

夕脚における静止摩擦係数の測定

第1チャレンジ番号：1544007
(※1)

(※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：植木 みさと

学校名又は
卒業校名：山口県立高森高等学校 学 年：1

学校のある
都道府県名：山口県 実験をした場所：家

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：	学校名・学年：
_____	_____
_____	_____
_____	_____

実験課題に取り組んだ感想を書いてください。

摩擦の計測は、測定箇所、向き、加工方法などによるばらつきが大きく、考察することが難しかったが、こうではないかと考えることがとても楽しかった。

今回の実験では25脚で実験を行ったが極限まで脚の面積を小さく、極限まで脚を増やしていき、どういった現象が起こるのか、ミクロの世界で同様の実験を行ってみたい。

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

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

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

目次

1. 実験の目的

2. 実験手法

2.1 滑走体の制作

2.1.1 滑走体1

- ・使用材料
- ・制作方法
- ・構造と特徴

2.1.2 滑走体2

- ・使用材料
- ・制作方法
- ・構造と特徴

2.2 実験装置の制作

2.2.1 傾斜法

- ・原理
- ・使用材料
- ・制作方法
- ・特徴

2.2.2 水平法

- ・原理
- ・使用材料
- ・制作方法
- ・特徴

2.2.3 加速度センサを用いた計測法

- ・原理
- ・使用材料
- ・制作方法
- ・特徴

2.3 予備実験1

2.3.1 実験方法

2.3.2 実験条件

2.3.3 結果

2.3.4 考察

3. 実験1

3.1 概要

3.2 実験条件

3.3 実験方法

3.3 結果

3.4 考察

4. 予備実験2

4.1 概要

4.2 実験条件

4.3 実験方法

4.4 結果

4.5 考察

5. 実験2

5.1 概要

5.2 実験条件

5.3 実験方法

5.4 実験結果

5.5 考察

6. 実験3

6.1 概要

6.2 実験条件

6.3 実験方法

6.4 実験結果

6.5 考察

7. 結論

8. 参考文献

1. 実験の目的

摩擦は、私たちの日常に欠かせない物理現象であり、私たちの生活を支えている。身の回りのあらゆる物が他の物と接しているが、この接し方は様々である。例えばコマの一脚、人間の二脚、洗濯物干しやカメラの三脚、いすや机の四脚、板の平面などが挙げられる。これらの間にどのような関係が成り立っているのか、三脚、四脚、さらにそこから脚の数を定量的に増やして実験を行い、接触面積や接触形状を変化させて調べる。実験に使う材料は、三脚、机やこれらの滑り止めなどに使われているアルミニウム、木、ポリプロピレン、塩化ビニル、ゴムを用いた。摩擦静電気の影響を小さくするために、帯電列で並びが近いもので実験を行った。実験1では、同一の材質のみで面積を増加させて実験を行う。実験2、3では、脚の材質が異なる場合について実験を行う。予備実験1では、2種類の測定装置から実験で使用する装置の選定を行う。予備実験2では、実験2、3で用いる脚の組み合わせを決定する。今回の実験レポートでは、動摩擦係数と静止摩擦係数のうち静止摩擦係数のみについて考える。

また、実験を行うにあたって、変化させたい面積率や面積形状以外の原因による系統誤差を小さくするための実験装置の開発を行うことも目的とする。

2. 実験手法

2.1 滑走体の制作

脚の面積を定量的に変化させて実験を行うに当たって、実験値のばらつきをなるべく小さくするために気を付けなければならないことは、

- 何度でも自由に接触面の形を変えられる
- いろんな種類の材質で実験が行える
- すべての脚が接触し、接触面に対して垂直である
- 実験を行っている最中に変形せず、すべての脚に加わる力が同じである

の四つである。上記を満たすように滑走体の制作を行った。基本的な構造を以下の図2-1(a)に示す。脚の本数は5×5の計25とし、100mm×100mmの正方形、格子の間隔は20mmとする。そして、組み替えられやすいように裏面から見て右上から番号を付ける。脚を取り付ける際は、対応した番号の脚を取り付ける。この時、必ず脚に記した番号が滑走方向を向くようにする。また、枠のふちに滑走方向の番号を記す。例えば、滑走方向1の場合1が進行方向を向くようにする。さらに、実験方法などで面積形状を示す際には、図2-1の(b)のように示す。

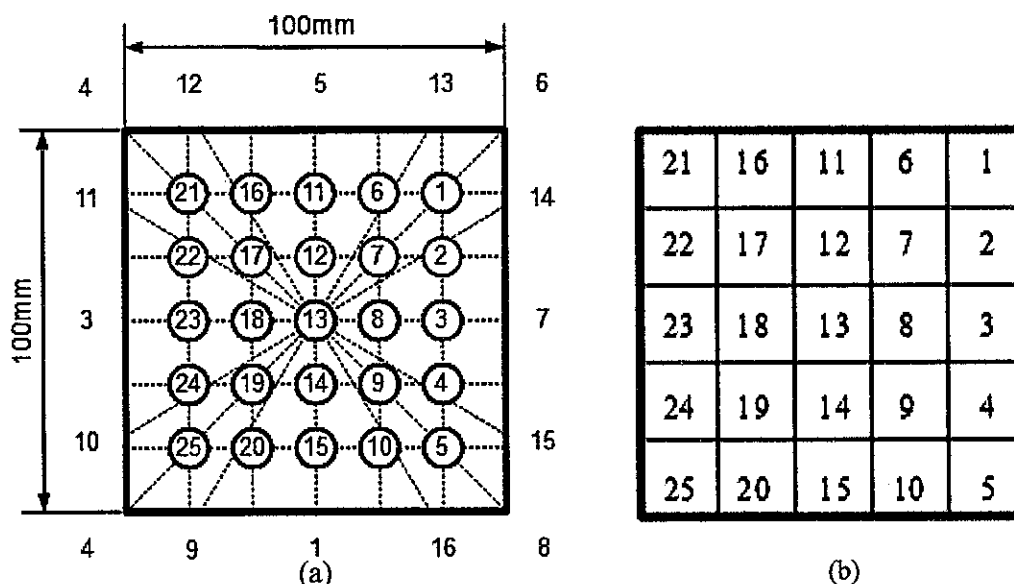


図2-1 裏面から見た場合の脚と滑走方向番号

様々な材料と方法で滑走体の制作を行った。スチレンボード、プラスチック板、木材、アクリル板に垂直に穴あけ可能なドリルスタンドを用いて穴をあけ制作したが、アクリル板と木材は下降中に割れ、スチレンボードにはうまく穴をあけることができなかった。プラスチック板では、穴あけ加工はできたが、穴の直径が大きくなり脚が垂直に固定しにくいなどの条件を満たさなかったので実験には使用できなかった。今回の実験では最終的に二つの異なる滑走体を制作した。以下にそれぞれの構造、使用材料、制作方法、特徴を示す。

2. 1. 1 滑走体1

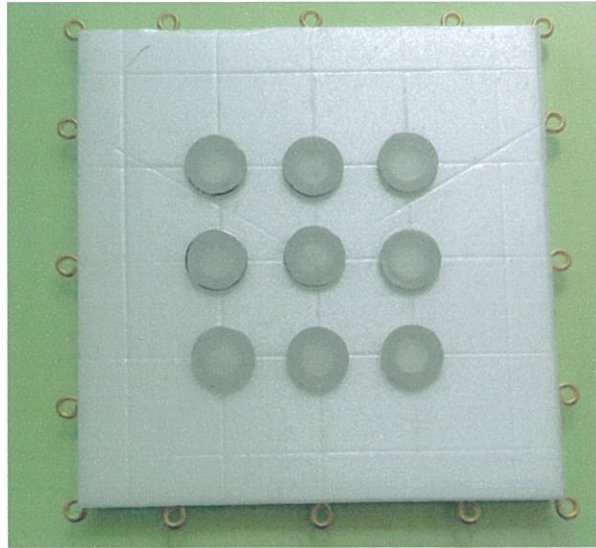


図2-2 滑走体1

○使用材料

- ・糊付きスチレンボード(100mm×100mm×7mm)
- ・真鍮製フック(11mm)
- ・M6アルミ平ワッシャー
- ・両面テープ

○制作方法

- ① 糊付きスチレンボードをカッターで1辺100mmの長方形に切る。
- ② 中心から20mmの間隔で補助線を引く。
- ③ 30°の間隔で中心から補助線を引く。
- ④ ワッシャーの裏側に印をつけて取り外して再度つけたときに同じ方向を向くようにする。(実験中に方向によって摩擦係数が異なることが判明したため)
- ⑤ 30°と45°の間隔で糊付き面から高さ3mmの場所に、ねじ付フックをつける。この時フックが中心と直線で結ばれていること。

○構造と特徴

直径8mmのアルミワッシャーの中心を20mmの間隔でならべ、5×5の25個の脚で実験を行う。脚の面積を変えるときは、ワッシャーをはがし別の場所に貼りつける。滑走体2では実験できない三脚などの形も容易にできる。ワッシャーに両面テープで材料を貼り付けけることで様々な材料の摩擦係数を測定することが可能である。制作が簡単で重心が低く軽いため実験がスムーズに進むが、スチレンボードが本当に平面であるかどうかわからない。そのため、すべての脚に荷重が分散しているか分からないという欠点がある。

2. 1. 2 滑走体2

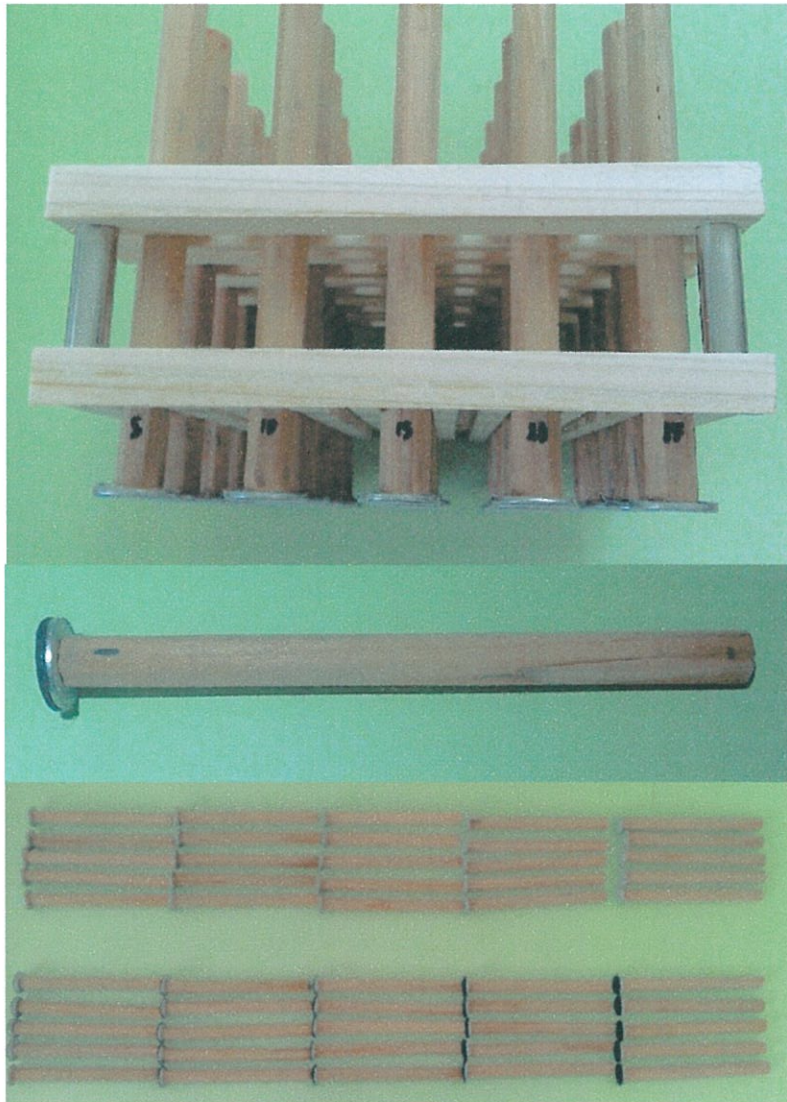


図2-3 滑走体2

○使用材料

- ・バルサ材 (2mm×8mm×900mm)
- ・角材 (8mm)
- ・スペーサー (5mm×20mm)
- ・ねじ (M3×35mm)
- ・M6アルミ平ワッシャー
- ・両面テープ

