

摩擦係数の測定～木材を中心として～

第1チャレンジ番号: 1 5 3 4 0 7 9 (※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: 吉田 智治

学校名又は卒業校名: 大阪星光学院高等学校 学 年: 2

学校のある都道府県名: 大阪府 実験をした場所: 学校実験室

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: 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。

減衰振動の実験をしたの(おもしろくて、興味深かった。あと、ホキキで紐に引っかかったので7リ、70をばいしました。

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

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)

## 1.実験の目的

摩擦とは身近に溢れている現象である。

たとえば摩擦がなければ徒競走のスタートのときに地面を蹴ることができないし、鉛筆で文字を書くこともできない。広い意味で空気抵抗も含むものとする、もしこれがなければ梅雨時には多数の死者が出ることになる。

しかし、その現象の根本的理由は何かと問われるとその現象の複雑さゆえ未だこれといった決定的なものは存在しないようである。

何が複雑かという、たとえば接触した2面の間にはたらく摩擦を考えるときに考えられる変数が多すぎるのである。完全に均一な素材というものは(少なくともわれわれの日常生活の中では)存在しないので面の位置によっても変わりうるし、温度、湿度によっても変わりうるだろう。さらに調べたところによると動摩擦力の場合は面同士の相対速度によって変わり、静止摩擦の場合は面が接触した時間によっても変わるようだ。[1]

そこで、この実験ではそれらのパラメータができるだけ変わらないことを意識した。つまりは、できるだけすばやく実験を行えるようにするのである。このことにより必然的に誤差が大きくなり、本末転倒なようにも思われるが、それはデジタル機器を用いることによって回避することができる。

また、動摩擦力、転がり摩擦力の測定では位置のパラメータを減らすため1次元内での運動になるように工夫もした。

## 2.実験手法

### 2-0.準備物

- 木材各種（板，立方体，パルサボード，コルク板）
- プラスティックレール
- 鋼球
- ものさし
- カメラ
- バネ2本
- 力学スタンド
- 糸
- 温度計，湿度計
- パソコン
- 表計算ソフト:Excel
- 画像加工ソフト:Area61 ビデオブラウザ

## 2-1. 静止摩擦力

摩擦角で測る.

下図のような装置を組んで測定する.



下のコルクボードを少しずつスライドさせて質量 $m$ の錘がぎりぎり滑り出すときの、錘の地点での傾斜角 $\alpha$ (板がたわむため傾斜角は位置の関数になっていることに注意する), 垂直抗力の大きさ $N$ , 摩擦力の大きさ $f$ , 静止摩擦係数 $\mu_0$ としたときつりあいの式を立てると

$$N = mg \cos \alpha$$

$$\mu_0 N = f = mg \sin \alpha$$

より

$$\mu_0 = \tan \alpha$$

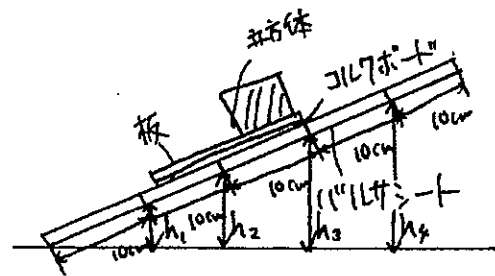
具体的にどのように求めるかというと

1. パルサシートに 10 cm おきに印を打つ.
2. 差金でそれぞれの印の位置の高さを測る.
3. そこから, ある区間内(たとえば 10~20 cm)でのおおよその傾きを求める.

その傾きの求め方は $10n \sim 10(n+1)$  [cm]において

$$\frac{h_{n+1} - h_n}{\sqrt{10^2 - (h_{n+1} - h_n)^2}}$$

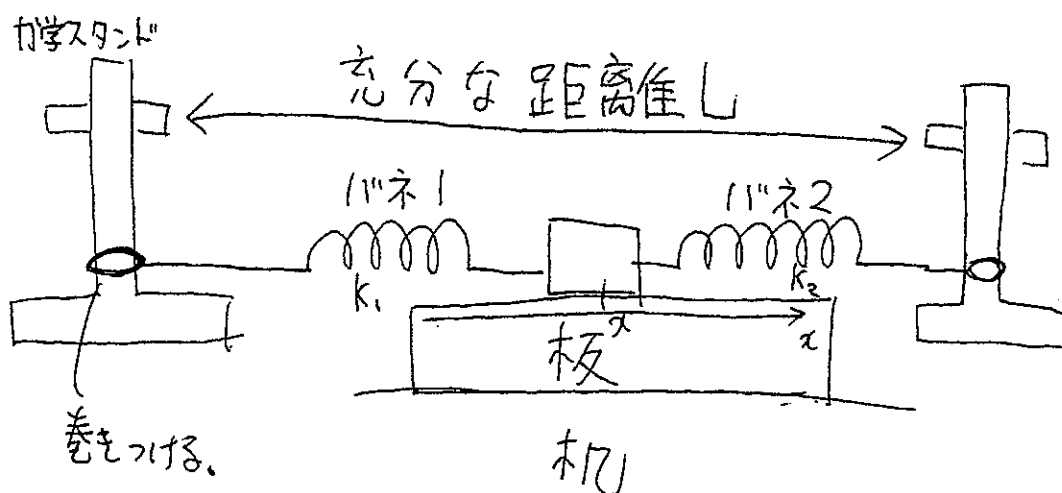
とする.



## 2-2. 動摩擦力

バネの減衰振動によって求める。

はじめはバネ 1 個でやろうとしていたが、バネが縮みきるとそのままになってしまう(つまり伸びが負のとき明らかに Hooke の法則が成り立っていない)ことがわかり、バネを 2 個にして伸びが常に正になるようにした。(下図参照)また、こうすることにより物体がより 1 次元に近い運動をするので好都合であることが分かった。



### 2-2-1. 原理

物体の振動方向(バネ 1→バネ 2)に  $x$  軸を取りバネ 1, 2 のバネ定数  $k_1, k_2$ , 自然長  $l_1, l_2$ , 動摩擦係数  $\mu'$  として滑っているときの運動方程式を立てると

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = k_2(L - x - l_2) - k_1(x - l_1) \pm \mu' mg$$

ただし複号は右向きに動くとき-, 左向きするとき+.

この式から,  $\mu'$  の速度依存性を無視すると加速度  $\alpha$  と  $x$  の間に線形の関係が期待されるので最小二乗法で一次関数近似してその係数から求める.

$c = k_2(L - l_2) + k_1 l_1$  として

$$\alpha = Ax + c \pm \mu' g$$

より右と左で動くときのグラフの  $\alpha$  切片の差を  $2g$  で割ればよい.

## 2-2-2 実験方法

### Step 1. バネ定数の測定

単振動の周期で求める。

まず右図のような装置を組み、バネを引っ張って放してからしばらくすると錘が近似的に1次元の運動をする。そうってから振動の周期を10周期ごとに測り、全体で100周期測る。そしてそれを10~60, 20~70, …という風に50周期ごとに時間の差をとり50で割ることで周期を出す。このようにすることで誤差が小さくなる。

ここで空気抵抗は無視するものとして周期からバネ定数を求める理論式を導出する。

運動方程式

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -(k_1 + k_2)x$$

ただし

$m$ : 錘の質量,  $x$ : 錘の位置(振動していないとき  $x = 0$ ),  $k_1, k_2$ : バネ 1, 2 のバネ定数

この解は

$$x = A \sin \omega t + B \cos \omega t \quad (A, B: \text{定数})$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k_1 + k_2}{m}}$$

周期  $T$  は

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

より

$$k_1 + k_2 = m \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2$$

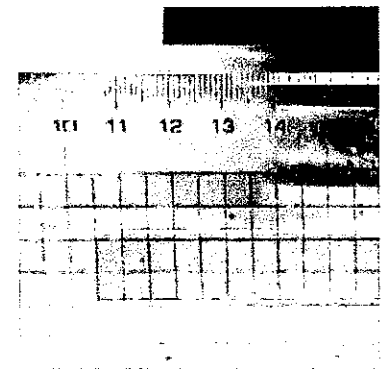
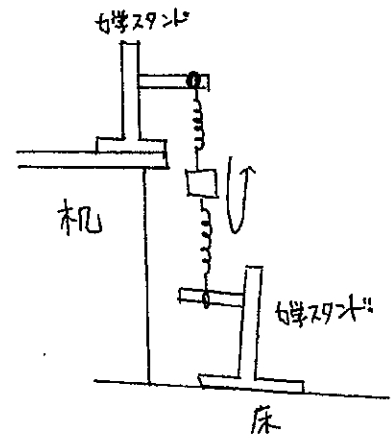
この式を見ると分かるようにバネ定数は周期の $-2$ 乗に比例するので誤差の伝播を考えるとこれを正確に測る必要があり、よって前述のような方法をとる。

### Step 2. 減衰振動の測定

振動している線のすぐ前に定規を固定してカメラで撮影し、画像加工ソフトでコマごとに分割して位置を求める。

ただし用いたカメラのフレームレートは 30 fps なのでどうしてもブレが見える(右図参照)。この実験ではブレを逆に利用することを考える。つまり、ブレの両端の位置を測定してそこから中央の時間での位置や速度、加速度を求める。

ぶれているということはその分時間的ずれがあるということでありそのずれを  $\Delta t_1$  とすると位置  $x$  の、時刻  $t$  の周りの Taylor 展開を考えることにより



$$\frac{x\left(t + \frac{1}{2}\Delta t_1\right) + x\left(t - \frac{1}{2}\Delta t_1\right)}{2} = x(t) + \frac{1}{8} \frac{d^2x}{dt^2}(t)(\Delta t_1)^2 + O((\Delta t_1)^4)$$

ただし $O((\Delta t_1)^4)$ は $\Delta t_1$ の4次以上の項を表す.

速度, 加速度について1コマの間隔 $\Delta t_2$ として

$$\begin{aligned} \frac{x\left(t + \frac{\Delta t_2}{2}\right) - x\left(t - \frac{\Delta t_2}{2}\right)}{\Delta t_2} &= \frac{dx}{dt}(t) + \frac{1}{24} \frac{d^3x}{dt^3}(t)(\Delta t_2)^2 + O((\Delta t_2)^4) \\ \frac{\frac{dx}{dt}\left(t + \frac{\Delta t_2}{2}\right) - \frac{dx}{dt}\left(t - \frac{\Delta t_2}{2}\right)}{\Delta t_2} &= \frac{d^2x}{dt^2}(t) + \frac{1}{24} \frac{d^4x}{dt^4}(t)(\Delta t_2)^2 + O((\Delta t_2)^4) \\ \frac{\frac{d^2x}{dt^2}\left(t + \frac{\Delta t_2}{2}\right) - \frac{d^2x}{dt^2}\left(t - \frac{\Delta t_2}{2}\right)}{\Delta t_2} &= \frac{d^3x}{dt^3}(t) + O((\Delta t_2)^2) \\ \frac{\frac{d^3x}{dt^3}\left(t + \frac{\Delta t_2}{2}\right) - \frac{d^3x}{dt^3}\left(t - \frac{\Delta t_2}{2}\right)}{\Delta t_2} &= \frac{d^4x}{dt^4}(t) + O((\Delta t_2)^2) \end{aligned}$$

