブロック粗さ依存性 (板 320, $R_a=0.35(\mu\text{m})$)

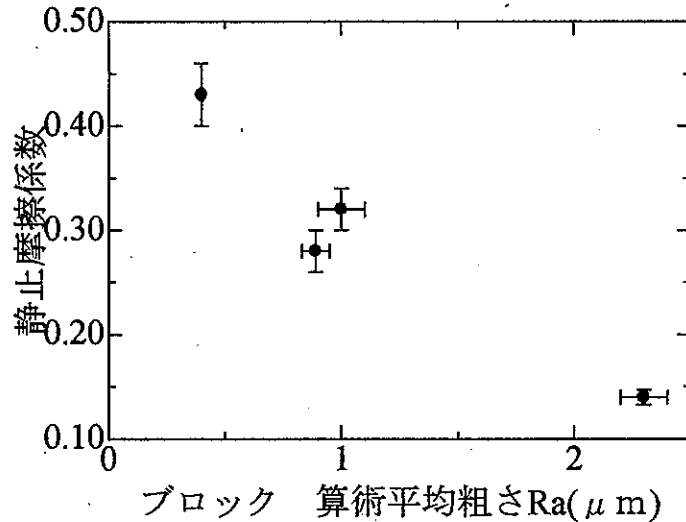


グラフ 10 真鍮の静止摩擦係数のブロック粗さ依存性 (板#600, $R_a=0.18(\mu\text{m})$)



同じ研磨番号の静止摩擦係数をまとめたものは次のようになる。

グラフ 11 真鍮における同じ研磨紙における静止摩擦係数のブロック粗さ依存性



- ・真鍮の静止摩擦係数は、粗さと負の相関関係を持つ。
- ・板とブロックとで算術平均粗さ R_a が近い値をとる組み合わせでも、表面粗さに対して静止摩擦係数が同じふるまいをする。

また、アルミと真鍮とを比較すると

- ・静止摩擦係数は、同じ粗さではアルミ > 真鍮となる

(3) 非金属における表面粗さの違いによる静止摩擦係数への寄与

滑り角度、摩擦係数、標準誤差のデータは、付属資料に示す。

(目的)

非金属のなかで、ガラスとアクリルの静止摩擦係数をそれぞれ測定する。ガラスは金属との間の静止摩擦係数も測定して、アクリルは粗さを変えて実験する。ガラスは研磨をせずに実験を行った。

(結果)

注：ガラスは研磨をせずに実験を行った。

1) ガラスーガラス

算術平均粗さ R_a の測定結果はガラスブロックでは $R_a=0.029\pm0.003$ 、ガラス板では $R_a=0.019\pm0.002$ である。また、摩擦角 $\theta_s=13.6\pm0.04$ より、静止摩擦係数は 0.24 ± 0.01 である。

2) アルミニウムーガラス

摩擦角 θ_s 、静止摩擦係数は表 20 のようになる。

表 20 アルミーガラスの摩擦角 θ_s 及び静止摩擦係数

アルミブロックの $R_a(\mu m)$	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
2.71(#60)	7.2 ± 0.3	0.127 ± 0.005
1.654(#150)	8.6 ± 0.3	0.151 ± 0.006
1.49(#320)	8.4 ± 0.2	0.147 ± 0.004
0.73(#600)	10.6 ± 0.2	0.187 ± 0.004

3) 真鍮ーガラス

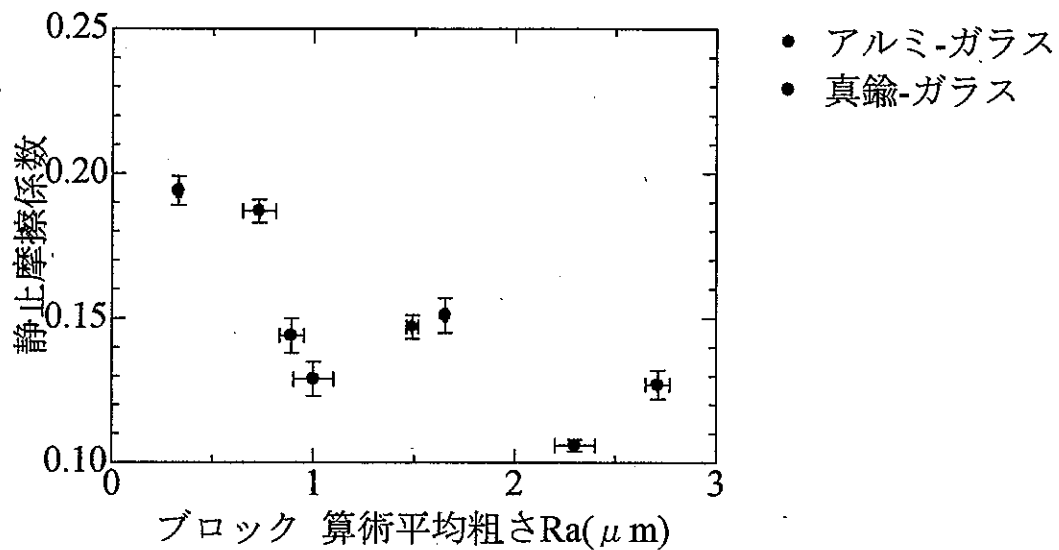
摩擦角 θ_s 、静止摩擦係数は表 21 のようになる。

表 21 真鍮ーガラスの摩擦角 θ_s 及び静止摩擦係数

真鍮ブロックの $R_a(\mu m)$	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
2.3(#60)	6.0 ± 0.1	0.106 ± 0.002
1.0(#150)	7.3 ± 0.3	0.129 ± 0.006
0.89(#320)	8.2 ± 0.3	0.144 ± 0.006
0.33(#600)	1.0 ± 0.3	0.194 ± 0.005

2)、3)より、アルミ、真鍮の粗さと静止摩擦係数の関係はグラフ 12 で表される。

グラフ 12 ガラス板におけるアルミ・真鍮ブロックとの静止摩擦係数のブロック粗さ依存性



- ・ガラス板の上で、金属の静止摩擦係数は表面粗さに対して負の相関関係を持つが、金属同士のときより変化が小さい。(金属同士では例えば $R_a=0.18\mu\text{m}$ の真鍮板のとき、静止摩擦係数の粗さによる範囲は約 0.2 だが、真鍮-ガラスでの範囲は約 0.1 である。)

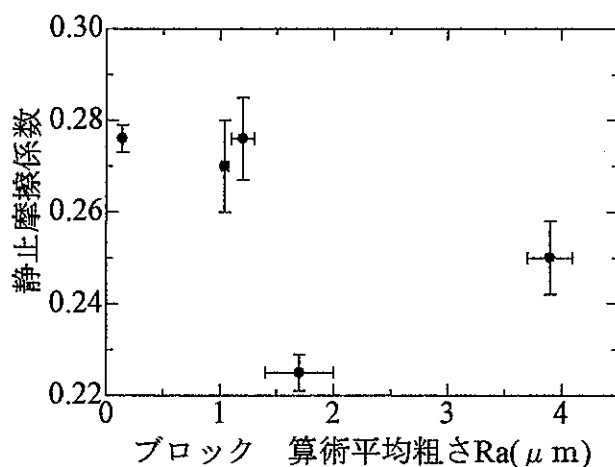
4) アクリル-アクリル

摩擦角、静止摩擦係数は表 22 のようになる。

表 22 アクリル-アクリルの摩擦角 θ_s 及び静止摩擦係数

粗さ	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
#60($R_a=3.9(\mu\text{m})$)-60($R_a=2.24(\mu\text{m})$)	12.7 ± 0.2	0.225 ± 0.004
#150($R_a=1.7(\mu\text{m})$)-150($R_a=0.98(\mu\text{m})$)	15.4 ± 0.5	0.276 ± 0.009
#320($R_a=1.2(\mu\text{m})$)-320($R_a=0.8(\mu\text{m})$)	15.1 ± 0.6	0.27 ± 0.01
#600($R_a=1.04(\mu\text{m})$)-600($R_a=0.53(\mu\text{m})$)	15.5 ± 0.1	0.276 ± 0.003
そのまま($R_a=0.14(\mu\text{m})$)-そのまま($R_a=0.0107(\mu\text{m})$)	14.0 ± 0.4	0.250 ± 0.008

グラフ 12 アクリルの同じ研磨紙における静止摩擦係数のブロック粗さ依存性



・アクリルは表面粗さに対する静止摩擦係数の範囲が 0.22～0.28 と小さく、下に凸な曲線を描くように変化する。

ことが分かる。

また、ガラスとアクリルにおいて

・ガラス、アクリルともに金属同士の時より静止摩擦係数が小さい。

(4)研磨の方向が静止摩擦係数に与える影響

(目的)

物質が特定の方向にのみ磨かれた際の静止摩擦係数の影響を測定する。

(結果)

注 1:「垂直」は、滑る方向に対して垂直方向に磨いたことを意味し、「平行」は、滑る方向に対して平行に磨いたことを意味する。

注 2:「ランダム」は、2.実験手法で説明した方法で表面を均一にみがいた板・ブロックである。

表 23 真鍮#60-60 における研磨の方向それぞれの摩擦角 θ_s 及び静止摩擦係数

研磨の方向	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
ランダム	8.0 ± 0.4	0.140 ± 0.007
垂直-垂直	10.1 ± 0.3	0.177 ± 0.005
垂直-平行	11.4 ± 0.5	0.202 ± 0.009
平行-垂直	11.7 ± 0.8	0.21 ± 0.01
平行-平行	9.5 ± 0.3	0.168 ± 0.006

・研磨方向が特定方向のときはランダムな方向より静止摩擦係数が大きくなる。

・静止摩擦係数は、垂直-垂直、平行-平行において互いに誤差の範囲で等しくなる。

・磨く方向をブロックと板とで垂直にすることで同じ方向のときより静止摩擦係数が約

0.04 大きくなり、「垂直－平行」と「平行－垂直」の値は静止摩擦係数が誤差の範囲で等しくなった。

(5)荷重による静止摩擦係数への寄与

(目的)

対象の物質に与える荷重による静止摩擦係数への影響を調べるために、最大静止摩擦力と荷重の関係を測定する。

(結果)

表 24 アルミ#60(Ra=3.9(μm))-60(Ra=2.4(μm))の摩擦角 θ_s 、静止摩擦係数、垂直抗力 N

及び斜面方向の力 F

質量(g)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	垂直抗力N(N)	斜面方向の力F(N)
47.3	31.4 $\pm$ 0.4	0.61 $\pm$ 0.01	0.40	0.242 $\pm$ 0.003
97.3	14.9 $\pm$ 0.7	0.27 $\pm$ 0.01	0.93	0.19 $\pm$ 0.01
197.4	11.6 $\pm$ 0.3	0.204 $\pm$ 0.005	1.90	0.39 $\pm$ 0.01
297.3	16.3 $\pm$ 0.6	0.29 $\pm$ 0.01	2.80	0.82 $\pm$ 0.03
397.5	19.2 $\pm$ 0.8	0.35 $\pm$ 0.02	3.68	1.28 $\pm$ 0.05
497.3	24.3 $\pm$ 0.4	0.451 $\pm$ 0.009	4.44	2.01 $\pm$ 0.03

表 25 アルミ#320(Ra=1.217(μm))-320(Ra=0.77(μm))の摩擦角 θ_s 、静止摩擦係数、垂直

抗力 N 及び斜面方向の力 F

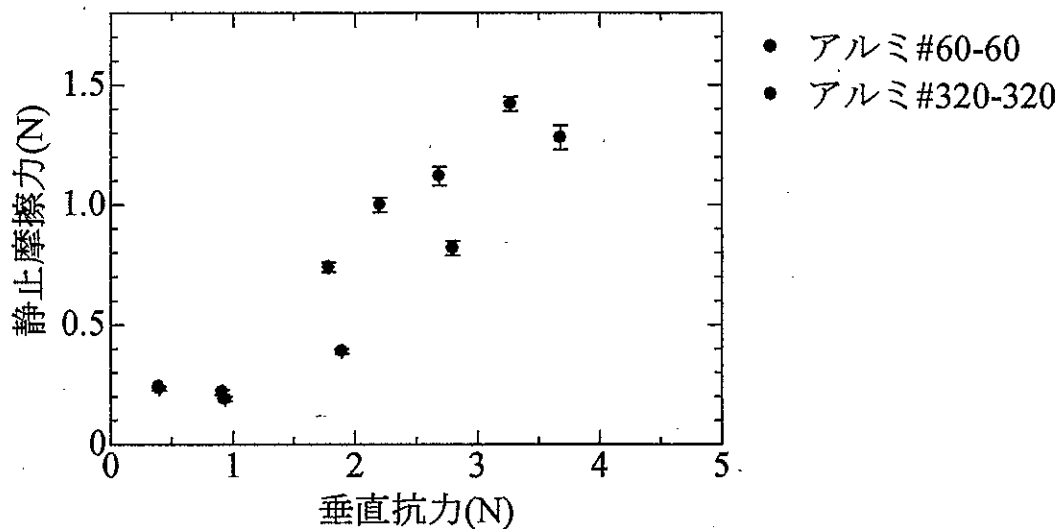
質量(g)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	垂直抗力N(N)	斜面方向の力F(N)
47.3	30.3 $\pm$ 0.8	0.58 $\pm$ 0.02	0.40	0.234 $\pm$ 0.006
97.3	16.4 $\pm$ 0.7	0.29 $\pm$ 0.01	0.91	0.22 $\pm$ 0.01
197.4	22.6 $\pm$ 0.6	0.42 $\pm$ 0.01	1.79	0.74 $\pm$ 0.02
247.1	24.5 $\pm$ 0.7	0.45 $\pm$ 0.01	2.20	1.00 $\pm$ 0.03
297.3	22.7 $\pm$ 0.8	0.42 $\pm$ 0.02	2.69	1.12 $\pm$ 0.04
397.5	21.3 $\pm$ 0.5	0.39 $\pm$ 0.01	3.63	1.42 $\pm$ 0.03
497.3	25.8 $\pm$ 0.6	0.48 $\pm$ 0.01	4.39	2.12 $\pm$ 0.05

算術平均粗さ Ra は実験 II と同じである。

以上より、F と N の関係は次のグラフで表される。

グラフ 13 アルミ#60(Ra=3.9(μm))-60(Ra=2.4(μm))及び

アルミ#320(Ra=1.217(μm))-320(Ra=0.77(μm))の F-N 図



グラフから、

- ・#320-320 のプロットは直線関係を示す。
- ・#60-60 は、プロットが直線からはなれており、その軌跡は垂直抗力、つまり荷重が増すにつれて変化が大きくなる。

実験Ⅲ 液体潤滑剤の静止摩擦係数への寄与

滑り角度、摩擦係数、標準誤差のデータは、付属資料に示す。

(1)液体潤滑剤と加重下待ち時間

(目的)

流動性を持つ液体潤滑剤が、加重がある時間によりどのように静止摩擦係数に寄与するかを調べる。

(結果)

注：表 26～表 31 内の項目で、

加重下待ち時間なし…水平位置から荷重を載せずに実験開始を意味する

表 26 純水における加重下待ち時間の有無による摩擦角 θ_s

対象の物質	加重下待ち時間あり(度)	加重下待ち時間なし(度)
真鍮#60(Ra=2.3(μm))-60(Ra=0.73(μm))(度)	20.5 $\pm$ 0.5	14.6 $\pm$ 0.9
真鍮#600(Ra=0.398(μm))-600(Ra=0.18(μm))(度)	19.4 $\pm$ 0.6	13.4 $\pm$ 0.9
アルミ#60(Ra=3.9(μm))-60(Ra=2.4(μm))(度)	21 $\pm$ 2	42.5 $\pm$ 0.9
アルミ#600(Ra=0.90(μm))-600(Ra=0.51(μm))(度)	37 $\pm$ 2	24 $\pm$ 1

表 27 グリセリンにおける加重下待ち時間の有無による摩擦角 θ_s

対象の物質	加重下待ち時間あり(度)	加重下待ち時間なし(度)
真鍮#60(Ra=2.3(μ m))-60(Ra=0.73(μ m))(度)	25 $\pm$ 1	21.1 $\pm$ 0.6
真鍮#600(Ra=0.398(μ m))-600(Ra=0.18(μ m))(度)	22.3 $\pm$ 0.7	0.8 $\pm$ 0.2
アルミ#60(Ra=3.9(μ m))-60(Ra=2.4(μ m))(度)	17.4 $\pm$ 0.7	16.6 $\pm$ 0.7
アルミ#600(Ra=0.90(μ m))-600(Ra=0.51(μ m))(度)	40 $\pm$ 1	1.4 $\pm$ 0.2

表 28 キャノーラ油における加重下待ち時間の有無による摩擦角 θ_s

対象の物質	加重下待ち時間あり(度)	加重下待ち時間なし(度)
真鍮#60(Ra=2.3(μ m))-60(Ra=0.73(μ m))(度)	9.3 $\pm$ 0.6	10.5 $\pm$ 0.6
真鍮#600(Ra=0.398(μ m))-600(Ra=0.18(μ m))(度)	21.0 $\pm$ 0.7	14.0 $\pm$ 0.9
アルミ#60(Ra=3.9(μ m))-60(Ra=2.4(μ m))(度)	22 $\pm$ 1	16.2 $\pm$ 0.6
アルミ#600(Ra=0.90(μ m))-600(Ra=0.51(μ m))(度)	40 $\pm$ 1	32.6 $\pm$ 0.9

よって、静止摩擦係数はそれぞれ次のようになる。

表 29 純水における加重下待ち時間の有無による静止摩擦係数

対象の物質	加重下待ち時間あり	加重下待ち時間なし
真鍮#60(Ra=2.3(μ m))-60(Ra=0.73(μ m))	0.37 $\pm$ 0.01	0.26 $\pm$ 0.02
真鍮#600(Ra=0.398(μ m))-600(Ra=0.18(μ m))	0.35 $\pm$ 0.01	0.24 $\pm$ 0.02
アルミ#60(Ra=3.9(μ m))-60(Ra=2.4(μ m))	0.38 $\pm$ 0.03	0.92 $\pm$ 0.03
アルミ#600(Ra=0.90(μ m))-600(Ra=0.51(μ m))	0.74 $\pm$ 0.06	0.45 $\pm$ 0.02

表 30 グリセリンにおける加重下待ち時間の有無による静止摩擦係数

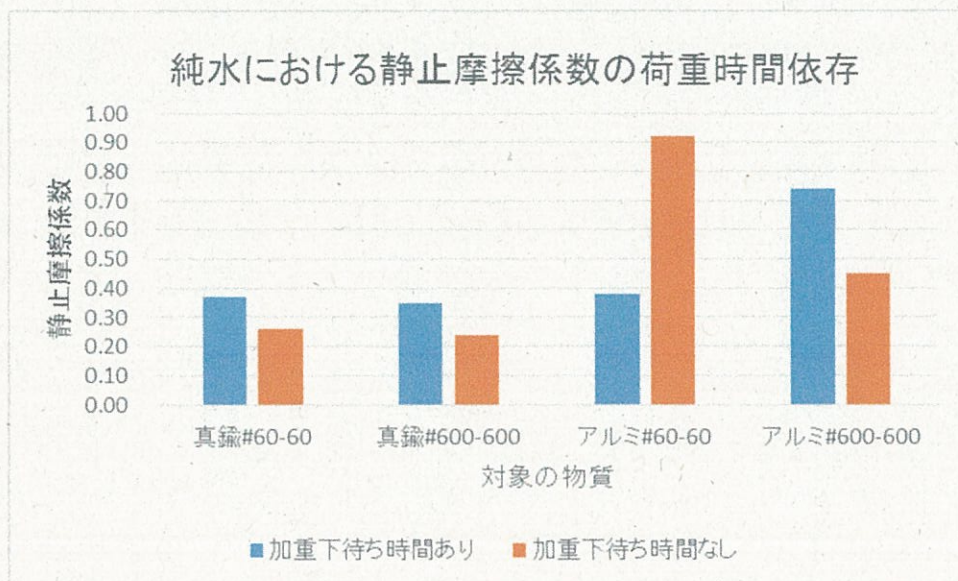
対象の物質	加重下待ち時間あり	加重下待ち時間なし
真鍮#60(Ra=2.3(μ m))-60(Ra=0.73(μ m))	0.41 $\pm$ 0.01	0.38 $\pm$ 0.1
真鍮#600(Ra=0.398(μ m))-600(Ra=0.18(μ m))	0.47 $\pm$ 0.02	0.015 $\pm$ 0.004
アルミ#60(Ra=3.9(μ m))-60(Ra=2.4(μ m))	0.31 $\pm$ 0.01	0.30 $\pm$ 0.01
アルミ#600(Ra=0.90(μ m))-600(Ra=0.51(μ m))	0.84 $\pm$ 0.04	0.024 $\pm$ 0.003

表 31 キャノーラ油における加重下待ち時間の有無による静止摩擦係数

対象の物質	加重下待ち時間あり	加重下待ち時間なし
真鍮#60(Ra=2.3(μ m))-60(Ra=0.73(μ m))	0.16 $\pm$ 0.01	0.19 $\pm$ 0.01
真鍮#600(Ra=0.398(μ m))-600(Ra=0.18(μ m))	0.38 $\pm$ 0.01	0.25 $\pm$ 0.02
アルミ#60(Ra=3.9(μ m))-60(Ra=2.4(μ m))	0.40 $\pm$ 0.02	0.29 $\pm$ 0.01
アルミ#600(Ra=0.90(μ m))-600(Ra=0.51(μ m))	0.87 $\pm$ 0.03	0.64 $\pm$ 0.02

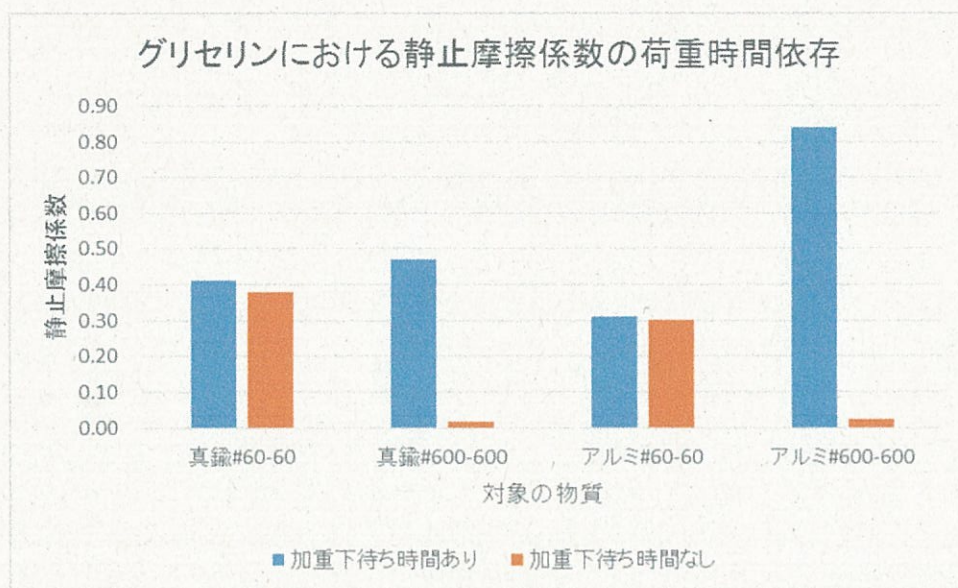
純水、グリセリン、キャノーラ油における加重下待ち時間の有無による静止摩擦係数を比較するグラフは以下のとおりである。

グラフ 14 純水における静止摩擦係数の荷重時間依存



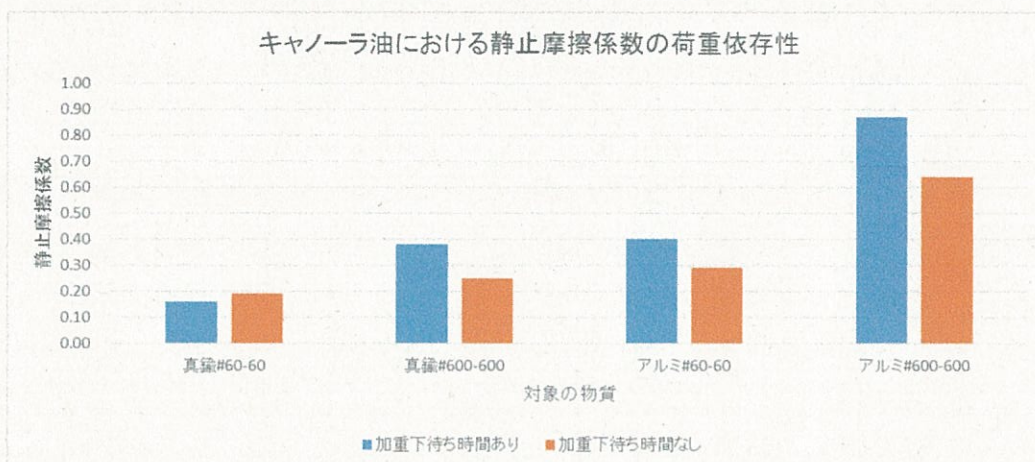
・アルミ#60-60 以外において、静止摩擦係数は、「加重下待ち時間なし」のほうが小さくなる。

グラフ 15 グリセリンにおける静止摩擦係数の荷重時間依存



・静止摩擦係数は、「加重下待ち時間なし」のほうが小さくなり、特に、真鍮#600-600 とアルミ#600-600 において、「加重下待ち時間なし」の静止摩擦係数は著しく小さくなる。

グラフ 16 キャノーラ油における静止摩擦係数の荷重時間依存



- ・真鍮#60-60 以外において、静止摩擦係数は、「加重下待ち時間なし」のほうが小さくなる。純水、グリセリン、キャノーラ油を比較すると
- ・全体的に、「加重下待ち時間なし」のときのほうが「加重下待ち時間あり」のときよりも静止摩擦係数は小さい。