○制作方法

- ① 紙に縦7mm、横8mmの隙間が中心との距離20mmとなるように線を引く。
- ② 幅8mmのバルサ材をカッターで4mmにする。
- ③ ①の紙の上にバルサ材を置きセロハンテープで仮止めする。組む時は、カッターの切断面が六角柱との接触面にならないように気を付ける。
- ④ 角材をはめ、自作の垂直ジグを用いて垂直であることを確認しながら、次段のバルサ材をグルーガンで止める。3段目まで同様にする。
- ⑤ 4段目はグルーガンを使わず、角は両面テープ、他はセロハンテープで仮止めする。これが、図3の上段と下段となる。
- ⑥ 6段目まで④に従い図2-3のように組み立てる。
- ⑦ ねじを通すための3mmの穴を電動ドリルであける。
- ⑧ ⑤での両面テープをはがし、ねじとスペーサーで図3のように組み立てる。
- ⑨ 次に脚をつくる。アルミワッシャーの両面か片面に両面テープを貼り、片方は角材に垂直になるように取り付ける。もう片方には、何もつけないか摩擦を測定する材質を貼りつける。一つの材質に対して同じものを25個作成する。
- ⑩ 滑走体の四隅の下に1mmまたは2mmのスペーサーを置いた状態で上から角柱を押して脚の高さを揃える。

○構造と特徴

角材の先端にワッシャーを取り付け、これを7mm×7mmの枠にはめ込み固定することで様々な底面を作る。脚の長さの変更、異なる厚さの材質同士での実験、物体との接触確認などが可能となる。欠点としては、一本ずつ垂直であることを確認しながら調整していくため、制作に時間がかかること。三脚などの形にはできないこと。また、滑走体①に比べ重たいことが挙げられる。

2.2 実験装置の制作

2.2.1 傾斜法

最も有名な静止摩擦係数の求め方で、簡易的な測定方法である。

○原理

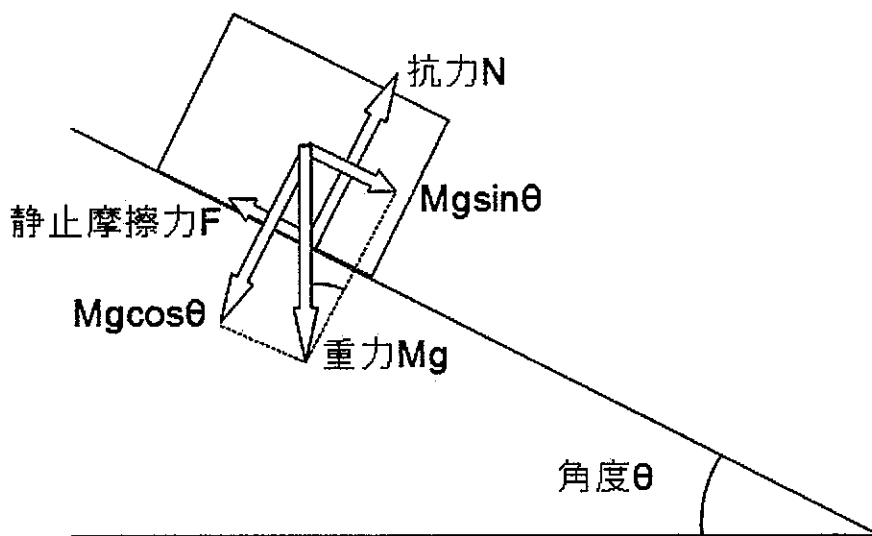


図2-4 傾斜法原理図

○滑走体が滑りだす瞬間の静止摩擦

滑走体に加わる重力の斜辺方向の力が静止摩擦力 F の限度の大きさである最大摩擦力 F_{\max} 以上に大きくすると物体は滑り始める。滑りだす直前は斜辺方向の力は釣り合っているため、滑走体の質量を $M(g)$ 、重力加速度を $g \text{ m/s}^2$ 、角度を θ° とすると、

$$Mg \sin \theta = F_{\max} \quad \dots (2-1)$$

となる。また、斜辺に垂直方向も釣り合っているため、

$$N = Mg \cos \theta \quad \dots (2-2)$$

となる。ここで、 F_{\max} は垂直抗力 N に対してほぼ比例し、その比例定数を μ とすると、(2-1) (2-2) 式より、静止摩擦係数 μ は、

$$Mg \sin \theta = \mu Mg \cos \theta \quad \dots (2-3)$$

$$\mu = \tan \theta \quad \dots (2-4)$$

これにより、斜面と板の角度を求めることにより静止摩擦係数を求めることができる。

○使用材料

- ・シナベニア(5.5mm×210mm×160mm)
- ・真鍮蝶番
- ・分度器
- ・円柱(円形であれば何でもよい)

○制作方法

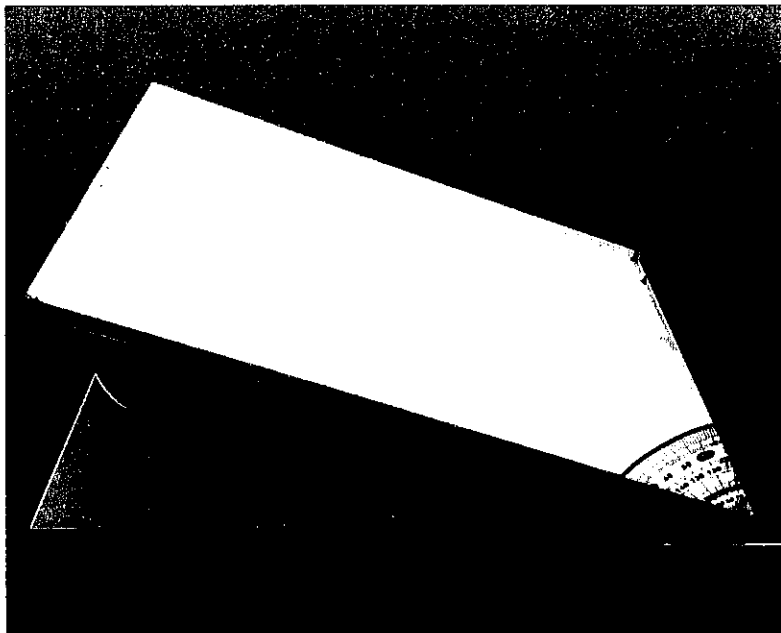


図2-5 傾斜法実験装置

- ① 二枚のシナベニア板が平行になるようにグルーガンで真鍮蝶番を仮止めする。
- ② 釘を8か所に打ち込み固定し、さらに真鍮の周りをグルーガンで補強する。
- ③ 二つの板の回転軸が中心となるように注意しながら分度器をセットする。この時分度器が板に対して水平であるようにする。
- ④ 円柱を二つの板の間に挟む。
- ⑤ 実験によって様々な材質の板を上部のシナベニアに貼る。

○特徴

円形のを二つの板の間に挟みこれを動かすことにより、板を直接動かす時よりも微細な動きを可能とし、摩擦に大きな変化を与える振動を少なくすることができた。また、任意の場所に固定できるため、角度を瞬時に読まなくて済む。傾けるため、滑走体が倒れたり、後方の脚が浮いたりする現象が起こりやすく、測定条件が限られる。

2.2.2 水平法

カップに水を徐々に注ぎ、物体に加わる力を動いた瞬間の水の重さから求める方法である。張力の求め方には、ばねばかりやロードセルを使うのが普通なのだろうが、どちらも非常に高価であるため、今回はこの方法で実験を行うことにする。

○原理

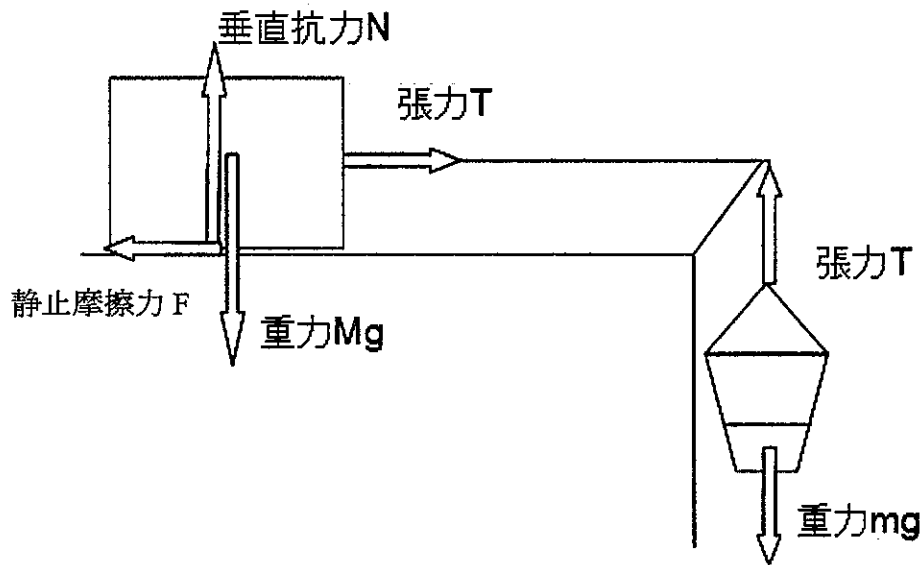


図2-6 水平法原理図

動いた瞬間のカップと滑走体の力の釣合の式は、滑走体の質量を $M(g)$ 、カップを含めた水の質量を $m(g)$ 、重力加速度を gm/s^2 とするとそれぞれ、

・滑走体について

$$N=Mg \quad \dots (2-5)$$

$$T=\mu N \quad \dots (2-6)$$

・カップについて

$$T=mg \quad \dots (2-7)$$

となり、この三つの式より

$$\mu = \frac{m}{M} \quad \dots (2-8)$$

で表すことができる。

○使用材料

- ・糸
- ・フック
- ・針金
- ・注射器
- ・シナベニア(5.5mm×210mm×160mm)
- ・プラスチックカップ
- ・電子ばかり(DRETEC ks-309)

○制作方法

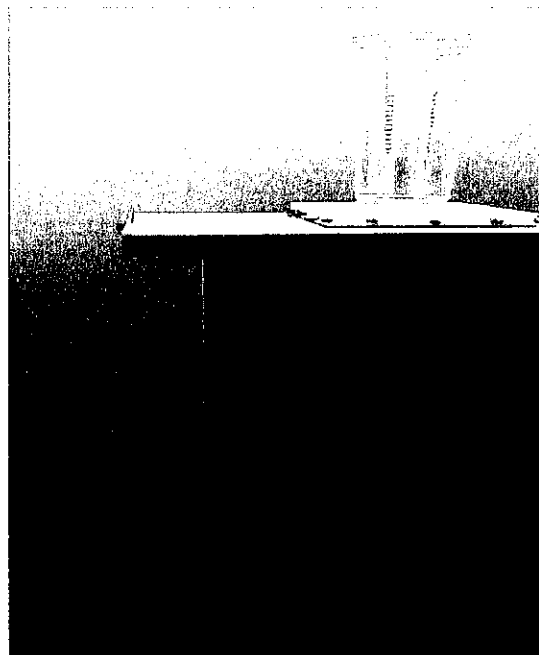


図2-7 水平法実験装置

- ① プラスチックカップの胸部に二か所ほど穴をあけ糸を通しテープで固定する
- ② 適当な長さの糸の両端にフックを取り付ける
- ③ シナベニアにドリルで1mmの穴をあけ、ガイド付けた針金を差し込み固定する。

○特徴

最大摩擦力と釣り合う力を水の質量から求める。水を注射器でカップに注入し、はかりで測定する。平面であるため滑走体に加わる荷重を変更可能である。欠点としては、針金と糸の間にも摩擦が働き大きな値が出る。(300回程度使用しても糸の摩擦係数はほぼ変化していなかった) また、電子ばかりが家庭用であるため1gまでしか読み取れず正確な値が出なかった。さらに、水をカップに注入する際、カップが振動と回転するため測定に大きな影響を与えられられる。

2. 2. 3 加速度センサを用いた計測法

加速度センサを利用することで、動いたかどうか、角度、速度を測定することができる。今回の実験では、趣味で使っていた LilyPad Arduino という衣服につけて楽しむ手芸用マイコン加速度センサを用いた。人間の干渉を極力なくすことで、場合に起こりうる測定時の過失誤差や個人誤差を少なくしようとした。