よって

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{x\left(t + \frac{1}{2}\Delta t_1\right) + x\left(t - \frac{1}{2}\Delta t_1\right)}{2} \\ &\quad - \frac{1}{8} \left[ x\left(t + \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2}\right) + x\left(t - \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2}\right) - x\left(t + \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2}\right) - x\left(t - \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2}\right) \right] \\ &\quad + O((\Delta t_2)^4) \\ \frac{dx}{dt}\left(t + \frac{1}{2}\Delta t_2\right) &= \frac{x(t + \Delta t_2) - x(t)}{\Delta t_2} \\ &\quad - \frac{1}{24} \left[ \frac{x(t + 2\Delta t_2) - x(t - \Delta t_2)}{\Delta t_2} + \frac{x(t) - x(t - \Delta t_2)}{\Delta t_2} - 2 \frac{x(t + \Delta t_2) - x(t)}{\Delta t_2} \right] + O((\Delta t_2)^4) \\ \frac{d^2x}{dt^2}(t) &= \frac{x(t + \Delta t_2) + x(t - \Delta t_2) - 2x(t)}{(\Delta t_2)^2} \\ &\quad - \frac{1}{12} \frac{\frac{dx}{dt}\left(t + \frac{3\Delta t_2}{2}\right) - \frac{dx}{dt}\left(t - \frac{3\Delta t_2}{2}\right) + 3 \frac{dx}{dt}\left(t - \frac{\Delta t_2}{2}\right) - 3 \frac{dx}{dt}\left(t + \frac{\Delta t_2}{2}\right)}{\Delta t_2} + O((\Delta t_2)^4) \\ \frac{dx}{dt}(t) &= \frac{\frac{dx}{dt}\left(t + \frac{\Delta t_2}{2}\right) + \frac{dx}{dt}\left(t - \frac{\Delta t_2}{2}\right)}{2} - \frac{1}{16} \left[ \frac{d^2x}{dt^2}(t + \Delta t_2) - \frac{d^2x}{dt^2}(t - \Delta t_2) \right] \Delta t_2 + O((\Delta t_2)^4) \end{aligned}$$

$n$ フレーム目での左端の位置 $x_n^{(l)}$ , 右端の位置 $x_n^{(r)}$ とすると $n$ フレーム目での中央の時間での位置 $x_n$ , 速度 $v_n$ , 加速度 $a_n$ は( $n$ が半整数のとき2フレームの中央を表す)

$$\begin{aligned} x_n &= \frac{x_n^{(r)} + x_n^{(l)}}{2} - \frac{1}{8} (x_{n+1}^{(r)} + x_{n-1}^{(l)} - x_{n+1}^{(l)} - x_{n-1}^{(r)}) + O((\Delta t_2)^4) \\ v_{n+\frac{1}{2}} &= \frac{x_{n+1} - x_n - \frac{1}{24} (x_{n+2} - 2x_{n+1} + 3x_n - 2x_{n-1})}{\Delta t_2} + O((\Delta t_2)^4) \end{aligned}$$

$$a_n = \frac{x_{n+1} - 2x_n + x_{n-1}}{(\Delta t_2)^2} - \frac{1}{12} \frac{v_{n+\frac{3}{2}} - v_{n-\frac{3}{2}} - 3v_{n+\frac{1}{2}} + 3v_{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t_2} + O((\Delta t_2)^4)$$

$$v_n = \frac{v_{n+\frac{1}{2}} + v_{n-\frac{1}{2}}}{2} - \frac{1}{16} (a_{n+1} - a_{n-1}) \Delta t_2 + O((\Delta t_2)^4)$$

以上の式を用いて位置，速度，加速度を求める。ただし $O((\Delta t_1)^4)$ ,  $O((\Delta t_2)^4)$ は無視する。

フレームレートが 30 fps であるから $\Delta t_2 = \frac{1}{30}$  s であり， $\Delta t_1$ はブレの幅と速度(ただし $\Delta t_1$ を含む項を除いて計算する)から求める。



### 2-3. 転がり摩擦力

レールの上に玉を転がしてビースピで速度変化を見る。

位置 $x$ における速さ $v(x)$ として転がり摩擦係数 $\mu_r$ とすると

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -\mu_r mg$$

$\frac{dx}{dt}$ をかけて $t$ で積分すると

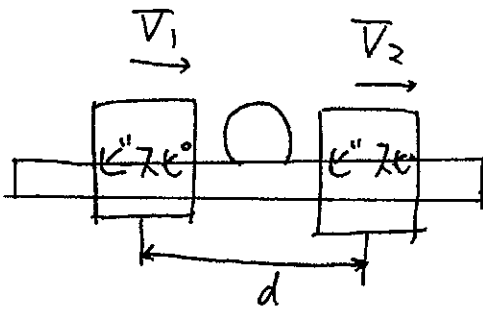
$$\frac{1}{2}m \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \mu_r mgx = \text{const.}$$

ただし $\mu_r$ は(転がっている最中)は一定とみなした。

具体的には下図のように装置を組んで間隔 $d$ および速度 $V_1, V_2$ を測定する。

式は

$$\mu_r = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2mg}$$



### 3. 実験結果

#### 3-1. 静止摩擦力

〇〇vs△△垂直とは△△の上に〇〇を木目が直交するように載せたときの摩擦を表し、ぶつぶつと続けているものは維管束で〇〇がぶつぶつしていることを表す。

$h$ の誤差はおよそ1 mm とみなす。(差金の垂直性の誤差を考慮している.)

10 cm 間隔の 10 cm の誤差は無視する。

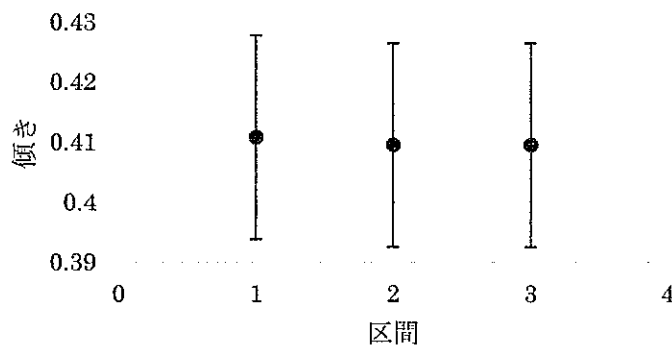
そうすると全区間での傾きの差は誤差の範囲に収まるので、(下グラフ参照) すべてを平均して傾きとすることにする。

具体的な誤差の計算式は

$$\Delta(\text{傾き}) = (\text{傾き}) \times \sqrt{2} \left| \frac{1}{h_{n+1} - h_n} + \frac{h_{n+1} - h_n}{(10 \text{ cm})^2 - (h_{n+1} - h_n)^2} \right| \times 0.1 \text{ cm}$$

である。

グラフ タイトル



一番初めのデータについてグラフ化したもの

測定日:6月6日,温度:25.1°C,湿度:56%

ホウ(ヤスリで磨いた)vs ホウ平行

$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$h_3$ [cm]	傾き(平均)
3.80	7.59	11.38	0.41±0.01
3.61	7.08	10.62	0.38±0.01
3.71	7.32	11.00	0.39±0.01
3.69	7.21	10.88	0.39±0.01
3.29	6.50	9.78	0.35±0.01

ホウ vs ホウ垂直

$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$h_3$ [cm]	傾き(平均)
4.48	8.75	13.10	0.49±0.01
4.81	9.69	/	0.55±0.01

コルク vs コルク

滑らずに転げ落ちたため測定不能.

測定日:6月15日,温度:26.3°C,湿度:72%

ホウ vs ホウ垂直

$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$h_3$ [cm]	$h_4$ [cm]	$h_5$ [cm]	傾き(平均)
4.01	7.32	12.50	16.66	20.90	$0.464 \pm 0.009$
4.51	8.82	13.86			$0.52 \pm 0.01$
3.98	7.81	12.03			$0.44 \pm 0.01$

ホウ(ヤスリで磨いた)vs ホウ平行

$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$h_3$ [cm]	$h_4$ [cm]	$h_5$ [cm]	傾き(平均)
3.03	6.30	9.50	12.69	15.90	$0.335 \pm 0.007$
3.72	7.31	11.58	15.36		$0.416 \pm 0.009$
3.57	7.03	11.04			$0.40 \pm 0.01$

測定日:6月18日,温度:22.0°C,湿度:66%

コルク(板)vs コルク

$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$h_3$ [cm]	傾き(平均)
7.51	15.21	22.90	$1.18 \pm 0.003$
7.70	15.36	21.18	$1.04 \pm 0.03$
7.52	15.21	22.90	$1.18 \pm 0.03$

コルク vs ホウ

$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$h_3$ [cm]	傾き(平均)
5.8	12.62	18.88	$0.82 \pm 0.02$
5.98	11.92	17.82	$0.74 \pm 0.02$

左右にふれながら滑り落ちた

### 3-2. 動摩擦力

Step1.

測定日:5月16日,温度:26.5°C

バネ 1,2 に錘  $m = 113.75 \text{ g}$  をつないだ周期

10 周 期[s]	20 周 期[s]	30 周 期[s]	40 周 期[s]	50 周 期[s]	60 周 期[s]	70 周 期[s]	80 周 期[s]	90 周 期[s]	100 周 期[s]	$T$ [s]
5.44	10.85	16.35	21.77	27.26	32.71	38.21	43.65	49.14	54.57	27.32 $\pm 0.02$
5.43	10.84	16.38	21.78	27.33	32.71	38.21	43.61	49.13	54.54	27.28 $\pm 0.04$
5.44	11.01	16.44	22.01	27.48	33.00	38.44	44.01	49.44	54.88	27.28 $\pm 0.04$
5.44	10.86	16.43	21.89	27.44	33.01	38.44	43.88	49.45	54.86	27.52 $\pm 0.03$
									平均	27.35 $\pm 0.02$

よって

$$k_1 + k_2 = 13.95 \pm 0.02 \text{ N/m}$$

となる.

ここで  $T$  の誤差は 50 周期ごとにとったもの 5 個の標準偏差を 50 で割ったもの.

$$\text{また } m \text{ の誤差は無視して } \Delta(k_1 + k_2) = \frac{2\Delta T}{T} (k_1 + k_2)$$

上二つとした二つでは振動中心でのばねの伸びを変えた(つまり力学スタンドの距離を変えた).この結果周期が異なっていることが分かる.

Step2.

$v > 0$  のとき  $a = A_+x + B_+$ ,  $v < 0$  のとき  $a = A_-x + B_-$  として最小二乗法で計算した係数およびその誤差を Excel の関数 LINEST で計算したものを表の下に示す. また  $A := \frac{A_+ + A_-}{2}$  として  $a - Ax$  と  $v$  の関係を見て速度依存性を測る. その速度依存性はグラフを描くと線形の傾向がみられたためその傾き  $C$  を最小二乗法で計算して下に示す.

また  $\Delta t_1 = 0.028$  s,  $\Delta x_l = \Delta x_r = 0.5$  cm として  $\Delta t_1, \Delta t_2$  の誤差は無視すると

$$\Delta x = \frac{3}{4} \times 0.5 \cong 0.4 \text{ cm}$$

$$\Delta v = \frac{\sqrt{130}}{8} \times \frac{0.5}{2.8} \cong 0.2 \text{ ms}^{-1}$$

$$\Delta a = \sqrt{\frac{6 \times 0.5^2}{3.3^4} + \frac{5}{36} \times \frac{0.2}{3.3}} \cong 0.1 \text{ ms}^{-2}$$

よって  $v$  は小数第 1 桁まで表示すべきだが, 手違いで 2 桁まで表示してしまっている.