(2) 静止摩擦係数の粘性率依存性

(目的)

濃度により粘性率が大きく変化するグリセリン水溶液を潤滑剤に用いることによって、静止摩擦係数の粘性率依存性を調べる。

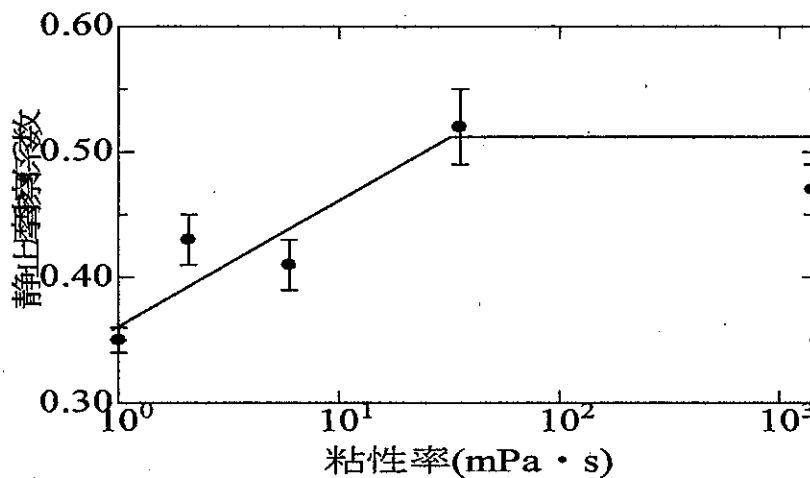
(結果)

表 32 グリセリン水溶液の摩擦角 θ_s 及び静止摩擦係数の粘性率依存性 (真鍮#600-600)

濃度(%)	粘性率(mPa・s)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
0	1.005	19.4±0.6	0.35±0.01
25	2.087	23±1	0.43±0.02
50	6	22±1	0.41±0.02
75	35.5	27±1	0.52±0.03
100	1410	25±1	0.47±0.02

グラフ 17 グリセリン水溶液の摩擦角 θ_s 及び静止摩擦係数の粘性率依存性

(真鍮#600-600、粘性率は 20℃の文献値[参考文献])



直線はプロットの傾向を分かりやすくするためのガイド線

・グリセリン水溶液において静止摩擦係数は、粘性率 $10^0 \sim 40 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ の範囲では粘性率の増加に対して増加するが、 $40 \sim 10^3 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ の範囲では一定になる。

(3) 表面粗さの異なる金属における静止摩擦係数に対する液体潤滑剤の効果

(目的)

表面粗さに対して静止摩擦係数に与える液体潤滑剤の効果を調べる。

(結果)

粗さの異なるアルミニウムと真鍮の静止摩擦係数に対する純水とエタノールの効果は次のようになった。

表 33 アルミニウムにおけるエタノールの摩擦角 θ_s 、静止摩擦係数の表面粗さ依存性(ア

ルミ板 #600, $R_a = 0.51 \mu\text{m}$)

ブロックの表面粗さ	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
#60($R_a = 3.9(\mu\text{m})$)	23 ± 1	0.43 ± 0.02
#150($R_a = 1.515(\mu\text{m})$)	30 ± 1	0.57 ± 0.02
#320($R_a = 1.217(\mu\text{m})$)	29.3 ± 0.5	0.56 ± 0.01
#600($R_a = 0.90(\mu\text{m})$)	28.3 ± 0.9	0.54 ± 0.02

表 34 真鍮におけるエタノールの摩擦角 θ_s 、静止摩擦係数の表面粗さ依存性(真鍮板

#600, $R_a = 0.18 \mu\text{m}$)

ブロックの表面粗さ	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
#60($R_a = 2.3(\mu\text{m})$)	18.6 ± 0.7	0.34 ± 0.01
#150($R_a = 1.0(\mu\text{m})$)	21.1 ± 0.7	0.39 ± 0.01
#320($R_a = 0.89(\mu\text{m})$)	23.1 ± 0.8	0.43 ± 0.02
#600($R_a = 0.398(\mu\text{m})$)	24.0 ± 0.7	0.44 ± 0.02

表 35 アルミニウムにおける純水の摩擦角 θ_s 、静止摩擦係数の表面粗さ依存性(アルミ板

#600, $R_a=0.51 \mu m$)

ブロックの表面粗さ	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	$R_a(\mu m)$
#60($R_a=3.9(\mu m)$)	38 ± 1	0.78 ± 0.04	3.9 ± 0.3
#150($R_a=1.515(\mu m)$)	38 ± 1	0.79 ± 0.04	1.515 ± 0.003
#320($R_a=1.217(\mu m)$)	36 ± 2	0.72 ± 0.05	1.217 ± 0.009
#600($R_a=0.90(\mu m)$)	37 ± 2	0.74 ± 0.06	0.90 ± 0.02

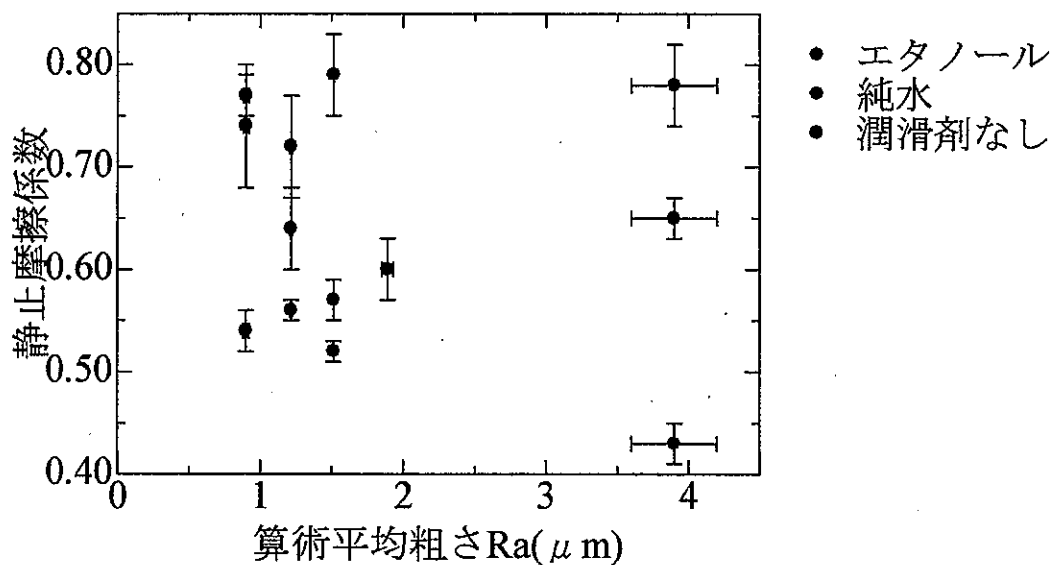
表 36 真鍮における純水の摩擦角 θ_s 、静止摩擦係数の表面粗さ依存性(真鍮板

#600, $R_a=0.18 \mu m$)

ブロックの表面粗さ	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
#60($R_a=2.3(\mu m)$)	17.4 ± 0.5	0.313 ± 0.009
#150($R_a=1.0(\mu m)$)	22.0 ± 0.3	0.405 ± 0.007
#320($R_a=0.89(\mu m)$)	24.3 ± 0.7	0.45 ± 0.02
#600($R_a=0.398(\mu m)$)	19.4 ± 0.6	0.35 ± 0.01

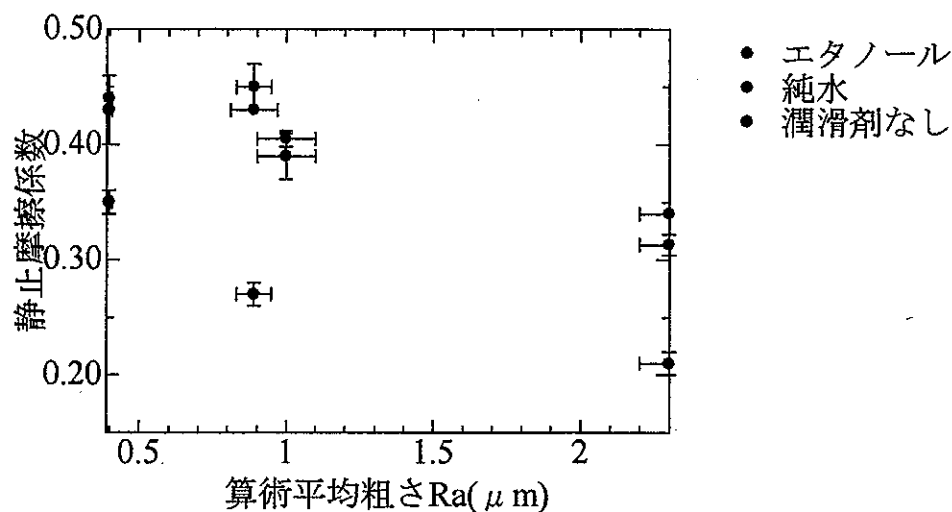
以上より、グラフは次のようになる。

グラフ 18 アルミ板($R_a=0.51 \mu m$)における潤滑剤の表面粗さ依存性



- ・潤滑作用よりむしろ静止摩擦係数を増加させる場合がある。
- ・液体潤滑剤を用いると静止摩擦係数の粗さ依存性が小さい。(特に、アルミ板 $R_a=0.51 \mu m$ における純水の場合)

グラフ 19 真鍮板(#600, Ra=0.18 μm)における潤滑剤の表面粗さ依存性



- ・潤滑作用よりむしろ静止摩擦係数を増加させる場合がある。
- ・液体潤滑剤を用いると静止摩擦係数の粗さ依存性が小さい。

(4)液体潤滑剤の種類と静止摩擦係数の関係

(目的)

液体潤滑剤の種類と静止摩擦係数の関係を調べる。

(結果)

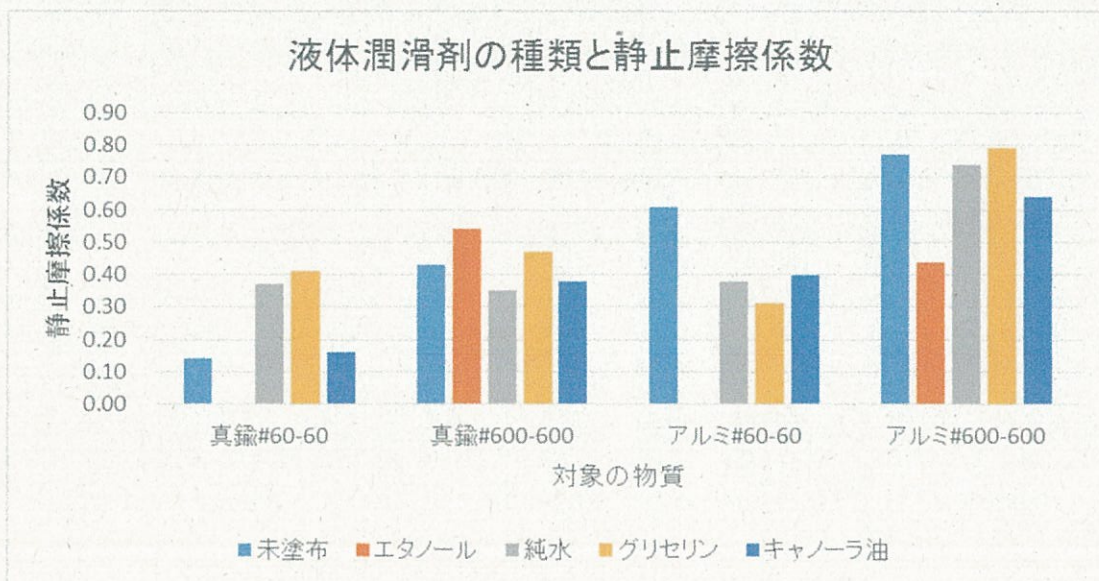
表 37 液体潤滑剤の種類と摩擦角 θ_s

摩擦角 θ_s (度)		液体潤滑剤の種類				
		未塗布	エタノール	純水	グリセリン	キャノーラ油
対象の物質	真鍮#60(Ra=2.3(μm))-60(Ra=0.73(μm))	7.9±0.4		20.5±0.5	25±1	9.3±0.6
	真鍮#600(Ra=0.398(μm))-600(Ra=0.18(μm))	23±1	28.3±0.9	19.4±0.6	22.3±0.7	21.0±0.7
	アルミ#60(Ra=3.9(μm))-60(Ra=2.4(μm))	32.5±0.4		21±2	17.4±0.7	22±1
	アルミ#600(Ra=0.90(μm))-600(Ra=0.51(μm))	37.7±0.9	24.0±0.7	36±2	40±1	32.6±0.9

表 38 液体潤滑剤の種類と静止摩擦係数

静止摩擦係数		液体潤滑剤の種類				
		未塗布	エタノール	純水	グリセリン	キャノーラ油
対象の物質	真鍮#60(Ra=2.3(μm))-60(Ra=0.73(μm))	0.138±0.007		0.37±0.01	0.41±0.01	0.16±0.01
	真鍮#600(Ra=0.398(μm))-600(Ra=0.18(μm))	0.43±0.03	0.54±0.02	0.35±0.01	0.47±0.02	0.38±0.01
	アルミ#60(Ra=3.9(μm))-60(Ra=2.4(μm))	0.61±0.01		0.38±0.03	0.31±0.01	0.40±0.02
	アルミ#600(Ra=0.90(μm))-600(Ra=0.51(μm))	0.77±0.02	0.44±0.02	0.74±0.06	0.84±0.04	0.64±0.02

グラフ 20 液体潤滑剤の種類と静止摩擦係数



- ・同じ潤滑剤でも対象物質により静止摩擦係数を減少させる場合と増加させる場合がある。
- ・キャノーラ油は真鍮#60-60 以外で潤滑作用を示すが、真鍮#60-60 では静止摩擦係数はほとんど変化しない。

実験Ⅳ 固体による表面状態変化が静止摩擦係数へ与える影響

滑り角度、摩擦係数、標準誤差のデータは、付属資料に示す。

(目的)

MoS₂ グリース、6B 鉛筆を物質表面に塗布し、チョーク(蛍光ピンク)の粒子を物質表面に塗布することにより表面状態を変化させ、表面状態変化による静止摩擦係数への影響を調べる。

(結果)

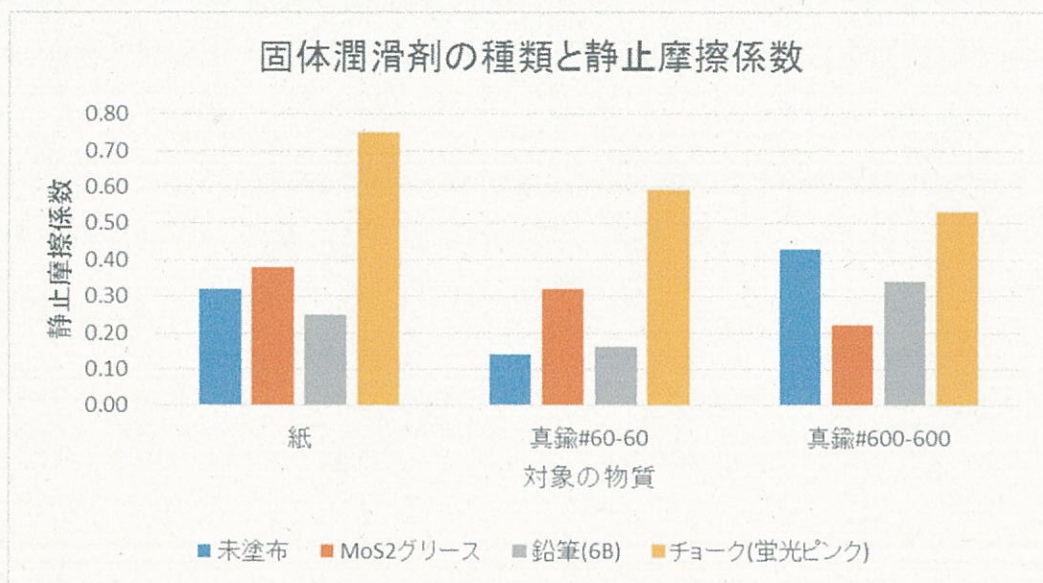
表 39 固体の種類と対象の物質に対応する摩擦角 θ_s

摩擦角 θ_s (度)		固体潤滑剤の種類			
		未塗布	MoS ₂ グリース	鉛筆(6B)	チョーク(蛍光ピンク)
対象の物質	紙(Ra=2.48(μ m))-紙(Ra=2.99(μ m))	17.7 $\pm$ 0.8	20.6 $\pm$ 0.6	14.0 $\pm$ 0.5	36.9 $\pm$ 0.8
	真鍮#60(Ra=2.3(μ m))-60(Ra=0.73(μ m))	7.9 $\pm$ 0.4	17.6 $\pm$ 0.8	9.3 $\pm$ 0.5	30.4 $\pm$ 0.9
	真鍮#600(Ra=0.398(μ m))-600(Ra=0.18(μ m))	23 $\pm$ 1	12.7 $\pm$ 0.8	18.6 $\pm$ 0.7	28.1 $\pm$ 0.8

表 40 固体の種類と対象の物質に対応する静止摩擦係数

静止摩擦係数		固体潤滑剤の種類			
		未塗布	MoS ₂ グリース	鉛筆(6B)	チョーク(蛍光ピンク)
対象の物質	紙(Ra=2.48(μ m))-紙(Ra=2.99(μ m))	0.32 $\pm$ 0.02	0.38 $\pm$ 0.01	0.25 $\pm$ 0.01	0.75 $\pm$ 0.02
	真鍮#60(Ra=2.3(μ m))-60(Ra=0.73(μ m))	0.139 $\pm$ 0.007	0.32 $\pm$ 0.01	0.16 $\pm$ 0.01	0.59 $\pm$ 0.02
	真鍮#600(Ra=0.398(μ m))-600(Ra=0.18(μ m))	0.43 $\pm$ 0.03	0.22 $\pm$ 0.01	0.34 $\pm$ 0.01	0.53 $\pm$ 0.02

グラフ 21 固体の種類と静止摩擦係数



- ・チョーク(蛍光ピンク)は常に静止摩擦係数を増加させる。
- ・6B 鉛筆は紙、真鍮#600-600 で潤滑効果を示すが、真鍮#60-60 では静止摩擦係数はほぼ変化しない。
- ・MoS2 グリースは真鍮#600-600 でのみ潤滑効果を示し、他は静止摩擦係数を増加させる。

実験 V 傾斜法による動摩擦係数の測定

滑り角度、摩擦係数、標準誤差のデータは、付属資料に示す。

(目的)

傾斜法とスマートフォンによる動画撮影を組み合わせることにより、表面状態を変化させた真鍮の動摩擦係数を測定して、小型の傾斜法により動摩擦係数を求めることができることを示す。

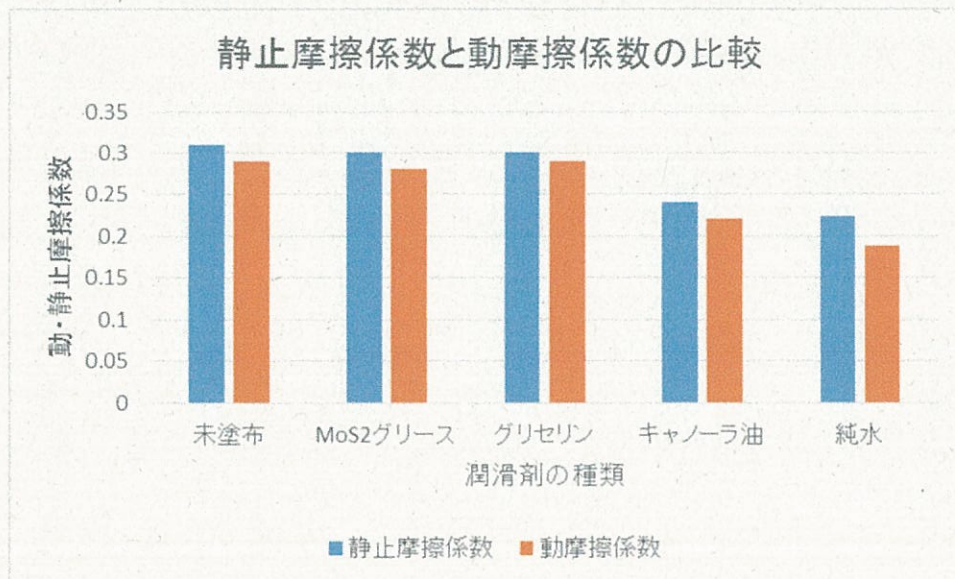
(結果)

この実験では、対象の物質として真鍮#60-60、潤滑剤として MoS2 グリース、グリセリン、キャノーラ油、純水を用いた。

表 41 真鍮#60-60 における潤滑剤の種類に対する静止摩擦係数と動摩擦係数

潤滑剤の種類	静止摩擦係数	動摩擦係数
未塗布	0.31±0.03	0.29±0.03
MoS2グリース	0.30±0.01	0.281±0.01
グリセリン	0.30±0.01	0.29±0.01
キャノーラ油	0.24±0.02	0.22±0.01
純水	0.223±0.008	0.188±0.006

グラフ 22 真鍮#60-60 における潤滑剤の種類に対する静止摩擦係数と動摩擦係数の比較



- ・表面状態の異なる真鍮の動摩擦係数は、いずれの場合も動摩擦係数は静止摩擦係数より 0.02～0.04 小さい。

4. 考察

静止摩擦係数に影響を与える要因として以下のものを考える。

- ①表面粗さ
- ②物質
- ③荷重
- ④摩耗
- ⑤液体潤滑
- ⑥固体による表面状態変化

また、傾斜法により測定された動摩擦係数の妥当性を考察する

- ⑦傾斜法による動摩擦係数の測定

そこで、まず始めに表面粗さと静止摩擦係数の関係を考察する。

4.1 表面粗さの寄与

ここで摩擦のメカニズムとして、以下の 2 つを挙げる。[参考文献(1)]

(1) 摩擦の凹凸説

摩擦係数は、接触 2 面間の表面粗さの引っ掛かりによってのみ決定すると考える。

図 11 摩擦の凹凸説

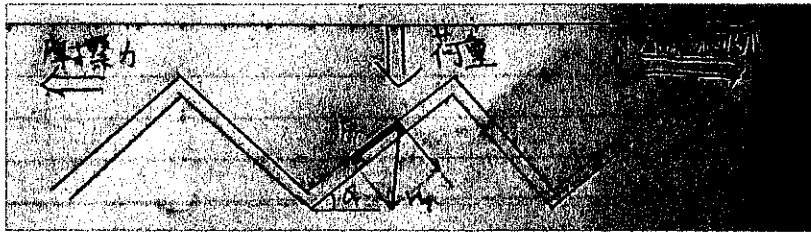


図 11 にて、 i 番目の突起の傾斜角を θ_i 、突起 1 個あたりに作用する荷重を W_i 、突起 1 個あたりの摩擦力を F_i とする。ここで、任意の i において $\theta_i = \theta$ と仮定すると、力のつりあいより

$$F = \sum_{i=1}^n F_i = \sum W_i \tan \theta = W \tan \theta \quad (4.1)$$

よって、静止摩擦係数 μ は、

$$\mu = \frac{F}{W} = \tan \theta = (\text{一定}) \quad (4.2)$$

となる。

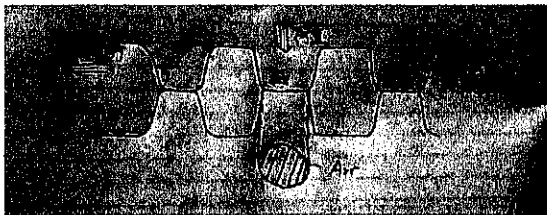
以上より、静止摩擦係数 μ は表面粗さの傾斜角 θ が大きければ大きい。

つまり、 μ は表面粗さ Ra が大きいほど大きいと考えられる。

(2) 摩擦の凝着説

固体の 2 面間は表面の突起どうして真実接触が起こり、その表面積は非常に小さいため、真実接触点では高い圧力が生じ凝着する。接線方向の外力がはたらくと凝着部にせん断力のはたらき、最大せん断強さになると凝着がはがれる。

図 12 摩擦の凝着説



このとき静止摩擦係数は、

$$\mu = \frac{\sigma_s}{\sigma_y} \quad (4.3)$$

ただし、 σ_s : せん断強さ、 σ_y : 降伏応力、である。

ここで、真実接触面積を A_r とおくと、荷重 $W = \sigma_y A_r$ より、

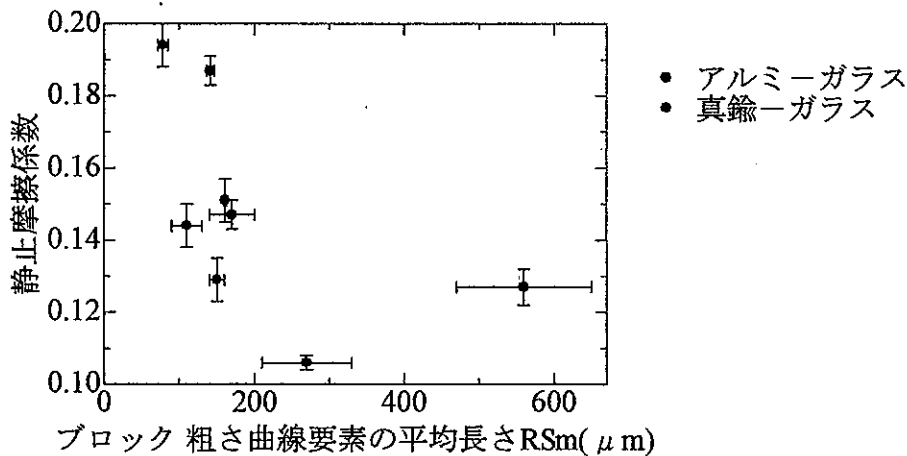
$$\mu = \frac{\sigma_y A_r}{W} \quad (4.4)$$