○原理

加速度は、センサの出力電圧から電源電圧の半分を引いた値を感度 mV/g で割ると求めることができる。ここで、感度と電圧の関係を直線近似より求める。ある2点 ($3.6\text{V}, 360\text{mV/g}$) と ($2.0\text{V}, 195\text{mV/g}$) をとると、

$$Y=103.43X-11.25 \quad \dots (2-9)$$

となる。ここで、 Y :感度 (mV/g)、 X :電源電圧 (V)とする。次に、逆正接関数(アークタンジェント)を使い、右図2-8のような上で求めた加速度を角度に変換する。ここでは、各軸の傾きを得ることができる $\text{atan2}()$ を用いる。

$$\theta = \text{atan}(g_x, g_y) \quad \dots (2-10)$$

で表される。

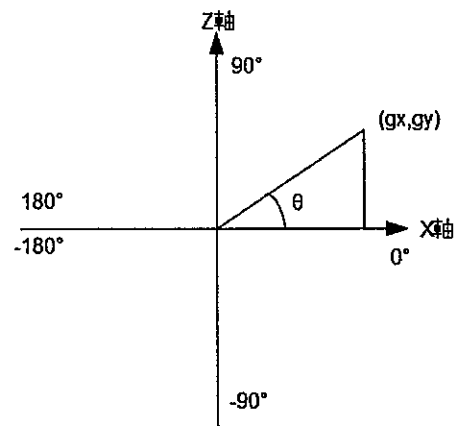


図2-8 極座標

○使用材料

- ・SSCI-010320 (FTDI USB シリアル変換アダプター3.3V)
- ・SFE-DEV-09266 (Lily Pad Arduino 328)
- ・SFE-DEV-09267 (Lily Pad 加速度センサ)
- ・Micro USB ケーブル
- ・パソコン
- ・配線コード

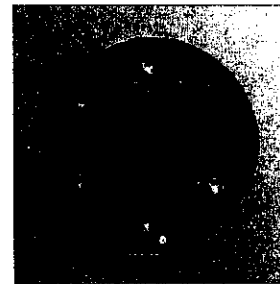


図2-9 加速度センサ

○制作方法

- ①加速度センサと Lily Pad Arduino を配線でつなぎ、USB ケーブルでパソコンにつなぐ。配線の仕方は、Lily Pad Arduino の端子 $a_0, a_1, a_2, +, -$ と加速度センサの $x, y, z, +, -$ をつなぐ。
- ②傾斜法の実験装置の上面に加速度センサを水平に取り付ける。この時、加速度センサの x の矢印が滑走方向と逆を向くようにする。そして、邪魔にならないように Lily Pad Arduino を傾斜面に取り付ける。取り付け図を図2-10に示す。
- ③次に Arduino IDE でスケッチ(プログラム)を作成する。完成したスケッチを図2-10に示す。
- ④実際の電源電圧をテスターで測定する。この値を VCC とする。 $VCC=3.38\text{V}$ となった。

④軸ごとに角度が 0° の時にセンサ出力が0になるように補正する。今回は、+0.06、+0.04、-0.02と
なった。

⑤角度が 0° の時に重力加速度となるように補正をかける。-0.01、-0.006、-0.014とした。

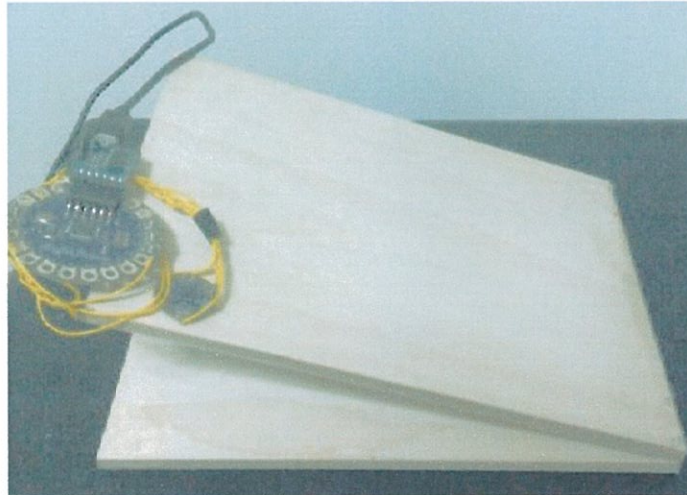


図2-10 取り付け概略図

```
a5 | Arduino 1.6.0
ファイル 編集 スケッチ ツール ヘルプ
a5
float VCC=3.38, VD=3.42;
void setup() {
  Serial.begin(9600);}
void loop() {
  float x=analogRead(0)*VCC/1024;
  float y=analogRead(1)*VCC/1024;
  float z=analogRead(2)*VCC/1024;
  float vx=x-VD/2.0+0.06;
  float vy=y-VD/2.0+0.04;
  float vz=z-VD/2.0-0.02;
  float gx=vx/((103.43*VD-11.25)/1000)-0.01;
  float gy=vy/((103.43*VD-11.25)/1000)-0.006;
  float gz=vz/((103.43*VD-11.25)/1000)-0.014;
  float kakuzx=atan2(gx, gz)*360/2.0/PI-0.05;
  float kakuzy=atan2(gy, gz)*360/2.0/PI;
  float kakuxy=atan2(gx, gy)*360/2.0/PI;
  Serial.println(kakuzx);

  delay(300);
}
```

図2-11 完成スケッチ

○特徴

実際に作成したスケッチを Lily Pad に書き込んで実行をすると、下図2-12のようになった。これは、静止中に測定したものであるが、常に一定の値を示しておらず、測定結果が不安定である。さらに、測定を繰り返すうちに、小数点以下の値が数パターンしかなく、正確な値を示しているようには考えられない。これらのことから、今回の実験では加速度センサを用いた角度計測は行わず、目測で測定することにする。

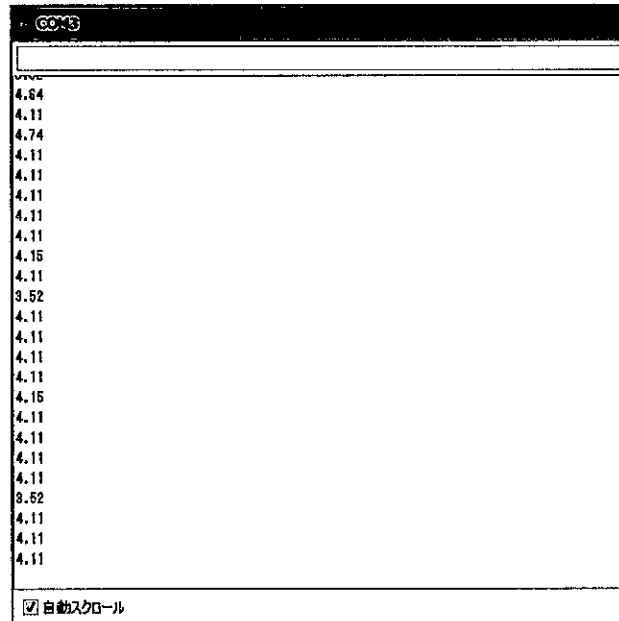


図2-12 実行結果

2.3 予備実験1

この予備実験では二つの測定方法を比較検討し、本実験で用いる測定方法を決定する。

3.3.1 実験方法

・実験装置1 傾斜方

- 1) 滑走体を傾斜面上に置く。このとき滑走方向1が進行方向を向くようにする。
- 2) プーリーを回転させながら傾斜面に角度をつけていき、滑走体が滑った角度を読み取る。20回測定を行う。このとき、傾斜面が振動しないように慎重に行う。

・実験装置2 水平方

- 1) 滑走体の質量をはかりで測定する。
- 2) 滑走体を水平面上に置く。このとき滑走体の1が進行方向を向くようにする。
- 3) 図のように器具をセットし、カップに注射器で水を注ぐ滑走体が滑り始めた時点で水を止め、カップの質量をはかりで測定する。これを20回繰り返す。このとき水の注入による振動の影響を避けるために少量ずつ注ぐ。

3.3.2 実験条件

- ・気温 21℃
- ・床面 シナベニア
- ・脚 ポリプロピレン
- ・滑走体質量 40.0g

3.3.4 結果

装置1, 2の滑り始めたときの角度と質量の測定結果と、それぞれ(4)式、(8)式を用いて計算した静止摩擦係数とその平均をそれぞれ表1, 2にまとめた。

表2-1 傾斜方による摩擦係数の測定結果

回数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
測定値(°)	18.9	20.4	21.1	21.1	21	20.3	20.1	21.4	19.4	20.6	
静止摩擦係数 μ	0.342	0.372	0.386	0.386	0.384	0.370	0.366	0.392	0.352	0.376	
回数	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	平均
測定値(°)	19.5	20	20.3	20.6	20.1	20	20.3	20.3	19.8	19.4	20.2
静止摩擦係数 μ	0.354	0.364	0.370	0.376	0.366	0.364	0.370	0.370	0.360	0.352	0.369

表2-2 水平方による摩擦係数の測定結果

回数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
測定値(g)	30.0	27.0	23.5	24.5	27.5	24.5	27.5	25.0	26.0	25.0	
静止摩擦係数 μ	0.750	0.675	0.588	0.613	0.688	0.613	0.688	0.625	0.650	0.625	
回数	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	平均
測定値(g)	22.0	24.0	24.5	23.0	23.0	22.5	25.0	21.0	23.0	22.5	24.6
静止摩擦係数 μ	0.550	0.600	0.613	0.575	0.575	0.563	0.625	0.525	0.575	0.563	0.614

次にそれぞれの実験結果が正規分布であるとして標準偏差を求める。標準偏差は測定値のばらつき具合を示し以下の式であらわされる。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} \quad \dots (9)$$

ここで、標準偏差 σ 、平均値との差である残差 v 、試行回数 n とする。この式を用いて、それぞれ標準偏差を計算すると、傾斜法は0.0127、水平法では0.0550となった。以下に、測定結果と一次の近似直線のグラフを示す。

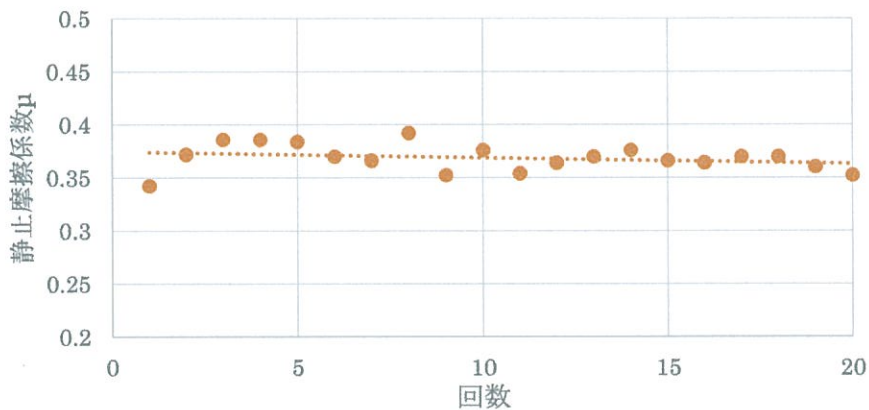


図2-13 傾斜法の測定結果グラフ

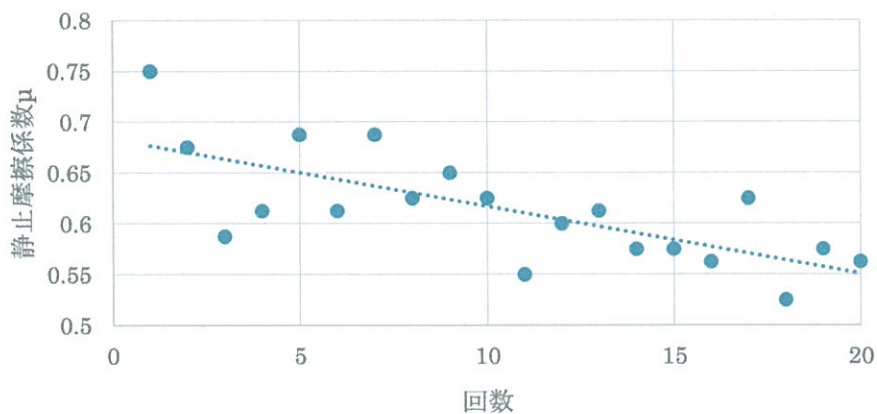


図2-14 水平法の測定結果グラフ

3.3.5 考察

標準偏差は傾斜法と水平法で、それぞれ0.0127と0.0550となり、傾斜法の方が測定値のばらつきが小さくなった。これは、水平法で張力 T を求める際に水を使ったため、注入の際に回転と振動が発生する場合があります、このためだと考えられる。また、家庭用のはかりには、誤差が約±1gあるためとも考えられる。また、水平法は減少傾向にあるが原因が判明していない。水平法も傾斜法も、摩擦面には同じ材質を用いているため、摩擦が原因で水平法だけ減少するとは考えにくい。そして、針金と糸の間の摩擦係数の減少かと考え予備実験を行ったが、300回使用後の摩擦係数と大きな変化は見られなかった。水平法では、一回の測定に傾斜法の3倍以上の時間がかかるため周囲の環境の影響を受けやすく、誤差が生じやすいと考えられる。これらのことより、水平法は正確な原因も分からず非常に不安定であるため、本実験では傾斜法を用いる。