ここから 55p までは 5 月 7 日 27.9°C 晴れ  
 またここから 58p までデータの羅列が続く  
 ホウ vs シナ垂直ぶつぶつ 1

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
0	-4.8	-4.8				
1	-4.6	-3.1	-4.1	0.57	19.4	-6.4
2	-2.6	0.4	-1.2	0.98	5.0	-2.6
3	0.8	3.3	2.2	0.82	-14.6	-0.7
4	3.7	3.8	4.0	0.10	-28.1	-2.6
5	2.2	3.4	2.9	-0.48	-6.1	12.1
6	0.5	1.4	1.0	-0.71	-7.6	-1.1
7	-1.9	-0.9	-1.6	-0.45	23.1	12.9
8	-1.9	-1.5	-1.8	0.12	10.4	-1.1
9	-1.3	-0.5	-0.9	0.34	2.8	-3.0
10	-0.2	0.8	0.3	0.33	-3.1	-1.1
11	1.1	1.1	1.2	0.12	-9.5	-1.8
12	1.1	1.1	1.1	-0.07	-2.1	5.0
13	0.8	0.9	0.8	-0.08	1.6	6.7
14	0.6	0.7				
15	0.5	0.5				

$$A_+ = (-5.9 \pm 0.2) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -2.4 \pm 0.6 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-6.8 \pm 1.5) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 9.5 \pm 2.6 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.6 \pm 0.1$$

$$C = 0.7 \pm 0.8 \text{ s}^{-1}$$

ホウ vs シナ垂直ぶつづつ2

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	7.0	7.0				
2	7.0	7.0	7.0	0.04	1.5	47.2
3	6.8	6.9	7.0	-0.25	-18.8	27.5
4	3.7	6.0	5.1	-1.02	-26.6	7.2
5	-0.8	1.8	0.5	-1.40	4.5	7.5
6	-4.2	-2.6	-3.7	-0.82	29.5	5.1
7	-4.7	-4.2	-4.8	0.21	31.7	0.5
8	-3.2	-1.3	-2.4	1.03	17.0	1.0
9	0.9	2.1	1.7	0.98	-19.9	-8.8
10	3.3	3.8	3.7	0.27	-22.3	2.3
11	3.0	3.6	3.4	-0.38	-16.0	6.6
12	0.8	2.0	1.4	-0.72	-4.1	5.2
13	-1.4	-0.4	-1.1	-0.55	13.9	7.0
14	-1.9	-1.9	-2.1	-0.04	16.5	2.9
15	-1.6	-1.0	-1.3	0.33	5.0	-3.8
16	-0.4	0.3	-0.1	0.39	-1.2	-1.6
17	0.9	1.1	1.1	0.20	-10.1	-2.8
18	1.2	1.2	1.2	-0.04	-3.8	4.3
19	0.9	1.0	0.9	-0.10	-0.2	5.9
20	0.6	0.6				
21	0.5	0.5				

$$A_+ = (-6.8 \pm 0.6) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -2 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-6.3 \pm 0.2) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 5.6 \pm 0.5 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.38 \pm 0.08$$

$$C = 2.4 \pm 0.7 \text{ s}^{-1}$$

ホウ vs シナ垂直ぶつぷつ 3

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	-4.8	-4.8				
2	-4.8	-4.8	-4.9	0.02	3.0	-27.0
3	-4.7	-4.1	-4.6	0.36	17.2	-10.9
4	-3.6	-1.0	-2.4	0.86	12.0	-3.1
5	-0.4	1.9	0.9	0.84	-13.2	-7.5
6	2.5	2.8	2.9	0.22	-23.1	-5.3
7	2.0	2.7	2.4	-0.27	-6.0	8.8
8	0.8	1.6	1.3	-0.46	-5.8	2.0
9	-0.8	0.1	-0.5	-0.36	11.8	8.7
10	-1.0	-1.0	-1.0	-0.01	9.0	2.6
11	-0.8	-0.4	-0.6	0.15	0.7	-3.2
12	-0.3	0.0	-0.1	0.14	-1.1	-1.8
13	0.2	0.3				
14	0.3	0.3				

$$A_+ = (-6.8 \pm 0.6) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -4 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-6 \pm 2) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 5 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.5 \pm 0.1$$

$$C = 0 \pm 1 \text{ s}^{-1}$$



ホウ vs シナ垂直ぶつぷつ4

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	7.0	7.0				
2	7.0	7.0	7.0	0.02	1.0	49.7
3	6.8	6.9	7.0	-0.12	-9.6	39.2
4	4.2	6.8	5.9	-1.03	-44.3	-2.7
5	-0.8	1.7	0.3	-1.54	14.4	16.5
6	-4.3	-2.7	-3.8	-0.80	29.3	2.6
7	-4.8	-4.2	-4.8	0.23	31.9	-1.8
8	-3.1	-1.4	-2.4	1.02	15.0	-1.9
9	0.8	2.0	1.6	0.99	-16.6	-5.5
10	3.4	3.8	3.8	0.29	-24.8	2.2
11	3.0	3.7	3.5	-0.35	-13.4	11.1
12	1.2	2.0	1.7	-0.73	-9.2	2.6
13	-1.4	-0.4	-1.1	-0.59	17.4	9.7
14	-1.9	-1.9	-2.1	-0.04	15.4	1.0
15	-1.5	-1.1	-1.4	0.33	6.1	-3.6
16	-0.4	0.2	0.0	0.39	-2.3	-2.6
17	0.9	1.1	1.1	0.20	-8.7	-1.2
18	1.2	1.2	1.3	-0.03	-5.1	3.8
19	0.9	0.9	0.9	-0.11	0.5	6.9
20	0.6	0.6				
21	0.4	0.4				

$$A_+ = (-6.8 \pm 0.4) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -2.0 \pm 0.9 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-7.3 \pm 0.8) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 6 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.4 \pm 0.1$$

$$C = 0.2 \pm 0.6 \text{ s}^{-1}$$

ホウ vs シナ平行ぶつぷつ 1

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	-5.0	-5.0				
2	-5.0	-5.0	-5.0	0.06	2.9	-25.0
3	-4.8	-4.2	-4.7	0.45	17.9	-8.3
4	-3.6	-1.2	-2.5	0.85	8.8	-5.1
5	-0.7	1.8	0.6	0.81	-5.6	-2.2
6	2.5	3.2	3.1	0.27	-26.1	-8.8
7	2.4	3.1	2.9	-0.29	-11.4	4.5
8	0.7	2.0	1.4	-0.51	-3.7	4.0
9	-0.9	0.1	-0.5	-0.36	10.5	7.6
10	-1.2	-1.2	-1.3	-0.06	10.3	2.9
11	-1.1	-1.0	-1.0	0.10	0.5	-5.2
12	-0.7	-0.6	-0.7	0.12	0.2	-3.5
13	-0.4	-0.2				
14	-0.3	-0.3				

$$A_+ = (-5.5 \pm 0.5) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -5 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-5.6 \pm 0.8) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 5 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.52 \pm 0.09$$

$$C = 0.7 \pm 0.8$$

ホウ vs シナ平行ぶつぷつ 2

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	5.6	5.6				
2	5.6	5.6	5.6	0.01	1.2	31.4
3	5.5	5.5	5.6	-0.17	-13.4	17.3
4	3.7	4.9	4.3	-0.55	-3.0	20.4
5	1.3	3.4	2.6	-0.99	-26.0	-11.8
6	-2.7	-0.3	-1.7	-0.84	24.0	14.5
7	-3.5	-3.2	-3.6	-0.15	22.6	3.2
8	-3.4	-2.4	-3.0	0.42	12.1	-4.3
9	-2.0	-0.2	-1.2	0.63	4.2	-2.1
10	0.5	1.5	1.2	0.39	-16.1	-9.8
11	1.7	1.7	1.8	0.01	-11.0	-1.1
12	1.0	1.5	1.3	-0.19	-1.3	5.7
13	0.4	0.8	0.6	-0.20	-0.1	3.2
14	-0.2	0.1	-0.1	-0.11	5.4	4.9
15	-0.2	-0.2				
16	-0.2	-0.2				

$$A_+ = (-6 \pm 1) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -4 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-5 \pm 2) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 6 \pm 5 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.5 \pm 0.3$$

$$C = 1 \pm 1 \text{ s}^{-1}$$

コルク vs シナ

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	7.2	7.2				
2	7.2	7.2	7.2	0.00	-2.4	73.8
3	6.0	7.1	6.9	-0.63	-34.5	38.6
4	1.3	4.4	3.0	-1.49	-15.7	16.4
5	-3.9	-0.3	-2.4	-1.15	35.5	9.6
6	-4.2	-3.3	-4.2	0.20	44.1	-0.3
7	-2.9	0.4	-1.3	1.06	6.8	-7.3
8	1.3	2.7	2.3	0.68	-28.7	-4.5
9	2.5	2.9	2.9	-0.20	-23.4	7.6
10	0.4	1.9	1.1	-0.55	3.0	14.9
11	-0.6	0.0	-0.4	-0.26	13.8	9.5
12	-0.6	-0.4	-0.5	0.05	4.0	-1.5
13	-0.3	-0.2	-0.2	0.07	-2.3	-4.5
14	-0.1	-0.1				
15	-0.1	-0.1				

$$A_+ = (-11.1 \pm 0.6) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -4 + 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-10.0 \pm 0.9) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 11 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.8 \pm 0.1$$

$$C = 1 \pm 1 \text{ s}^{-1}$$

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	-4.2	-4.2				
2	-4.2	-4.2	-4.3	0.06	6.4	-32.5
3	-4.1	-2.8	-3.6	0.53	21.2	-11.8
4	-2.2	0.7	-0.8	1.00	6.0	-1.2
5	2.0	2.7	2.6	0.57	-31.3	-7.2
6	2.5	2.7	2.8	-0.30	-19.7	6.0
7	0.2	1.7	0.9	-0.52	6.0	14.3
8	-0.6	0.0	-0.4	-0.23	11.0	7.2
9	-0.6	-0.5	-0.6	0.02	3.9	-1.6
10	-0.5	-0.3				
11	-0.3	-0.3				

$$A_+ = (-8.5 \pm 1.3) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -5 + 3 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-10 \pm 3) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 10 \pm 5 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.8 \pm 0.3$$

$$C = 2 \pm 2 \text{ s}^{-1}$$

チーク vs シナ垂直ぶつぷつ 1

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	6.7	6.7				
2	6.7	6.7	6.7	0.00	-0.2	40.7
3	6.6	6.6	6.6	0.00	-0.1	40.5
4	6.2	6.6	6.5	-0.24	-14.1	25.9
5	4.0	5.5	4.9	-0.76	-17.1	13.0
6	0.3	2.5	1.5	-1.31	-14.5	-5.1
7	-3.9	-2.0	-3.3	-0.93	37.1	16.7
8	-4.2	-3.7	-4.3	0.25	32.5	6.2
9	-2.7	-0.9	-1.8	0.88	4.7	-6.5
10	0.1	2.1	1.2	0.81	-8.4	-1.2
11	3.0	3.1	3.3	0.24	-25.8	-5.6
12	2.2	3.1	2.7	-0.35	-9.0	7.6
13	0.4	1.9	1.1	-0.51	-0.6	6.4
14	0.7	-1.6	-0.5	-0.44	4.6	1.4
15	-1.5	-1.5	-1.7	-0.09	16.3	6.0
16	-1.3	-0.9	-1.1	0.23	2.6	-4.3
17	-0.6	0.1	-0.3	0.27	0.1	-1.6
18	0.5	0.5	0.6	0.12	-9.2	-5.6
19	0.5	0.5				
20	0.5	0.5				

$$A_+ = (-7.2 \pm 0.6) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -3 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-5 \pm 1) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 7 \pm 4 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.5 \pm 0.2$$