荷重 W は一定であるから、静止摩擦係数 μ はせん断強さ σ_y 及び真実接触面積 A_r が大きくなるほど大きい。真実接触面積 A_r は接触点の数が多いほど大きくなり、接触点の数に関係する粗さのパラメータは高さを表す Ra ではなく、横の長さを表す RSm である。従って、真実接触面積 A_r に関係する粗さパラメータとして、 RSm がより適当であると考えられる。以下では、 RSm と静止摩擦係数の関係を調べる。

表 42 アルミブロック(a)と真鍮ブロック(b)の Ra , RSm 及びガラスとの間の静止摩擦係数

(a)				(b)			
粗さ	$Ra(\mu m)$	$RSm(\mu m)$	静止摩擦係数	粗さ	$Ra(\mu m)$	$RSm(\mu m)$	静止摩擦係数
#60	3.9 ± 0.3	560 ± 90	0.127 ± 0.005	#60	2.3 ± 0.1	270 ± 60	0.106 ± 0.002
#150	1.515 ± 0.003	161 ± 2	0.151 ± 0.006	#150	1.0 ± 0.1	150 ± 10	0.129 ± 0.006
#320	1.217 ± 0.009	170 ± 30	0.147 ± 0.004	#320	0.89 ± 0.06	110 ± 20	0.144 ± 0.006
#600	0.90 ± 0.02	141 ± 5	0.187 ± 0.004	#600	0.398 ± 0.009	78 ± 7	0.194 ± 0.005

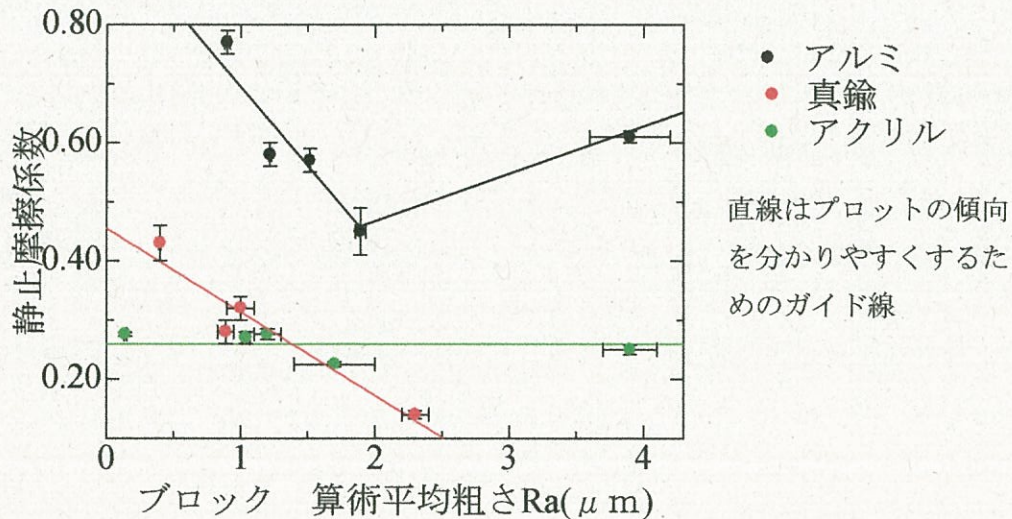
グラフ 23 静止摩擦係数の RSm 依存性



RSm が小さいほど、単位面積当たりの表面粗さの山が多く、ガラス板は $Ra = 0.019 \pm 0.002$ であり、とても平坦であるため、表面粗さの山が全てガラス板に接触すると考えてよい。よって、 RSm が小さいほど真実接触面積 A_r が大きくなる。そして、グラフより RSm が小さいほど静止摩擦係数は大きくなっている。したがって、 A_r が大きいほど静止摩擦係数が大きく、これは式(4.4)と一致する。このことは、今回の表面粗さの範囲では金属-ガラスの静止摩擦係数は凝着説によるものであることを示す。

次に、同じ研磨紙で磨いた板・ブロックの静止摩擦係数をアルミ、真鍮、アクリルでまとめると次のようになる。

グラフ 24 アルミ・真鍮・アクリルにおける同じ研磨紙で磨いた板・ブロックどうしの静止摩擦係数の粗さ依存性



グラフ 24 から得られる実験事実

事実(1)真鍮-真鍮、金属-ガラスにおいては、算術平均粗さ R_a が大きくなるにつれて静止摩擦係数 μ が小さくなる。

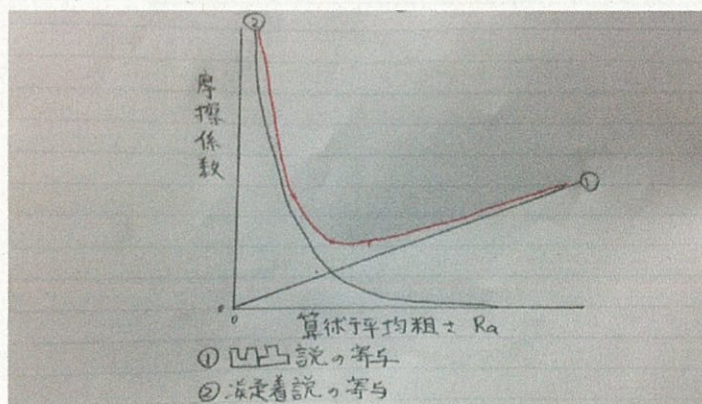
事実(2)アルミの静止摩擦係数は R_a に対して下に凸な曲線を描くように変化する。

事実(3)アクリルの静止摩擦係数は R_a に対する変化が小さい。

である。

事実(1)より、静止摩擦係数を決定するのは凝着説であるといえる。しかし、静止摩擦係数を決定するのが凝着説のみであるとする、事実(2)で R_a に対して μ が大きくなる範囲があることが説明できない。これは、 μ を決定するのは凝着説と凹凸説の両方であり、 μ に対する寄与はこの 2 説の寄与の和である[参考文献(7)]と考えることで解決できる。それを、模式的に表したものが図 13 である。

図 13 摩擦係数に対する凹凸説、凝着説の寄与



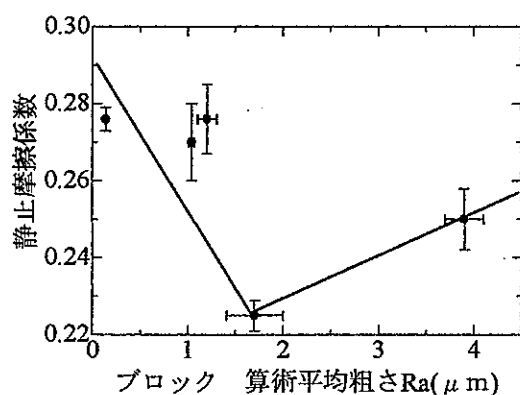
真鍮においては、 R_a に対する真鍮の静止摩擦係数が極小値をとるときの R_a の値が実験の範囲の R_a より大きいと考えることで、 R_a が大きくなるにつれて μ が小さくなる凝着説が主に寄与する領域のみが現れたと考える。

ここで、図 13 のように静止摩擦係数が変化する理由を考える。

R_a が大きくなるほど突起の傾斜角 θ が大きくなり、真実接触面積 A_r が小さくなる。よって、式(4.2)、(4.4)より、静止摩擦係数に対する凝着説、凹凸説の寄与する割合は、 R_a が小さいほど凝着説の寄与が増大し、 R_a が大きいほど凹凸説の寄与が増大する。よって、ある R_a の値において、凝着説と凹凸説の寄与が同等となり、その点で静止摩擦係数は極小値をとる。そして、その R_a を境目として R_a が小さいほうは凝着説が、 R_a が大きいほうは凹凸説が主に静止摩擦係数を決定するため、図 13 のように考えられる。

次に、事実(3)について考える。

グラフ 12(p24 からの再掲) アクリルの同じ研磨紙における静止摩擦係数の
ブロック粗さ依存性



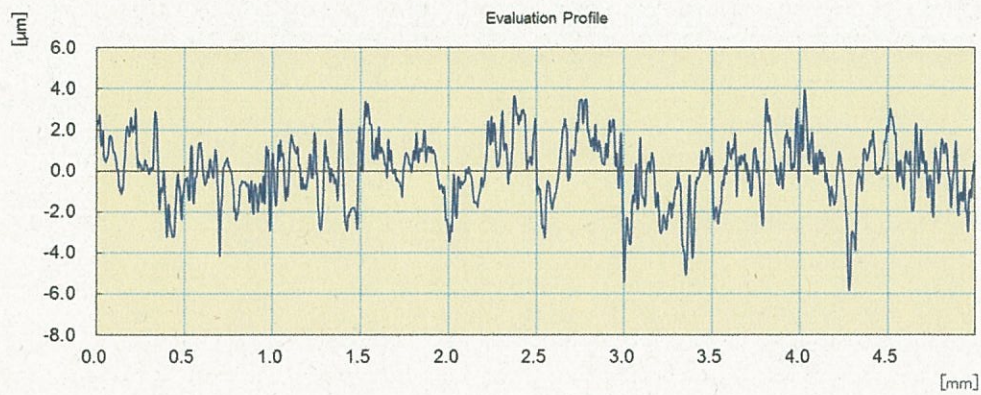
直線はプロットの傾向を分かりやすくするためのガイド線
グラフ 24 でアクリルのプロットを拡大したグラフ

上のグラフ 12 にて、アクリルの静止摩擦係数は R_a に対して下に凸な曲線を描くように変化することは前述の議論にあてはまる。つまり、凝着説と凹凸説の両方に静止摩擦係数は影響され、この 2 つの説のいずれでも R_a に対して静止摩擦係数の変化が小さいことを示せばよい。

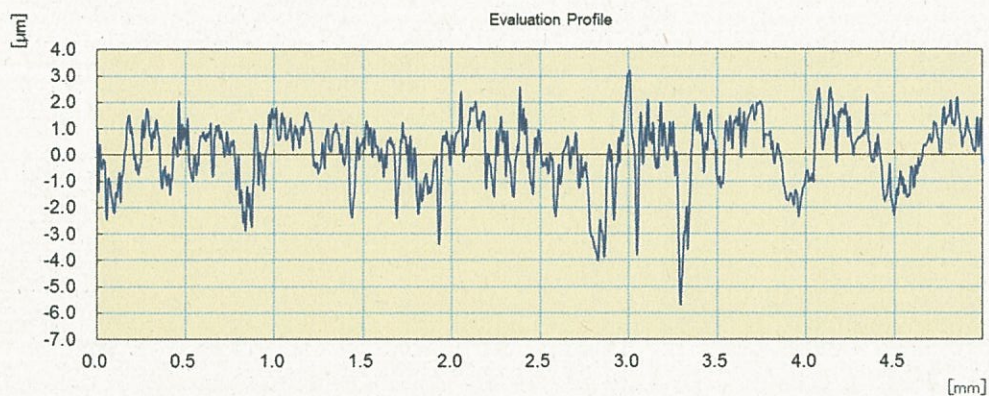
まず、凝着説の観点から考える。次の節で述べる表 43(p44)より、金属に比べてアクリルの引っ張り強さ σ_b は小さく、これはせん断応力 σ_s が小さいのと同じ意味である。よって、式(4.4)より真実接触面積 A_r の変化に対する μ の変化が小さくなる。したがって、 R_a の変化に対する μ の変化は小さい。

次に、凹凸説の観点から考える。ここで、アルミ、真鍮、アクリルの表面粗さの様子を粗さ測定器で測定したグラフを見る。

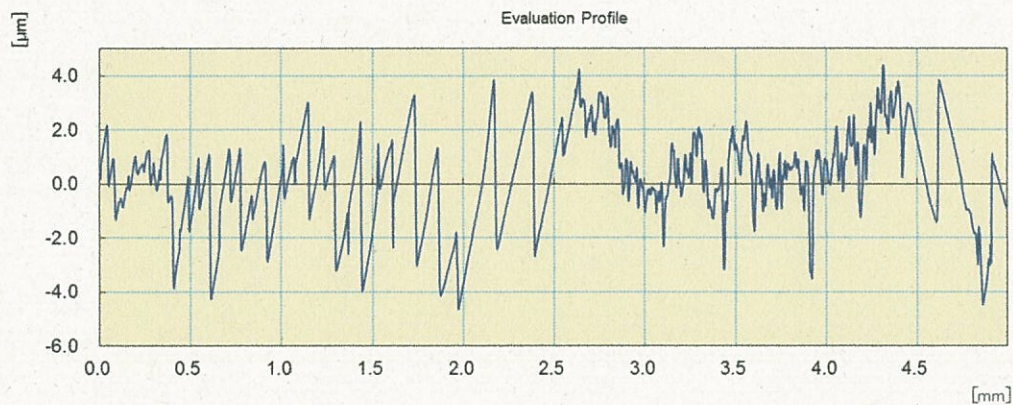
グラフ 25 アルミブロック #320 ($R_a = 1.217 (\mu m)$) の表面粗さ



グラフ 26 真鍮ブロック#320($R_a=0.89(\mu\text{m})$)の表面粗さ



グラフ 27 アクリルブロック#320($R_a=1.2(\mu\text{m})$)の表面粗さ



アクリルの表面粗さを金属の表面粗さと比べると、 R_a はあまり変わらないが、1つの粗さの山の幅が非常に大きい。山の幅が大きいほど、高さの増加に対する傾斜角の正接($\tan$)

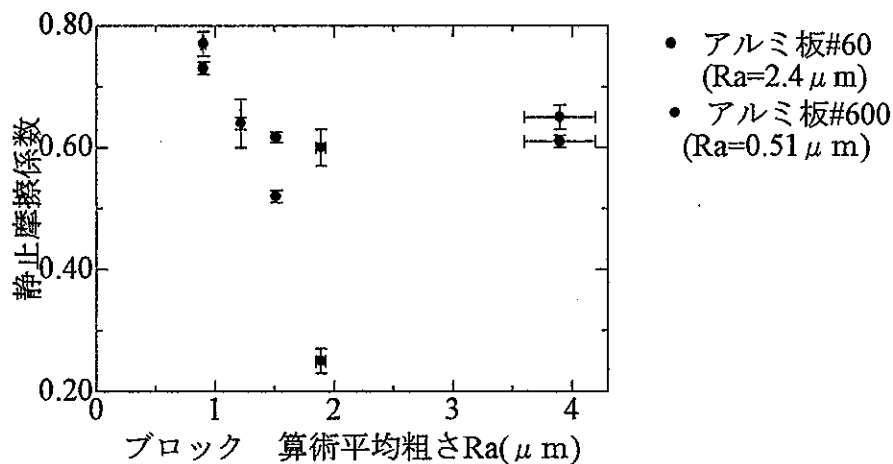
の増加は小さくなる。よって、式(4.2) $\mu = \frac{F}{W} = \tan \theta$ より R_a の変化に対する μ の変化は小

さい。

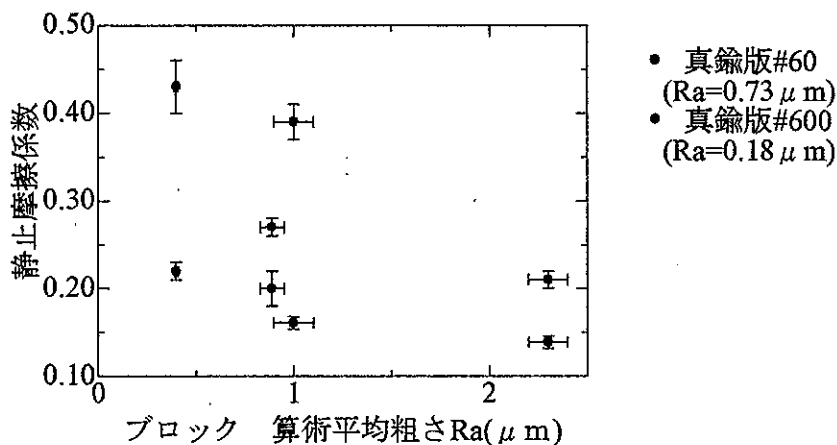
以上より、凝着説、凹凸説ともに Ra の変化に対する μ の変化が小さいことが示された。したがって、アクリルの静止摩擦係数は Ra に対する変化が小さい。

次に、アルミ、真鍮における板の粗さ#60、#600 のときの静止摩擦係数のグラフは次のようになる。

グラフ 28 アルミ板#60($Ra=2.4(\mu m)$),#600($Ra=0.51(\mu m)$)における静止摩擦係数の Ra 依存性



グラフ 29 真鍮板#60($Ra=0.73(\mu m)$),#600($Ra=0.18(\mu m)$)における静止摩擦係数の Ra 依存性



アルミの場合、板#60—ブロック#100 のとき以外は、静止摩擦係数のブロックの Ra 依存性は板の Ra によって変化しない。一方、真鍮の場合、板の Ra が小さいほど静止摩擦係数のブロックの Ra 依存性の数値が全体的に高くなる。この理由は以下のように考えられる。理

由は、図 13 にてアルミではいずれも表面粗さに対する静止摩擦係数の極小点付近のため凝着説による静止摩擦係数への寄与が小さいが、真鍮は静止摩擦係数が凝着説により決定される領域にあるので、板の Ra が小さいほど真実接触面積が大きくなるため、静止摩擦係数が大きくなると考えられる。

次に、粗さの方向による静止摩擦係数へ寄与を調べる。

表 23(p24 からの再掲) 真鍮#60-60 における研磨の方向それぞれの摩擦角 θ_s

及び静止摩擦係数

研磨の方向	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
ランダム	8.0 ± 0.4	0.140 ± 0.007
垂直-垂直	10.1 ± 0.3	0.177 ± 0.005
平行-平行	9.5 ± 0.3	0.168 ± 0.006
垂直-平行	11.4 ± 0.5	0.202 ± 0.009
平行-垂直	11.7 ± 0.8	0.21 ± 0.01

以下の 3 点について考察する。

- (1) 垂直-垂直は平行-平行と誤差の範囲で静止摩擦係数が等しい。
- (2) 磨く方向が互いに垂直なほうが同じ方向のときより大きく、垂直-平行、平行-垂直は誤差の範囲で静止摩擦係数が等しい。
- (3) 研磨方向がランダムなとき特定の研磨方向を持つときより静止摩擦係数が小さい。

(1) 凹凸説で考えると、平行-平行より縦-縦のほうが引っかかりが大きくなる。しかし、この両者の静止摩擦係数は誤差の範囲で等しくなった。ここで、凹凸の様子を知るために凹凸の幅 RSm を測定した。すると、RSm は測定不能となった。このことは、特定方向によって、図 のように周期の大きな「うね」が発生し、「うね」の周期が粗さ測定器の測定範囲($360 \mu\text{m}$)を超えて大きかったことが原因であると考えられる。この「うね」どうしの凹凸説としての接触は式(4.2)にて θ が小さいことと同じである。したがって、凹凸による静止摩擦係数の影響が非常に小さくなったため、垂直-垂直と平行-平行の静止摩擦係数は変わらなかったと考えられる。

(2) 垂直-垂直、平行-平行のときと違い、研磨方向が互いに垂直なときでは突起同士の真実接触面積が増加する。理由は、研磨の向きが垂直のときは、「うね」の交差点で突起同士が接触し凝着するが、研磨の向きが同じときは、「うね」の周期は大きく、かつ、互いの面の「うね」の周期がわずかに異なると突起同士の接触が大幅に減少するからである。よって、式(4.4)より粗さの向きが垂直の静止摩擦係数が大きくなる。また、凹凸による影響は(1)と同じ理由で非常に小さくなるため、垂直-平行と平行-垂直は静止摩擦係数が変わらない。

(3) 研磨方向がランダムであると、「うね」は存在せず、周期の短い凹凸がランダムに存在す

る。すると、真実接触面積が小さくなるため、式(4.4)より研磨方向がランダムるとき静止摩擦係数は小さくなる。

4.2 物質の種類と静止摩擦係数の関係

物質は機械的性質を表す固有のパラメータをもっているため、そのパラメータの静止摩擦係数への寄与を考察する。物質のパラメータと静止摩擦係数の関係を表す関係は凝着点の変形の仕方により異なる。[参考文献(7)]

(1) 塑性変形 曲率半径 $R < 500\Delta z$ Δz : 粗さの標準偏差 (表面が粗い場合)

静止摩擦係数 μ は式(4.3)により表される。ここで、引っ張り強さを σ_B とおくと、

$\sigma_s = \sigma_B \times \frac{1}{\sqrt{3}}$ の関係があるので、式(4.3)に代入すると

$$\mu = \frac{\sigma_B}{\sqrt{3}\sigma_y} \quad (4.5)$$

となる。

(2) 弾性変形 $R > 1000\Delta z$ (表面が平坦な場合)

静止摩擦係数 μ は、

$$\mu = (1 - \nu^2) \frac{\sigma_s}{E} \sqrt{\pi \lambda R} \quad (4.6)$$

となる。ただし、 E : ヤング率、 ν : ポアソン比、 $\lambda = \frac{d^2}{\Delta z^2}$ (d : 平均の高さを 0 として突起

と接触する最低の高さ)である。表 43 より物質によって大きく変化するのは E と σ_s だけで

あり、 $\sigma_s = \sigma_B \times \frac{1}{\sqrt{3}}$ の関係があるので、

$$\mu \propto \frac{\sigma_B}{E} \quad (4.7)$$

で考える。

ここで、今回の実験に用いた物質の固有のパラメータである引っ張り強さ σ_B 、降伏応力 σ_s 、

ヤング率 E 、ポアソン比 ν は表 43 のようになる

表 43 今実験に用いた物質の機械的特性パラメータ

	アルミ	真鍮	アクリル
引っ張り強さ $\sigma_B(\times 10^6 \text{ N/m}^2)$ [8]	200	230	75
降伏応力 $\sigma_y(\times 10^6 \text{ N/m}^2)$ [8]	40	70	65~77
ヤング率 $E(\times 10^9 \text{ N/m}^2)$ [9]	70.3	100.6	1.6~3.4
ポアソン比[9]	0.345	0.35	

このパラメータ値を使って計算すると静止摩擦係数の実験値と文献値、及び式(4.5)、(4.7)から導かれる塑性変形、弾性変形時の静止摩擦係数の理論値は表 44 のようになる。ただし、この実験の実験値は文献値に最も近い値を記載してある。

表 44 静止摩擦係数の実験値、文献値及び理論値

	アルミ	真鍮	アクリル	アルミ-ガラス	真鍮-ガラス
μ 実験値	0.57 ± 0.02 (#150-150)	0.39 ± 0.02 (#150-600)	0.277 ± 0.003 (#600-600)	0.187 ± 0.004 (アルミブロック#600)	0.194 ± 0.005 (真鍮ブロック#600)
μ 文献値	0.57[10]	0.4[11]	0.38[12]	0.17[13]	0.25[14]
μ 塑性変形理論値	2.9	1.9	0.56		
$\mu \propto$ 弾性変形理論値($\times 10^{-3}$)	2.9	2.3	22		

以上より、実験値と文献値はおおむね一致していることが分かる。(注：文献値は、それを求めた表面粗さなどの条件がわからないので、本実験の値と直接比較することはできない。)

さて、塑性変形における静止摩擦係数の理論値はアルミ>真鍮>アクリルとなり、実験値と同じ傾向を示すが、弾性変形の理論値は静止摩擦係数がアクリル>アルミ>真鍮となり、実験値と異なる傾向を示す。このことは、凝着点の変形が塑性変形の領域であることを

を意味する。よって、式(4.3) $\mu = \frac{\sigma_s}{\sigma_y}$ より、静止摩擦係数はせん断応力と降伏応力により

決定される。

アルミの文献値には 1.35 という実験値より大きな値がある[参考文献(15)]。この理論値と実験値の大きな違いは、酸化膜による潤滑効果が原因であると考えられる。アルミの文献値 1.35 が真空の値と考えられ、金属は表面に残る金属結合はとても不安定なので直ちに空気中の酸素と結合する[参考文献(7)]ので、大気中で測定した実験値より大きくなると考えられる。

4.3 荷重と静止摩擦係数の関係

アモントン-クーロンの荷重に関する法則は次のようである。

・摩擦力は、接触する二面間に作用する垂直荷重(垂直抗力)に比例する。

凹凸説では、式(4.2)より常にこの法則は成り立つ。

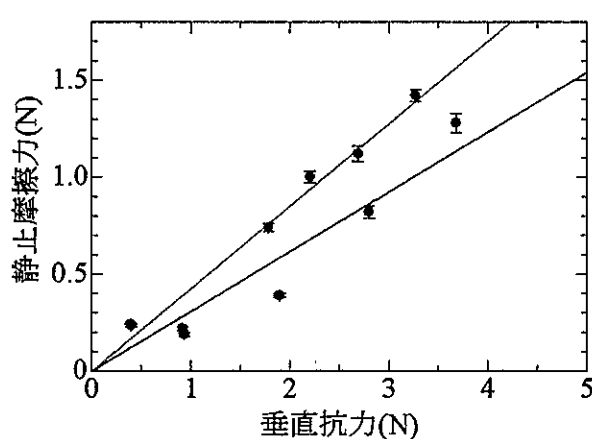
凝着説では、式(4.4)より次のように言い換えられる。

・真実接触面積は垂直荷重(垂直抗力)に比例する。

この節では上記のことについて考察する。

グラフ 13(p26 の再掲) アルミ#60($R_a=3.9(\mu\text{m})$)-60($R_a=2.4(\mu\text{m})$)及び

アルミ#320($Ra=1.217(\mu m)$)-320($Ra=0.77(\mu m)$)の F-N 図



• アルミ#60-60

$$y = \sum a_n x^n$$

$$a_0 = 0.00000000e+00$$

$$a_1 = 3.08542921e-01$$

• アルミ#320-320

$$y = \sum a_n x^n$$

$$a_0 = 0.00000000e+00$$

$$a_1 = 4.25622801e-01$$

直線はプロットの傾向
を分かりやすくするた
めのガイド線

「残差」を次のように定義する。

(残差)=(各質量における静止摩擦係数)-(F-N図の傾きから求めた静止摩擦係数)