また、今回の静止摩擦係数を測定する実験において、滑走体を測定装置に置いてすぐに測定を行った時よりも、一定時間放置した場合の方が大きくなるように感じられた。これは、測定物質同士が貼りついたためだと考えられる。このことから、本実験を行う際に滑走体を置いてからすぐに実験を行う。

3. 実験1

3. 1 概要

脚の形状面積を変更し、アモントンクーロンの法則について考える。また、三脚の場合は3つの脚を結ぶと正三角形となるような形状で実験を行う。この形状については、同じ形状でも2種類で実験を行い、辺の長さの違いについても検討する。三脚での実験も行うため、滑走体1を用いて実験を行う。

3. 2 実験条件

- ・気温 20℃
- ・傾斜法
- ・滑走体1
- ・脚(ポリプロピレン)
- ・床(シナベニア)

3. 3 実験方法

- ① ポリプロピレンシートを貼ったアルミワッシャーを3脚から始め、25脚まで様々な形で実験を行う。実験を行う形は、次ページの図3-1に記す。形状8は、脚を使わずにポリプロピレンを滑走体に直接貼り付ける。
- ② ワッシャーを貼りかえるときに、常に同じ方向を向くようにするため、印をつけ、その印が1の方向を向くようにする。
- ③ シナベニア板に脚をセットした滑走体を置き、円柱を回転させながら、ゆっくり振動が起きないように板の角度を増やす。
- ④ 滑走体が滑った時点での角度を読み取り4回繰り返す。
- ⑤ 三脚、9,10,11,13は8方向で滑らせ、他は4方向で行う。

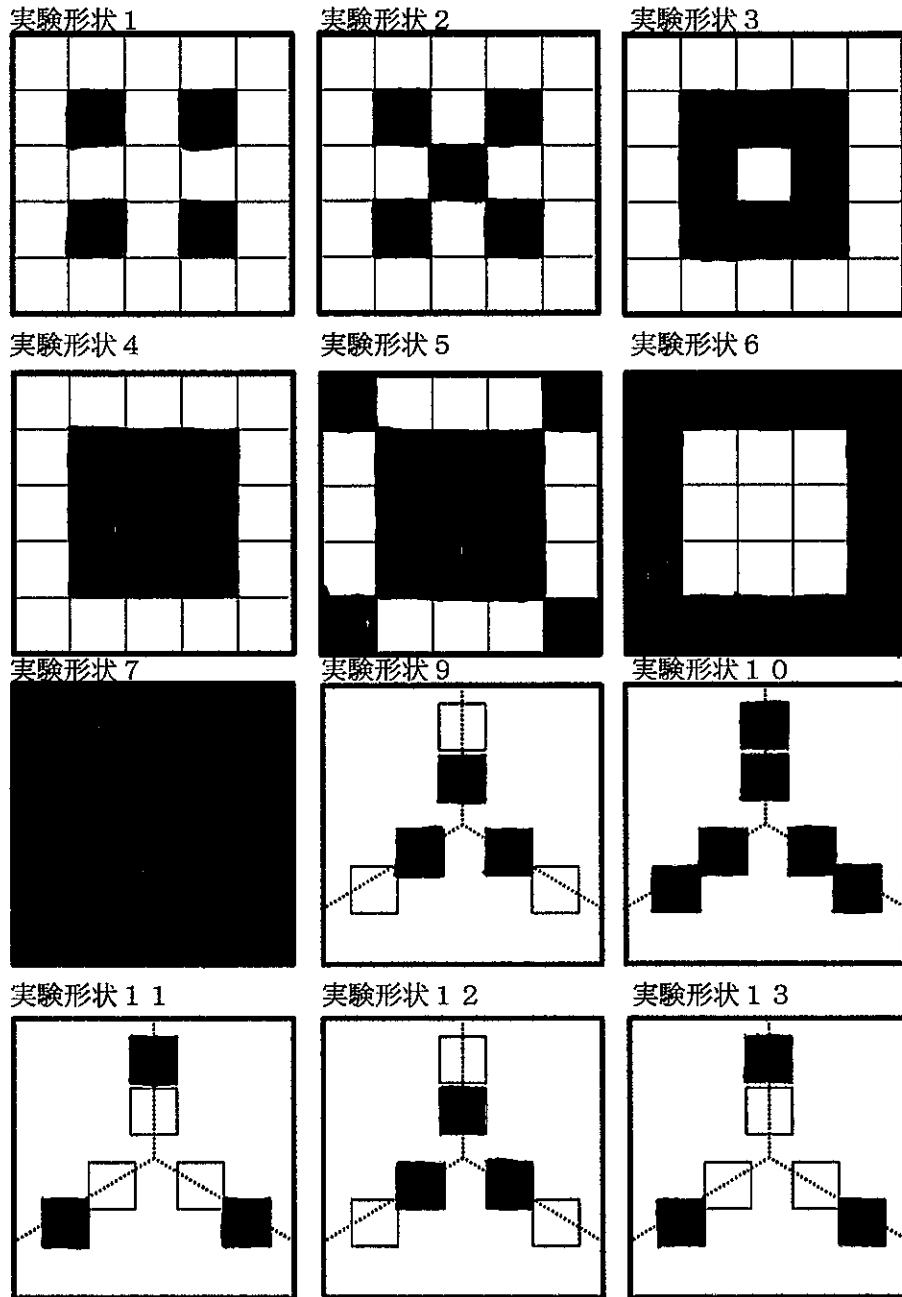


図 3 - 1 実験形状

3. 3 実験結果

実験結果を以下の表 3-1 に、計算結果である静止摩擦係数 μ を表 3-2 にまとめる。

表 3-1 形状ごとの実験結果

実験形状1	脚の数	4	接触面積	532(mm ²)
	傾斜角(°)			
回目	方向1	方向3	方向5	方向7
1	19.6	18.8	22.6	18.7
2	18.2	18.4	20.9	17.1
3	18.2	17.6	20.8	16.5
4	18.5	17.6	19.6	17.1
平均	18.6	18.1	21.0	17.4

実験形状2	脚の数	5	接触面積	665(mm ²)
	傾斜角(°)			
回目	方向1(°)	方向3(°)	方向5(°)	方向7(°)
1	20.6	21.6	22.1	21.4
2	19.1	20.4	21.6	20.8
3	21.3	21.7	21.1	21.8
4	20.2	20.1	21.3	20.8
平均	20.3	21.0	21.5	21.2

実験形状3	脚の数	8	接触面積	1064(mm ²)
	傾斜角(°)			
回目	方向1	方向3	方向5	方向7
1	22.3	19.6	20.7	19.5
2	22.3	19.8	21.5	19.0
3	22.3	19.1	20.7	19.6
4	23.4	19.1	20.7	19.6
平均	22.6	19.4	20.9	19.4

実験形状4	脚の数	9	接触面積	1197(mm ²)
	傾斜角(°)			
回目	方向1	方向3	方向5	方向7
1	22.6	19.3	19.3	20.2
2	20.1	19.1	19.1	19.5
3	20.5	18.5	20.2	20.4
4	20.9	19.5	20.4	20.2
平均	21.0	19.1	19.8	20.1

実験形状5	脚の数	13	接触面積	1729(mm ²)
	傾斜角(°)			
回目	方向1	方向3	方向5	方向7
1	20.7	18.9	21.8	18.9
2	20.7	20.7	20.7	20.7
3	20.2	19.5	18.4	18.4
4	20.7	18.9	20.2	19.5
平均	20.6	19.5	20.3	19.4

実験形状6	脚の数	16	接触面積	2128(mm ²)
	傾斜角(°)			
回目	方向1	方向3	方向5	方向7
1	20.9	23.6	21.5	22.0
2	21.0	24.0	21.0	21.8
3	21.0	23.9	20.7	22.0
4	21.8	23.1	20.2	21.3
平均	21.2	23.7	20.9	21.8

実験形状7	脚の数	25	接触面積	3325(mm ²)
	傾斜角(°)			
回目	方向1	方向3	方向5	方向7
1	21.5	22.6	22.6	21.3
2	21.5	22.0	20.7	20.7
3	21.5	23.3	20.7	21.3
4	21.3	22.3	21.5	20.7
平均	21.5	22.6	21.4	21.0

実験形状8	脚の数	0	接触面積	10000(mm ²)
	傾斜角(°)			
回目	方向1	方向3	方向5	方向7
1	26.2	25.9	23.7	26.6
2	25.9	24.8	23.2	27.6
3	26.0	24.9	23.3	28.1
4	26.3	25.6	23.0	27.7
平均	26.1	25.3	23.3	27.5

実験形状9	脚の数	3	接触面積	532(mm ²)			
	傾斜角(°)						
回目	方向1	方向3	方向5	方向7	方向10	方向11	方向14
1	22.2	20.8	22.8	21.3	21.0	21.5	21.3
2	20.9	21.4	20.1	21.8	21.1	20.8	10.9
3	20.1	21.1	21.2	21.1	20.8	20.1	19.4
4	21.0	21.9	21.7	21.3	20.7	19.3	19.3
平均	21.1	21.3	21.5	21.4	20.9	20.4	17.7

実験形状10	脚の数	6	接触面積	532(mm ²)			
	傾斜角(°)						
回目	方向1	方向3	方向5	方向7	方向10	方向11	方向14
1	23.2	20.2	23.0	23.1	23.0	22.6	21.8
2	22.9	21.5	21.2	22.0	22.9	22.7	22.8
3	21.9	20.8	22.1	22.2	22.1	21.1	22.0
4	22.3	20.8	23.0	23.0	22.8	21.7	22.1
平均	22.6	20.8	22.3	22.6	22.7	22.0	22.2

実験形状11	脚の数	3	接触面積	532(mm ²)			
	傾斜角(°)						
回目	方向1	方向3	方向5	方向7	方向10	方向11	方向14
1	20.9	21.0	24.6	21.1	20.0	20.0	21.1
2	20.8	19.0	21.4	19.9	21.0	21.0	19.8
3	22.0	20.8	21.0	20.7	20.4	20.4	21.0
4	22.0	20.8	20.8	21.4	21.0	21.0	20.8
平均	21.4	20.4	22.0	20.8	20.6	20.6	20.7

実験形状12	脚の数	3	接触面積	532(mm ²)			
	傾斜角(°)						
回目	方向1	方向3	方向5	方向7	方向10	方向11	方向14
1	22.6	18.0	22.6	21.1	21.1	20.1	20.2
2	19.8	18.3	22.5	20.8	20.8	20.0	20.9
3	19.2	19.0	21.1	19.6	19.1	19.1	19.9
4	18.8	18.0	21.0	18.9	20.3	19.0	19.5
平均	20.1	18.3	21.8	20.1	20.3	19.6	20.1

実験形状13	脚の数	3	接触面積	532(mm ²)			
	傾斜角(°)						
回目	方向1	方向3	方向5	方向7	方向10	方向11	方向14
1	24.2	20.8	22.9	20.9	22.0	20.4	20.9
2	23.0	21.0	23.0	22.0	20.7	20.8	20.4
3	23.0	21.8	22.1	21.6	21.9	19.6	19.9
4	22.6	21.0	22.8	21.0	21.4	20.2	20.0
平均	23.2	21.2	22.7	21.4	21.5	20.3	20.3