$$C = 1.0 \pm 0.8 \text{ s}^{-1}$$

チーク vs シナ垂直ぶつぷつ2

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	-5.1	-5.1		0.00		
2	-5.1	-5.0	-5.2	0.16	12.6	-21.4
3	-4.5	-3.0	-3.9	0.69	18.7	-7.1
4	-2.0	0.5	-0.7	1.03	1.6	-3.3
5	1.7	3.1	2.6	0.69	-22.0	-4.9
6	3.4	3.5	3.6	-0.02	-20.1	3.6
7	1.9	2.9	2.5	-0.57	-12.1	4.4
8	-0.6	0.9	0.1	-0.67	5.8	6.5
9	-1.9	-1.2	-1.7	-0.30	15.9	4.7
10	-1.9	-1.6	-1.9	0.13	9.8	-2.3
11	-1.3	-0.5	-0.9	0.38	4.8	-1.4
12	0.3	0.5	0.5	0.27	-11.2	-8.0
13	0.7	0.7	0.8	0.02	-3.2	1.8
14	0.7	0.7	0.7	-0.02	0.3	4.9
15	0.7	0.7		-0.02		
16	0.6	0.6				

$$A_+ = (-6.3 \pm 0.7) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -4 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-6.8 \pm 0.2) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 5.1 \pm 0.5 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.44 \pm 0.08$$

$$C = 0.8 \pm 0.7 \text{ s}^{-1}$$

チーク vs シナ垂直

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	6.8	6.8				
2	6.8	6.8	6.8	0.01	-0.9	41.3
3	6.1	6.8	6.6	-0.38	-22.2	19.1
4	2.6	5.3	4.2	-1.14	-22.4	3.4
5	-2.1	1.0	-0.7	-1.30	13.4	9.2
6	-4.7	-2.9	-4.1	-0.61	27.1	1.9
7	-4.7	-3.8	-4.6	0.35	30.2	1.8
8	-3.1	-0.4	-1.9	1.04	10.7	-0.9
9	0.6	3.1	2.0	1.03	-11.3	1.0
10	4.2	4.3	4.6	0.21	-37.5	-8.8
11	2.3	4.1	3.3	-0.65	-12.9	7.7
12	-0.6	1.8	0.6	-0.86	0.2	4.0
13	-2.7	-1.1	-2.1	-0.55	18.1	5.2
14	-2.8	-2.5	-2.9	0.11	20.6	2.8
15	-2.2	-0.5	-1.5	0.58	7.8	-1.2
16	-0.1	1.6	0.8	0.63	-5.4	-0.5
17	2.2	2.3	2.5	0.13	-24.0	-8.6
18	1.6	1.7	1.6	-0.26	0.8	11.0
19	0.2	1.4	0.9	-0.33	-5.1	0.3
20	-0.8	0.0	-0.5	-0.31	6.7	3.9
21	-1.0	-1.0	-1.1	-0.02	9.9	3.3
22	-0.8	-0.4	-0.6	0.17	1.5	-2.4
23	-0.3	0.2	0.0	0.16	-1.9	-2.1
24	0.3	0.5	0.4	0.08	-2.8	-0.4
25	0.5	0.5				
26	0.5	0.5				

$$A_+ = (-7.3 \pm 0.3) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -1.9 \pm 0.8 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-5.1 \pm 0.5) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 5 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.37 \pm 0.08$$

$$C = 0.4 \pm 0.5 \text{ s}^{-1}$$

コクタン vs シナ垂直 1

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	7.0	7.0				
2	7.0	7.0	7.0	-0.01	-1.1	29.4
3	6.8	7.0	6.9	-0.08	-3.4	26.4
4	5.6	6.6	6.4	-0.58	-26.3	1.3
5	2.0	4.0	3.1	-1.09	-3.5	9.7
6	-1.8	0.7	-0.6	-1.01	7.8	5.2
7	-4.0	-2.5	-3.4	-0.53	21.0	6.1
8	-4.0	-3.8	-4.0	0.09	15.7	-1.8
9	-3.5	-2.2	-2.9	0.53	10.8	-1.9
10	-1.6	0.2	-0.7	0.67	-2.5	-5.4
11	0.6	2.1	1.4	0.56	-4.2	1.7
12	2.6	3.0	2.9	0.23	-15.5	-2.8
13	2.7	2.9	2.9	-0.14	-6.2	6.2
14	1.7	2.4	2.1	-0.31	-4.2	4.9
15	0.4	1.4	0.9	-0.36	1.5	5.4
16	-0.5	0.3	-0.2	-0.22	6.4	5.6
17	-0.6	-0.5	-0.6	-0.05	4.0	1.5
18	-0.5	-0.5	-0.5	0.02	0.3	-2.0
19	-0.5	-0.3	-0.4	0.05	1.4	-0.5
20	-0.3	-0.2	-0.2	0.05	-1.5	-2.3
21	-0.1	-0.1	-0.1	0.01	-0.7	-1.2
22	-0.1	-0.1	-0.1	0.00	-0.1	-0.6
23	-0.1	-0.1				
24	-0.1	-0.1				

$$A_+ = (-4.2 \pm 0.3) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -1.6 \pm 0.6 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-4.4 \pm 0.3) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 5.2 \pm 0.9 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.35 \pm 0.06$$

$$C = 0.4 \pm 0.4 \text{ s}^{-1}$$



コクタン vs シナ垂直 2

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	-4.4	-4.4				
2	-4.4	-4.4	-4.4	-0.02	-0.9	-15.7
3	-4.4	-4.4	-4.5	0.04	4.6	-10.4
4	-4.2	-3.5	-4.0	0.44	18.8	5.3
5	-2.0	-1.3	-1.6	0.65	-6.4	-11.8
6	-0.8	1.3	0.2	0.67	8.0	8.5
7	2.2	3.0	2.7	0.52	-17.4	-8.2
8	3.4	3.4	3.5	0.01	-12.6	-0.9
9	2.5	3.1	2.9	-0.29	-5.3	4.3
10	1.2	2.1	1.7	-0.40	-1.4	4.2
11	-0.2	0.8	0.3	-0.40	1.1	2.1
12	-1.1	-0.6	-1.0	-0.24	8.7	5.5
13	-1.2	-1.2	-1.3	0.00	5.5	1.2
14	-1.1	-0.8	-1.0	0.14	2.7	-0.6
15	-0.6	-0.2	-0.4	0.17	-1.0	-2.3
16	-0.1	0.2	0.1	0.13	-1.4	-1.2
17	0.4	0.4				
18	0.4	0.4				

$$A_+ = (-3.2 \pm 0.9) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -2 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-3.5 \pm 0.6) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 4 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.3 \pm 0.1$$

$$C = 0.5 \pm 0.7 \text{ s}^{-1}$$

コクタン vs シナななめ 1

n	$x_l$ [cm]	$x_r$ [cm]	$x$ [cm]	$v$ [m/s]	$a$ [ms <sup>-2</sup> ]	$a - Ax$ [ms <sup>-2</sup> ]
1	7.0	7.0		0.00		
2	7.0	7.0	6.9	0.01	0.7	29.2
3	6.7	6.9	6.9	-0.17	-11.3	17.1
4	4.8	6.3	5.7	-0.69	-19.3	4.0
5	1.3	3.5	2.4	-1.05	-2.1	7.9
6	-2.1	0.2	-1.1	-0.98	6.3	2.0
7	-4.2	-3.1	-3.8	-0.51	21.2	5.5
8	-4.4	-4.0	-4.4	0.16	18.7	0.8
9	-3.7	-1.8	-2.9	0.67	11.9	0.2
10	-1.0	0.8	-0.1	0.88	0.1	-0.2
11	2.0	3.1	2.7	0.60	-16.2	-5.1
12	3.6	3.8	3.8	0.12	-12.6	3.0
13	3.2	3.7	3.5	-0.25	-9.4	5.0
14	1.6	2.8	2.2	-0.44	-1.6	7.5
15	0.2	1.2	0.7	-0.50	-2.2	0.8
16	-1.3	-0.5	-1.0	-0.37	9.7	5.7
17	-1.6	-1.5	-1.7	-0.03	10.4	3.6
18	-1.4	-1.0	-1.2	0.20	3.5	-1.6
19	-0.7	-0.1	-0.4	0.30	2.6	0.9
20	0.0	1.2	0.7	0.23	-6.9	-4.2
21	1.0	1.0	1.0	0.07	-2.6	1.7
22	1.1	1.1	1.1	0.00	-1.8	2.9
23	1.1	1.1	1.0	-0.03	0.2	4.4
24	1.0	1.0	1.0	-0.04	-0.9	3.0
25	0.8	0.8	0.8	-0.04	1.1	4.2
26	0.7	0.7		-0.02		
27	0.7	0.7				

$$A_+ = (-4.2 \pm 0.4) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -0.5 \pm 0.9 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-4.0 \pm 0.2) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 4.3 \pm 0.6 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.24 \pm 0.06$$

$$C = 0.2 \pm 0.3 \text{ s}^{-1}$$

コクタン vs シナななめ2

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	-4.2	-4.2		0.00		
2	-4.2	-4.2	-4.2	0.02	2.0	-13.6
3	-4.1	-3.7	-4.0	0.22	10.2	-4.6
4	-3.2	-2.1	-2.7	0.52	7.6	-2.3
5	-1.4	0.3	-0.6	0.69	2.3	0.1
6	1.0	2.3	1.8	0.58	-9.0	-2.6
7	2.8	3.3	3.1	0.22	-12.3	-0.7
8	3.0	3.2	3.2	-0.15	-9.7	2.1
9	1.7	2.6	2.2	-0.38	-3.9	4.3
10	0.3	1.3	0.8	-0.45	-0.6	2.4
11	-1.0	-0.2	-0.7	-0.31	8.6	6.2
12	-1.2	-1.1	-1.2	-0.04	7.4	2.9
13	-1.1	-0.8	-1.0	0.12	2.2	-1.5
14	-0.7	-0.3	-0.5	0.17	1.0	-0.9
15	-0.1	0.3	0.1	0.18	-0.1	0.2
16	0.6	0.6	0.7	0.09	-5.4	-2.9
17	0.7	0.7	0.7	0.00	-0.1	2.4
18	0.7	0.7				
19	0.7	0.7				

$$A_+ = (-3.3 \pm 0.2) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -1.6 \pm 0.5 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-4.0 \pm 0.4) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 3.7 \pm 0.8 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.27 \pm 0.05$$

$$C = 0.5 \pm 0.4 \text{ s}^{-1}$$

ホウ vs ホウななめ 1

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	8.0	8.0				
2	8.0	8.0	8.1	-0.12	-11.8	39.9
3	5.7	7.6	7.0	-0.82	-29.7	14.6
4	0.2	4.8	2.6	-1.60	-16.3	0.5
5	-4.4	-2.2	-3.3	-1.90	-0.9	-22.0
6	-8.5	-8.5	-9.3	-0.53	82.0	22.9
7	-6.9	-5.8	-6.7	1.41	32.7	-9.6
8	-2.2	0.8	-0.5	1.68	-16.1	-19.6
9	2.1	5.2	3.9	0.94	-27.7	-2.6
10	4.7	5.5	5.5	-0.17	-38.3	-3.5
11	1.4	4.1	2.9	-1.15	-19.6	-1.0
12	-3.2	0.2	-1.7	-1.16	18.6	7.8
13	-4.5	-3.6	-4.4	-0.28	33.6	5.7
14	-4.1	-2.8	-3.5	0.45	9.8	-12.7
15	-2.5	-0.4	-1.6	0.88	15.7	5.6
16	0.9	2.7	2.0	0.81	-20.1	-7.4
17	3.1	3.2	3.5	-0.10	-33.6	-11.5
18	0.2	2.7	1.4	-0.63	2.5	11.5
19	-1.0	0.2	-0.4	-0.52	3.5	0.9
20	-1.9	-1.6	-1.9	-0.24	13.3	1.3
21	-2.0	-1.8	-1.9	0.14	8.9	-3.5
22	-1.5	-0.6	-1.1	0.33	2.8	-4.0
23	-0.2	0.3	0.1	0.29	-5.4	-4.6
24	0.7	0.7	0.8	0.07	-7.2	-2.3
25	0.6	0.7	0.6	-0.07	-1.2	2.9
26	0.4	0.4	0.4	-0.07	0.8	3.3
27	0.2	0.2	0.2	-0.03	1.7	2.9
28	0.2	0.2		-0.01		
29	0.2	0.2				