すると、F-N図の傾きから真鍮#60-60の静止摩擦係数は0.309、真鍮#320-320の静止摩擦係数は0.426と求まる。よって、残差は次のようになる。

表 45 アルミ#60-60における静止摩擦係数の残差

質量(g)	静止摩擦係数	残差
47.3	0.61 ± 0.01	0.30
97.3	0.27 ± 0.01	-0.04
197.4	0.204 ± 0.005	-0.105
297.3	0.29 ± 0.01	-0.02
397.5	0.35 ± 0.02	0.04
497.3	0.451 ± 0.009	0.142

表 46 アルミ#320-320における静止摩擦係数の残差

質量(g)	静止摩擦係数	残差
47.3	0.58 ± 0.02	0.15
97.3	0.29 ± 0.01	-0.14
197.4	0.42 ± 0.01	-0.01
247.1	0.45 ± 0.01	0.02
297.3	0.42 ± 0.02	-0.01
397.5	0.39 ± 0.01	-0.04
497.3	0.48 ± 0.01	0.05

グラフ 13 より、アモンソン-クーロンの法則はアルミ#320-320では精度よく成り立つ。

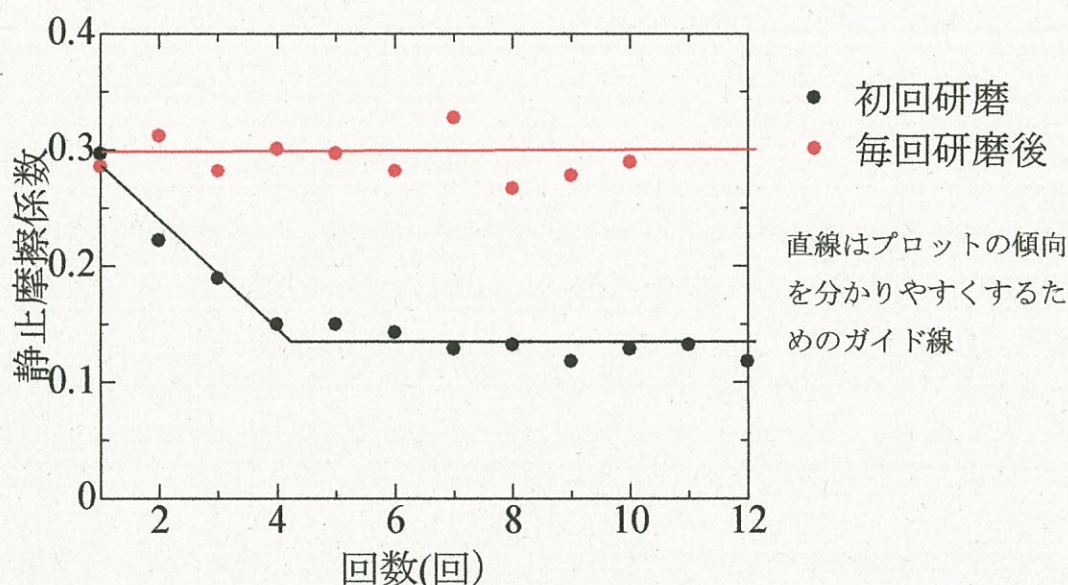
次に表 45、46 より、47.3gを除くと荷重が小さいと残差は負となる。これは、荷重が小さいと、荷重に対する真実接触面積が比例するより小さくなることを意味する。荷重が小さいと真実接触を形成されるのにより時間がかかり、今回の加重下待ち時間がその時間より短かったと予想できるが、それを検証することはできなかった。

また、47.3gの静止摩擦係数が大きくなった原因として実験日の違いが考えられる。47.3gはアルミ#60-60は3月27日、アルミ#320-320は3月31日に実験が行われたのに対して、他は4月22～28日に実験が行われた。この1ヶ月の間に、実験者の実験技術(研磨の均等性や傾斜法の際の回転の滑らかさなど)が変化したことが原因であると考えられるが、具体的な原因は分からなかった。

4.4 摩耗による静止摩擦係数の変化

摩擦面には必ず摩耗が生じる。この摩耗が静止摩擦係数にどのようなメカニズムで寄与するかを考察する。

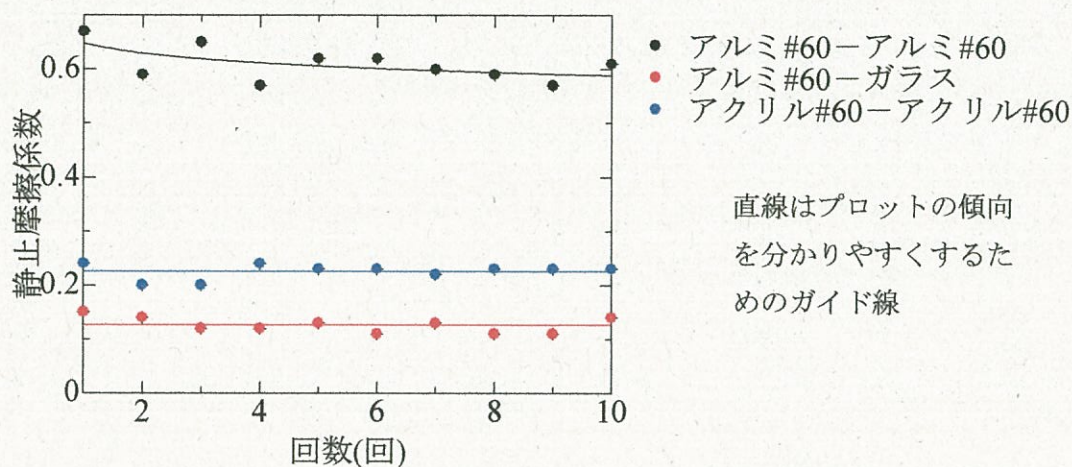
グラフ 1(p15 からの再掲) 真鍮#60-60 の初回研磨と毎回研磨後の静止摩擦係数の回数依存性



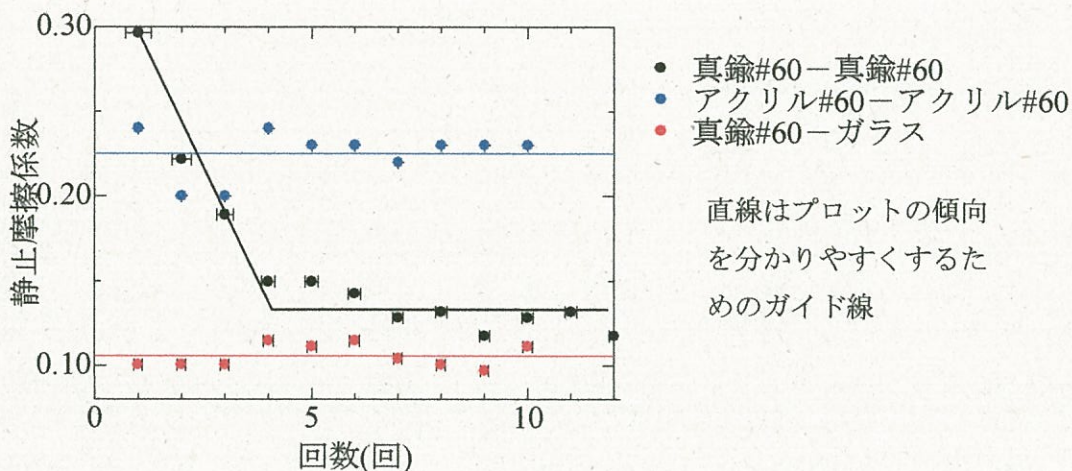
グラフ 1 は、毎回研磨をしないとある回数まで静止摩擦係数が減少し、それ以降は一定値を取り、毎回研磨をすると全ての回数において毎回研磨をしない最大値で一定値を取るということを示している。これより、研磨をしても金属表面には「非常に鋭い突起」があり、この突起を破壊する力が式(4.4)の分子に追加されていると考えられる。また、表より摩擦前後で R_a があまり変化しないことが分かる。これより、「非常に鋭い突起」はわずかしかな存在しないことが分かる。よって、この「非常に鋭い突起」は直ちに破壊され、静止摩擦係数は突起の破壊の影響がなくなり一定値を取るようになると考えられる。

次に、金属と非金属における摩耗と静止摩擦係数の関係を調べる。

グラフ 30 各物質における静止摩擦係数の滑り回数依存性



グラフ 31 各物質における静止摩擦係数の滑り回数依存性



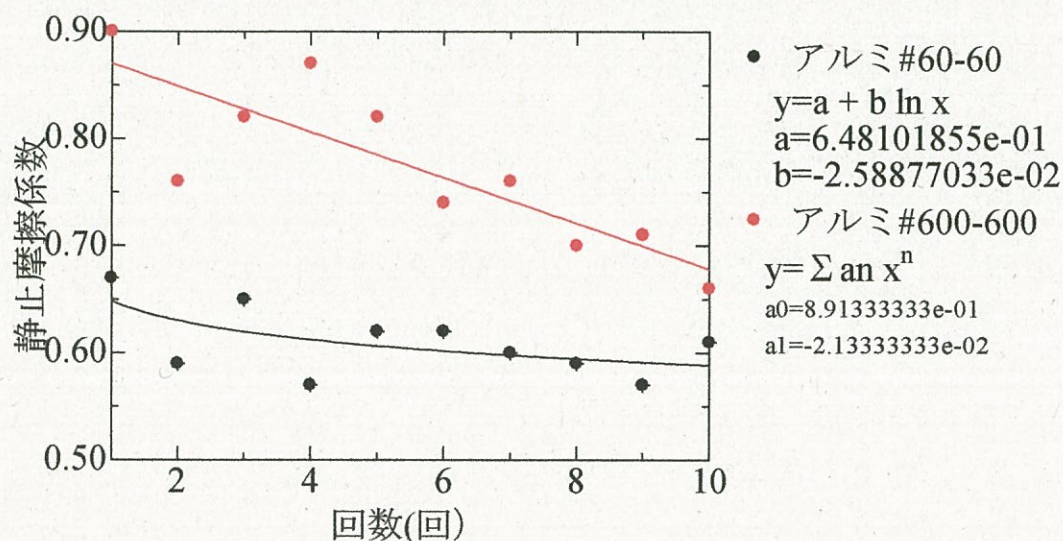
以上より、金属ー金属が実験回数により静止摩擦係数が減少するのに対して、アクリルーアクリル、金属ーガラスは実験回数に対して静止摩擦係数が一定である。これは、アクリルーアクリル、金属ーガラスが摩耗による影響を受けないことを意味する。この理由をまずアクリルーアクリルの場合で考える。金属とアクリルの表面粗さの様子はグラフ 25～27(p40)になる。金属では、例えばアルミブロック#320 が $Ra=1.217(\mu m)$ であるのに対して表面粗さが $+4\mu m$ に達する非常に幅の小さな突起がある。一方、アクリルブロック#320 もまた $Ra=1.2(\mu m)$ であるのに対して表面粗さが $+4\mu m$ に達する突起もあるが、幅が大きい。前者の突起は簡単に破壊される「非常に鋭い突起」とみなせ、後者の突起は幅の大きさゆえに簡単に破壊されない(イメージは前者の突起が爪楊枝で後者の突起が割り箸)。よって、アクリルは摩耗による静止摩擦係数への影響が小さい。

次に、金属ーガラスについて考える。ガラスは、 Ra が非常に小さい(ブロック $Ra=0.029(\mu m)$ 、板 $Ra=0.019(\mu m)$)ことから、とても平坦な平面なので金属の「非常に鋭い突起」を破

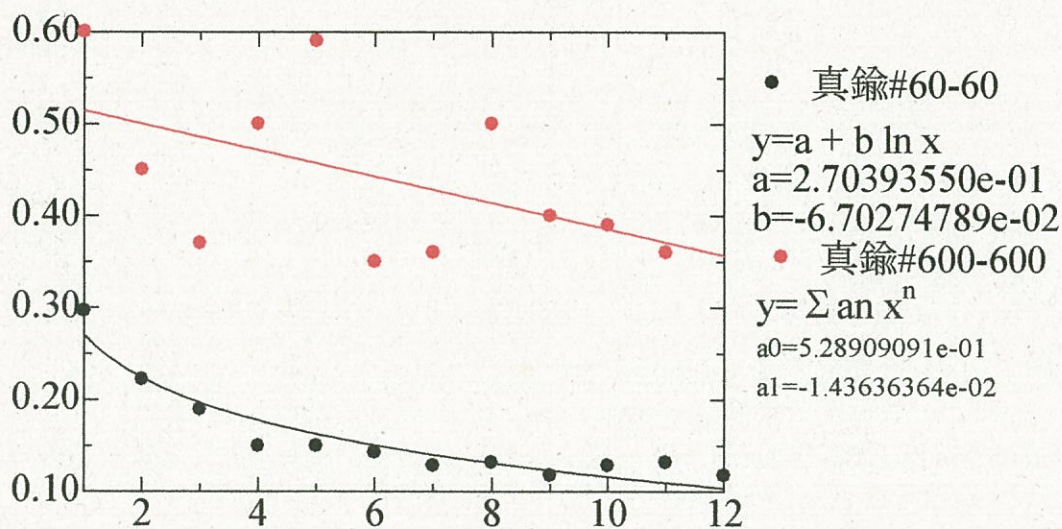
壊するに足る突起を持ち合わせていないと考えられる。よって、ガラスは摩耗による静止摩擦係数への影響が小さい。

次に、静止摩擦係数と摩耗の関係の表面粗さ依存性を調べる。

グラフ 32 アルミ#60-60 とアルミ#600-600 の静止摩擦係数の回数依存性



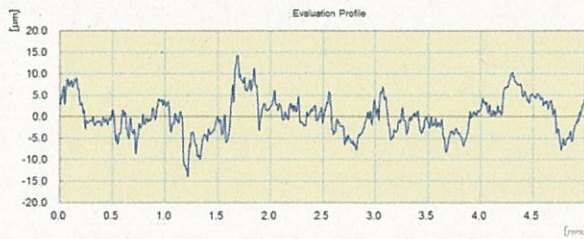
グラフ 33 真鍮#60-60 と真鍮#600-600 の静止摩擦係数の回数依存性



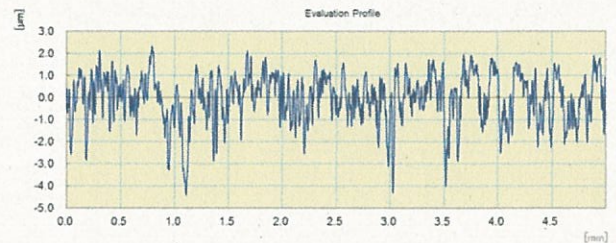
表面粗さの粗い#60-60は摩耗による静止摩擦係数の影響は4回目までであるが、表面粗さの滑らかな#600-600は摩耗による静止摩擦係数の影響は最後まで続き、ばらつきが大きいことが分かる。ここで、アルミと真鍮のそれぞれの#60、#600のブロックの表面粗さの様子をグラフにしたものが以下のグラフ 34,35 である。

グラフ 34 アルミブロック#60($Ra=3.9(\mu m)$)(a)と#600($Ra=0.90(\mu m)$)(b)の表面粗さ

(a)

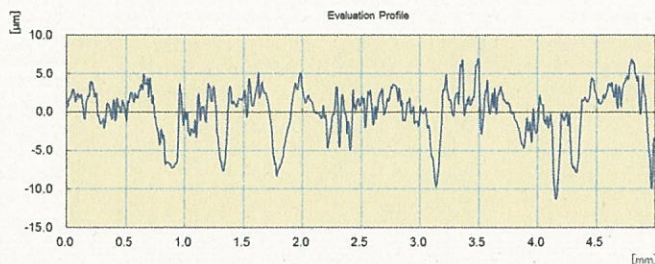


(b)

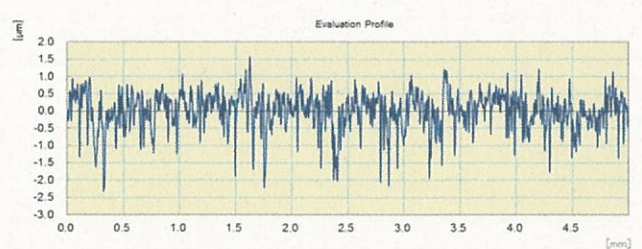


グラフ 35 真鍮ブロック#60($Ra=0.73(\mu m)$)(a)と#600($Ra=0.18(\mu m)$)(b)の表面粗さ

(a)



(b)



アルミ、真鍮のいずれにおいても幅の非常に小さな突起が#600が#60より圧倒的に多い。これは、#600のほうが#60より「非常に鋭い突起」の数が圧倒的に多いことを意味する。よって、#60-60は摩耗による影響がすぐになくなるが、#600-600は摩耗による影響が持続する。また、#600-600の静止摩擦係数が回数に対してばらつく原因は、あらゆる高さに「非常に鋭い突起」があり、高さによる分布が不均一なので摩耗してある高さに達すると「非常に鋭い突起」の数が増える、あるいは急激に減ることで静止摩擦係数が回数に対してばらついたと考えられる。

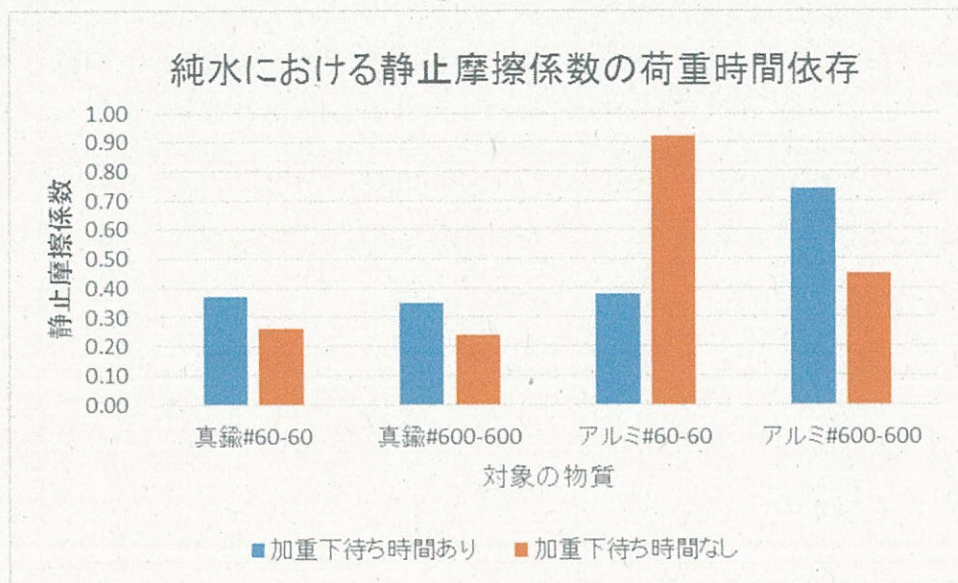
4.5 液体潤滑剤の寄与

この節では、以下の5つに分けて考察する。

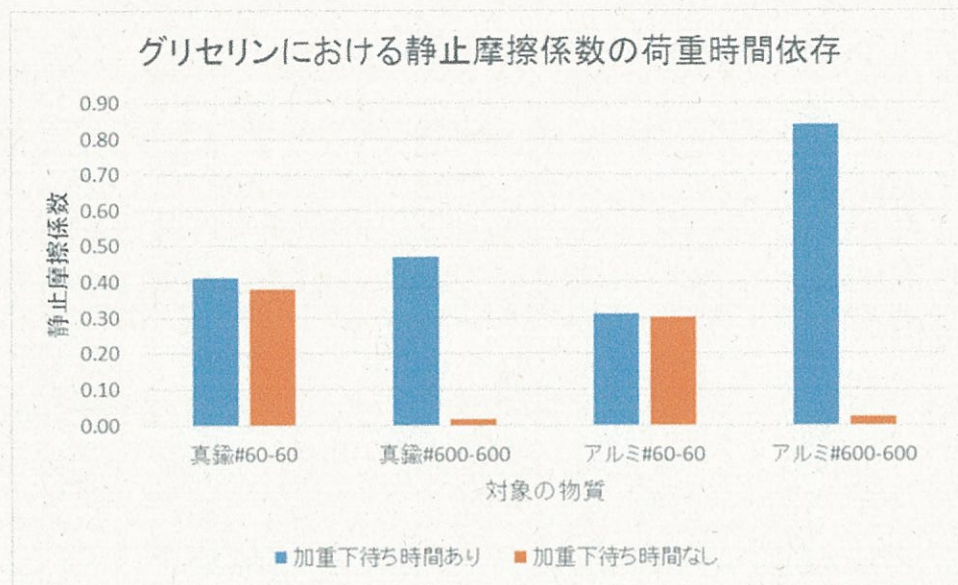
- (1)液体潤滑と加重下待ち時間
- (2)液体潤滑と表面粗さ
- (3)液体潤滑剤の種類
- (4)液体潤滑と滑り回数
- (5)液体潤滑と粘性率

(1) 液体潤滑と加重下待ち時間

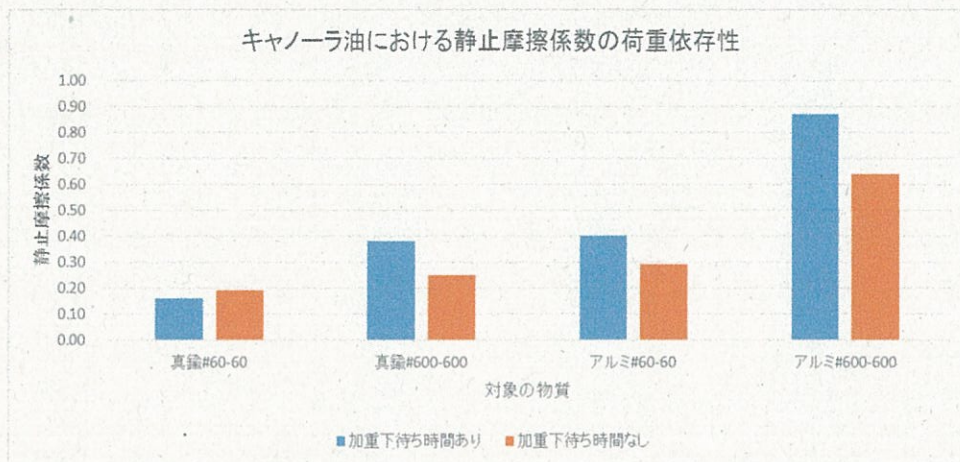
グラフ 14(p28 からの再掲) 純水における静止摩擦係数の荷重時間依存



グラフ 15(p28 からの再掲) グリセリンにおける静止摩擦係数の荷重時間依存



グラフ 16(p29 からの再掲) キャノーラ油における静止摩擦係数の荷重時間依存

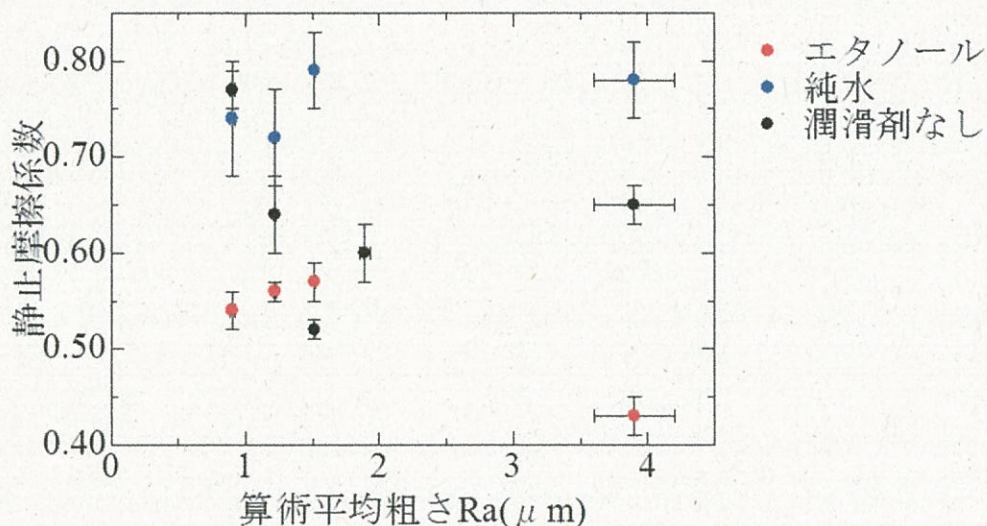


グラフ 14~16 より、加重下待ち時間が短いほど静止摩擦係数が小さくなるのが分かる。この理由は、真実接触を形成するのに十分な時間がなかったことであると考えられる。そのため、荷重時間が短いと真実接触面積が小さくなるので、静止摩擦係数が小さくなると考えられる。