表3-2 形状ごとの静止摩擦係数

実験形状	静止摩擦係数 μ			
	方向1	方向3	方向5	方向7
1	0.337	0.327	0.383	0.312
2	0.370	0.383	0.394	0.388
3	0.416	0.352	0.382	0.353
4	0.384	0.346	0.359	0.365
5	0.375	0.354	0.369	0.352
6	0.387	0.438	0.381	0.399
7	0.393	0.415	0.391	0.384
8	0.490	0.473	0.431	0.521

実験形状	静止摩擦係数 μ						
	方向1	方向3	方向5	方向7	方向10	方向11	方向14
9	0.385	0.390	0.393	0.391	0.382	0.372	0.320
10	0.416	0.380	0.411	0.416	0.418	0.405	0.408
11	0.392	0.372	0.403	0.379	0.376	0.376	0.377
12	0.366	0.331	0.400	0.366	0.370	0.355	0.366
13	0.429	0.387	0.418	0.391	0.394	0.369	0.370

3. 4 考察

今回の実験では、まず3つの脚を結んだ形状が正三角形となるような3脚および6脚において考える。実験形状9～13における方向ごとの静止摩擦係数を以下の図3-2に示す

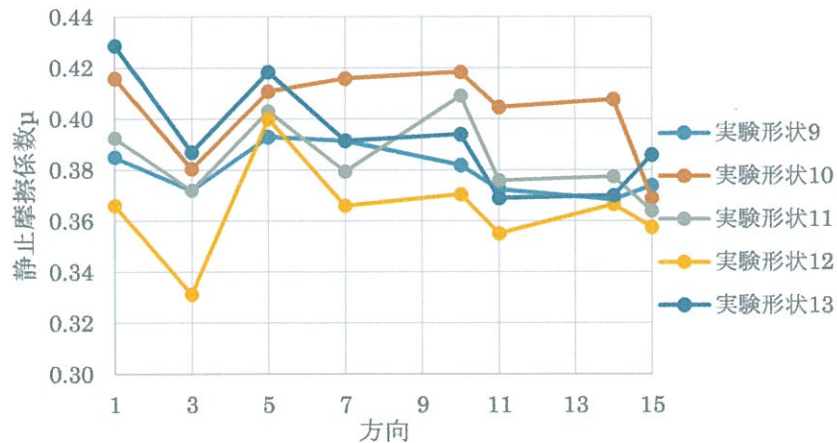


図3-2 3脚及び6脚における方向ごとの静止摩擦係数

全体的にみると、4脚以降の時と同様に面積の大きい6脚の方が大きな静止摩擦係数となった。また、方向3や7の時に摩擦係数が減少傾向にあるように感じられる。これは、滑走方向から見ると右側に1脚、左側に2脚となり、配分に偏りが発生するためだと考えられる。このことに関しては、本実験3にて詳しく検討する。また、同じ脚を使用して、中心からの距離を2倍にした実験形状13と14、11と15では、似たようなグラフとなった。そして、どちらの場合も中心から距離が離れた方が大きいようである。

次に、四脚以降において滑らせる方向によって影響があるかについての検討を行う。実験形状が1から7番までの測定結果を滑走方向ごとに示すと、下図のようになった。

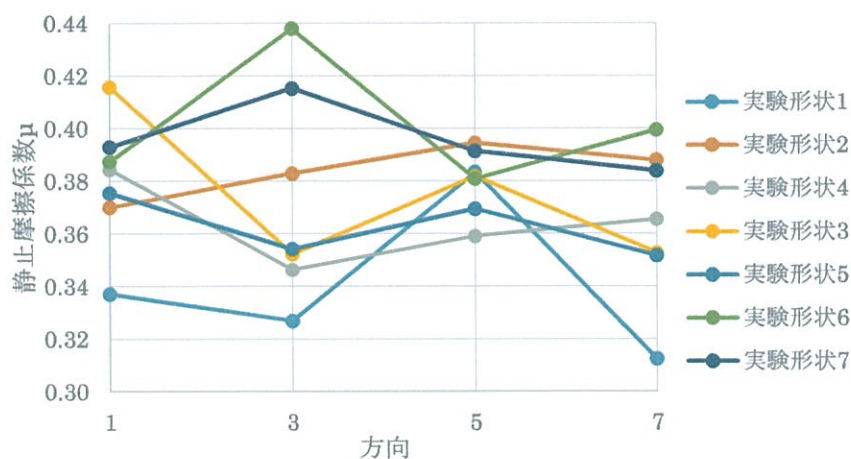


図3-3 方向ごとの静止摩擦係数

実験前の予想では、形状が対象であることから方向によっては変化しないと考えていた。実際には方向によって大きく異なった。滑走体そのものの特性であることを考慮して、追加実験を行った。脚同士の相対的な方向は変化させず、同じ形状のまま足の位置を変化させる実験の結果は向きを変化させる前と変化せず、滑走体の影響によるものではなかった。このことから静止摩擦係数は、同じ材質でも方向によって異なり、この組み合わせにより大きく変化しているものだと考えられる。

次に、面積ごとの変化量について比べる。横軸を面積、縦軸を静止摩擦係数とする。図3-4にはすべての方向のプロットを行い、図3-5は平均のみのグラフとする。

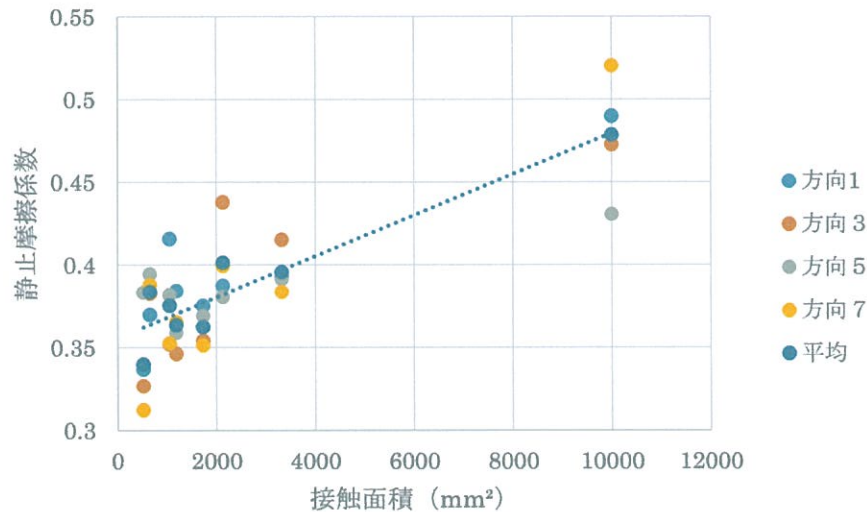


図3-4 静止摩擦係数と接触面積の関係

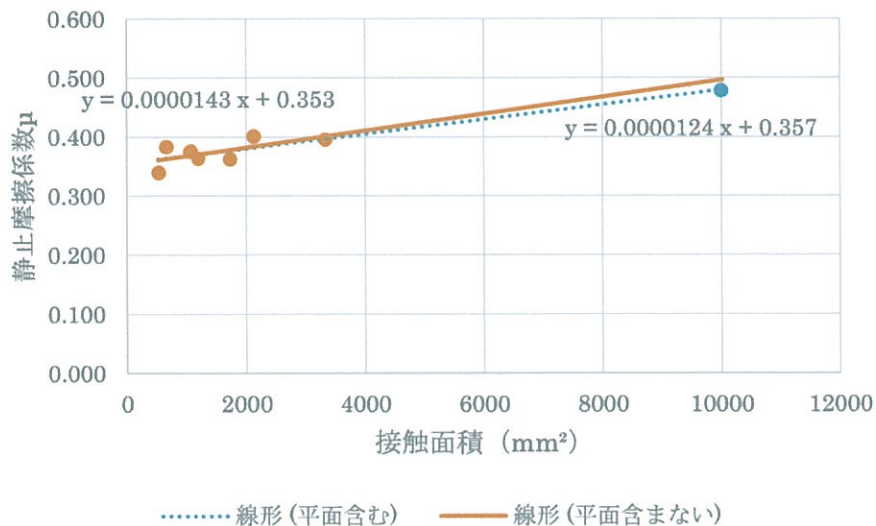


図3-5 静止摩擦係数と接触面積の関係 (平均のみ)

アモントンクーロンの法則では摩擦係数は、見かけ上の接触面積によらず一定であるとされている。しかし、実験結果はポリプロピレンと木の間の静止摩擦係数は面積の増加に伴って増加しており、一定であると言うことはできない。脚を使い求めた静止摩擦係数のみで近似直線（オレンジ実線）を引くと $y = 0.0000143x + 0.353$ で表せ、 10000mm^2 の時の値は 0.496 となる。面積が 10000mm^2 の時に平面で測定した静止摩擦係数の値 0.478 と比べると、相対誤差は 3.67% となる。これより、明らかに比例関係となっており、アモントンクーロンの法則や凝着説による面積には関係しないという説明が成り立っていない。このような実験結果になった原因として理由が2つ考えられる。

一つ目は、脚の境界での引っ掛かりによる静止摩擦係数の増加である。



図 3 - 6

上図 3 - 6 のように実際には、木材と脚ともに変形を起こしており、接触面による摩擦力とは関係のない抵抗が発生すると考えられる。

これにより進行方向に対する境界が増加するほど、摩擦係数も増加すると考えられる。

二つ目は、傾斜法によるものだと考えられる。2-2 実験装置の制作で行った計算を、A 点 B 点の2脚のみで地面に接する物体の場合について考える。図 3 - 7 を以下に示す。

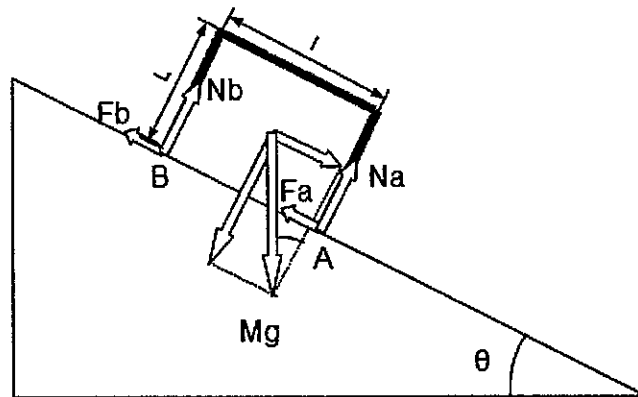


図 3 - 7

$$\text{斜辺方向の力の釣り合い} \quad -mg\cos\theta + N_a + N_b = 0 \quad \dots(3-1)$$

$$\text{斜辺垂直方向の力の釣り合い} \quad F_a + F_b - mg\sin\theta = 0 \quad \dots(3-2)$$

$$\text{A 点回りのモーメントの釣り合い} \quad -\left(\frac{1}{2}l\cos\theta - \frac{1}{2}L\sin\theta\right)mg + lN_b = 0 \quad \dots(3-3)$$

$$N_b = \frac{1}{2}\left(\cos\theta - \frac{L}{l}\sin\theta\right)mg \quad \dots(3-4)$$

(3-1)、(3-4) 式より

$$N_a = mg\cos\theta - N_b = \frac{1}{2}\left(\cos\theta + \frac{L}{l}\sin\theta\right)mg$$

摩擦力は荷重に比例しているとする、A,B 点での摩擦力は、

$$F_a = \mu N_a = \frac{1}{2}\mu\left(\cos\theta + \frac{L}{l}\sin\theta\right)mg$$

$$F_b = \mu N_b = \frac{1}{2}\mu\left(\cos\theta - \frac{L}{l}\sin\theta\right)mg$$

滑り出す瞬間の最大摩擦力は、滑走体にかかる斜辺方向の重力と釣り合うため、

$$F_a + F_b = mgsin\theta \quad \dots (3-5)$$

となる。ここで、A、B 点の摩擦係数が同じであれば、A,B 点で荷重が異なっても、

$$\mu mg\cos\theta = mgsin\theta$$

$$\mu = \tan\theta$$

とすることができ、前述のように同じ材質でも μ がわずかに異なるため、 F_a, F_b の $\sin\theta$ 成分が消えず計測に影響を及ぼしたものだと考えられる。さらに、傾斜法を使うことにより前方の脚に大きな荷重がかかり前方の脚で分散された荷重により比例関係になったと考えられる。

今回の実験 1 では、脚の形状を決める際に形状面積を定量的に変化させておらず、同形状によって静止摩擦係数の特徴があるかどうか判断できなかった。このことについては、二種類の異なる静止摩擦係数を持つ材質を用いて実験を行う本実験②を再実験として扱い、確認を行う。