$$A_+ = (-5.8 \pm 0.8) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -6 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-6.9 \pm 0.7) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 3 \pm 3 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.41 \pm 0.18$$

$$C = -3 \pm 2 \text{ s}^{-1}$$

ホウ vs ホウななめ 2

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	-3.8	-3.8				
2	-3.8	-3.8	-3.8	-0.01	-0.4	-23.3
3	-3.8	-3.7	-3.8	0.13	9.1	-13.8
4	-3.0	-2.4	-2.8	0.53	14.1	-2.9
5	-1.5	0.7	-0.4	0.75	-0.8	-3.2
6	1.4	2.2	1.9	0.45	-17.3	-5.6
7	2.2	2.5	2.5	-0.05	-12.0	2.8
8	1.5	1.6	1.7	-0.45	-11.9	-1.7
9	-0.7	0.2	-0.3	-0.52	7.5	5.4
10	-1.6	-1.3	-1.6	-0.16	14.0	4.4
11	-1.5	-1.2	-1.4	0.12	2.5	-5.8
12	-0.9	-0.8	-0.9	0.25	5.3	0.0
13	0.1	0.2	0.2	0.20	-8.0	-6.9
14	0.4	0.4	0.4	0.02	-3.0	-0.4
15	0.4	0.4				
16	0.4	0.4				

$$A_+ = (-4.9 \pm 0.9) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -4 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-7.1 \pm 0.9) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 3 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.4 \pm 0.1$$

$$C = -6 \pm 3 \text{ s}^{-1}$$

ホウ vs ホウ垂直 1

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	8.2	8.2				
2	8.2	8.2	8.3	-0.16	-13.6	48.3
3	6.4	7.4	7.0	-0.57	-10.7	41.6
4	0.0	9.0	4.5	-0.74	-0.6	32.9
5	0.6	1.9	2.0	-2.04	-74.5	-59.9
6	-7.0	-7.0	-8.2	-1.14	127.8	66.5
7	-6.4	-3.4	-5.1	1.34	17.6	-20.3
8	-1.8	1.5	-0.1	1.53	-5.2	-6.0
9	3.5	4.6	4.4	0.78	-38.7	-5.8
10	4.2	5.0	4.9	-0.34	-27.5	8.9
11	1.2	3.5	2.4	-0.91	-6.6	11.3
12	-1.9	0.4	-0.8	-0.91	6.5	0.4
13	-3.1	-3.1	-3.3	-0.35	26.7	1.8
14	-3.1	-2.6	-3.0	0.46	21.1	-1.6
15	-1.5	0.4	-0.5	0.71	-5.9	-9.7
16	0.8	1.9	1.4	0.46	-9.2	1.5
17	2.2	2.2	2.4	0.03	-16.2	1.6
18	1.2	1.9	1.7	-0.48	-13.9	-1.5
19	-0.5	-0.2	-0.5	-0.32	23.2	19.1
20	-0.4	-0.4	-0.4	0.05	-1.4	-4.1
21	-0.3	-0.3	-0.3	0.01	-0.4	-2.8
22	-0.3	-0.3	-0.3	0.00	-0.6	-2.8
23	-0.3	-0.3	-0.3	-0.01	0.2	-2.2
24	-0.3	-0.3		0.00		
25	-0.2	-0.2				

$$A_+ = (-6.0 \pm 0.7) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -5 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-9 \pm 2) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 10 \pm 9 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.8 \pm 0.5$$

$$C = -3 \pm 6 \text{ s}^{-1}$$

ホウ vs ホウ垂直 2

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	-3.6	-3.6				
2	-3.6	-3.6	-3.6	-0.01	-0.5	-18.5
3	-3.6	-3.6	-3.6	0.04	3.7	-14.4
4	-3.5	-2.5	-3.2	0.45	20.3	4.2
5	-1.8	0.4	-0.7	0.70	-5.5	-8.9
6	0.4	2.1	1.3	0.57	-2.4	4.0
7	2.7	2.7	2.9	0.09	-25.7	-10.9
8	1.5	2.2	1.9	-0.43	-4.9	4.7
9	0.0	0.7	0.3	-0.39	6.6	8.2
10	-0.8	-0.3	-0.6	-0.17	6.6	3.6
11	-0.8	-0.8	-0.8	-0.01	3.1	-1.0
12	-0.7	-0.6	-0.7	0.09	2.5	-1.0
13	-0.3	-0.3	-0.3	0.12	-0.6	-2.0
14	0.0	0.0	0.1	0.05	-3.6	-3.3
15	0.0	0.0	0.0	-0.01	0.4	0.5
16	0.0	0.0		0.00		
17	0.0	0.0				

$$A_+ = (-7 \pm 1) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -3 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-3 \pm 2) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 3 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.3 \pm 0.1$$

$$C = -7 \pm 5 \text{ s}^{-1}$$

チーク vs ホウ垂直ぶつぶつ 1

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	7.9	7.9				
2	7.9	7.9	8.0	-0.04	-4.4	52.3
3	6.9	7.7	7.5	-0.43	-19.4	33.7
4	2.7	6.3	4.9	-1.44	-40.3	-5.5
5	-3.3	-0.2	-1.9	-1.98	9.0	-4.2
6	-8.2	-6.0	-7.6	-0.98	50.4	-3.7
7	-8.4	-6.6	-8.0	0.72	50.2	-6.8
8	-3.6	-2.4	-3.1	1.77	11.6	-10.5
9	1.2	4.2	3.0	1.36	-35.4	-13.7
10	4.9	5.3	5.5	0.13	-37.3	1.8
11	2.7	4.8	3.9	-0.88	-22.9	5.3
12	-1.7	1.3	0.0	-1.57	-18.2	-18.4
13	-6.1	-4.6	-5.9	-1.01	51.9	10.1
14	-6.2	-5.3	-6.3	0.76	51.9	7.2
15	-2.6	-0.3	-1.2	1.28	-20.6	-29.5
16	0.4	2.8	1.7	0.76	-10.0	2.2
17	3.3	3.4	3.6	0.12	-28.0	-2.2
18	1.8	3.1	2.5	-0.59	-14.3	3.9
19	-0.7	0.8	0.0	-0.67	9.3	9.0
20	-2.1	-1.1	-1.7	-0.32	11.2	-0.7
21	-2.2	-1.8	-2.1	0.12	15.3	0.2
22	-1.4	-0.4	-0.9	0.43	2.7	-4.0
23	0.0	0.9	0.5	0.34	-7.7	-3.9
24	1.1	1.1	1.2	0.03	-10.3	-1.7
25	0.6	1.0	0.8	-0.12	0.9	6.6
26	0.3	0.6	0.5	-0.13	-1.5	1.8
27	-0.1	0.1		-0.15		
28	-0.3	-0.3				

$$A_+ = (-7.1 \pm 0.8) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -5 \pm 3 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-7.2 \pm 0.7) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 0 \pm 3 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.3 \pm 0.2$$

$$C = -3 \pm 2 \text{ s}^{-1}$$



チーク vs ホウ垂直ぶつぷつ 2

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	-3.8	-3.8				
2	-3.7	-3.7	-3.7	0.02	-1.9	-25.2
3	-3.7	-3.6	-3.7	-0.03	16.5	-7.1
4	-3.0	-1.2	-2.1	0.49	7.7	-5.6
5	-0.7	1.3	0.3	0.75	-3.3	-1.2
6	2.1	2.5	2.4	0.63	-21.2	-6.2
7	2.0	2.5	2.3	-0.04	-9.9	4.3
8	0.2	1.8	1.0	-0.38	-6.1	0.4
9	-1.3	-0.2	-0.8	-0.57	10.5	5.4
10	-1.5	-1.5	-1.6	-0.23	13.4	3.5
11	-1.3	-0.6	-1.0	0.20	0.6	-5.5
12	-0.6	0.2	-0.2	0.23	0.4	-1.0
13	0.4	0.6	0.5	0.24	-5.9	-2.5
14	0.7	0.7	0.7	0.05	-3.7	0.7
15	0.5	0.5	0.5	-0.07	1.3	4.3
16	0.4	0.4				
17	0.3	0.3				

$$A_+ = (-6.0 \pm 0.9) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -3 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-6.6 \pm 0.7) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 4 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.34 \pm 0.08$$

$$C = -8 \pm 2 \text{ s}^{-1}$$

チーク vs ホウ垂直

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	7.9	7.9				
2	7.9	7.9	7.9	-0.04	-5.2	57.8
3	6.4	7.8	7.3	-0.49	-22.4	35.9
4	2.5	5.1	4.4	-1.97	-64.1	-29.0
5	-5.1	-4.0	-5.2	-1.97	64.4	23.5
6	-8.1	-7.1	-7.9	-0.33	32.2	-30.9
7	-7.6	-5.8	-7.3	1.22	60.2	2.1
8	-2.0	0.9	-0.3	1.83	-24.3	-26.9
9	2.7	5.2	4.2	1.03	-22.6	10.4
10	5.8	5.9	6.3	-0.04	-41.0	8.6
11	2.5	5.0	3.9	-1.07	-20.1	11.1
12	-2.1	0.8	-0.5	-1.69	-16.1	-20.2
13	-6.6	-5.4	-6.6	-0.94	60.5	8.1
14	-6.4	-5.2	-6.3	0.97	51.7	1.4
15	-2.1	0.4	-0.7	1.50	-19.8	-25.0
16	1.9	3.7	3.0	0.81	-20.4	3.5
17	4.2	4.3	4.5	-0.05	-30.9	5.2
18	1.9	3.4	2.8	-0.78	-12.3	9.8
19	-0.9	0.5	-0.3	-0.84	8.3	6.0
20	-2.7	-1.9	-2.5	-0.33	21.9	2.0
21	-2.6	-1.8	-2.4	0.34	18.1	-1.0
22	-0.9	0.2	-0.4	0.74	5.2	2.2
23	1.7	2.3	2.2	0.51	-18.4	-1.0
24	2.7	2.7	2.8	-0.06	-15.4	7.1
25	1.4	2.2	1.8	-0.43	-6.6	8.1
26	-0.1	0.5	0.1	-0.44	6.0	7.1
27	-1.1	-0.6	-0.9	-0.18	9.2	1.8
28	-1.0	-0.8	-1.0	0.15	10.6	2.4
29	-0.3	0.2	0.0	0.31	-1.0	-1.1
30	0.6	1.1	0.9	0.22	-4.3	2.9
31	1.3	1.3	1.4	-0.01	-9.4	1.6
32	0.7	1.1	0.9	-0.14	2.1	9.0
33	0.5	0.7	0.6	-0.08	1.2	5.7
34	0.4	0.4				
35	0.3	0.3				

$$A_+ = (-7.6 \pm 0.3) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -2 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-8.3 \pm 0.4) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 8 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.28 \pm 0.09$$