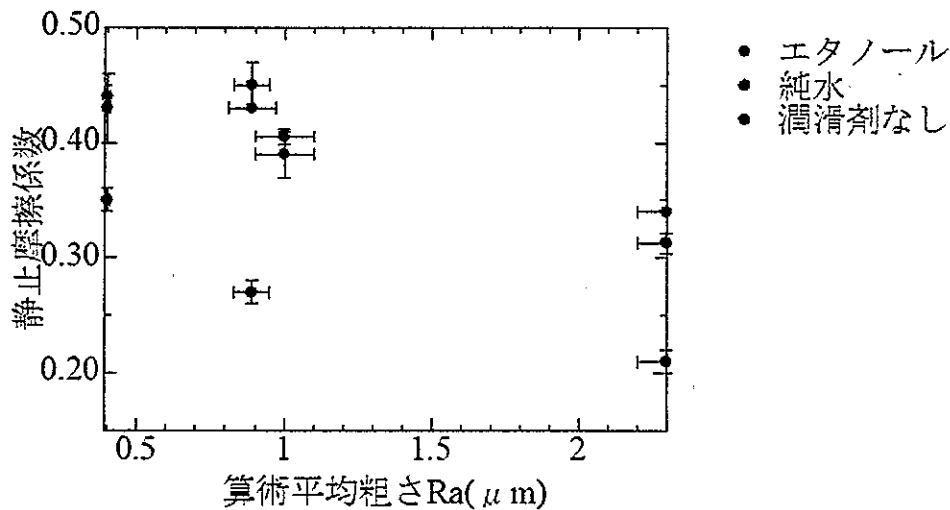
また、グラフ 15 より、グリセリンを塗布した場合、加重下待ち時間が短いと静止摩擦係数が極端に小さくなる場合がある。この理由は、グリセリンは粘性率が大きく、粘性率が大きく、かつ加重下待ち時間が短いと物質が沈み込まず、それにより 2 面間で凝着が起きない流体潤滑状態が実現したことが原因であると考えられる。

(2)液体潤滑と表面粗さ

グラフ 18(p31 からの再掲) アルミ板(#600, $Ra=0.51 \mu m$)における潤滑剤の表面粗さ依存性



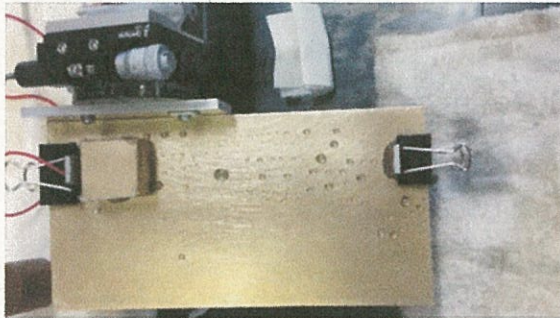
グラフ 19(p32 からの再掲) 真鍮板(#600, $Ra=0.18 \mu m$)における潤滑剤の表面粗さ依存性



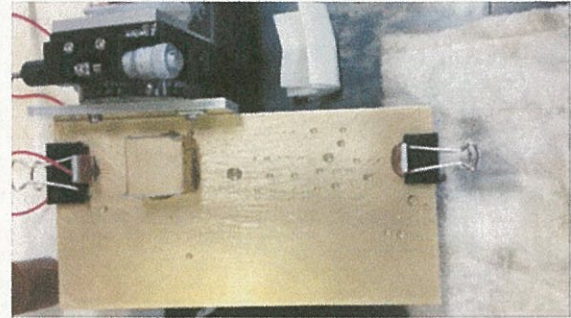
グラフ 18,19 より、液体潤滑剤を用いると静止摩擦係数の Ra 依存性が小さくなる。また、潤滑剤を用いた静止摩擦係数が、乾燥素材同士の静止摩擦係数より大きくなる場合がある。境界潤滑状態では、金属表面に潤滑剤中のナノのスケールの極性分子が金属表面に結合して覆っている[参考文献(16)]だけなので、境界潤滑状態でもマイクロのスケールの Ra(または RSm)が小さいほど A_s が大きくなる関係は変わらない。よって、静止摩擦係数が Ra に依存する凹凸説や凝着説ではこの現象は説明できない。ここで、2つの物質間の液体潤滑剤が加重下待ち時間の間に物質間で密閉状態が作り出されたと考えると説明が付く。つまり境界面の液体の存在により空気が除かれた境界面の圧力が小さくなるため、大気圧に押されて、式(4.2) $\mu = \frac{F}{W} = (\text{一定})$ の荷重 W が大きくなり、そのため滑るのに必要な摩擦力 F が大きくなるので角度を大きくする必要がある。そして、密閉状態が解けて空気が境界面に流入した角度 θ が大きいとき式(4.2) $\mu = \tan \theta$ で求める静止摩擦係数 μ が大きくなる。その様子が、下の図 14 でよく表れている。また、密閉状態のなくなる条件が Ra にあまり依存しないと仮定すると静止摩擦係数が Ra にあまり依存しないことが説明できる。以上より、静止摩擦係数は密閉状態により決定される場合があると考えられる。

図 14 グリセリンを塗布した際の滑りの様子

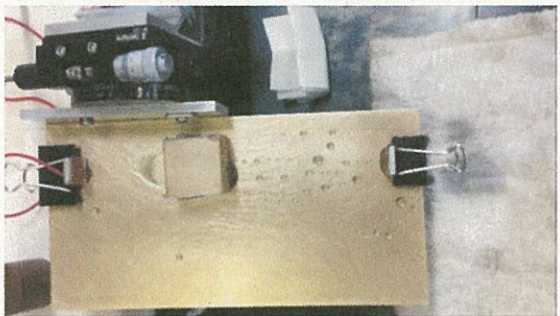
(a) $t=0(s)$



(b) $t=11.7(s)$



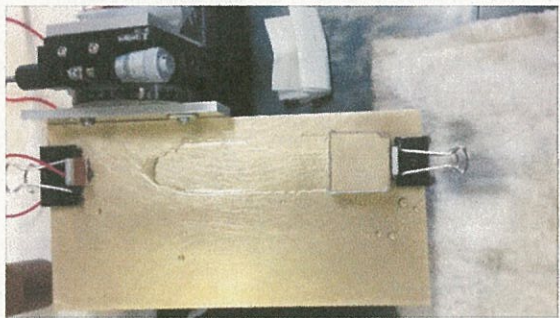
(c) $t=17.7(s)$



(d) $t=18.6(s)$

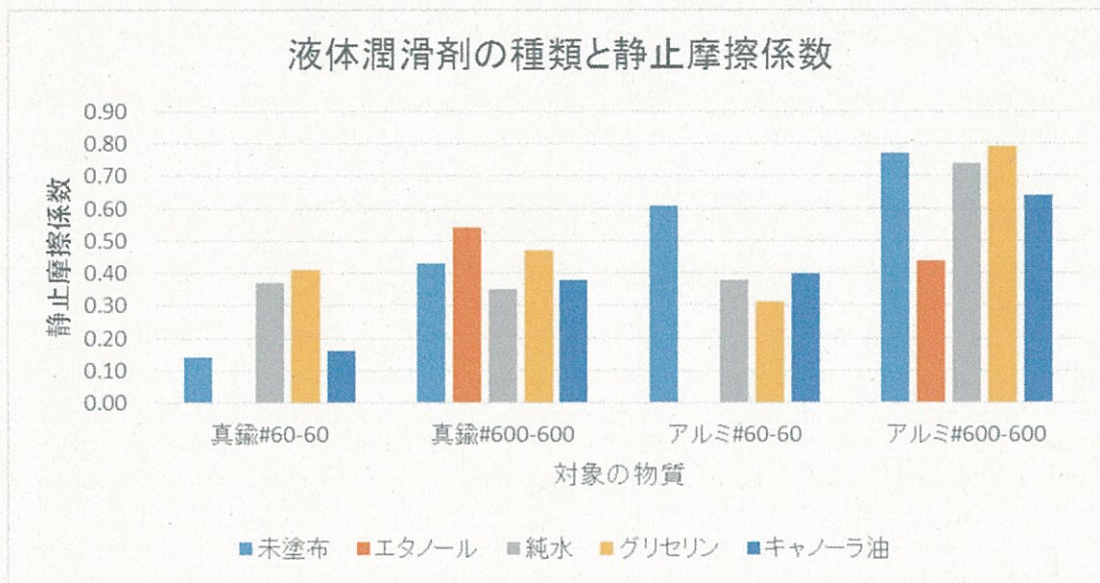


(e) $t=18.9(s)$



(2) 液体潤滑剤の種類

グラフ 20(p33 からの再掲) 液体潤滑剤の種類と静止摩擦係数

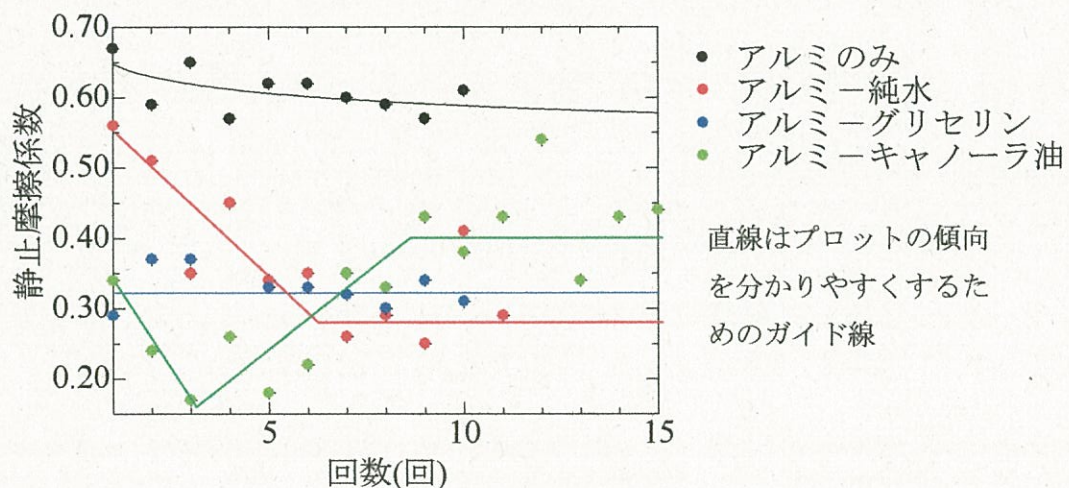


グラフ 20 において、静止摩擦係数が減少する場合は潤滑剤の薄い膜によるせん断応力の低下によるものと考えられ、静止摩擦係数が増加する場合は密閉状態に静止摩擦係数が依存する場合であると考えられる。

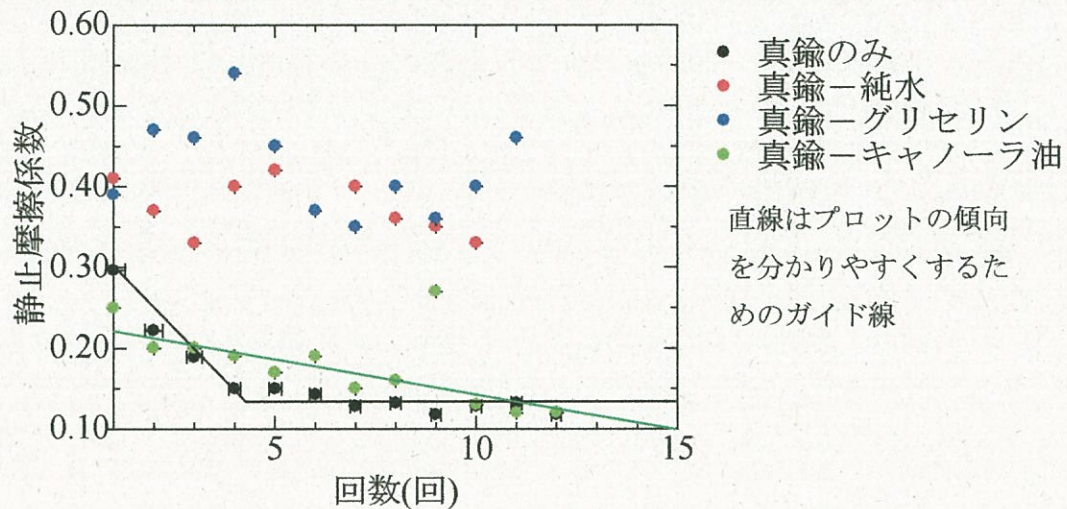
(4) 液体潤滑と滑り回数

乾燥素材同士では「4.4 摩耗による静止摩擦係数の変化」より滑り回数の増加に伴い、摩耗による静止摩擦係数の減少があると考えられたが、液体潤滑剤の導入により静止摩擦係数と滑り回数の関係がどのように変化するかを調べることを目的とする測定をした。

グラフ 36 アルミ#60-60 における潤滑剤の種類と静止摩擦係数の滑り回数依存性



グラフ 37 真鍮#60-60 における潤滑剤の種類と静止摩擦係数の滑り回数依存性



乾燥素材同士では、「4.4 摩耗による静止摩擦係数の変化」から滑り回数を重ねるにつれて摩耗が進行するため、回数に対して静止摩擦係数が減少してその後一定になると考えられるが、その傾向を示したのはアルミ-純水と真鍮-キャノーラ油のみであった。

この理由のひとつとして、潤滑剤の存在によって摩耗が進行しないことが考えられる。すると、回数に対して一定になるアルミ-グリセリンはこれによって説明が付く。

2つめの理由として、静止摩擦係数が凝着説によって決定される場合と密閉状態によって決定される場合とが回数に応じてランダムに表れたと考えられる。すると、真鍮-純水と真鍮-グリセリンとで静止摩擦係数が乱高下する理由が説明できる。

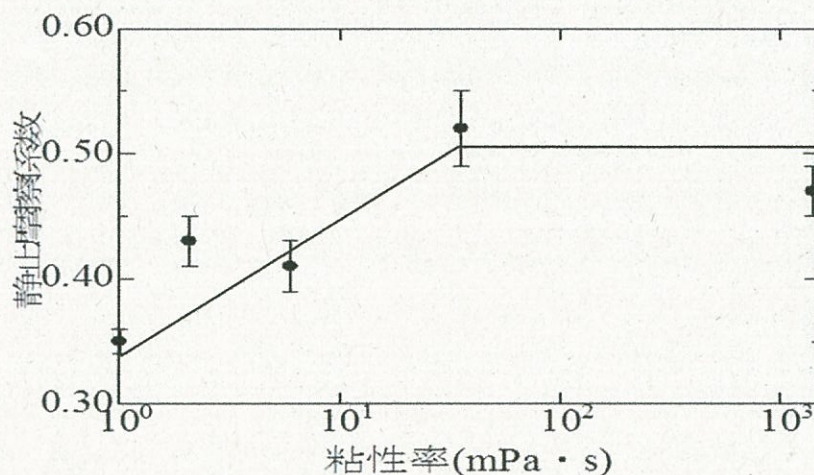
3つ目の理由として、十分量の潤滑剤が表面に存在しなかったことが考えられる。すると、アルミ-キャノーラ油において静止摩擦係数が滑り回数とともに増加したことが説明できる。

(3) 液体潤滑と粘性率

グラフ 17(p30 からの再掲) グリセリン水溶液の摩擦角 θ_s 及び静止摩擦係数の

粘性率依存性

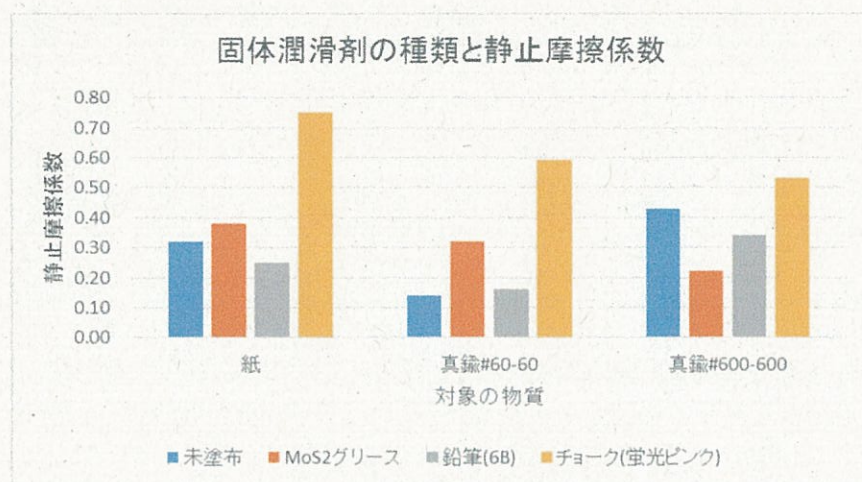
(真鍮#600-600、粘性率は 20℃の文献値[参考文献])



粘性率が高いほど流体からの抵抗が大きくなるので静止摩擦係数が増加すると予想できる。しかし、実際はグラフ 17 より、ある粘性率までは粘性率と静止摩擦係数は正の相関関係を示すが、その粘性率を超えると静止摩擦係数が一定になり、予想と反することが分かる。よって、静止摩擦係数に対する潤滑剤の効果は、滑り速度の大きい動摩擦係数の流体潤滑領域における効果とは異なるといえる。

4.6 固体による表面状態変化の寄与

グラフ 21(p34 からの再掲) 固体の種類と静止摩擦係数



グラフ 21 より、固体潤滑剤として知られる MoS₂ や黒鉛をそれぞれ含む MoS₂ グリースや 6B 鉛筆は真鍮#60-60 ではそれぞれ静止摩擦係数を増加、変化なしにさせるが、真鍮#600-600 では静止摩擦係数を減少させる。この理由は、MoS₂ や黒鉛は分子結晶が層を成し、その層間の結合力が弱いため層間の静止摩擦係数が小さくなるので固体潤滑剤となる[参考文献(16)]が、表面粗さの粗い真鍮#60(Ra=2.3(μm))-60(Ra=0.73(μm))ではその層が

安定してできないため潤滑作用を示さず、表面粗さの滑らかな真鍮#600($Ra=0.398(\mu m)$)-#600($Ra=0.18(\mu m)$)ではその層が安定してできるため潤滑作用を示すからであると考えられる。また、真鍮#60-60においてMoS₂グリースが静止摩擦係数を増加させた原因はグリースの粘性による抵抗力が原因であると考えられる。また、紙においては $Ra=2.48(\mu m)$ ・ $Ra=2.99(\mu m)$ となり真鍮#60-60より表面粗さは粗いが黒鉛においては静止摩擦係数が減少した。理由は、黒鉛を塗ると、金属表面には黒鉛の層が上に積み重なるだけで表面粗さが粗いと層が形成されにくい、紙は繊維でできているため、黒鉛の層が絡み取られ安定してできやすいためであると考えられる。

次に、チョークについて考えると、グラフ 21 より静止摩擦係数を増加させることが分かる。この原因を考える。まず、チョークを用いる際は粉末状にしてそれを板とブロックに振りかけた。顕微鏡でチョークの粒子を見たところ、チョークの粒子の直径は $1\mu m$ 以下であった。したがって、表面粗さ($0.1\sim 3\mu m$)よりもチョークの粒子が小さいので、凹凸に入り込んで、粒子同士が接触する。その結果、接触面積が増えるため、静止摩擦係数を増加させたと考えられる。

以上より、固体による表面状態変化において、物質表面で層間の結合力の小さい層を形成するものが安定した層を形成する場合に潤滑作用を示し、粒子状の物質として表面に存在する場合は潤滑作用を示さず静止摩擦係数を増加させると考えられる。

次は、傾斜法による動摩擦係数の測定について考察する。

4.7 傾斜法による動摩擦係数の測定

表 47 真鍮#60-60 における潤滑剤の種類に対する静止摩擦係数と動摩擦係数とその差

潤滑剤の種類	静止摩擦係数	動摩擦係数	$\mu_s - \mu_k$
未塗布	0.31 ± 0.03	0.29 ± 0.03	0.02
MoS ₂ グリース	0.30 ± 0.01	0.281 ± 0.01	0.02
グリセリン	0.30 ± 0.01	0.29 ± 0.01	0.01
キャノーラ油	0.24 ± 0.02	0.22 ± 0.01	0.02
純水	0.223 ± 0.008	0.188 ± 0.006	0.035

真鍮の文献値は $\mu_s = 0.4$ [参考文献(11)]、 $\mu_k = 0.292 \sim 0.317$ [参考文献(17)]から、 $\mu_s - \mu_k =$

$0.083 \sim 0.108$ より、 $\mu_s - \mu_k$ の実験値は文献値より小さい。よって、次に、傾斜法による

動摩擦係数の測定の妥当性を調べる。その際に、真鍮における $\mu_s - \mu_k$ を比べる。

同校の他班の引っ張り法による動摩擦係数は次のようになる。[参考文献(18)]

表 48 引っ張り法による真鍮における静止摩擦係数と動摩擦係数とその差

Ra(μ m)	静止摩擦係数 μ_s	動摩擦係数 μ_k	$\mu_s - \mu_k$
0.786	0.22 ± 0.03	0.173 ± 0.006	0.05
0.599	0.24 ± 0.01	0.214 ± 0.008	0.03
0.4	0.27 ± 0.03	0.25 ± 0.02	0.02
0.058	0.32 ± 0.06	0.28 ± 0.06	0.04

表 47、48 より傾斜法と引っ張り法のいずれにおいても静止摩擦係数と動摩擦係数の差 $\mu_s - \mu_k$ が同程度である。ここで、引っ張り法は、静止摩擦係数と動摩擦係数を同時に測定する一般的な方法であるから、 $\mu_s - \mu_k$ が同程度であることは、傾斜法によっても静止摩擦係数だけでなく動摩擦係数も測定できることを意味する。また、真鍮の $\mu_s - \mu_k$ が小さくなるのはスティック・スリップ運動が原因であるとしている。[参考文献(18)]

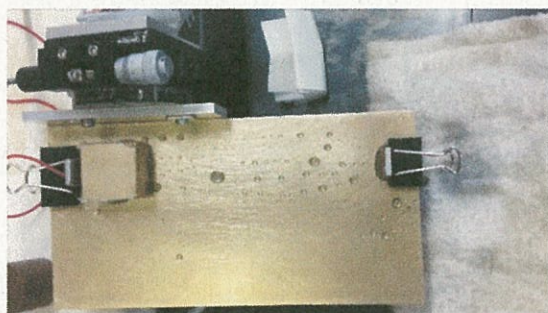
次に、潤滑剤があるときに $\mu_s - \mu_k$ の値が小さくなる原因を考察する。

まず、グリセリンと純水について考察する。そのために、グリセリンとキャノーラ油の滑る様子をそれぞれ次の図 14、15 で見る。

図 14(p53 からの再掲) グリセリンを塗布した際の滑る様子(t は滑りはじめからの時間)

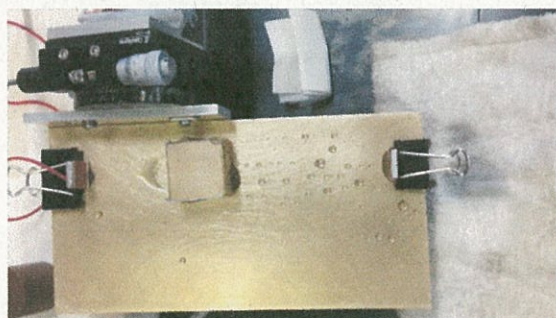
(a) t=0(s)

(b) t=11.7(s)



(c) t=17.7(s)

(d) t=18.6(s)



(e) t=18.9(s)

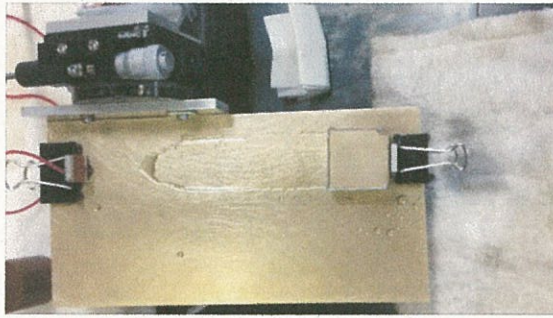
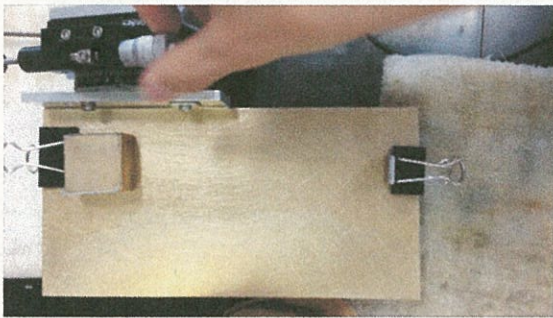


図 15 キャノーラ油を塗布した際の滑る様子(t は滑りはじめからの時間)

(a) $t=0(\text{s})$

(b) $t=0.3(\text{s})$



(c) $t=0.6(\text{s})$

(d) $t=0.9(\text{s})$



(e) $t=1.2(\text{s})$

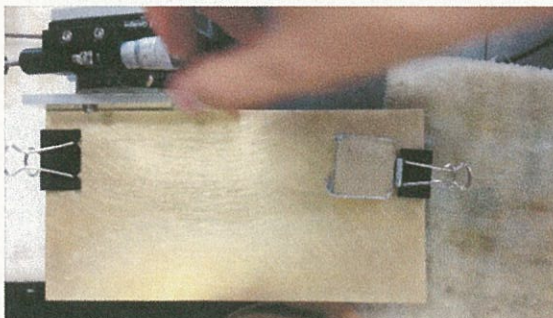


図 14、15 より、グリセリンを塗布した場合、滑り始めは非常にゆっくり滑るが、ある時間を境に急に滑るのに対し、キャノーラ油を塗布した場合ははじめてから滑る。この違いは、グリセリンの表面張力が原因であると考えられる。表面張力による液体の盛り上がりによ