4. 予備実験 2

4. 1 概要

二種類の異なる静止摩擦係数の材質を使う本実験 2、本実験 3 を行う前に、使う脚と床の材質の選定を行う。材料の候補は、身近にある三脚や四脚に使われている素材で、加工のしやすいものを用いる。候補として、木、アルミ、ポリプロピレン、塩化ビニル、滑り止めが挙げられる。条件としては、二つの脚の静止摩擦係数の差が多きいことと、ばらつきが小さく測定値がなるべく安定していることである。また、はじめに脚の長さを 20mm で行ったところ、ゴム脚で測定する際に転倒や、後脚の浮きが見られた。これらは、重心が高いためだと考えられる。このため、予備実験 2、実験 2、実験 3 では脚の長さを 10mm で実験を行う。

4. 2 実験条件

- ・傾斜法
- ・滑走体 2
- ・温度 19℃
- ・脚の長さ 10mm
- ・脚 (ゴム、アルミ、ポリプロピレン)
- ・床 (木、アルミ、ポリプロピレン、塩化ビニル)

4. 3 実験方法

- ① 滑走体②にゴム付きの脚を四隅に取り付け、実験 1 と同様に測定を行う。
- ② 上記の脚と床のすべての組み合わせで実験を行う。

4. 4 結果

実験結果を以下の表にまとめる

表 4-1 アルミ脚と床の静止摩擦係数

床の材料	傾斜角(°)					静止摩擦係数
	1回目	2回目	3回目	4回目	平均	
木	26.1	27.9	27.1	27.6	27.2	0.513
アルミ	25.0	28.9	25.0	29.0	27.0	0.509
PP	16.0	15.1	16.1	16.0	15.8	0.283
塩ビ	15.8	16.2	17.4	17.0	16.6	0.298

表 4-2 ポリプロピレン脚と床の静止摩擦係数

床の材料	傾斜角(°)					静止摩擦係数
	1回目	2回目	3回目	4回目	平均	
木	16.4	16.0	16.3	16.8	16.4	0.294
アルミ	19.4	20.0	20.9	18.5	19.7	0.358
PP	19.9	20.0	19.2	18.9	19.5	0.354
塩ビ	15.0	16.3	18.8	17.1	16.8	0.302

表 4-3 ゴム脚と床の静止摩擦係数

床の材料	傾斜角(°)					静止摩擦係数
	1回目	2回目	3回目	4回目	平均	
木	43.9	42.9	40.0	39.7	41.6	0.889
アルミ	54.0	54.1	54.1	54.2	54.1	1.38
PP	52.0	49.2	54.4	53.9	52.4	1.30
塩ビ	54.0	51.1	54.2	54.1	53.4	1.34

この結果から同じ床に対する脚素材の静止摩擦係数の差の絶対値を取り、下の表にまとめる。

表 4-4 床素材に対する脚素材の静止摩擦係数の差

床	脚		
	アルミ、PP	ゴム、アルミ	ゴム、PP
木	0.220	0.375	0.595
アルミ	0.151	0.872	1.023
PP	0.071	1.014	0.943
塩ビ	0.004	1.046	1.042

4. 5 考察

予備実験 2 の結果から注目すべき点が 3 つ挙げられる。一つ目は、塩化ビニルを床素材に用いると測定値のばらつきが大きくなり不安定になる点である。これは、不導体同士または不導体と導体をこすり合わせると、摩擦電気が発生しプラスに帯電する物質とマイナスに帯電する物質に分かれる。これにより引き合うものと考えられる。

表 4-5 帯電列

ア	ア	人	ガ	ウ	ナ	レ	鉛	絹	木	麻	木	人	ア	ア	紙	鉄	銅	ニ	ゴ	ポ	ポ	ア	ポ	ポ	塩
ス	ス	毛	ラ	イ	イ				綿		材	の	セル					ッ	ム	リ	リ	ク	リ	リ	化
ベ	ベ	・	ス	ル	ロ	ヨ					皮	テ	ミ				ケ		プ	エ	リ	ウ	エ	ビ	
ス	ス	毛		ン	ン						膚	ニ					ル		ロ	ス	ル	レ	テ	ニ	
ト	ト	皮										ト	ウ						ピ	テ		タ	レ	ル	
												ム								レ	ル		ン	ン	
+																				ン				-	

ここで、帯電列は、上記のように表され、左側がプラスに帯電しやすく右側がマイナスに帯電しやすい。離れれば離れるほど強く帯電すると考えられる。静電気の影響を無視するため、同じ素材かあまり離れてない素材を用いる。実験結果で静止摩擦係数の差が一番大きかったのは、床の塩ビに対してゴム：アルミとゴム：PP の比 1.04 であるが、帯電列上で離れており、ばらつきが大きいため使用しない。二つ目は、アルミ同士では 25° ~ 29° となり、とても不安定な結果となった点である。これは、動摩擦係数が静止摩擦係数より大きいとされているため、正確に計測できなかつたと考えられる。三つ目は、ゴム脚を用いて木の床で測定後にゴムの接触面にて白い付着物が見られた点である。これはゴム脚が木材の表面を滑るたびに、接触面に木の粉末がついたものである。さらに、測定結果は減少傾向 (28°, 24°, 21°, 22°) にあり、付着物がゴムの隙間に埋まったことにより測定結果が減少したと思われる。

これらのことより、比較的測定値のばらつきが小さく、静止摩擦係数の差がでかい組み合わせは、(床：ポリプロピレン板、脚：ゴムとポリプロピレン) である。したがってこの組み合わせで実験 2、実験 3 を行う。

5. 実験 2

5. 1 概要

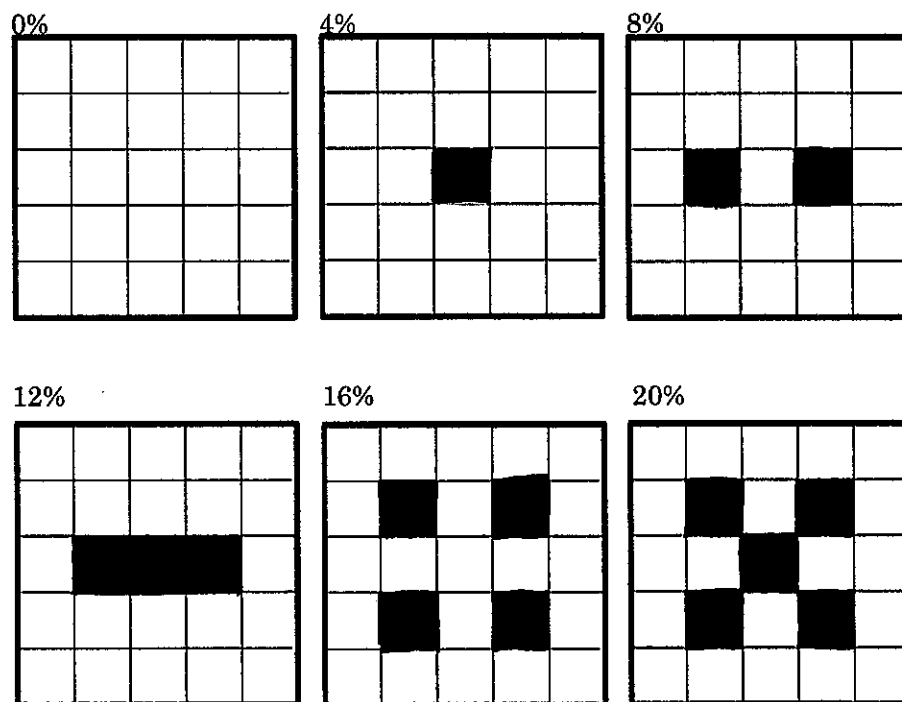
今回の実験では異なる静止摩擦係数な材質の脚を定量的に増減させ、どのような変化が起こり、規則性があるかについて調べる。さらに、実験 1 の結果のみでは、同形状によって静止摩擦係数の特徴があるかどうかについて正確な判断をすることができなかった。このことについても、確認を行う。

5. 2 実験条件

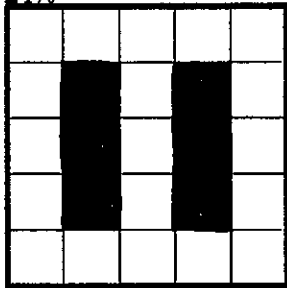
- ・温度 21℃
- ・脚の長 10mm
- ・傾斜法
- ・滑走体 2
- ・脚 (ゴム、ポリプロピレン)
- ・床 (ポリプロピレン)

5. 3 実験方法

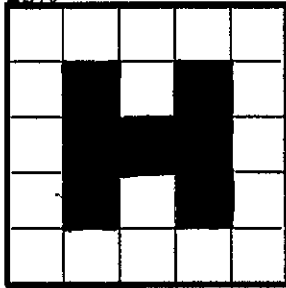
- ① 滑走体 2 にポリプロピレン脚を 25 脚取り付け。実験 1 と同様に測定を行う。
- ② この状態を 0% として 4% (1 本) ずつゴム脚に取り換えて 100% まで繰り返し実験を行う。測定を行う接触面の形状は以下の図 5-1 に示す。黒マスがゴム、白マスをポリプロピレンとする。