$$C = -2 \pm 3 \text{ s}^{-1}$$

サクラ vs ホウ水平

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	6.9	6.9				
2	6.9	6.9	6.9	0.07	3.3	46.8
3	6.7	6.9	7.1	-0.43	-33.2	11.9
4	2.6	5.0	3.9	-1.22	-12.8	11.9
5	-2.2	1.1	-0.6	-1.30	7.9	3.9
6	-4.8	-3.2	-4.3	-0.64	30.9	3.5
7	-5.0	-3.9	-4.7	0.39	30.4	0.5
8	-3.2	-0.4	-1.9	1.09	11.1	-0.9
9	1.0	3.0	2.1	1.07	-12.4	1.0
10	4.3	4.6	4.8	0.19	-39.7	-9.2
11	2.4	4.0	3.3	-0.77	-17.0	4.1
12	-1.1	1.3	0.1	-0.96	5.7	6.0
13	-2.9	-2.0	-2.7	-0.52	20.3	3.5
14	-3.1	-2.9	-3.2	0.17	20.5	0.2
15	-2.1	-0.9	-1.6	0.71	11.2	1.1
16	0.3	1.9	1.2	0.68	-13.2	-5.5
17	2.2	2.7	2.7	0.14	-18.6	-1.8
18	1.7	2.4	2.1	-0.31	-8.2	5.3
19	0.0	1.4	0.7	-0.48	-2.1	2.5
20	-1.2	-0.4	-0.9	-0.33	11.4	5.6
21	-1.2	-1.2	-1.3	0.07	12.0	3.5
22	-0.8	-0.3	-0.5	0.25	-1.0	-4.3
23	0.0	0.4	0.2	0.23	-0.6	0.8
24	0.9	0.9	0.9	0.10	-6.9	-1.1
25	0.9	0.9	0.9	-0.02	-0.4	5.2
26	0.8	0.8	0.8	-0.05	-1.2	3.9
27	0.6	0.6	0.6	-0.03	2.2	5.9
28	0.6	0.6	0.6	0.00	-0.1	3.7
29	0.6	0.6	0.6	-0.01	-0.6	3.2
30	0.6	0.6				
31	0.5	0.5				

$$A_+ = (-7.1 \pm 0.4) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -1.0 \pm 0.9 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-5.6 \pm 0.2) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 4.8 \pm 0.6 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.29 \pm 0.05$$

$$C = -4 \pm 1 \text{ s}^{-1}$$

サクラ vs ホウ垂直 1

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	6.9	6.9				
2	6.9	6.9	6.9	0.03	1.2	46.4
3	6.7	6.8	7.0	-0.28	-20.1	25.6
4	4.1	5.4	4.9	-0.93	-18.6	13.6
5	-0.6	2.4	0.9	-1.27	-1.0	5.0
6	-4.0	-2.0	-3.2	-0.97	18.7	-1.9
7	-4.9	-4.7	-5.2	0.05	41.5	7.3
8	-3.5	-2.0	-2.9	0.98	13.9	-5.1
9	-0.5	2.2	0.9	1.09	-7.6	-1.7
10	3.3	4.0	3.9	0.47	-28.7	-3.1
11	3.1	4.2	3.9	-0.43	-24.9	0.5
12	0.1	2.2	1.2	-0.98	-7.4	0.6
13	-2.8	-1.2	-2.2	-0.70	24.1	9.5
14	-3.0	-3.0	-3.2	0.00	17.1	-3.7
15	-2.6	-1.7	-2.3	0.51	13.1	-1.8
16	-0.8	0.8	0.0	0.73	-0.4	-0.3
17	1.6	2.5	2.3	0.36	-21.2	-6.5
18	1.9	2.4	2.3	-0.21	-12.1	2.8
19	0.7	1.3	1.0	-0.44	-1.6	5.0
20	-0.6	-0.2	-0.4	-0.37	5.6	2.7
21	-1.2	-1.2	-1.3	-0.06	12.5	3.8
22	-0.9	-0.8	-0.9	0.16	1.1	-4.7
23	-0.4	-0.2	-0.3	0.20	1.0	-1.1
24	0.2	0.4	0.4	0.13	-4.9	-2.5
25	0.5	0.5	0.5	0.00	-2.8	0.6
26	0.4	0.4	0.4	-0.02	1.4	4.0
27	0.4	0.4	0.4	0.00	0.0	2.6
28	0.4	0.4				
29	0.4	0.4				

$$A_+ = (-7.1 \pm 0.4) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -2 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-6.0 \pm 0.6) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 4 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.28 \pm 0.09$$

$$C = -5 \pm 1 \text{ s}^{-1}$$

サクラ vs ホウ垂直 2

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	-4.6	-4.6				
2	-4.7	-4.7	-4.7	0.01	3.6	-30.1
3	-4.6	-4.0	-4.4	0.32	14.9	-16.6
4	-3.5	-1.3	-2.6	0.88	18.4	0.1
5	-0.2	2.3	1.2	0.94	-15.2	-6.8
6	2.7	3.6	3.3	0.32	-21.5	2.3
7	2.6	3.4	3.2	-0.40	-21.0	1.9
8	-0.2	1.9	0.9	-0.79	-2.3	3.9
9	-2.2	-1.0	-1.7	-0.56	15.7	3.4
10	-2.5	-2.5	-2.7	0.01	18.5	-0.6
11	-2.0	-1.2	-1.7	0.46	8.2	-3.7
12	-0.4	0.8	0.2	0.55	-3.4	-1.9
13	1.3	1.9	1.7	0.24	-14.7	-2.3
14	1.4	1.9	1.7	-0.19	-10.6	1.8
15	0.4	0.9	0.6	-0.33	2.2	6.6
16	-0.6	0.2	-0.3	-0.18	6.2	4.1
17	-0.5	-0.5	-0.6	-0.04	2.3	-1.7
18	-0.6	-0.5	-0.6	0.06	3.5	-0.6
19	-0.3	-0.2	-0.2	0.10	-0.9	-2.4
20	0.0	0.0				
21	0.1	0.1				

$$A_+ = (-7.1 \pm 0.5) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -1.8 \pm 0.9 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-7.1 \pm 0.7) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 3 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.24 \pm 0.07$$

$$C = -5 \pm 1 \text{ s}^{-1}$$

コクタン vs ホウ水平

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	7.1	7.1				
2	7.1	7.1	7.2	-0.12	-9.3	21.5
3	5.4	6.7	6.2	-0.49	-13.0	13.6
4	2.5	4.8	3.8	-1.02	-17.8	-1.4
5	-1.8	1.3	-0.4	-1.08	14.3	12.6
6	-4.6	-1.6	-3.1	-0.78	3.3	-10.1
7	-5.2	-5.0	-5.4	-0.16	33.7	10.4
8	-4.6	-3.5	-4.1	0.60	11.3	-6.6
9	-2.5	-0.7	-1.6	0.91	7.5	0.4
10	0.5	2.6	1.7	0.86	-10.8	-3.6
11	3.2	4.1	3.8	0.36	-18.6	-2.0
12	3.8	4.1	4.0	-0.13	-10.9	6.5
13	2.4	3.4	3.0	-0.49	-10.4	2.6
14	0.1	1.7	0.9	-0.70	-2.3	1.5
15	-2.1	-0.7	-1.5	-0.60	8.7	2.3
16	-2.9	-2.6	-2.9	-0.15	17.6	5.0
17	-2.6	-2.2	-2.5	0.28	8.2	-2.5
18	-1.6	-0.7	-1.2	0.43	0.9	-4.2
19	-0.2	0.7	0.3	0.48	1.9	3.1
20	1.7	1.8	1.9	0.24	-16.1	-8.0
21	1.8	1.8	1.8	-0.07	-2.0	5.9
22	1.3	1.7	1.5	-0.17	-4.6	2.0
23	0.7	0.8	0.7	-0.21	2.6	5.7
24	0.0	0.3	0.2	-0.17	-0.4	0.4
25	-0.4	-0.3	-0.4	-0.09	5.1	3.4
26	-0.4	-0.4	-0.4	0.02	1.3	-0.5
27	-0.3	-0.3	-0.3	0.03	-0.4	-1.8
28	-0.2	-0.2	-0.2	0.02	-0.3	-1.3
29	-0.2	-0.2	-0.2	0.01	-0.4	-1.3
30	-0.2	-0.2				
31	-0.2	-0.2				

$$A_+ = (-4.2 \pm 0.4) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -2.3 \pm 0.9 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-4.4 \pm 0.6) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 3 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.29 \pm 0.09$$

$$C = -3 \pm 2 \text{ s}^{-1}$$





コクタン vs ホウ垂直

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	7.2	7.2		0.00		
2	7.1	7.1	7.1	0.01	2.5	31.5
3	7.1	7.1	7.2	-0.09	-8.4	20.9
4	5.9	6.4	6.3	-0.55	-18.7	7.2
5	2.3	4.6	3.5	-1.00	-8.2	6.2
6	-1.6	1.4	-0.2	-1.06	5.0	4.3
7	-4.4	-2.0	-3.3	-0.80	10.2	-3.4
8	-5.1	-5.1	-5.3	-0.26	22.2	0.4
9	-5.7	-3.7	-5.0	0.61	29.6	9.3
10	-2.7	-0.4	-1.5	1.01	-5.8	-11.8
11	0.5	2.3	1.5	0.79	-7.1	-1.1
12	3.2	3.8	3.6	0.42	-15.2	-0.3
13	3.9	4.1	4.2	-0.15	-18.4	-1.3
14	2.1	3.3	2.8	-0.56	-6.3	5.0
15	-0.1	1.4	0.6	-0.62	2.4	4.9
16	-1.8	-0.6	-1.3	-0.53	3.3	-1.9
17	-2.6	-2.6	-2.8	-0.19	17.1	5.7
18	-2.4	-2.4	-2.5	0.20	5.7	-4.5
19	-1.7	-1.3	-1.6	0.43	8.2	1.8
20	-0.3	0.7	0.2	0.46	-6.2	-5.3
21	1.0	1.6	1.4	0.23	-7.1	-1.5
22	1.7	1.7	1.8	0.02	-5.7	1.6
23	1.3	1.6	1.5	-0.18	-6.1	0.2
24	0.7	0.7				
25	0.4	0.4				

$$A_+ = (-4.6 \pm 0.8) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -1 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-3.6 \pm 0.3) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 2 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.2 \pm 0.1$$

$$C = -4 \pm 2 \text{ s}^{-1}$$

カツラ vs ホウ垂直

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	6.9	6.9		0.00		
2	6.9	6.9	6.9	0.00	0.6	49.8
3	6.9	6.9	6.9	0.05	2.0	51.2
4	6.6	6.8	7.0	-0.43	-31.2	18.8
5	1.9	5.1	3.8	-1.52	-32.7	-5.1
6	-3.2	-1.3	-2.7	-1.38	40.9	21.8
7	-5.2	-4.1	-4.9	-0.23	26.9	-8.2
8	-4.6	-3.5	-4.2	0.54	19.4	-11.0
9	-2.4	-0.2	-1.5	1.23	21.2	10.4
10	2.2	3.9	3.4	0.97	-36.6	-11.9
11	4.0	4.5	4.5	-0.19	-31.6	0.9
12	1.1	3.2	2.3	-1.00	-16.4	0.2
13	-2.3	-0.6	-1.6	-0.93	20.3	8.4
14	-3.2	-3.2	-3.5	-0.13	26.9	1.8
15	-2.9	-1.8	-2.5	0.60	16.6	-1.5
16	-0.8	1.1	0.2	0.77	-6.7	-5.1
17	1.5	2.7	2.3	0.35	-18.1	-1.7
18	2.1	2.5	2.4	-0.22	-15.4	2.1
19	0.3	1.6	1.0	-0.53	-2.9	4.0
20	-1.1	-0.4	-0.8	-0.40	10.2	4.2
21	-1.5	-1.5	-1.6	-0.04	11.2	0.0
22	-1.3	-0.9	-1.1	0.26	6.6	-1.4
23	-0.2	0.2	0.0	0.27	-6.0	-5.8
24	0.4	0.7	0.6	0.11	-3.6	0.6
25	0.7	0.7	0.7	-0.02	-3.6	1.7
26	0.5	0.6	0.5	-0.04	1.8	5.5
27	0.5	0.5	0.5	-0.03	-0.7	2.7
28	0.4	0.4	0.4	-0.03	0.8	3.3
29	0.3	0.3				
30	0.3	0.3				