って、境界面に空気が入らないようになるため、境界面の圧力が小さくなる。そのため、大気圧に押されて荷重 W は大きくなる。よって、動摩擦力が大きくなるので滑り始めは非常にゆっくり滑る。そして、この密閉状態がなくなると、大気圧による荷重がなくなるので、動摩擦力が小さくなるため、ある時間を境に急に滑る。実際、図 14 の(c)より、急に滑る前には、ブロックの後方にグリセリンが出てきた跡が見える。これは、滑りによりブロックの後方で表面張力による液体の盛り上がりが薄く引き延ばされて、そのため、ブロックの後方には空気の入る余地ができるためであると考えられる。話を本題に戻すと、グリセリンにおいて、滑り始めの非常にゆっくりとした滑りのために滑り時間が長くなり、そ

のため、式(2.7) $\mu_k = \mu_s - \frac{2s}{gt^2 \cos\theta_s}$ における t が大きくなり、動摩擦係数と静止摩擦係

数の差 $\mu_s - \mu_k$ が小さくなったと考えられる。

次に、キャノーラ油と純水について考える。図 16 より、キャノーラ油を塗布した場合は非常にゆっくり滑る時間はなく、純水を塗布した場合にも非常にゆっくり滑る時間はなかった。よって、 $\mu_s - \mu_k$ が小さくなる理由として上記の理由は当てはまらない。しかし、これに対する理由は分からなかった。

5. 結論

この実験は、表面粗さ、物質、荷重、摩耗、潤滑剤による表面状態変化と摩擦係数の関係を調べ、摩擦係数を決める要因を考察することを目的とした。表面粗さを数値化した、いろいろな物質の摩擦係数の測定結果から分かったことを以下に述べる。

①表面粗さと摩擦係数の関係

表面粗さが大きくなると静止摩擦係数が減少する場合と減少した後に再び大きくなる場合があった。これは、粗さに対して増加関数の凹凸説の寄与と減少関数の凝着説の寄与の和で摩擦係数が決められているためであることがわかった。また、特定方向のみを研磨することにより粗さ方向を 1 つの方向にすると、周期の大きな「うね」が生じる。すると、凹凸説による静止摩擦係数への寄与は非常に小さくなるため、静止摩擦係数は凝着説にのみ依存する。そのため、粗さ方向が互いに垂直なとき最も静止摩擦係数が大きくなった。

②物質の種類と静止摩擦係数の関係

静止摩擦係数の測定値は、アルミ>真鍮>アクリルの関係があり、凝着面の塑性変形を考えた理論モデルの値による大小関係とこれは一致することが分かった。つまり、静止摩擦係数の値は、塑性変形に関係するせん断応力と降伏応力という物質固有のパラメータに依存している。

③荷重と静止摩擦係数の関係

アモントン・クーロンの荷重に関する法則「摩擦力は、接触する二面間に作用する垂直

荷重(垂直抗力)に比例する。」は、この実験の荷重、表面粗さでほぼ成り立つことが分かった。ただし、荷重が小さい場合の静止摩擦係数は、アモントン・クーロンの法則から導き出される静止摩擦係数より小さくなる。荷重が小さいと真実接触が完全に形成されるのに時間がかかり、それゆえに真実接触面積が小さい状態で実験を行うため静止摩擦係数が小さくなったと考えられる。

④摩耗による静止摩擦係数の変化

表面粗さの小さい金属で摩耗の効果が見られた。これは表面の突起構造に関係している。幅の非常に小さな「非常に鋭い突起」の存在により、滑る際にこの突起を破壊する力がせん断力や凹凸を乗り越える力に加えて必要となるため静止摩擦係数は大きくなる。しかし、滑り回数が増えると、摩耗により「非常に鋭い突起」は破壊されてなくなるため静止摩擦係数は小さくなる。「非常に鋭い突起」は金属の研磨の際に生じ、表面粗さの滑らかなものほど様々な高さの突起で多く生じる。したがって、滑らかな金属ほど摩耗による静止摩擦係数の影響は大きく、長期にわたって続くと考えられる。

⑤潤滑剤による表面状態の変化と静止摩擦係数の関係

速度が速い場合の動摩擦係数に対する潤滑剤の効果は大きいですが、静止摩擦係数に対して潤滑剤はあまり効果を示さないことが分かった。ただし、加重下待ち時間が短いと、静止摩擦係数が小さくなる。これは、真実接触を形成する時間が十分に無いため、真実接触面積が小さくなるので静止摩擦係数が小さくなると考えられる。

物質表面で層間結合力の弱い層を形成する黒鉛は、紙のような繊維で絡みとられる表面でも安定した層を形成することで潤滑作用を示した。一方、チョークのような粒子状の固体は表面粗さの突起に入り込むことで真実接触面積を増加させ、それにより静止摩擦係数を増加させることが分かった。

⑥傾斜法による動摩擦係数の測定

動摩擦係数を測定する一般的な方法である引っ張り法とデータを比較することで、動画撮影を利用した傾斜法によっても動摩擦係数が測定できることが分かった。ただし、グリセリンのような表面張力が大きく、かつ粘性率が大きい潤滑剤は、滑りが遅くなるので、この実験には不向きである。

静止摩擦係数はここで並べた①表面粗さ、②物質、③荷重、④摩耗、⑤潤滑剤による表面状態の変化という多数の要因により決定され、それぞれの中でもさらに詳細な要因により決定される。しかし、基本的な要因は二面間の凝着力と真実接触面積であることが分かった。以上より、乾燥素材の静止摩擦係数を測定する際は、摩耗して静止摩擦係数が安定してからデータを採用し、静止摩擦係数の値とともに物質の組み合わせだけでなく荷重や Ra など表面粗さを示すパラメータを併記することが必要である。

この実験で、静止摩擦係数に寄与する多数の要因を調べることができた理由は、スケールの小さい回転ステージを用いることによって数 cm の小さな試料を用いたからである。

6.参考文献

- [1] 基礎から学ぶトライボロジー 橋本 巨著 森北出版
- [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] 粗さ(二次元)パラメーター - Olympus
http://www.olympus-ims.com/ja/knowledge/metrology/roughness/2d_parameter/
- [7] 摩擦の物理 松川宏 著 岩波書店
- [8] 京都工芸繊維大学 HP
- [9] 理科年表 平成 20 年 丸善株式会社 国立天文台編
- [10] 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
- [11] A.Mills.Phys.Educ.43,392,2008
- [12] <http://daitokasei.co.jp/dictionary.php>
- [13]<http://blog.mechguru.com/machine-design>
/typical-coefficient-of-friction-values-for-common-分かった materials/
- [14] <http://www.labnotes.jp/pdf2/friction.pdf>
- [15] <http://www.carbidedepot.com/formulas-frictioncoefficient.htm>
- [16] 表面物性工学ハンドブック 松川 宏 丸善
- [17] 阿部 哲也ほか、日本原子力研究所研究報告 JAREI-Tech 2002-093
- [18] 三重県立四日市高校 SSH 科学部 3 年の引っ張り法の実験による

7.共同実験者と役割分担

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)

8.謝辞

実験方法のアドバイスなどの実験指導をしていただいた豊田理化学研究所フェロー 中村新男先生に感謝いたします。

<付録資料>

・水平の角度

アルミ板#60

回数	水平の角度 θ_h (度)
1	89.42
2	89.47
3	89.41
4	89.42
5	89.42
6	89.42
7	89.42
8	89.48
9	89.44
10	89.43
平均	89.43
誤差	0.01
平均(rad)	1.5609
誤差(rad)	0.0001

アルミ板#100

回数	水平の角度 θ_h (度)
1	89.37
2	89.52
3	89.30
4	89.30
5	89.27
6	89.39
7	89.35
8	89.37
9	89.31
10	89.30
平均	89.35
誤差	0.02
平均(rad)	1.5594
誤差(rad)	0.0004

アルミ板#150

回数	水平の角度 θ_h (度)
1	89.28
2	89.27
3	89.31
4	89.31
5	89.26
6	89.27
7	89.24
8	89.37
9	89.21
10	89.24
平均	89.28
誤差	0.01
平均(rad)	1.5582
誤差(rad)	0.0003

アルミ板#320

回数	水平の角度 θ_h (度)
1	89.50
2	89.51
3	89.47
4	89.50
5	89.50
6	89.54
7	89.53
8	89.50
9	89.56
10	89.59
平均	89.52
誤差	0.01
平均(rad)	1.5624
誤差(rad)	0.0002

アルミ板#600

回数	水平の角度 θ_h (度)
1	89.60
2	89.50
3	89.47
4	89.43
5	89.42
6	89.47
7	89.48
8	89.46
9	89.54
10	89.53
平均	89.49
誤差	0.02
平均(rad)	1.5619
誤差(rad)	0.0003

真鍮板#60

回数	水平の角度 θ_h (度)
1	89.47
2	89.51
3	89.53
4	89.53
5	89.51
6	89.55
7	89.51
8	89.54
9	89.44
10	89.53
平均	89.51
誤差	0.01
平均(rad)	1.5623
誤差(rad)	0.0002

真鍮板#150

回数	水平の角度 θ_h (度)
1	89.39
2	89.42
3	89.40
4	89.43
5	89.42
6	89.43
7	89.31
8	89.31
9	89.32
10	89.37
平均	89.38
誤差	0.02
平均(rad)	1.5600
誤差(rad)	0.0003

真鍮板#320

回数	水平の角度 θ_h (度)
1	89.34
2	89.40
3	89.38
4	89.33
5	89.27
6	89.33
7	89.32
8	89.32
9	89.41
10	89.29
平均	89.34
誤差	0.01
平均(rad)	1.5593
誤差(rad)	0.0002

真鍮板#600

回数	水平の角度 θ_h (度)
1	89.52
2	89.58
3	89.53
4	89.49
5	89.55
6	89.41
7	89.54
8	89.47
9	89.43
10	89.51
平均	89.50
誤差	0.02
平均(rad)	1.5621
誤差(rad)	0.0003

ガラス板

回数(回)	水平の角度 θ_h (度)
1	89.39
2	89.34
3	89.34
4	89.42
5	89.43
6	89.41
7	89.42
8	89.33
9	89.38
10	89.42
平均	89.39
誤差	0.01
平均(rad)	1.5601
誤差(rad)	0.0002

アクリル#60

回数(回)	水平の角度 θ_h (度)
1	89.36
2	89.39
3	89.37
4	89.40
5	89.36
6	89.40
7	89.39
8	89.28
9	89.31
10	89.38
平均	89.36
誤差	0.0121
平均	1.5597
誤差(rad)	0.0002

アクリル#150

回数(回)	水平の角度 θ_h (度)
1	89.969
2	89.910
3	89.905
4	89.910
5	89.953
6	89.939
7	89.942
8	89.957
9	89.973
10	89.925
平均	89.938
誤差	0.008
平均	1.5697
誤差(rad)	0.0001

アクリル#320

回数(回)	水平の角度 θ_h (度)
1	89.74
2	89.77
3	89.66
4	89.70
5	89.69
6	89.72
7	89.71
8	89.72
9	89.74
10	89.77
平均	89.72
誤差	0.01
平均(rad)	1.5659
誤差(rad)	0.0002

紙板

回数	水平の角度 θ_h (度)
1	89.83
2	89.94
3	89.89
4	89.88
5	89.83
6	89.91
7	89.86
8	89.92
9	89.92
10	89.93
平均	89.89
誤差	0.01
平均(rad)	1.5621
誤差(rad)	0.0003

アクリル#600

回数(回)	水平の角度 θ_h (度)
1	89.57
2	89.52
3	89.53
4	89.60
5	89.51
6	89.55
7	89.50
8	89.58
9	89.58
10	89.58
平均	89.55
誤差	0.01
平均(rad)	1.5630
誤差(rad)	0.0002

・乾燥素材の静止摩擦係数

アルミ#60-60

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	55.6	33.8	0.67
2	58.8	30.6	0.59
3	56.4	33.0	0.65
4	59.6	29.8	0.57
5	57.8	31.8	0.62
6	57.8	31.6	0.62
7	58.4	31.0	0.60
8	59.0	30.4	0.59
9	58.0	31.4	0.61
10	59.6	29.8	0.57
平均	58.1	31.4	0.61
誤差	0.4	0.4	
平均(rad)	1.014	0.547	
誤差(rad)	0.007	0.007	

アルミ#60-150

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	51	39	0.80
2	53	36	0.73
3	58	32	0.62
4	51	39	0.80
5	58	32	0.62
6	56	33	0.66
7	57	33	0.65
8	60	29	0.56
9	53	36	0.74
10	57	32	0.63
平均	55	34	0.68
誤差	1	1	
平均(rad)	0.97	0.60	
誤差(rad)	0.02	0.02	

アルミ#60-320

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	59.6	29.9	0.58
2	59.6	29.9	0.58
3	61.6	27.9	0.53
4	61.0	28.5	0.54
5	64.0	25.5	0.48
6	59.6	29.9	0.58
7	62.8	26.7	0.50
8	64.0	25.5	0.48
9	64.8	24.7	0.46
10	63.6	25.9	0.49
平均	62.1	29.3	0.56
誤差	0.6	0.7	
平均(rad)	1.08	0.51	
誤差(rad)	0.01	0.01	

アルミ#60-600

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	62.0	27.5	0.52
2	56.6	32.9	0.65
3	55.8	33.7	0.67
4	59.4	30.1	0.58
5	53.8	35.7	0.72
6	57.6	31.9	0.62
7	53.4	36.1	0.73
8	56.8	32.7	0.64
9	55.8	33.7	0.67
10	54.8	34.7	0.69
平均	56.6	32.9	0.65
誤差	0.8	0.8	
平均(rad)	0.99	0.57	
誤差(rad)	0.01	0.01	

アルミ#100-60

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	72.8	16.6	0.30
2	70.0	19.4	0.35
3	75.2	14.2	0.25
4	78.0	11.4	0.20
5	75.8	13.6	0.24
6	79.0	10.4	0.18
7	76.2	13.2	0.24
8	79.4	10.0	0.18
9	73.0	16.4	0.29
10	76.8	12.6	0.22
平均	75.6	13.8	
誤差	0.9	0.9	
平均(rad)	1.32	0.24	
誤差(rad)	0.02	0.02	

アルミ#100-100

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	55	34	0.68
2	62	27	0.51
3	58	31	0.60
4	60	29	0.55
5	65	24	0.45
6	70	19	0.34
7	68	22	0.39
8	73	17	0.30
9	68	21	0.39
10	69	20	0.37
平均	65	24	
誤差	2	2	
平均(rad)	1.13	0.43	
誤差(rad)	0.03	0.03	

アルミ#100-150

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	58	31	0.60
2	64	25	0.46
3	68	21	0.38
4	71	19	0.34
5	71	18	0.33
6	75	14	0.25
7	73	16	0.30
8	75	14	0.25
9	77	12	0.22
10	77	12	0.22
11	78	11	0.20
12	78	11	0.20
平均	74	15	
誤差	1	1	
平均(rad)	1.30	0.26	
誤差(rad)	0.02	0.02	

アルミ#100-320

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	69.4	20.1	0.37
2	71.4	18.1	0.33
3	69.0	20.5	0.37
4	67.8	21.7	0.40
5	67.4	22.1	0.41
6	71.0	18.5	0.33
7	72.2	17.3	0.31
8	70.0	19.5	0.35
9	67.4	22.1	0.41
10	69.0	20.5	0.37
平均	69.5	20.1	
誤差	0.5	0.5	
平均(rad)	1.212	0.35	
誤差(rad)	0.009	0.01	

アルミ#100-600

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	54	36	0.72
2	53	36	0.73
3	60	30	0.57
4	56	33	0.66
5	61	28	0.54
6	63	26	0.49
7	55	35	0.69
8	60	30	0.57
9	58	31	0.60
10	66	24	0.44
平均	59	31	
誤差	1	1	
平均(rad)	1.02	0.54	
誤差(rad)	0.02	0.02	

アルミ#150-60

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	57.4	32.0	0.63
2	57.6	31.8	0.62
3	59.0	30.4	0.59
4	56.8	32.6	0.64
5	58.2	31.2	0.61
6	58.8	30.6	0.59
7	58.0	31.4	0.61
8	59.0	30.4	0.59
9	56.4	33.0	0.65
10	56.4	33.0	0.65
平均	57.8	31.7	0.62
誤差	0.3	0.3	
平均(rad)	1.008	0.553	
誤差(rad)	0.006	0.006	

アルミ#150-150

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	60.4	29	0.55
2	60.6	29	0.55
3	58.6	31	0.59
4	56.0	33	0.66
5	60.0	29	0.56
6	59.6	30	0.57
7	53.4	36	0.72
8	64.4	25	0.46
9	61.4	28	0.53
10	59.8	29	0.57
平均	59.4	30	0.57
誤差	0.9	1	
平均(rad)	1.04	0.52	
誤差(rad)	0.02	0.02	

アルミ#150-320

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	56.4	33.1	0.65
2	56.6	32.9	0.65
3	55.6	33.9	0.67
4	54.0	35.5	0.71
5	56.2	33.3	0.66
6	54.0	35.5	0.71
7	55.4	34.1	0.68
8	55.8	33.7	0.67
9	55.4	34.1	0.68
10	56.4	33.1	0.65
平均	55.6	33.9	0.67
誤差	0.3	0.3	
平均(rad)	0.970	0.592	
誤差(rad)	0.005	0.005	

アルミ#150-600

回数	終点角度 θ_e (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	58.8	30.7	0.59
2	61.8	27.7	0.52
3	62.0	27.5	0.52
4	59.0	30.5	0.59
5	60.8	28.7	0.55
6	63.6	25.9	0.49
7	65.0	24.5	0.48
8	64.0	25.5	0.48
9	63.0	26.5	0.50
10	63.0	26.5	0.50
平均	62.1	27.4	0.52
誤差	0.7	0.7	
平均(rad)	1.08	0.48	
誤差(rad)	0.01	0.01	

アルミ#320-60

回数	終点角度 θ_e (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	55.0	34.4	0.69
2	56.2	33.2	0.66
3	56.8	32.8	0.64
4	56.4	33.0	0.65
5	56.2	33.2	0.66
6	59.8	29.6	0.57
7	58.4	33.0	0.65
8	58.4	31.0	0.60
9	55.6	33.8	0.67
10	56.0	33.4	0.66
平均	56.7	32.8	0.64
誤差	0.4	0.5	
平均(rad)	0.989	0.572	
誤差(rad)	0.008	0.009	

アルミ#320-150

回数	終点角度 θ_e (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	57.0	32.3	0.63
2	53.2	36.1	0.73
3	55.8	33.5	0.66
4	61.2	28.1	0.53
5	57.6	31.7	0.62
6	60.6	28.7	0.55
7	56.2	33.1	0.65
8	57.0	32.3	0.63
9	59.6	29.7	0.57
10	59.8	29.5	0.57
平均	57.8	31.5	0.61
誤差	0.8	0.8	
平均(rad)	1.01	0.55	
誤差(rad)	0.01	0.01	

アルミ#320-320

回数	終点角度 θ_e (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	54.8	34.9	0.70
2	58.8	30.7	0.59
3	59.0	30.5	0.59
4	56.0	33.5	0.66
5	61.4	28.1	0.53
6	57.8	31.7	0.62
7	61.6	27.9	0.53
8	60.0	29.5	0.57
9	61.2	28.3	0.54
10	62.2	27.3	0.52
平均	59.3	30.3	0.58
誤差	0.8	0.8	
平均(rad)	1.03	0.53	
誤差(rad)	0.01	0.01	

アルミ#320-600

回数	終点角度 θ_e (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	52	37	0.77
2	46	43	0.94
3	54	36	0.72
4	60	30	0.57
5	58	31	0.61
6	60	29	0.58
7	57	33	0.64
8	60	29	0.56
9	60	29	0.57
10	62	27	0.51
平均	57	33	0.64
誤差	2	2	
平均(rad)	0.99	0.57	
誤差(rad)	0.03	0.03	

アルミ#600-60

回数	終点角度 θ_e (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	54.4	35.0	0.70
2	53.4	36.0	0.73
3	53.0	36.4	0.74
4	55.4	34.0	0.68
5	52.4	37.0	0.75
6	50.4	39.0	0.81
7	53.0	36.4	0.74
8	52.8	36.6	0.74
9	55.2	34.2	0.68
10	54.0	35.4	0.71
平均	53.4	36.0	0.73
誤差	0.5	0.5	
平均(rad)	0.932	0.629	
誤差(rad)	0.008	0.008	

アルミ#600-150

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	54.0	35.3	0.71
2	52.4	36.9	0.75
3	49.4	39.9	0.84
4	57.0	32.3	0.63
5	57.4	31.9	0.62
6	58.2	31.1	0.60
7	57.4	31.9	0.62
8	57.8	31.5	0.61
9	55.2	34.1	0.68
10	56.6	32.7	0.64
平均	55.5	33.7	0.67
誤差	0.9	0.9	
平均(rad)	0.97	0.59	
誤差(rad)	0.02	0.02	

アルミ#600-320

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	53	36	0.74
2	56	33	0.65
3	59	30	0.58
4	54	36	0.72
5	58	32	0.61
6	60	29	0.56
7	61	29	0.55
8	58	32	0.61
9	52	38	0.77
10	60	30	0.57
平均	57	32	0.63
誤差	1	1	
平均(rad)	1.00	0.57	
誤差(rad)	0.02	0.02	

アルミ#600-600

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	47.4	42.1	0.90
2	52.2	37.3	0.76
3	50.2	39.3	0.82
4	48.6	40.9	0.87
5	50.2	39.3	0.82
6	53.0	36.5	0.74
7	52.4	37.1	0.76
8	54.4	35.1	0.70
9	54.0	35.5	0.71
10	56.0	33.5	0.66
平均	51.8	37.7	0.77
誤差	0.9	0.9	
平均(rad)	0.90	0.66	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#60-60

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	73.0	16.5	0.30
2	77.0	12.5	0.22
3	78.8	10.7	0.19
4	81.0	8.5	0.15
5	81.0	8.5	0.15
6	81.4	8.1	0.14
7	82.2	7.3	0.13
8	82.0	7.5	0.13
9	82.8	6.7	0.12
10	82.2	7.3	0.13
11	82.0	7.5	0.13
12	82.8	6.7	
平均	81.6	7.9	
誤差	0.4	0.4	
平均(rad)	1.425	0.138	
誤差(rad)	0.007	0.007	

真鍮#60-60 毎回研磨

回数(回)	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	73.6	15.9	0.29
2	72.2	17.3	0.31
3	73.8	15.7	0.28
4	72.8	16.7	0.30
5	73.0	16.5	0.30
6	73.8	15.7	0.28
7	71.4	18.1	0.33
8	74.6	14.9	0.27
9	74.0	15.5	0.28
10	73.4	16.1	0.29
平均	73.3	16.3	0.29
誤差	0.3	0.3	
平均(rad)	1.279	0.284	
誤差(rad)	0.005	0.005	

真鍮#60-150

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	67.4	22.0	0.40
2	75.4	14.0	0.25
3	73	16.4	0.29
4	79.6	9.8	0.17
5	79.8	9.6	0.17
6	80.0	9.4	0.17
7	79.6	9.8	0.17
8	81.0	8.4	0.15
9	79.8	9.6	0.17
10	80.4	9.0	0.16
11	76.0	13.4	0.24
12	78.2	11.2	0.20
13	81.0	8.4	0.15
平均	79.5	9.8	
誤差	0.5	0.5	
平均(rad)	1.388	0.172	
誤差(rad)	0.008	0.008	

真鍮#60-320

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	73.4	15.9	0.29
2	74.2	15.1	0.27
3	74.2	15.1	0.27
4	75.6	13.7	0.24
5	77.0	12.3	0.22
6	76.2	13.1	0.23
7	74.6	14.7	0.26
8	69.4	19.9	0.36
9	73.4	15.9	0.29
10	76.0	13.3	0.24
平均	74.4	14.9	
誤差	0.7	0.7	
平均(rad)	1.30	0.26	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#60-600

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	71.8	17.6	0.32
2	77.4	12.0	0.21
3	78.8	10.6	0.19
4	78.6	10.8	0.19
5	74.8	14.6	0.26
6	76.6	12.8	0.23
7	77.0	12.4	0.22
8	76.4	13.0	0.23
9	80.0	9.4	0.17
10	76.8	12.6	0.22
11	78.0	11.4	0.20
平均	77.4	11.9	
誤差	0.5	0.5	
平均(rad)	1.352	0.208	
誤差(rad)	0.008	0.008	

真鍮#150-60

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	77.8	11.7	0.21
2	79.2	10.3	0.18
3	80.4	9.1	0.16
4	80.2	9.3	0.16
5	80.2	9.3	0.16
6	82.0	7.5	0.13
7	81.4	8.1	0.14
8	80.6	8.9	0.16
9	81.0	8.5	0.15
10	80.8	8.7	0.15
平均	80.4	9.2	
誤差	0.4	0.4	
平均(rad)	1.403	0.160	
誤差(rad)	0.006	0.006	

真鍮#150-150

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	69	20	0.36
2	70	19	0.35
3	71	18	0.32
4	68	21	0.39
5	68	21	0.38
6	75	14	0.25
7	68	21	0.39
8	74	15	0.27
9	77	12	0.21
10	73	17	0.30
平均	72	18	
誤差	1	1	
平均(rad)	1.25	0.31	
誤差(rad)	0.02	0.02	

真鍮#150-320

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	76.6	12.7	0.23
2	72.2	17.1	0.31
3	75.2	14.1	0.25
4	72.4	16.9	0.30
5	75.4	13.9	0.25
6	77.2	12.1	0.22
7	75.0	14.3	0.26
8	73.6	15.7	0.28
9	70.0	19.3	0.35
10	73.6	15.7	0.28
平均	74.1	15.2	
誤差	0.7	0.7	
平均(rad)	1.29	0.27	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#150-600