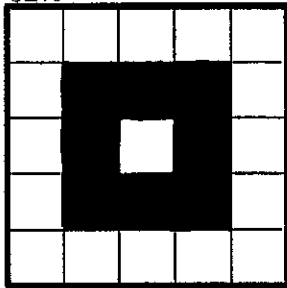
24%



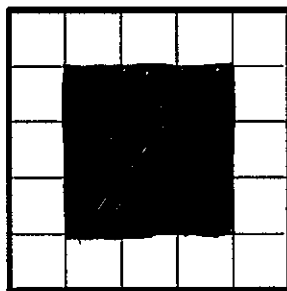
28%



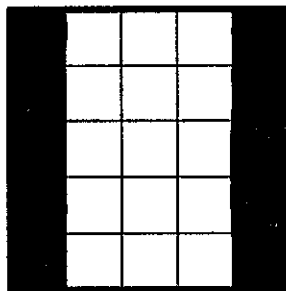
32%



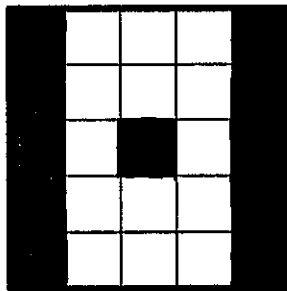
36%



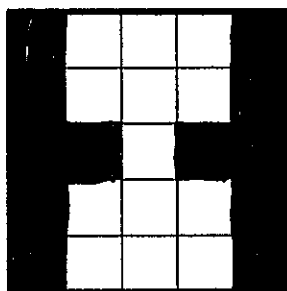
40%



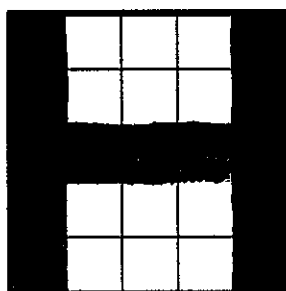
44%



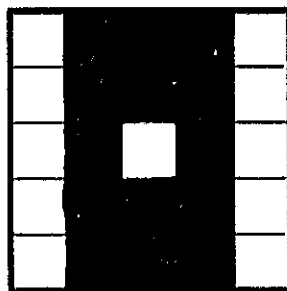
48%



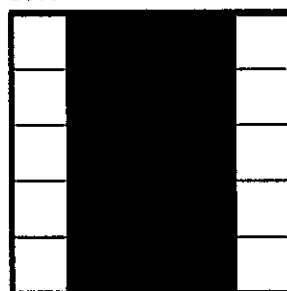
52%



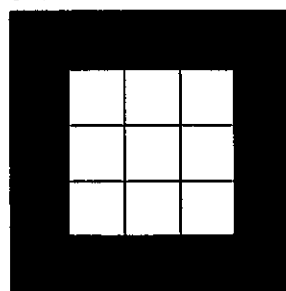
56%



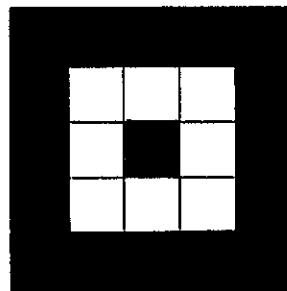
60%



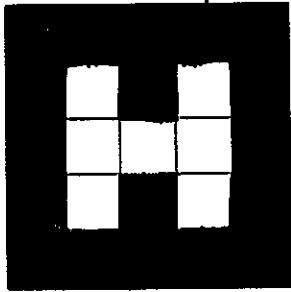
64%



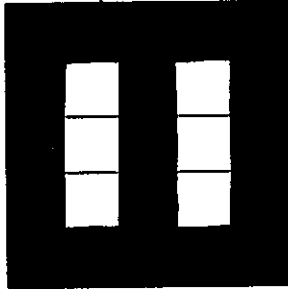
68%



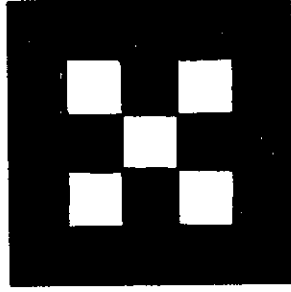
72%



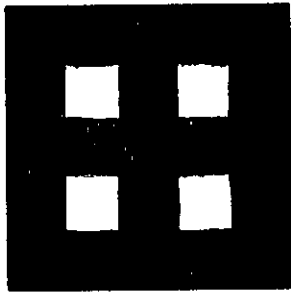
76%



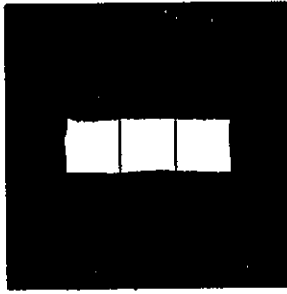
80%



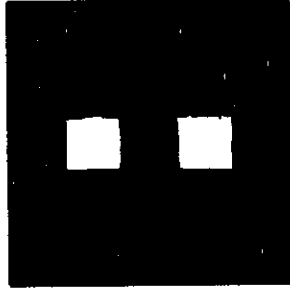
84%



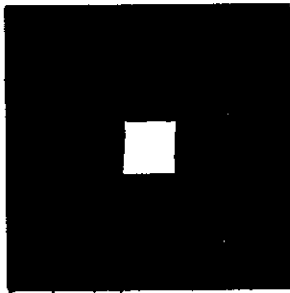
88%



92%



96%



100%



图 5-1 实验形状

5. 4 実験結果

実験形状の%ごとに、5回の測定結果とその平均を表5-1にまとめ、平均から計算した静止摩擦係数を表5-2にまとめる。

表5-1 割合ごとの傾斜角度

割合	傾斜角度(°)						
	0%	4%	8%	12%	16%	20%	24%
1回目	19.9	19.8	21.9	23.3	26.0	26.9	28.9
2回目	20.0	26.2	22.8	26.2	26.0	27.2	29.0
3回目	19.2	25.3	22.8	22.0	25.8	27.7	29.8
4回目	18.9	27.3	22.8	25.9	27.9	27.1	29.7
5回目	19.8	27.0	22.8	26.9	24.1	25.8	27.9
平均	19.6	25.1	22.8	24.9	26.0	26.9	29.1
割合	28%	32%	36%	40%	44%	48%	52%
1回目	30.2	29.9	32.9	24.0	26.9	29.0	31.9
2回目	30.9	29.3	32.3	26.6	29.1	28.5	30.9
3回目	32.9	30.5	30.1	25.0	28.9	26.6	34.1
4回目	31.6	32.1	32.7	26.0	28.9	29.0	33.4
5回目	30.8	32.0	32.8	27.0	28.5	29.1	33.1
平均	31.3	30.8	32.2	25.7	28.5	28.4	32.7
割合	56%	60%	64%	68%	72%	76%	80%
1回目	36.1	33.3	32.0	33.0	33.0	37.6	35.6
2回目	32.9	32.9	27.1	31.9	33.0	31.9	34.0
3回目	34.2	33.2	26.6	31.7	33.9	32.4	35.2
4回目	35.8	33.0	29.1	34.9	32.0	33.9	32.2
5回目	33.0	33.4	29.8	31.6	33.9	34.3	32.0
平均	34.4	33.2	28.9	32.6	33.2	34.0	33.8
割合	84%	88%	92%	96%	100%		
1回目	37.0	36.0	42.2	40.9	54.0		
2回目	37.4	37.2	36.7	37.5	54.1		
3回目	33.1	39.8	34.4	39.0	52.9		
4回目	33.9	39.9	36.8	37.1	53.1		
5回目	35.1	39.0	36.2	38.8	50.9		
平均	35.3	38.4	37.3	38.7	53.0		

表5-2 割合ごとの静止摩擦係数

割合	0%	4%	8%	12%	16%	20%	24%
静止摩擦係数 μ	0.355	0.469	0.463	0.463	0.487	0.508	0.556
割合	28%	32%	36%	40%	44%	48%	52%
静止摩擦係数 μ	0.608	0.595	0.629	0.482	0.542	0.542	0.641
割合	56%	60%	64%	68%	72%	76%	80%
静止摩擦係数 μ	0.685	0.653	0.552	0.640	0.653	0.675	0.669
割合	84%	88%	92%	96%	100%		
静止摩擦係数 μ	0.708	0.792	0.761	0.800	1.33		

5.5 考察

測定で得られた結果を静止摩擦係数と面積の割合の関係をグラフに表すと図5-2のようになった。

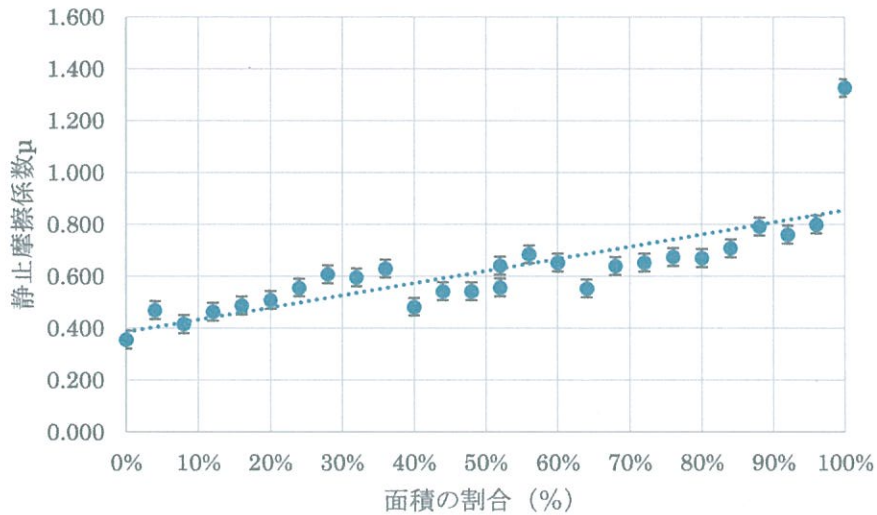


図5-2 静止摩擦係数と接触面積の関係

はじめ、なにも考慮せずに全体での近似直線を引いたが、図5-2をよく見てみると、明らかに0%~36%、40%~52%、52%~60%、64%~96%、100%の間での関係となっている。確かに脚の形を比較してみると、36%と40%、48%と52%、60%と64%の間で根本的な脚の形状が異なっており、形状と照らし合わせてみると中心に静止摩擦係数が大きな材質を置く方が両端に配置するよりも大きくなるようである。ここで、上記の間隔ごとに近似直線を引いたグラフを図5-3に示す。

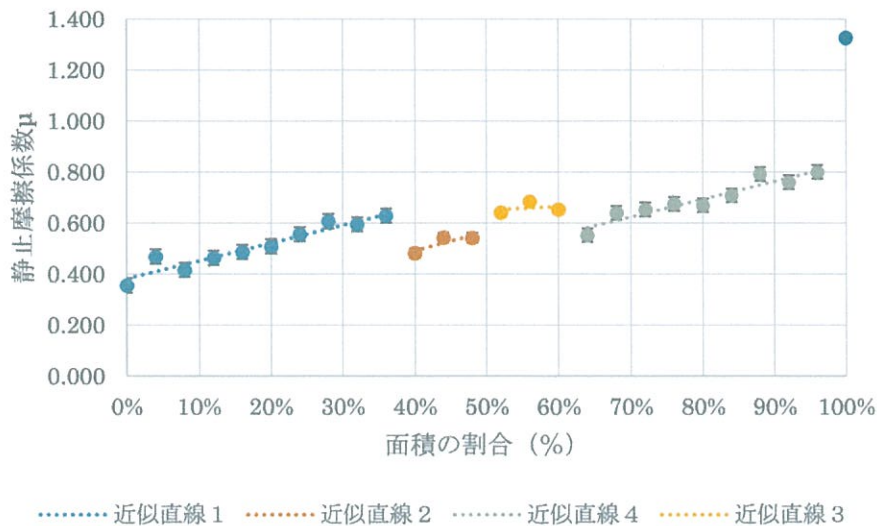


図5-3 静止摩擦係数と接触面積の関係

近似直線 1 と近似直線 3、近似直線 2 と近似直線 4 は、ほぼ同一形状上での変化であるため、片方の近似直線のほぼ延長線上にあることがわかる。近似直線の傾きはほぼ一致し、形状に大きな変化がなければ、静止摩擦係数の増加量は一定であり面積の増加量と比例関係となることが分かった。また、このことから実験 1 で曖昧だった同形状によって特徴があることが判明した。

今回の実験において最も興味深いのは、ゴム 100%の静止摩擦係数と 96%の静止摩擦係数の間には 1.6 倍の差が生じたことである。これには、二つの理由が考えられる。一つ目は、滑走体が動いた瞬間に気付かなかった可能性である。ゴムは動摩擦係数の値が大きいためか、動いたかどうか分かりにくく計測値が大きくなってしまったと考えられる。二つ目は、静止摩擦係数の低い材質に引きずられたためである。1%でも他より小さい静止摩擦係数を持つ材質がある場合、全体の摩擦係数がそれにつられて小さくなったと考えられる。後者の方が影響は大きいと思われる。

6. 実験3

6. 1 概要

実験2では、形状面積が対称である場合のみについて扱ったが、静止摩擦係数が偏っている場合において全体にどのような影響を及ぼすのかについて調べる。また実験2において、中心に静止摩擦係数が大きな材質を置く方が両端に配置するよりも大きくなったが、このようになった理由についても、この実験3で考える。

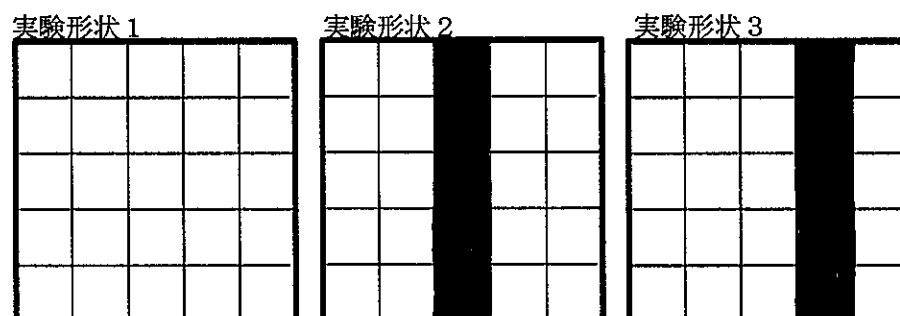
6. 2 実験条件

- ・温度 21℃
- ・脚の長さ 10mm
- ・傾斜法
- ・滑走体 2
- ・脚 (ゴム、ポリプロピレン)
- ・床 (ポリプロピレン)

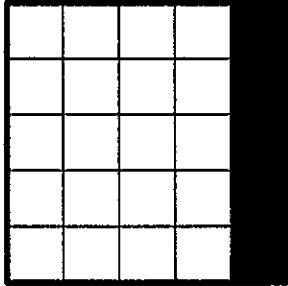
6. 3 実験方法

- ① 滑走体2にポリプロピレン脚を25脚取り付け。実験1と同様に測定を行う。ただし、滑走体のどこか一ヶ所でも滑ると、その時点で傾斜角を増やすことを止める。一定時間後に滑り落ちたら、その角度を記録する。放置後落ちなければ、再度傾斜角を上げていく。
- ② この状態の形状を形状番号1として縦1列ごとゴム脚に取り換えて実験を行う。測定を行う接触面の形状は以下に示す。