$$A_+ = (-9 \pm 1) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -2 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-7.6 \pm 0.7) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 3 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.2 \pm 0.1$$

$$C = -6 \pm 3 \text{ s}^{-1}$$

カツラ vs ホウ水平

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	6.9	6.9				
2	6.9	6.9	6.9	0.02	0.8	52.3
3	6.9	6.9	6.9	0.00	-2.2	49.5
4	5.9	6.9	6.7	-0.56	-31.0	18.8
5	1.6	4.4	3.2	-1.35	-15.7	7.9
6	-3.2	-0.3	-2.0	-1.34	16.9	2.3
7	-5.2	-4.4	-5.3	-0.26	46.9	7.6
8	-4.6	-2.4	-3.6	0.78	14.8	-12.3
9	-1.6	1.1	-0.4	1.26	13.2	10.3
10	3.1	4.5	4.2	0.76	-42.7	-11.2
11	3.6	4.5	4.3	-0.46	-29.2	3.3
12	0.3	2.5	1.4	-1.01	-3.7	6.8
13	-2.7	-0.8	-2.0	-0.76	18.8	4.1
14	-3.2	-3.0	-3.4	-0.01	25.0	0.0
15	-2.7	-1.3	-2.1	0.65	14.1	-1.6
16	-0.4	1.4	0.7	0.69	-11.6	-6.7
17	1.6	2.5	2.2	0.23	-15.3	1.2
18	1.7	2.3	2.2	-0.26	-13.8	2.3
19	0.0	1.2	0.6	-0.49	0.3	5.0
20	-1.1	-0.5	-0.9	-0.30	10.5	3.8
21	-1.2	-1.2	-1.3	0.04	9.7	-0.1
22	-0.9	-0.5	-0.7	0.23	1.9	-3.3
23	-0.1	0.3	0.1	0.19	-4.1	-3.2
24	0.5	0.5	0.5	0.05	-4.3	-0.3
25	0.5	0.5				
26	0.5	0.5				

$$A_+ = (-8 \pm 1) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -3 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-7.4 \pm 0.3) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 4.3 \pm 0.9 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.4 \pm 0.1$$

$$C = -5 \pm 2 \text{ s}^{-1}$$

コルク vs ホウ

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	6.7	6.7				
2	6.0	6.7	6.6	-0.52	-33.1	41.3
3	1.1	4.7	3.2	-1.54	-26.2	9.0
4	-3.4	-1.7	-3.0	-1.21	46.0	12.1
5	-4.0	-4.0	-4.4	0.21	37.4	-11.8
6	-3.0	-0.5	-1.8	1.07	13.6	-7.1
7	0.9	2.8	2.2	0.76	-31.4	-7.3
8	2.4	2.9	2.9	-0.21	-26.0	6.5
9	0.0	1.9	0.9	-0.67	-0.9	9.5
10	-1.3	-0.7	-1.2	-0.37	18.1	4.9
11	-1.3	-1.3	-1.4	0.12	10.8	-5.0
12	-0.7	-0.4	-0.5	0.27	-1.9	-7.6
13	0.1	0.2				
14	0.3	0.3				

$$A_+ = (-10.6 \pm 0.5) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -7 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-11.8 \pm 0.8) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 8 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.8 \pm 0.1$$

$$C = -11 \pm 2 \text{ s}^{-1}$$

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	-4.4	-4.4				
2	-4.3	-4.1	-4.3	0.01	20.6	-8.3
3	-3.3	-0.8	-2.1	0.66	14.7	0.5
4	0.4	2.4	1.5	1.12	-21.6	-11.4
5	2.7	2.9	2.9	0.43	-30.8	-11.1
6	0.2	2.2	1.2	-0.55	-1.1	6.8
7	-1.1	-0.3	-0.8	-0.60	14.6	9.3
8	-1.3	-1.1	-1.3	-0.14	10.8	2.3
9	-0.8	-0.4				
10	0.1	0.2				

$$A_+ = (-8 \pm 1) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -8 \pm 3 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-6 \pm 3) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 6 \pm 3 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.7 \pm 0.2$$

$$C = -10 \pm 4 \text{ s}^{-1}$$

ウェンジュ vs ホウ垂直ぶつぶつ

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	6.1	6.1				
2	6.1	6.1	6.1	0.03	0.5	37.9
3	5.6	6.0	6.1	-0.51	-32.8	4.6
4	1.3	3.8	2.7	-1.29	-13.0	3.3
5	-3.2	-0.6	-2.1	-1.13	22.4	9.4
6	-5.3	-3.4	-4.5	-0.42	20.0	-7.8
7	-5.2	-3.8	-4.8	0.44	30.7	1.3
8	-3.0	-0.4	-1.8	1.12	9.7	-1.2
9	1.0	3.2	2.3	1.02	-15.5	-1.6
10	4.0	4.8	4.7	0.31	-26.3	2.3
11	3.6	4.5	4.3	-0.53	-23.6	2.6
12	0.1	2.5	1.3	-0.98	-3.0	5.3
13	-2.5	-1.0	-1.9	-0.79	13.8	2.1
14	-3.6	-3.3	-3.7	-0.14	24.7	2.1
15	-3.2	-2.2	-2.8	0.51	14.1	-3.3
16	-1.1	0.2	-0.5	0.78	2.1	-0.9
17	1.4	2.5	2.1	0.55	-15.6	-2.7
18	2.9	2.9	3.0	0.05	-14.5	4.2
19	1.9	2.7	2.4	-0.39	-11.5	3.4
20	-0.1	1.2	0.6	-0.65	-3.6	0.0
21	-1.7	-1.2	-1.6	-0.37	19.7	9.7
22	-1.7	-1.7	-1.8	0.05	5.4	-5.5
23	-1.7	-0.9	-1.3	0.28	8.3	0.1
24	-0.5	0.5	0.0	0.39	-2.1	-2.2
25	0.7	1.3	1.1	0.20	-8.9	-2.1
26	1.2	1.2	1.3	-0.06	-6.7	1.2
27	0.6	0.9	0.8	-0.15	1.6	6.2
28	0.2	0.5	0.4	-0.14	-1.3	1.0
29	-0.1	-0.1	-0.1	-0.08	4.7	3.8
30	-0.2	-0.2	-0.2	-0.01	-0.2	-1.3
31	-0.2	-0.2				
32	-0.2	-0.2				

$$A_+ = (-5.8 \pm 0.3) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -1.0 \pm 0.7 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-6.5 \pm 0.4) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 3.6 \pm 0.9 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.23 \pm 0.06$$

$$C = -3 \pm 1 \text{ s}^{-1}$$

ウェンジュ vs ホウ垂直

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	7.0	7.0				
2	7.0	7.0	7.0	0.03	0.7	39.0
3	6.6	7.0	7.0	-0.38	-25.5	12.9
4	3.1	5.4	4.4	-1.04	-13.1	10.7
5	-1.1	1.7	0.3	-1.30	-2.5	-0.7
6	-5.0	-2.4	-3.9	-0.92	25.4	4.0
7	-5.4	-4.9	-5.5	0.10	35.0	5.2
8	-4.5	-1.8	-3.3	1.03	20.3	2.2
9	-0.2	2.1	1.0	1.24	-8.0	-2.5
10	3.8	4.6	4.5	0.60	-30.0	-5.4
11	4.6	4.8	4.8	-0.17	-15.7	10.6
12	2.7	3.7	3.4	-0.87	-25.6	-6.9
13	-1.7	0.7	-0.7	-1.04	15.8	12.1
14	-3.5	-2.4	-3.1	-0.43	20.0	3.1
15	-3.5	-2.9	-3.4	0.29	22.7	3.9
16	-2.2	-0.5	-1.3	0.68	0.4	-6.9
17	0.0	1.6	0.8	0.66	-1.0	3.4
18	2.5	2.8	2.9	0.31	-19.9	-4.3
19	2.5	2.8	2.8	-0.29	-15.7	-0.4
20	0.6	1.6	1.1	-0.50	3.0	8.8
21	-0.9	0.2	-0.4	-0.43	1.4	-0.6
22	-1.7	-1.4	-1.7	-0.19	12.9	3.9
23	-1.8	-1.1	-1.6	0.21	10.5	2.0
24	-0.7	-0.1	-0.4	0.34	-2.6	-4.6
25	0.3	0.8	0.6	0.20	-5.5	-2.4
26	0.9	0.9	0.9	0.03	-4.6	0.5
27	0.8	0.8	0.8	-0.06	-1.1	3.4
28	0.4	0.7	0.6	-0.08	0.2	3.3
29	0.4	0.4	0.3	-0.04	2.1	3.9
30	0.3	0.3	0.3	0.00	0.2	1.9
31	0.3	0.3				
32	0.3	0.3				

$$A_+ = (-6.4 \pm 0.4) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -1 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-4.5 \pm 0.4) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 5 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.30 \pm 0.07$$

$$C = -3 \pm 2 \text{ s}^{-1}$$

ウェンジュ vs カツラ垂直ぶつつ

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	6.2	6.2				
2	5.9	6.2	6.2	-0.25	-18.0	18.5
3	2.6	5.2	4.3	-1.34	-45.8	-20.2
4	-5.0	1.4	-2.3	-1.33	46.3	32.9
5	-4.4	-3.5	-4.0	-0.37	10.2	-13.7
6	-4.7	-4.2	-4.7	0.22	25.0	-2.8
7	-3.5	-1.7	-2.7	0.86	13.1	-2.7
8	-0.5	1.8	0.7	0.91	-10.3	-6.0
9	2.8	3.0	3.1	0.45	-16.6	1.4
10	3.7	3.1	3.6	-0.20	-22.0	-0.6
11	1.4	2.2	1.9	-0.65	-5.2	5.7
12	-1.4	0.4	-0.5	-0.71	2.1	-0.8
13	-2.6	-2.2	-2.6	-0.34	19.6	4.2
14	-2.8	-2.2	-2.7	0.28	17.0	1.3
15	-1.6	-0.2	-0.9	0.58	0.9	-4.4
16	0.2	1.6	1.0	0.47	-6.9	-1.2
17	1.9	2.1	2.1	0.15	-12.0	0.4
18	1.7	2.1	2.0	-0.17	-7.0	4.6
19	0.7	1.4	1.1	-0.36	-4.4	2.0
20	-0.6	0.2	-0.3	-0.32	6.6	5.0
21	-0.9	-0.8	-1.0	-0.06	8.7	3.1
22	-0.8	-0.6	-0.7	0.11	1.4	-2.8
23	-0.4	-0.2				
24	0.1	0.1				

$$A_+ = (-5.6 \pm 0.4) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -2 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-6.2 \pm 0.5) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 3 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.24 \pm 0.07$$