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	61.2	28.2	0.54
2	66.8	22.6	0.42
3	67.2	22.2	0.41
4	70.0	19.4	0.35
5	62.0	27.4	0.52
6	68.0	21.4	0.39
7	70.0	19.4	0.35
8	69.8	19.6	0.36
9	70.8	18.6	0.34
10	65.2	24.2	0.45
11	69.0	20.4	0.37
平均	67.9	21.5	
誤差	0.9	0.9	
平均(rad)	1.18	0.38	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#320-60

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	74.4	15.1	0.27
2	75.6	13.9	0.25
3	78.0	11.5	0.20
4	75.2	14.3	0.26
5	77.6	11.9	0.21
6	79.0	10.5	0.19
7	79.8	9.7	0.17
8	80.8	8.7	0.15
9	81.2	8.3	0.15
10	81.8	7.7	0.14
平均	78.3	11.2	
誤差	0.8	0.8	
平均(rad)	1.37	0.19	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#320-150

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	62.4	27.0	0.51
2	70.0	19.4	0.35
3	75.6	13.8	0.25
4	75.2	14.2	0.25
5	72.8	16.6	0.30
6	74.8	14.6	0.26
7	71.6	17.8	0.32
8	74.0	15.4	0.28
9	77.6	11.8	0.21
10	76.8	12.6	0.22
11	76.4	13.0	0.23
平均	74.5	14.9	
誤差	0.8	0.8	
平均(rad)	1.30	0.26	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#320-320

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	69.4	19.9	0.36
2	71.4	17.9	0.32
3	72.8	16.5	0.30
4	75.8	13.5	0.24
5	70.4	18.9	0.34
6	77.8	11.5	0.20
7	71.6	17.7	0.32
8	75.8	13.5	0.24
9	74.8	14.5	0.26
10	76.0	13.3	0.24
平均	73.6	15.8	
誤差	0.9	0.9	
平均(rad)	1.28	0.28	
誤差(rad)	0.02	0.02	

真鍮#320-600

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	63.8	25.7	0.48
2	70.8	18.7	0.34
3	73.0	16.5	0.30
4	74.4	15.1	0.27
5	76.6	12.9	0.23
6	74.0	15.5	0.28
7	72.6	16.9	0.30
8	76.2	13.3	0.24
9	75.0	14.5	0.26
10	74.8	14.7	0.26
11	77.2	12.3	0.22
平均	74.5	15.0	
誤差	0.6	0.6	
平均(rad)	1.30	0.26	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#600-60

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	75.8	13.7	0.24
2	76.2	13.3	0.24
3	76.8	12.7	0.23
4	75.0	14.5	0.26
5	75.0	14.5	0.26
6	75.6	13.9	0.25
7	76.8	12.7	0.23
8	78.8	10.7	0.19
9	80.0	9.5	0.17
10	79.2	10.3	0.18
平均	76.9	12.6	
誤差	0.6	0.6	
平均(rad)	1.34	0.22	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#600-150

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	68.8	20.6	0.38
2	71.2	18.2	0.33
3	72.4	17.0	0.31
4	71.0	18.4	0.33
5	72.6	16.8	0.30
6	68.8	20.6	0.38
7	70.2	19.2	0.35
8	69.0	20.4	0.37
9	71.2	18.2	0.33
10	65.6	23.8	0.44
平均	70.1	19.3	
誤差	0.7	0.7	
平均(rad)	1.22	0.34	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#600-320

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	65.8	23.5	0.44
2	72.0	17.3	0.31
3	72.8	16.5	0.30
4	68.2	21.1	0.39
5	73.2	16.1	0.29
6	68.0	21.3	0.39
7	68.0	21.3	0.39
8	72.2	17.1	0.31
9	69.0	20.3	0.37
10	67.8	21.5	0.39
平均	69.7	19.6	
誤差	0.8	0.8	
平均(rad)	1.22	0.34	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#600-600

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	58.4	31.1	0.60
2	65	24	0.45
3	69	21	0.37
4	63	27	0.50
5	59	31	0.59
6	70	19	0.35
7	70	20	0.36
8	63	27	0.50
9	68	22	0.40
10	68	22	0.39
11	70	20	0.36
平均	66	23	
誤差	1	1	
平均(rad)	1.16	0.40	
誤差(rad)	0.02	0.02	

アルミ#60-ガラス

回数(回)	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	80.8	8.5	0.15
2	81.2	8.1	0.14
3	82.4	6.9	0.12
4	82.6	6.7	0.12
5	82.2	7.1	0.13
6	82.8	6.5	0.11
7	81.8	7.5	0.13
8	82.8	6.5	0.11
9	83.2	6.1	0.11
10	81.4	7.9	0.14
平均	82.1	7.2	
誤差	0.2	0.3	
平均(rad)	1.433	0.126	
誤差(rad)	0.004	0.005	

アルミ#150-ガラス

回数(回)	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	81.4	7.9	0.14
2	82.0	7.3	0.13
3	79.4	9.9	0.18
4	81.8	7.5	0.13
5	80.8	8.5	0.15
6	80.6	8.7	0.15
7	79.4	9.9	0.18
8	81.6	7.7	0.14
9	81.4	7.9	0.14
10	79.4	9.9	0.18
平均	80.8	8.6	
誤差	0.3	0.3	
平均(rad)	1.410	0.150	
誤差(rad)	0.006	0.006	

アルミ#320-ガラス

回数(回)	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	80.2	9.1	0.16
2	81.6	7.7	0.14
3	80.8	8.5	0.15
4	80.2	9.1	0.16
5	81.6	7.7	0.14
6	81.2	8.1	0.14
7	81.0	8.3	0.15
8	80.4	8.9	0.16
9	81.0	8.3	0.15
10	81.8	7.5	0.13
平均	81.0	8.4	
誤差	0.2	0.2	
平均(rad)	1.413	0.146	
誤差(rad)	0.003	0.004	

アルミ#600-ガラス

回数(回)	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	78.0	11.3	0.20
2	79.2	10.1	0.18
3	79.0	10.3	0.18
4	78.2	11.1	0.20
5	79.0	10.3	0.18
6	79.4	9.9	0.18
7	78.8	10.5	0.19
8	79.4	9.9	0.18
9	77.8	11.5	0.20
10	78.6	10.7	0.19
平均	78.74	10.6	
誤差	0.2	0.2	
平均(rad)	1.374	0.185	
誤差(rad)	0.003	0.003	

真鍮#60-ガラス

回数(回)	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	83.6	5.7	0.10
2	83.6	5.7	0.10
3	83.6	5.7	0.10
4	82.8	6.5	0.11
5	83.0	6.3	0.11
6	82.8	6.5	0.11
7	83.4	5.9	0.10
8	83.6	5.7	0.10
9	83.8	5.5	0.10
10	83.0	6.3	0.11
平均	83.3	6.0	
誤差	0.1	0.1	
平均(rad)	1.454	0.105	
誤差(rad)	0.002	0.002	

真鍮#150-ガラス

回数(回)	終点角度 θ (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	82.8	6.5	0.11
2	82.8	6.5	0.11
3	82.2	7.1	0.13
4	82.8	6.5	0.11
5	82.6	6.7	0.12
6	81.8	7.5	0.13
7	80.4	8.9	0.16
8	82.4	6.9	0.12
9	80.2	9.1	0.16
10	82.2	7.1	0.13
平均	82.0	7.3	
誤差	0.3	0.3	
平均(rad)	1.432	0.128	
誤差(rad)	0.005	0.006	

真鍮#320-ガラス

回数(回)	終点角度 θ (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	82.0	7.3	0.13
2	80.4	8.9	0.16
3	82.0	7.3	0.13
4	82.0	7.3	0.13
5	82.0	7.3	0.13
6	80.8	8.5	0.15
7	80.8	8.5	0.15
8	80.0	9.3	0.16
9	79.4	9.9	0.18
10	82.0	7.3	0.13
平均	81.1	8.2	
誤差	0.3	0.3	
平均(rad)	1.416	0.143	
誤差(rad)	0.005	0.006	

真鍮#600-ガラス

回数(回)	終点角度 θ (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	76.8	12.5	0.22
2	78.2	11.1	0.20
3	77.8	11.5	0.20
4	77.6	11.7	0.21
5	78.2	11.1	0.20
6	78.8	10.5	0.19
7	78.4	10.9	0.19
8	78.6	10.7	0.19
9	79.4	9.9	0.18
10	79.8	9.5	0.17
平均	78.4	11.0	
誤差	0.3	0.3	
平均(rad)	1.368	0.192	
誤差(rad)	0.005	0.005	

アクリル#60-60

回数(回)	終点角度 θ (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	75.8	13.6	0.24
2	77.8	11.6	0.20
3	77.8	11.6	0.20
4	76.0	13.4	0.24
5	76.2	13.2	0.23
6	76.2	13.2	0.23
7	77.2	12.2	0.22
8	76.8	12.6	0.22
9	76.6	12.8	0.23
10	76.4	13.0	0.23
平均	76.7	12.7	0.23
誤差	0.2	0.2	
平均(rad)	1.338	0.221	
誤差(rad)	0.004	0.004	

アクリル#150-150

回数(回)	終点角度 θ (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	73.4	16.5	0.30
2	74.4	15.5	0.28
3	75.8	14.1	0.25
4	76.0	13.9	0.25
5	78.0	11.9	0.21
6	76.8	13.1	0.23
7	77.0	12.9	0.23
8	77.2	12.7	0.23
9	76.4	13.5	0.24
10	77.8	12.1	0.22
平均	76.3	15.4	0.28
誤差	0.5	0.5	
平均(rad)	1.331	0.269	
誤差(rad)	0.008	0.008	

アクリル#320-320

回数(回)	終点角度 θ (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	74.4	15.3	0.27
2	75.6	14.1	0.25
3	73.8	15.9	0.29
4	77.2	12.5	0.22
5	80.2	9.5	0.17
6	77.2	12.5	0.22
7	74.4	15.3	0.27
8	73.8	15.9	0.29
9	75.6	14.1	0.25
10	76.2	13.5	0.24
平均	75.8	15.1	0.27
誤差	0.6	0.6	
平均(rad)	1.32	0.26	
誤差(rad)	0.01	0.01	

アクリル#600-600

回数(回)	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	73.6	16.0	0.29
2	74.6	15.0	0.27
3	74.0	15.6	0.28
4	74.0	15.6	0.28
5	74.8	14.8	0.26
6	74.0	15.6	0.28
7	74.0	15.6	0.28
8	74.0	15.6	0.28
9	74.6	15.0	0.27
10	73.8	15.8	0.28
平均	74.1	15.4	0.28
誤差	0.1	0.1	
平均(rad)	1.294	0.269	
誤差(rad)	0.002	0.002	

アクリルそのまま-そのまま

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	75.2	14.2	0.25
2	72.2	17.2	0.31
3	76.0	13.4	0.24
4	76.0	13.4	0.24
5	75.6	13.8	0.25
6	76.8	12.6	0.22
7	75.0	14.4	0.26
8	75.8	13.6	0.24
9	75.8	13.6	0.24
10	75.6	13.8	0.25
平均	75.4	14.0	0.25
誤差	0.4	0.4	
平均(rad)	1.316	0.245	
誤差(rad)	0.007	0.007	

・エタノール

真鍮#60-600 16.8°C

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	67.8	21.7	0.40
2	69.8	19.7	0.36
3	72.0	17.5	0.32
4	68.2	21.3	0.39
5	70.8	18.7	0.34
6	70.0	19.5	0.35
7	69.4	20.1	0.37
8	74.0	15.5	0.28
9	73.2	16.3	0.29
10	73.6	15.9	0.28
平均	70.9	18.6	
誤差	0.7	0.7	
平均(rad)	1.24	0.33	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#150-600 16.1°C

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	63.6	25.9	0.49
2	70.2	19.3	0.35
3	69.6	19.9	0.36
4	71.4	18.1	0.33
5	68.4	21.1	0.39
6	67.6	21.9	0.40
7	68.6	20.9	0.38
8	68.2	21.3	0.39
9	67.4	22.1	0.41
10	69.2	20.3	0.37
平均	68.4	21.1	
誤差	0.7	0.7	
平均(rad)	1.19	0.37	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#320-600 16.2°C

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	66.8	22.7	0.42
2	60.8	28.7	0.55
3	63.4	26.1	0.49
4	66.6	22.9	0.42
5	67.2	22.3	0.41
6	68	21.5	0.39
7	67.4	22.1	0.41
8	68.4	21.1	0.39
9	68	21.5	0.39
10	67.4	22.1	0.41
平均	66.4	23.1	
誤差	0.8	0.8	
平均(rad)	1.16	0.40	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#600-600 15.9°C

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	65.4	24.10316667	0.45
2	69.2	20.30316667	0.37
3	67.8	21.70316667	0.40
4	63	26.50316667	0.50
5	68	21.50316667	0.39
6	65.8	23.70316667	0.44
7	62	27.50316667	0.52
8	65.4	24.10316667	0.45
9	64	25.50316667	0.48
10	64.6	24.90316667	0.46
平均	65.5	24.0	
誤差	0.7	0.7	
平均(rad)	1.14	0.42	
誤差(rad)	0.01	0.01	

アルミ#60-600 16.6℃

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	67.2	22	0.41
2	67.6	22	0.40
3	67.4	22	0.41
4	66.2	23	0.43
5	60.4	29	0.56
6	67.0	22	0.41
7	68.2	21	0.39
8	62.0	27	0.52
9	67.2	22	0.41
10	70.6	19	0.34
平均	66.4	23	
誤差	0.9	1	
平均(rad)	1.16	0.40	
誤差(rad)	0.02	0.02	

アルミ#150-600 15.9℃

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	57	32	0.64
2	58	32	0.62
3	58	31	0.60
4	63	27	0.50
5	56	34	0.67
6	58	31	0.61
7	60	30	0.57
8	66	23	0.43
9	58	31	0.60
10	64	26	0.48
平均	60	30	
誤差	1	1	
平均(rad)	1.04	0.52	
誤差(rad)	0.02	0.02	

アルミ#320-600 15.8℃

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	62.0	27.5	0.52
2	61.2	28.3	0.54
3	60.0	29.5	0.57
4	60.8	28.7	0.55
5	60.4	29.1	0.56
6	60.8	28.7	0.55
7	56.8	32.7	0.64
8	59.0	30.5	0.59
9	60.6	28.9	0.55
10	60.4	29.1	0.56
平均	60.2	29.3	
誤差	0.5	0.5	
平均(rad)	1.051	0.511	
誤差(rad)	0.008	0.008	

アルミ#600-600 温度なし

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	59.6	29.9	0.57
2	63.0	26.5	0.50
3	67.6	21.9	0.40
4	59.4	30.1	0.58
5	62.0	27.5	0.52
6	57.0	32.5	0.64
7	60.8	28.7	0.55
8	58.5	31.0	0.60
9	62.6	26.9	0.51
10	61.2	28.3	0.54
平均	61.2	28.3	
誤差	0.9	0.9	
平均(rad)	1.1	0.5	
誤差(rad)	0.02	0.02	

・純水

真鍮#60-600 18.6℃

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	71.2	18.3	0.33
2	74.0	15.5	0.28
3	75.0	14.5	0.26
4	72.6	16.9	0.30
5	72.4	17.1	0.31
6	71.0	18.5	0.33
7	70.8	18.7	0.34
8	70.6	18.9	0.34
9	71.6	17.9	0.32
10	71.8	17.7	0.32
平均	72.1	17.4	
誤差	0.5	0.5	
平均(rad)	1.26	0.30	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#150-600 温度なし

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	65.2	24.3	0.45
2	68.0	21.5	0.39
3	68.0	21.5	0.39
4	66.8	22.7	0.42
5	67.0	22.5	0.41
6	68.0	21.5	0.39
7	66.8	22.7	0.42
8	67.8	21.7	0.40
9	69.0	20.5	0.37
10	68.2	21.3	0.39
平均	67.5	22.0	
誤差	0.3	0.4	
平均(rad)	1.178	0.384	
誤差(rad)	0.006	0.006	

真鍮#320-600 18.2°C

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	61.2	28.3	0.54
2	67.2	22.3	0.41
3	67.0	22.5	0.41
4	68.4	21.1	0.39
5	64.0	25.5	0.48
6	62.2	27.3	0.52
7	65.0	24.5	0.46
8	64.4	25.1	0.47
9	66.0	23.5	0.43
10	67.0	22.5	0.41
平均	65.2	24.3	
誤差	0.7	0.8	
平均(rad)	1.14	0.42	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#600-600 温度なし

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	74.6	14.9	0.27
2	67.8	21.7	0.40
3	68.6	20.9	0.38
4	69.0	20.5	0.37
5	69.6	19.9	0.36
6	68.4	21.1	0.39
7	69.6	19.9	0.36
8	69.8	19.7	0.36
9	71.4	18.1	0.33
10	71.8	17.7	0.32
平均	70.1	19.4	
誤差	0.6	0.7	
平均(rad)	1.22	0.34	
誤差(rad)	0.01	0.01	

アルミ#60-600 15.9°C

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	56	33	0.65
2	48	42	0.89
3	51	38	0.80
4	52	37	0.77
5	50	39	0.82
6	48	42	0.89
7	51	38	0.79
8	45	44	0.97
9	56	33	0.66
10	58	32	0.62
平均	52	38	
誤差	1	1	
平均(rad)	0.90	0.66	
誤差(rad)	0.02	0.02	

アルミ#150-600 15.2°C

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	57	33	0.64
2	49	40	0.85
3	45	44	0.98
4	44	45	1.01
5	51	39	0.80
6	53	36	0.73
7	55	35	0.70
8	53	37	0.75
9	55	34	0.68
10	51	38	0.80
平均	51	38	
誤差	1	1	
平均(rad)	0.90	0.67	
誤差(rad)	0.02	0.02	

アルミ#320-600 15.9°C

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	66	24	0.44
2	60	30	0.57
3	50	39	0.82
4	48	42	0.89
5	51	38	0.79
6	60	30	0.57
7	43	46	1.04
8	51	39	0.80
9	58	32	0.62
10	58	31	0.60
11	59	31	0.60
平均	54	36	
誤差	2	2	
平均(rad)	0.94	0.62	
誤差(rad)	0.03	0.03	

アルミ#600-600

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	65	25	0.46
2	52	37	0.76
3	53	36	0.74
4	58	31	0.61
5	51	38	0.78
6	41	48	1.11
7	49	40	0.85
8	43	46	1.05
9	59	31	0.60
10	57	32	0.63
平均	53	37	
誤差	2	2	
平均(rad)	0.92	0.64	
誤差(rad)	0.04	0.04	

アルミ#60-60

回数	終点角度 θ_e (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	60	29	0.56
2	63	27	0.51
3	70	19	0.35
4	65	24	0.45
5	71	19	0.34
6	70	19	0.35
7	75	14	0.26
8	73	16	0.29
9	75	14	0.25
10	67	22	0.41
11	73	16	0.29
平均	69	21	
誤差	2	2	
平均(rad)	1.20	0.36	
誤差(rad)	0.03	0.03	

真鍮#60-60 18.6℃

回数	終点角度 θ_e (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	67.2	22.3	0.41
2	69.0	20.5	0.37
3	71.0	18.5	0.33
4	67.8	21.7	0.40
5	66.6	22.9	0.42
6	69.4	20.1	0.37
7	67.8	21.7	0.40
8	69.8	19.7	0.36
9	70.0	19.5	0.35
10	71.2	18.3	0.33
平均	69.0	20.5	
誤差	0.5	0.5	
平均(rad)	1.204	0.358	
誤差(rad)	0.009	0.009	

荷重なし 真鍮#60-60 27.1℃

回数	終点角度 θ_e (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	70.0	19.5	0.35
2	70.2	19.3	0.35
3	73.2	16.3	0.29
4	75.0	14.5	0.26
5	77.0	12.5	0.22
6	76.4	13.1	0.23
7	76.8	12.7	0.23
8	77.2	12.3	0.22
9	78.2	11.3	0.20
10	75.6	13.9	0.25
11	78.0	11.5	0.20
12	76.8	12.7	0.23
13	74.8	14.7	0.26
平均	75.0	14.6	
誤差	0.9	0.9	
平均(rad)	1.31	0.25	
誤差(rad)	0.02	0.02	

荷重なし 真鍮#600-600 23.7℃

回数	終点角度 θ_e (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	68.8	20.7	0.38
2	77.4	12.1	0.21
3	75.0	14.5	0.26
4	80.0	9.5	0.17
5	76.8	12.7	0.23
6	79.2	10.3	0.18
7	78.6	10.9	0.19
8	70.6	18.9	0.34
9	75.4	14.1	0.25
10	73.4	16.1	0.29
11	74.2	15.3	0.27
平均	76.1	13.4	
誤差	0.9	0.9	
平均(rad)	1.33	0.23	
誤差(rad)	0.02	0.02	

荷重なし アルミ#60-60 温度なし

回数	終点角度 θ_e (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	43.0	46.4	1.05
2	48.0	41.4	0.88
3	49.4	40.0	0.84
4	44.2	45.2	1.01
5	47.4	42.0	0.90
6	54.0	35.4	0.71
7	50.6	38.8	0.80
8	39.8	49.6	1.18
9	43.6	45.8	1.03
10	47.8	41.6	0.89
11	45.4	44.0	0.97
12	49.6	39.8	0.83
平均	46.9	42.5	0.92
誤差	0.9	0.9	
平均(rad)	0.82	0.74	
誤差(rad)	0.01	0.01	

荷重なし アルミ#600-600 温度なし

回数	最終	真の角度	静止摩擦係数
1	63	26.1	0.49
2	71	18.5	0.33
3	64	25.9	0.49
4	64	25.1	0.47
5	69	20.9	0.38
6	61	28.9	0.55
7	60	29.5	0.57
8	66	23.5	0.43
9	68	21.1	0.39
10	66	23.9	0.44
平均	65	24.3	
誤差	1	1.1	
平均(rad)	1.14	0.42	
誤差(rad)	0.02	0.02	

・グリセリン水溶液 濃度依存性

濃度 25% 真鍮#600-600

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	温度(℃)
1	71	18	0.33	21.4
2	69	21	0.37	20
3	68	22	0.40	19.8
4	67	22	0.41	20
5	67	22	0.41	19.8
6	66	24	0.44	19.8
7	65	24	0.45	19.8
8	62	27	0.51	19.8
9	67	23	0.42	19.8
10	61	29	0.55	20
平均	66	23		
誤差	1	1		
平均(rad)	1.16	0.40		
誤差(rad)	0.02	0.02		

濃度 50% 真鍮#600-600

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	温度(℃)
1	64	26	0.48	21.6
2	74	15	0.27	20.8
3	70	20	0.36	21
4	66	23	0.43	20.8
5	68	21	0.39	20.6
6	68	21	0.39	20.6
7	62	27	0.52	20.6
8	68	22	0.40	20.6
9	68	22	0.40	20.4
10	65	24	0.45	20.2
平均	67	22		
誤差	1	1		
平均(rad)	1.18	0.39		
誤差(rad)	0.02	0.02		

濃度 75% 真鍮#600-600

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	温度(℃)
1	66	23	0.43	18.2
2	64	26	0.48	18.2
3	59	31	0.59	18.4
4	55	35	0.69	18.6
5	63	27	0.50	19
6	61	29	0.54	19.2
7	64	26	0.48	19.2
8	67	23	0.41	19.4
9	61	29	0.54	19.4
10	60	29	0.56	19.4
平均	62	27		
誤差	1	1		
平均(rad)	1.08	0.48		
誤差(rad)	0.02	0.02		

濃度 100% 真鍮#600-600

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	温度(℃)
1	69	20	0.37	24.9
2	66	24	0.44	24.7
3	64	25	0.47	24.2
4	61	29	0.54	24
5	70	20	0.36	24
6	66	24	0.44	24
7	60	30	0.57	24.1
8	61	28	0.53	24.2
9	63	27	0.50	24.2
10	71	19	0.33	24.2
11	56	33	0.66	24.6
12	65	25	0.46	24.7
平均	64	25		
誤差	1	1		
平均(rad)	1.13	0.44		
誤差(rad)	0.02	0.02		

・グリセリン 荷重なし

真鍮#60-60

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	温度(℃)
1	70.8	18.7	0.34	24.9
2	68.6	20.9	0.38	24.8
3	66.8	22.7	0.42	24.6
4	66.4	23.1	0.43	24.8
5	66.4	23.1	0.43	24.9
6	69.0	20.5	0.37	24.9
7	68.2	21.3	0.39	25.1
8	69.0	20.5	0.37	24.9
9	71.8	17.7	0.32	25
10	67.6	21.9	0.40	24.9
平均	68.5	21.1		
誤差	0.6	0.6		
平均(rad)	1.19	0.37		
誤差(rad)	0.01	0.01		

真鍮#600-600

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	温度(℃)
1	89.0	0.5	0.01	24
2	89.0	0.5	0.01	24.9
3	88.8	0.7	0.01	24.6
4	80.8	8.7	0.15	24.2
5	88.8	0.7	0.01	24.4
6	86.8	2.7	0.05	24.2
7	88.8	0.7	0.01	24.4
8	88.4	1.1	0.02	24.6
9	82.0	7.5	0.13	24.6
10	88.8	0.7	0.01	24.6
11	89.0	0.5	0.01	
12	75.6	13.9	0.25	
13	88.8	0.7	0.01	
平均	88.6	0.9		
誤差	0.2	0.2		
平均(rad)	1.547	0.015		
誤差(rad)	0.004	0.004		