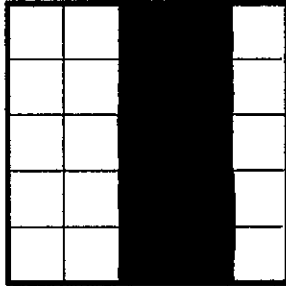
測定した脚の形を図6-1に示す。黒マスがゴム白マスをポリプロピレンとする。



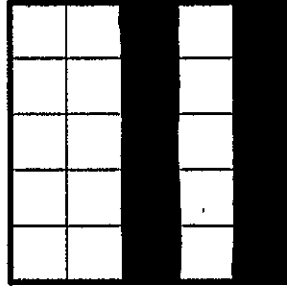
実験形状 4



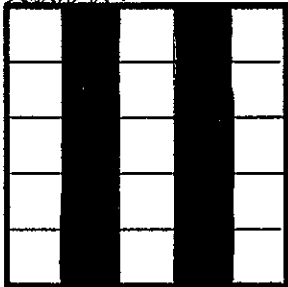
実験形状 5



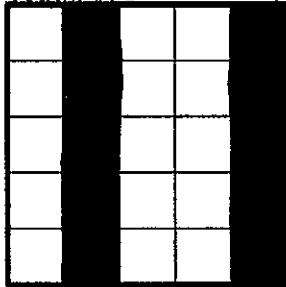
実験形状 6



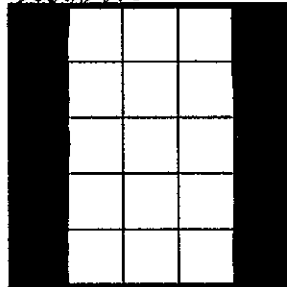
実験形状 7



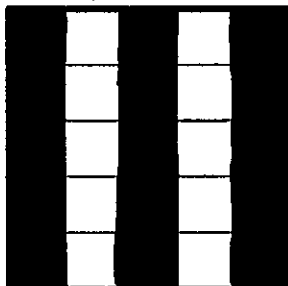
実験形状 8



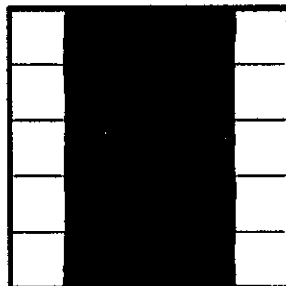
実験形状 9



実験形状 10



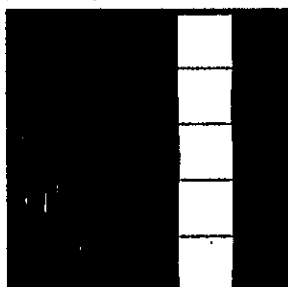
実験形状 11



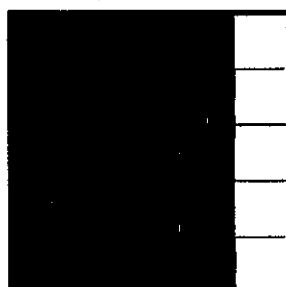
実験形状 12



実験形状 13



実験形状 14



実験形状 15

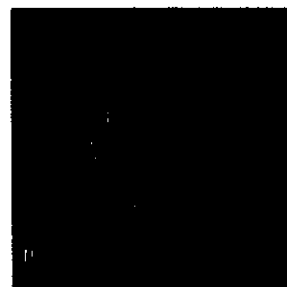


図 6-1 実験形状

6. 4 実験結果

測定結果を以下の表に示す。

表 6-1 形状ごとの傾斜角度

実験形状	傾斜角度(°)					
	1	2	3	4	5	6
1回目	19.9	50.2	22.9	21.3	40.2	45.6
2回目	20.0	50.1	28.0	22.4	48.0	40.0
3回目	19.2	49.8	26.5	21.1	48.1	42.9
4回目	18.9	47.9	30.2	23.4	49.0	43.9
5回目	20.1	47.9	29.0	22.4	46.7	46.9
平均	19.6	49.2	27.3	22.1	46.4	43.9
実験形状	7	8	9	10	11	12
1回目	33.8	31.2	24.0	42.0	41.2	41.6
2回目	34.9	33.0	26.6	42.1	34.2	31.9
3回目	34.2	32.1	25.0	40.0	41.6	33.0
4回目	33.6	30.7	26.0	40.9	39.3	32.2
5回目	33.8	35.1	27.0	38.0	40.8	32.0
平均	34.1	32.4	25.7	40.6	39.4	34.1
実験形状	13	14	15			
1回目	47.9	44.6	54.0			
2回目	43.4	37.8	54.1			
3回目	46.5	41.9	52.9			
4回目	45.9	37.8	53.1			
5回目	47.7	36.6	50.9			
平均	46.3	39.7	53.0			

表 6-2 形状ごとの静止摩擦係数

実験形状	1	2	3	4	5	6
静止摩擦係数 μ	0.356	1.16	0.517	0.406	1.05	0.961
実験形状	7	8	9	10	11	12
静止摩擦係数 μ	0.676	0.635	0.482	0.857	0.822	0.678
実験形状	13	14	15			
静止摩擦係数 μ	1.05	0.831	1.33			

6.5 考察

まず、一列だけを変化させて比較してみる。グラフを以下の図6-2に示す。2番のように、中央に静止摩擦係数が大きい材質が集中すると、全体の静止摩擦係数が跳ね上がりゴムの割合が100%時の値に近くなる。予想の通りに外側に行くにつれて静止摩擦係数が減少していることがわかる。また、列を中心から移動させると、滑走体はある角度で摩擦係数の大きい列の中心として回転し始め、一定時間後に全体が滑り始めた。

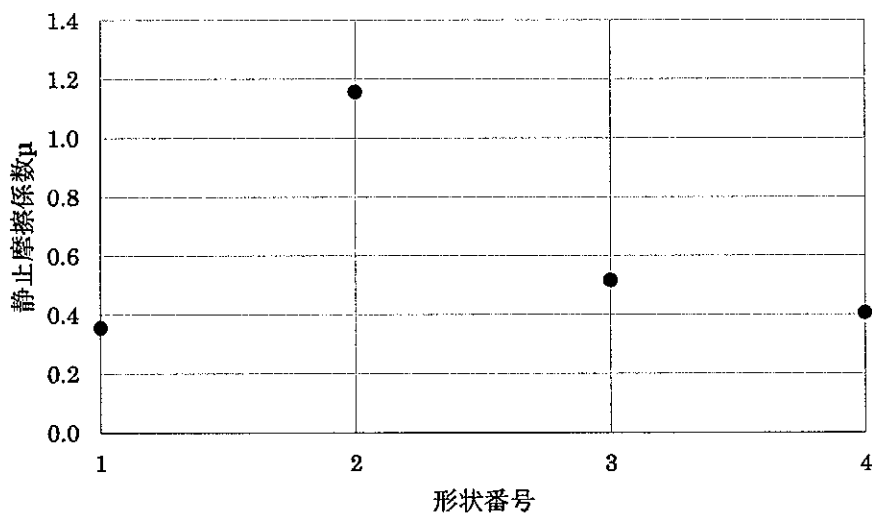


図6-2 形状ごとの静止摩擦係数

次に、2列の場合で比較を行う。グラフを図6-3に示す。

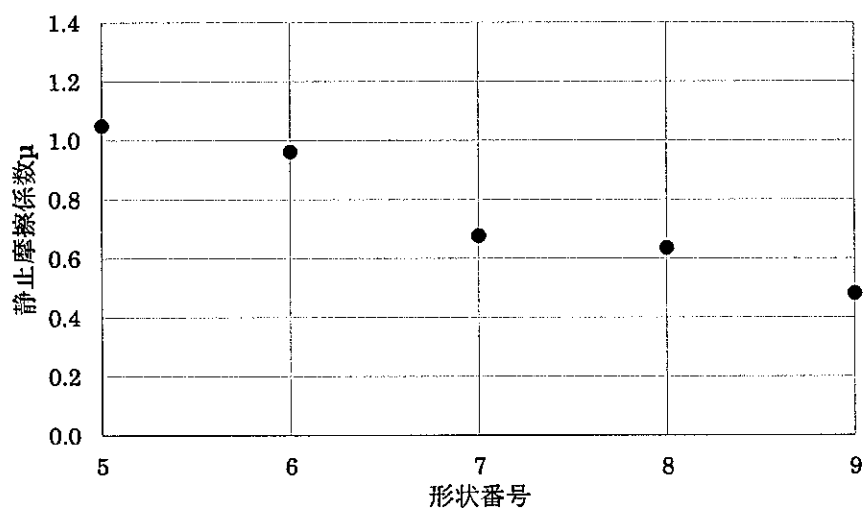


図6-3 形状ごとの静止摩擦係数

左右均等に 2 列を並べた 7 番と 9 番は、中央による方が静止摩擦係数の値が大きくなっている。さらに、1 列少ない 2 番の方が 7, 9 番よりも大きいことから、本実験 2 での形状によって静止摩擦係数の値は大きく変化し、静止摩擦係数の大きい材質が内側にある方が係数の値が大きくなるのでは、という仮説が正しいことが確認できた。また、右端に 1 列と他の場所に 1 列の形状で比較した 6 番 8 番 9 番にも同じことが言える。

3 列以上の場合も、ほぼ同じであると言える。形状番号 10~15 のグラフを以下に示す。

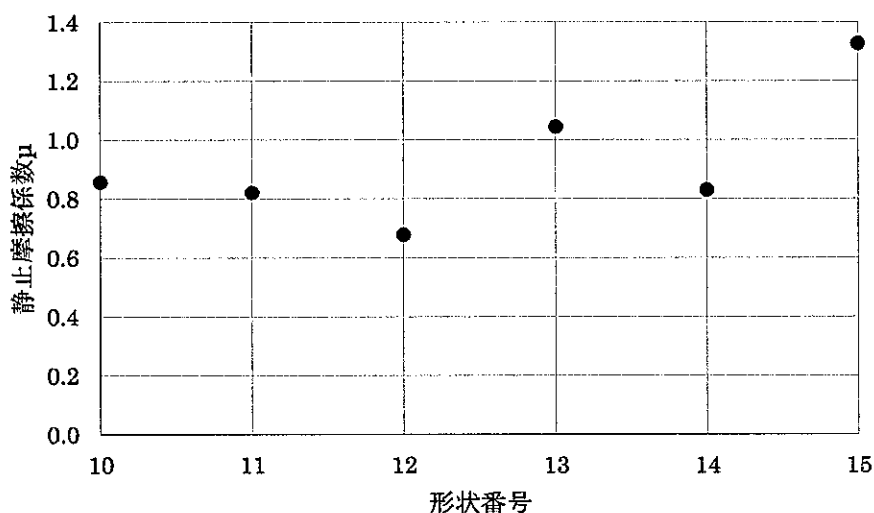


図 6 - 4 形状ごとの静止摩擦係数

これらの実験結果から、静止摩擦係数の分布に偏りがある場合の方が、左右対称の場合に比べて減少傾向にある。これは、静止摩擦係数が小さい材質の最大摩擦力を越えると滑りだそうとはじめ、偏りがある場合にはこれにより静止摩擦係数が大きい材質周りの回転モーメントが発生し、回転することでずれ落ちたためだと思われる。

7. 結論

まず、接触面積形状を自由に変更でき、元の状態に戻せる滑走体が制作することができた。次に静止摩擦係数は、面積によらないとされているが、グラフからは比例関係にあるように読み取れる。これは、進行方向の境界面による影響と測定方法に傾斜法を用いたためだと考えられる。異なる静止摩擦係数を持つ材質を定量的に増加させると比例して増加するが、形状によって増加傾向が異なる。これは、同一形状の時にも同じである。中心に静止摩擦係数が大きな材質を置く方が両端に配置するよりも大きくなるようである。これは、回転モーメントによる影響で静止摩擦係数から値の小さい動摩擦係数に早く移行したためだと考えられる。

また、今回の実験を通して、摩擦は様々な影響を受けやすく不安定であることなど、摩擦について理解を深め、理解することができた。今回は最大25脚で実験を行ったが、極限まで脚を増やしていくと、どういう現象が起こるのか、ミクロの世界で同様の実験を行ってみたい。

8. 参考文献

- ・ Arduino で計る、測る、量る 神崎康宏 CQ出版 2012年
- ・ 物理図録 数研出版編集部 数研出版 2013年
- ・ 摩擦の物理 「www.phys.aoyama.ac.jp」
- ・ celles 「<http://www.celles.co.jp/archives/99>」