アルミ#60-60

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	温度(℃)
1	75.0	14.4	0.26	27.6
2	72.0	17.4	0.31	27.7
3	71.2	18.2	0.33	27.6
4	68.8	20.6	0.38	27.8
5	62.8	26.6	0.50	27.5
6	73.0	16.4	0.29	27.4
7	75.4	14.0	0.25	27.4
8	63.6	25.8	0.48	27.4
9	71.0	18.4	0.33	27.3
10	75.6	13.8	0.25	27.8
11	74.0	15.4	0.28	27.8
12	72.6	16.8	0.30	27.8
平均	72.9	16.6		
誤差	0.7	0.7		
平均(rad)	1.27	0.29		
誤差(rad)	0.01	0.01		

アルミ#600-600

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	温度(℃)
1	88.0	1.5	0.03	26
2	88.6	0.9	0.02	26.6
3	88.6	0.9	0.02	26.3
4	88.6	0.9	0.02	26.3
5	88.2	1.3	0.02	26.3
6	88.4	1.1	0.02	26.1
7	88.0	1.5	0.03	26
8	87.8	1.7	0.03	26
9	88.0	1.5	0.03	26.1
10	86.8	2.7	0.05	26.1
平均	88.1	1.4		
誤差	0.2	0.2		
平均(rad)	1.538	0.024		
誤差(rad)	0.003	0.003		

・サラダ油

真鍮#60-60

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	温度(°C)
1	75.6	13.9	0.25	28.7
2	78.2	11.3	0.20	27.8
3	78.2	11.3	0.20	27.8
4	78.8	10.7	0.19	27.8
5	80.0	9.5	0.17	27.5
6	78.6	10.9	0.19	27.6
7	80.8	8.7	0.15	27.8
8	80.6	8.9	0.16	27.8
9	74.4	15.1	0.27	27.5
10	82.2	7.3	0.13	27.6
11	82.4	7.1	0.12	27.6
12	82.4	7.1	0.12	27.8
平均	80.2	9.3		
誤差	0.5	0.6		
平均(rad)	1.40	0.16		
誤差(rad)	0.01	0.01		

真鍮#600-600

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	温度(°C)
1	61.4	28.1	0.53	24.9
2	67.8	21.7	0.40	24.6
3	61.6	27.9	0.53	24.7
4	70.4	19.1	0.35	24.8
5	71.0	18.5	0.33	24.8
6	68.0	21.5	0.39	24.8
7	68.0	21.5	0.39	24.7
8	68.0	21.5	0.39	24.8
9	63.8	25.7	0.48	24.9
10	71.8	17.7	0.32	25.1
11	67.0	22.5	0.41	25.1
12	69.6	19.9	0.36	25.1
平均	68.5	21.0		
誤差	0.7	0.7		
平均(rad)	1.20	0.37		
誤差(rad)	0.01	0.01		

アルミ#60-60

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	温度(°C)
1	70.4	19.0	0.34	23.7
2	76.0	13.4	0.24	23.5
3	80.0	9.4	0.17	23.3
4	74.8	14.6	0.26	23.5
5	79.2	10.2	0.18	23.5
6	77.0	12.4	0.22	23.3
7	70.2	19.2	0.35	23.3
8	71.4	18.0	0.33	23.5
9	66.0	23.4	0.43	23.5
10	68.8	20.6	0.38	23.6
11	66.0	23.4	0.43	23.7
12	61.0	28.4	0.54	23.7
13	70.4	19.0	0.34	23.9
14	66	23.4	0.43	23.7
15	65.8	23.6	0.44	23.9
平均	67.6	21.8		
誤差	1.0	1.0		
平均(rad)	1.18	0.38		
誤差(rad)	0.02	0.02		

アルミ#600-600

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	温度(°C)
1	67	22	0.41	22.9
2	31	58	1.63	22.6
3	51	38	0.80	22.6
4	50	40	0.83	22.6
5	47	42	0.90	22.6
6	54	36	0.72	22.9
7	47	43	0.93	22.6
8	48	41	0.88	22.6
9	46	44	0.96	22.6
10	53	36	0.74	22.6
11	42	47	1.09	22.5
12	45	45	1.00	22.3
13	47	43	0.93	22.3
平均	48	41		
誤差	1	1		
平均(rad)	0.84	0.72		
誤差(rad)	0.02	0.02		

荷重なし 真鍮#60-60

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	温度(°C)
1	76.6	12.9	0.23	25.6
2	80.2	9.3	0.16	25.8
3	78.8	10.7	0.19	25.6
4	78.4	11.1	0.20	25.5
5	77.0	12.5	0.22	25.5
6	81.4	8.1	0.14	25.3
7	81.2	8.3	0.15	25.5
8	77.4	12.1	0.21	25.5
9	78.0	11.5	0.20	25.5
10	80.8	8.7	0.15	25.3
平均	79.0	10.5		
誤差	0.6	0.6		
平均(rad)	1.38	0.18		
誤差(rad)	0.01	0.01		

荷重なし 真鍮#600-600

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	温度(°C)
1	78.0	11.5	0.20	23.5
2	80.4	9.1	0.16	23.9
3	78.0	11.5	0.20	23.9
4	77.0	12.5	0.22	24.2
5	76.0	13.5	0.24	23.5
6	72.4	17.1	0.31	24.1
7	74.8	14.7	0.26	24.1
8	74.8	14.7	0.26	23.8
9	72.2	17.3	0.31	24.1
10	71.6	17.9	0.32	24.2
11	77.8	11.7	0.21	23.7
12	77.8	11.7	0.21	24.2
13	77.4	12.1	0.21	24.2
平均	75.5	14.0		
誤差	0.9	0.9		
平均(rad)	1.32	0.24		
誤差(rad)	0.02	0.02		

荷重なし アルミ#60-60

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	温度(°C)
1	76.0	13.4	0.24	23.9
2	72.8	16.6	0.30	24.2
3	60.0	29.4	0.56	24.2
4	71.0	18.4	0.33	24
5	74.4	15.0	0.27	24.2
6	72.0	17.4	0.31	24.4
7	73.0	16.4	0.29	24.2
8	70.4	19.0	0.34	24.2
9	75.6	13.8	0.25	24.2
10	73.2	16.2	0.29	24.2
11	74.2	15.2	0.27	24.2
平均	73.3	16.2		
誤差	0.6	0.6		
平均(rad)	1.28	0.28		
誤差(rad)	0.01	0.01		

荷重なし アルミ#600-600

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数	温度(°C)
1	51.8	37.7	0.77	23.9
2	54.6	34.9	0.70	23.7
3	59.8	29.7	0.57	23.8
4	55.0	34.5	0.69	23.6
5	56.6	32.9	0.65	23.7
6	57.0	32.5	0.64	23.7
7	57.8	31.7	0.62	24
8	60.8	28.7	0.55	23.8
9	48.6	40.9	0.87	24
10	49.8	39.7	0.83	23.8
11	39.2	50.3	1.20	23.8
12	47.8	41.7	0.89	24
13	55.8	33.7	0.67	24.6
14	59.6	29.9	0.57	
平均	56.9	32.6		
誤差	0.9	0.9		
平均(rad)	0.99	0.57		
誤差(rad)	0.02	0.02		

・ MoS₂ グリース

紙

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	62.0	27.9	0.53
2	59.8	30.1	0.58
3	51.8	38.1	0.78
4	60.8	29.1	0.56
5	65.2	24.7	0.46
6	67.8	22.1	0.41
7	70.2	19.7	0.36
8	70.4	19.5	0.35
9	66.8	23.1	0.43
10	70.0	19.9	0.36
11	70.0	19.9	0.36
12	70.8	19.1	0.35
13	70.8	19.1	0.35
14	70.6	19.3	0.35
平均	69.3	20.6	
誤差	0.6	0.6	
平均(rad)	1.21	0.36	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#60-60

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	70.0	19.5	0.35
2	71.2	18.3	0.33
3	70.4	19.1	0.35
4	72.2	17.3	0.31
5	73.8	15.7	0.28
6	72.0	17.5	0.32
7	72.2	17.3	0.31
8	70.0	19.5	0.35
9	64.0	25.5	0.48
10	67.0	13.7	0.24
11	75.8	18.1	0.33
平均	71.5	17.6	
誤差	0.8	0.8	
平均(rad)	1.25	0.31	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#600-600

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	68.8	20.7	0.38
2	75.8	13.7	0.24
3	80.0	9.5	0.17
4	80.0	9.5	0.17
5	76.8	12.7	0.23
6	81.0	8.5	0.15
7	75.0	14.5	0.26
8	78.0	11.5	0.20
9	78.8	10.7	0.19
10	74.2	15.3	0.27
平均	76.8	12.7	
誤差	0.8	0.8	
平均(rad)	1.34	0.22	
誤差(rad)	0.01	0.01	

・ 6B 鉛筆

紙

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	77.0	12.9	0.23
2	75.8	14.1	0.25
3	76.4	13.5	0.24
4	76.0	13.9	0.25
5	76.8	13.1	0.23
6	76.8	13.1	0.23
7	71.8	18.1	0.33
8	75.0	14.9	0.27
9	76.6	13.3	0.24
10	77.2	12.7	0.23
平均	75.9	14.0	
誤差	0.5	0.5	
平均(rad)	1.325	0.243	
誤差(rad)	0.009	0.009	

真鍮#60-60

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)
1	78.2	11.3
2	80.0	9.5
3	81.0	8.5
4	81.8	7.7
5	80.4	9.1
6	82.0	7.5
7	80.8	8.7
8	81.8	7.7
9	79.2	10.3
10	77.0	12.5
平均	80.2	9.3
誤差	0.5	0.5
平均(rad)	1.400	0.162
誤差(rad)	0.009	0.009

真鍮#600-600

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	68.6	20.9	0.38
2	68.0	21.5	0.39
3	70.6	18.9	0.34
4	73.6	15.9	0.28
5	70.0	19.5	0.35
6	68.8	20.7	0.38
7	72.2	17.3	0.31
8	70.6	18.9	0.34
9	69.4	20.1	0.37
10	75.0	14.5	0.26
平均	70.9	18.6	
誤差	0.7	0.7	
平均(rad)	1.24	0.32	
誤差(rad)	0.01	0.01	

・ チョーク(蛍光ピンク)

紙

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	56.8	33.1	0.65
2	53.0	36.9	0.75
3	57.4	32.5	0.64
4	53.4	36.5	0.74
5	52.6	37.3	0.76
6	52.4	37.5	0.77
7	49.4	40.5	0.85
8	51.4	38.5	0.80
9	52.4	37.5	0.77
10	51.4	38.5	0.80
平均	53.0	36.9	
誤差	0.8	0.8	
平均(rad)	0.93	0.64	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#60-60

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	67.8	21.7	0.40
2	64.6	24.9	0.46
3	57.8	31.7	0.62
4	61.8	27.7	0.53
5	59.4	30.1	0.58
6	59.8	29.7	0.57
7	57.0	32.5	0.64
8	55.0	34.5	0.69
9	59.0	30.5	0.59
10	59.0	30.5	0.59
11	57.4	32.1	0.63
平均	59.1	30.4	
誤差	0.8	0.9	
平均(rad)	1.03	0.53	
誤差(rad)	0.01	0.01	

真鍮#600-600

回数	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	60.4	29.1	0.56
2	58.8	30.7	0.59
3	61.0	28.5	0.54
4	63.8	25.7	0.48
5	59.6	29.9	0.58
6	61.8	27.7	0.53
7	65.8	23.7	0.44
8	63.0	26.5	0.50
9	58.4	31.1	0.60
10	61.8	27.7	0.53
平均	61.4	28.1	
誤差	0.8	0.8	
平均(rad)	1.07	0.49	
誤差(rad)	0.01	0.01	

・ 荷重依存性

47.3g アルミ#60-60

回数(回)	終点角度 θ_t (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	55.6	33.8	0.67
2	58.8	30.6	0.59
3	56.4	33.0	0.65
4	59.6	29.8	0.57
5	57.6	31.8	0.62
6	57.8	31.6	0.62
7	58.4	31.0	0.60
8	59.0	30.4	0.59
9	58.0	31.4	0.61
10	59.6	29.8	0.57
平均	58.1	31.4	
誤差	0.4	0.4	
平均(rad)	1.014	0.547	
誤差(rad)	0.007	0.007	

97.3g アルミ#60-60

回数(回)	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	72.2	17.2	0.31
2	71.8	17.6	0.32
3	73.4	16.0	0.29
4	72.4	17.0	0.31
5	74.2	15.2	0.27
6	75.6	13.8	0.25
7	75.4	14.0	0.25
8	76.8	12.6	0.22
9	77.0	12.4	0.22
10	77.0	12.4	0.22
平均	74.6	14.9	
誤差	0.7	0.7	
平均(rad)	1.30	0.26	
誤差(rad)	0.01	0.01	

197.4g アルミ#60-60

回数(回)	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	70.2	19.2	0.35
2	73.0	16.4	0.29
3	73.8	15.6	0.28
4	72.6	16.8	0.30
5	76.4	13.0	0.23
6	77.0	12.4	0.22
7	77.2	12.2	0.22
8	77.6	11.8	0.21
9	78.0	11.4	0.20
10	78.0	11.4	0.20
11	77.8	11.6	0.21
12	78.8	10.6	0.19
13	79.0	10.4	0.18
14	79.0	10.4	0.18
平均	77.9	11.6	
誤差	0.3	0.3	
平均(rad)	1.359	0.202	
誤差(rad)	0.005	0.005	

297.3g アルミ#60-60

回数(回)	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	68.4	21.0	0.38
2	71.4	18.0	0.33
3	69.0	20.4	0.37
4	73.0	16.4	0.29
5	72.2	17.2	0.31
6	72.8	16.6	0.30
7	74.2	15.2	0.27
8	73.2	16.2	0.29
9	75.4	14.0	0.25
10	75.2	14.2	0.25
11	74.8	14.6	0.26
平均	73.1	16.3	
誤差	0.6	0.6	
平均(rad)	1.28	0.28	
誤差(rad)	0.01	0.01	

397.5g アルミ#60-60

回数(回)	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	65.2	24.2	0.45
2	69.2	20.2	0.37
3	68.4	21.0	0.38
4	68.4	21.0	0.38
5	72.6	16.8	0.30
6	66.8	22.6	0.42
7	71.6	17.8	0.32
8	75.0	14.4	0.26
9	76.0	13.4	0.24
10	71.6	17.8	0.32
11	68.0	21.4	0.39
12	69.6	19.8	0.36
13	73.0	16.4	0.29
14	74.4	15.0	0.27
平均	70.2	19.2	
誤差	0.8	0.8	
平均(rad)	1.23	0.34	
誤差(rad)	0.01	0.01	

497.3g アルミ#60-60

回数(回)	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	66.2	23.2	0.43
2	63.2	26.2	0.49
3	65.8	23.6	0.44
4	67.0	22.4	0.41
5	64.4	25.0	0.47
6	63.4	26.0	0.49
7	66.6	22.8	0.42
8	64.8	24.6	0.46
9	66.2	23.2	0.43
10	64.0	25.4	0.48
平均	65.2	24.3	
誤差	0.4	0.4	
平均(rad)	1.137	0.424	
誤差(rad)	0.008	0.008	

47.3g アルミ#320-320

回数(回)	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	54.6	34.9	0.70
2	58.8	30.7	0.59
3	59.0	30.5	0.59
4	56.0	33.5	0.66
5	61.4	28.1	0.53
6	57.8	31.7	0.62
7	61.6	27.9	0.53
8	60.0	29.5	0.57
9	61.2	28.3	0.54
10	62.2	27.3	0.52
平均	59.3	30.3	
誤差	0.8	0.8	
平均(rad)	1.03	0.53	
誤差(rad)	0.01	0.01	

97.3g アルミ#320-320

回数(回)	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	63.8	25.7	0.48
2	62.8	26.7	0.50
3	63.8	25.7	0.48
4	70.2	19.3	0.35
5	69.0	20.5	0.37
6	72.4	17.1	0.31
7	74.0	15.5	0.28
8	72.2	17.3	0.31
9	75.6	13.9	0.25
10	75.0	14.5	0.26
11	75.4	14.1	0.25
12	72.4	17.1	0.31
13	74.8	14.7	0.26
平均	73.1	16.4	
誤差	0.7	0.7	
平均(rad)	1.28	0.29	
誤差(rad)	0.01	0.01	

297.3g アルミ#320-320

回数(回)	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	67.2	22.3	0.41
2	61.6	27.9	0.53
3	63.8	25.7	0.48
4	67.8	21.7	0.40
5	64.8	24.7	0.46
6	63.0	26.5	0.50
7	69.0	20.5	0.37
8	68.2	21.3	0.39
9	65.6	23.9	0.44
10	64.4	25.1	0.47
11	67.0	22.5	0.41
12	71.2	18.3	0.33
平均	66.8	22.7	
誤差	0.8	0.8	
平均(rad)	1.17	0.40	
誤差(rad)	0.01	0.01	

197.4g アルミ#320-320

回数(回)	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	63.4	26.1	0.49
2	65.8	23.7	0.44
3	64.6	24.9	0.46
4	61.8	27.7	0.53
5	67.2	22.3	0.41
6	66.0	23.5	0.44
7	65.4	24.1	0.45
8	65.6	23.9	0.44
9	66.8	22.7	0.42
10	69.0	20.5	0.37
11	69.4	20.1	0.37
12	69.8	19.7	0.36
平均	67.0	22.6	
誤差	0.6	0.6	
平均(rad)	1.17	0.39	
誤差(rad)	0.01	0.01	

397.5g アルミ#320-320

回数(回)	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	63.2	26.3	0.49
2	66.4	23.1	0.43
3	66.4	23.1	0.43
4	67.0	22.5	0.41
5	68.8	20.7	0.38
6	68.2	21.3	0.39
7	67.8	21.7	0.40
8	67.8	21.7	0.40
9	71.8	17.7	0.32
10	69.2	20.3	0.37
11	68.8	20.7	0.38
平均	68.2	21.3	
誤差	0.5	0.5	
平均(rad)	1.191	0.372	
誤差(rad)	0.009	0.009	

497.3g アルミ#320-320

回数(回)	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	61.0	28.5	0.54
2	65.4	24.1	0.45
3	60.4	29.1	0.56
4	64.0	25.5	0.48
5	62.8	26.7	0.50
6	61.2	28.3	0.54
7	63.8	25.7	0.48
8	66.6	22.9	0.42
9	64.4	25.1	0.47
10	64.8	24.7	0.46
平均	63.7	25.8	
誤差	0.6	0.6	
平均(rad)	1.11	0.45	
誤差(rad)	0.01	0.01	

247.1g アルミ#320-320

回数(回)	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	63.4	26.1	0.49
2	64.0	25.5	0.48
3	67.8	21.7	0.40
4	67.8	21.7	0.40
5	70.2	19.3	0.35
6	68.0	21.5	0.39
7	67.4	22.1	0.41
8	67.4	22.1	0.41
9	67.4	22.1	0.41
10	70.2	19.3	0.35
平均	67.4	24.5	
誤差	0.7	0.7	
平均(rad)	1.18	0.43	
誤差(rad)	0.01	0.01	

・特定の研磨方向(真鍮#60-60)

垂直－垂直

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	68.8	20.7	0.38
2	75.0	14.5	0.26
3	79.2	10.3	0.18
4	80.0	9.5	0.17
5	78.6	10.9	0.19
6	80.0	9.5	0.17
7	80.6	8.9	0.16
8	80.2	9.3	0.16
9	79.8	9.7	0.17
10	79.2	10.3	0.18
11	78.8	10.7	0.19
12	75.4	14.1	0.25
13	78.2	11.3	0.20
平均	79.5	10.1	
誤差	0.2	0.3	
平均(rad)	1.387	0.175	
誤差(rad)	0.004	0.004	

垂直－平行

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	72.2	17.3	0.31
2	76.4	13.1	0.23
3	77.4	12.1	0.21
4	77.8	11.7	0.21
5	76.8	12.7	0.23
6	76.0	13.5	0.24
7	79.4	10.1	0.18
8	79.2	10.3	0.18
9	79.2	10.3	0.18
10	80.6	8.9	0.16
11	78.2	11.3	0.20
平均	78.1	11.4	
誤差	0.5	0.5	
平均(rad)	1.363	0.199	
誤差(rad)	0.008	0.008	

平行－垂直

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	73.6	15.9	0.29
2	74.0	15.5	0.28
3	76.8	12.7	0.23
4	78.2	11.3	0.20
5	78.2	11.3	0.20
6	78.0	11.5	0.20
7	79.8	9.7	0.17
8	79.2	10.3	0.18
9	80.0	9.5	0.17
10	80.4	9.1	0.16
平均	77.8	11.7	
誤差	0.8	0.8	
平均(rad)	1.36	0.20	
誤差(rad)	0.01	0.01	

平行－平行

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	71.4	18.1	0.33
2	79.0	10.5	0.19
3	79.8	9.7	0.17
4	80.0	9.5	0.17
5	78.2	11.3	0.20
6	80.2	9.3	0.16
7	79.6	9.9	0.17
8	81.4	8.1	0.14
9	81.2	8.3	0.15
10	80.0	9.5	0.17
11	80.4	9.1	0.16
平均	80.0	9.5	
誤差	0.3	0.3	
平均(rad)	1.396	0.166	
誤差(rad)	0.005	0.005	

・動摩擦係数の測定(真鍮#60-60)

・未塗布

回数	終点角度 θ_s (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	81	9	0.16
2	68	22	0.41
3	77	12	0.22
4	78	12	0.20
5	78	12	0.20
6	68	22	0.40
7	72	18	0.32
8	67	23	0.43
9	72	18	0.32
10	71	19	0.34
11	71	18	0.33
平均	72	17	
誤差	1	1	
平均(rad)	1.26	0.30	
誤差(rad)	0.02	0.02	

回数	移動時間(s)	動摩擦係数
1	0.7	0.10
2	1.4	0.39
3	0.8	0.17
4	3.3	0.20
5	1.9	0.20
6	1.0	0.37
7	2.5	0.31
8	1.0	0.40
9	0.8	0.27
10	0.8	0.29
11	0.9	0.30
平均	1.4	0.29
誤差	0.3	0.03

・MoS₂ グリース

回数	終点角度 θ (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	73	16.7	0.30
2	79.8	9.9	0.17
3	79.6	10.1	0.18
4	78.6	11.1	0.20
5	75.6	14.1	0.25
6	68.2	21.5	0.39
7	73.8	15.9	0.28
8	73.8	15.9	0.28
9	72.2	17.5	0.32
10	74.6	15.1	0.27
11	72	17.7	0.32
12	75	14.7	0.26
13	72	17.7	0.32
14	73	16.7	0.30
15	66.8	22.9	0.42
16	72.8	16.9	0.30
平均	72.7	17.0	
誤差	0.6	0.6	
平均(rad)	1.27	0.30	
誤差(rad)	0.01	0.01	

回数	移動時間(s)	動摩擦係数
1	0.4	0.220
2	2.1	0.279
3	2.0	0.277
4	2.1	0.309
5	1.5	0.257
6	0.4	0.220
7	2.1	0.279
8	2.0	0.277
9	2.1	0.309
10	1.5	0.257
11	2.2	0.313
12	1.7	0.253
13	2.3	0.314
14	2.0	0.293
15	1.2	0.401
16	1.8	0.295
平均	1.8	0.281
誤差	0.1	0.008

・グリセリン

回数	終点角度 θ (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	75.0	14.7	0.26
2	72.2	17.5	0.32
3	68.4	21.3	0.39
4	72.4	17.3	0.31
5	71.2	18.5	0.33
6	73.0	16.7	0.30
7	73.0	16.7	0.30
8	72.8	16.9	0.30
9	74.6	15.1	0.27
10	75.6	14.1	0.25
平均	72.8	16.9	
誤差	0.7	0.7	
平均(rad)	1.27	0.29	
誤差(rad)	0.01	0.01	

回数	移動時間(s)	動摩擦係数
1	2.8	0.26
2	1.7	0.31
3	0.9	0.36
4	1.5	0.30
5	1.2	0.32
6	1.6	0.29
7	4.8	0.30
8	4.7	0.30
9	3.4	0.27
10	4.1	0.25
平均	2.7	0.29
誤差	0.5	0.01

・キャノーラ油

回数	終点角度 θ (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	70.0	19.7	0.36
2	71.6	18.1	0.33
3	76.8	12.9	0.23
4	77.6	12.1	0.21
5	75.6	14.1	0.25
6	76.6	13.1	0.23
7	78.0	11.7	0.21
8	79.0	10.7	0.19
9	78.0	11.7	0.21
10	78.2	11.5	0.20
平均	76.1	13.6	
標準偏差	3.0	3.0	
標準誤差	0.9	0.9	

回数	移動時間(s)	動摩擦係数
1	0.8	0.31
2	0.7	0.26
3	1.9	0.22
4	1.6	0.20
5	0.9	0.22
6	1.1	0.21
7	1.2	0.19
8	1.6	0.18
9	1.9	0.20
10	2.3	0.20
平均	1.4	0.22
誤差	0.2	0.01

・純水

回数	終点角度 θ (度)	摩擦角 θ_s (度)	静止摩擦係数
1	78.8	10.9	0.19
2	78.4	11.3	0.20
3	78.4	13.3	0.24
4	78.0	11.7	0.21
5	77.8	11.9	0.21
6	77.0	12.7	0.23
7	76.4	13.3	0.24
8	77.4	12.3	0.22
9	77.0	12.7	0.23
10	74.0	15.7	0.28
平均	77.1	12.6	
標準偏差	1.4	1.4	
標準誤差	0.4	0.4	

回数	移動時間(s)	動摩擦係数
1	1.00	0.165
2	0.87	0.163
3	0.97	0.207
4	1.00	0.179
5	0.90	0.176
6	0.77	0.178
7	0.80	0.193
8	1.07	0.194
9	1.07	0.201
10	0.70	0.223
平均	0.92	0.188
誤差	0.04	0.006