$$C = -10 \pm 3 \text{ s}^{-1}$$

ウェンジュ vs カツラ垂直

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	6.3	6.3				
2	6.3	6.3	6.4	-0.17	-14.2	23.1
3	4.3	5.3	5.0	-0.69	-16.3	12.7
4	0.6	2.9	1.8	-1.18	-12.3	-1.5
5	-3.5	-1.2	-2.5	-1.06	19.5	4.6
6	-4.7	-4.3	-4.9	-0.16	33.4	5.1
7	-4.3	-2.6	-3.6	0.71	18.3	-2.9
8	-1.7	0.8	-0.4	1.00	-0.6	-3.2
9	1.9	3.2	2.7	0.68	-18.5	-2.6
10	3.7	3.7	3.9	0.05	-19.1	3.6
11	2.4	3.4	3.0	-0.50	-13.3	4.5
12	0.1	1.5	0.8	-0.73	-0.1	4.3
13	-1.9	-0.9	-1.5	-0.48	14.6	5.6
14	-2.2	-2.2	-2.3	0.02	14.9	1.4
15	-1.7	-1.1	-1.5	0.34	4.5	-4.1
16	-0.6	0.3	-0.2	0.43	0.6	-0.4
17	1.0	1.3	1.2	0.27	-10.2	-3.0
18	1.5	1.5	1.5	-0.02	-7.0	2.1
19	1.0	1.3	1.1	-0.16	-1.0	5.5
20	0.4	0.7	0.6	-0.18	-0.1	3.2
21	0.0	0.1		-0.17		
22	0.0	0.0				

$$A_+ = (-5.4 \pm 0.4) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -1 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-6.2 \pm 0.3) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 3.7 \pm 0.7 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.26 \pm 0.06$$

$$C = -4 \pm 1 \text{ s}^{-1}$$



コルク vs カツラ

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	6.2	6.2				
2	6.2	6.2	6.2	0.03	1.2	70.0
3	6.2	6.2	6.2	-0.12	-10.1	59.6
4	4.4	5.8	5.2	-0.55	-15.5	42.9
5	1.2	3.8	2.6	-1.01	-11.4	17.7
6	-2.2	0.2	-1.2	-0.88	19.4	6.3
7	-2.7	-2.4	-2.9	0.09	37.2	4.8
8	-1.8	0.2	-0.7	0.67	-2.5	-10.8
9	0.7	1.5	1.2	0.45	-10.2	3.0
10	1.9	1.9	2.1	-0.03	-18.1	5.0
11	0.7	1.4	1.1	-0.37	-2.1	9.8
12	-0.4	0.2	-0.2	-0.22	10.7	8.5
13	-0.3	-0.3	-0.4	0.00	2.3	-1.6
14	-0.3	-0.2	-0.3	0.03	-0.2	-3.2
15	-0.2	-0.2	-0.2	0.03	0.2	-1.9
16	-0.1	-0.1	-0.1	0.01	-1.1	-2.0
17	-0.1	-0.1	-0.1	0.00	0.0	-1.0
18	-0.1	-0.1	-0.1	0.01	1.0	-0.2
19	0.0	0.0				
20	0.0	0.0				

$$A_+ = (-12 \pm 1) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -0.3 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-10 \pm 2) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 4 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.2 \pm 0.1$$

$$C = -18 \pm 6 \text{ s}^{-1}$$

カツラ vs カツラななめ

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	6.3	6.3				
2	6.3	6.3	6.4	-0.07	-7.0	35.0
3	4.8	6.1	5.6	-0.54	-20.6	16.7
4	1.1	4.1	2.8	-1.20	-18.5	-0.2
5	-3.1	-0.4	-2.0	-1.10	24.8	11.5
6	-4.0	-3.6	-4.2	-0.08	35.5	8.0
7	-3.3	-1.6	-2.6	0.71	11.0	-6.1
8	-1.2	1.5	0.2	0.79	-5.9	-4.6
9	1.7	2.7	2.4	0.44	-14.7	1.0
10	2.7	2.8	3.0	-0.20	-23.1	-3.3
11	0.5	1.9	1.2	-0.55	2.2	10.0
12	-0.9	0.2	-0.4	-0.40	6.9	4.0
13	-1.2	-1.2	-1.3	-0.06	13.0	4.2
14	-1.1	-0.6	-0.9	0.17	0.4	-5.3
15	-0.5	-0.2	-0.3	0.16	-0.6	-2.9
16	0.1	0.1	0.1	0.06	-5.0	-4.1
17	0.1	0.1	0.1	-0.01	0.5	1.2
18	0.1	0.1				
19	0.1	0.1				

$$A_+ = (-5.2 \pm 0.3) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -3.4 \pm 0.5 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-8.0 \pm 0.6) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 4 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.39 \pm 0.08$$

$$C = -6 \pm 2 \text{ s}^{-1}$$

カツラ vs カツラ垂直

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	6.5	6.5				
2	6.4	6.4	6.4	0.02	1.0	50.6
3	5.8	6.4	6.4	-0.46	-29.4	20.0
4	1.9	4.5	3.3	-1.15	-10.9	14.5
5	-2.0	0.3	-0.9	-1.22	6.7	-0.6
6	-4.3	-3.8	-4.4	-0.44	39.7	5.5
7	-4.2	-2.8	-3.7	0.61	22.3	-6.5
8	-1.8	0.6	-0.7	1.05	3.5	-1.6
9	1.8	3.1	2.8	0.56	-32.2	-10.6
10	2.7	2.8	2.9	-0.19	-12.1	10.3
11	1.3	1.9	1.7	-0.53	-8.5	4.5
12	-1.1	0.4	-0.4	-0.53	8.6	5.2
13	-1.6	-1.5	-1.7	-0.15	13.9	0.9
14	-1.5	-1.2	-1.4	0.19	6.2	-4.9
15	-0.8	-0.3	-0.5	0.30	0.4	-3.7
16	0.3	0.4				
17	0.5	0.5				

$$A_+ = (-8.4 \pm 0.7) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -6 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-7 \pm 5) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 0 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.3 \pm 0.1$$

$$C = -7 \pm 2 \text{ s}^{-1}$$

コクタン vs カツラななめ

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	6.3	6.3				
2	6.3	6.3	6.3	-0.04	-4.6	21.3
3	4.9	6.3	5.9	-0.58	-27.3	-3.4
4	1.3	3.7	2.5	-1.07	-1.4	8.8
5	-2.2	0.3	-1.0	-1.02	4.2	0.1
6	-4.5	-3.1	-4.0	-0.58	22.0	5.6
7	-4.7	-4.3	-4.7	0.16	21.5	2.3
8	-3.7	-2.4	-3.1	0.65	8.0	-4.6
9	-1.7	0.6	-0.6	0.80	1.1	-1.3
10	1.1	2.9	2.1	0.73	-5.5	2.9
11	3.8	4.0	4.1	0.28	-21.1	-4.4
12	3.7	3.8	3.9	-0.31	-14.1	1.8
13	1.5	2.8	2.2	-0.58	-2.1	6.7
14	-0.5	0.9	0.2	-0.60	1.0	1.7
15	-2.1	-1.1	-1.7	-0.43	8.9	2.0
16	-2.5	-2.4	-2.6	-0.05	13.9	3.4
17	-2.2	-1.7	-2.0	0.30	6.6	-1.6
18	-1.1	-0.3	-0.7	0.43	1.4	-1.5
19	0.3	1.0	0.7	0.36	-5.6	-2.6
20	1.4	1.7	1.6	0.16	-6.5	0.1
21	1.7	1.7	1.8	-0.04	-5.5	1.8
22	1.2	1.5	1.3	-0.16	-1.3	4.2
23	0.3	1.2	0.8	-0.22	-2.3	0.8
24	-0.1	0.1	0.0	-0.19	4.0	3.8
25	-0.4	-0.4	-0.4	-0.05	3.9	2.1
26	-0.4	-0.4	-0.4	0.03	0.9	-0.8
27	-0.3	-0.3	-0.3	0.04	-0.3	-1.5
28	-0.2	-0.2	-0.2	0.02	-0.7	-1.5
29	-0.2	-0.2	-0.2	0.01	0.3	-0.4
30	-0.1	-0.1				
31	-0.1	-0.1				

$$A_+ = (-4.2 \pm 0.3) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -1.2 \pm 0.6 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-3.9 \pm 0.3) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 3.3 \pm 0.7 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.23 \pm 0.05$$

$$C = -4 \pm 1 \text{ s}^{-1}$$

コクタン vs カツラ垂直

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	6.4	6.4				
2	6.3	6.3	6.3	0.00	1.7	27.1
3	6.3	6.3	6.3	-0.08	-6.4	19.2
4	5.5	5.7	5.7	-0.35	-9.7	13.2
5	3.2	4.5	4.0	-0.73	-13.3	2.8
6	-0.5	2.2	0.9	-0.97	-0.8	2.8
7	-3.1	-1.2	-2.3	-0.82	10.3	1.1
8	-4.3	-4.0	-4.3	-0.29	21.2	3.6
9	-4.2	-3.8	-4.1	0.30	13.9	-2.8
10	-2.9	-1.7	-2.4	0.72	10.6	0.8
11	-0.7	1.4	0.4	0.77	-7.3	-5.6
12	1.9	2.9	2.5	0.49	-9.4	0.7
13	3.4	3.4	3.6	0.02	-18.4	-4.0
14	2.3	3.0	2.7	-0.35	-3.9	7.0
15	0.8	1.8	1.4	-0.48	-3.7	1.8
16	-0.9	0.2	-0.4	-0.48	3.4	1.9
17	-1.7	-1.6	-1.7	-0.23	11.5	4.5
18	-1.8	-1.8	-1.9	0.06	5.9	-1.7
19	-1.8	-0.9	-1.4	0.25	5.2	-0.3
20	-0.6	0.0	-0.3	0.33	-0.7	-2.0
21	0.4	0.9	0.7	0.23	-5.0	-2.2
22	1.1	1.1	1.2	0.06	-4.7	0.0
23	1.1	1.1	1.1	-0.06	-2.5	2.1
24	0.8	0.8	0.8	-0.11	-0.8	2.5
25	0.5	0.5				
26	0.3	0.3				

$$A_+ = (-4.1 \pm 0.3) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -1.7 \pm 0.7 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-3.9 \pm 0.2) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 3.0 \pm 0.6 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.24 \pm 0.05$$

$$C = -5 \pm 2 \text{ s}^{-1}$$

サクラ vs カツラ水平

$n$	$x_l$ [cm]	$x_r$ [cm]	$x$ [cm]	$v$ [m/s]	$a$ [ms <sup>-2</sup> ]	$a - Ax$ [ms <sup>-2</sup> ]
1	6.3	6.3				
2	6.3	6.3	6.3	0.01	-0.1	41.8
3	5.8	6.2	6.2	-0.28	-17.4	24.0
4	2.8	5.2	4.3	-1.00	-24.7	3.9
5	-1.9	1.6	-0.2	-1.26	9.2	7.8
6	-4.1	-2.8	-3.7	-0.66	26.2	1.4
7	-4.5	-3.8	-4.4	0.28	29.5	-0.1
8	-3.0	-0.7	-2.0	0.97	11.3	-2.1
9	0.3	2.7	1.6	0.92	-13.9	-3.0
10	3.3	3.8	3.8	0.24	-26.3	-0.9
11	2.4	3.6	3.2	-0.52	-18.7	2.6
12	-0.4	1.7	0.6	-0.74	5.3	9.2
13	-2.1	-0.7	-1.5	-0.49	10.0	0.0
14	-2.3	-2.3	-2.5	0.04	20.9	4.1
15	-1.9	-0.7	-1.3	0.46	4.1	-4.7
16	-0.3	0.9	0.3	0.44	-5.0	-2.8
17	1.2	1.5	1.5	0.16	-11.1	-1.3
18	1.3	1.5	1.4	-0.11	-5.1	4.4
19	0.6	1.1	0.8	-0.18	0.6	6.1
20	0.1	0.5				
21	-0.1	-0.1				

$$A_+ = (-7.0 \pm 0.4) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -1 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-6.4 \pm 0.5) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 4.2 \pm 1.2 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.29 \pm 0.08$$

$$C = -4 \pm 1 \text{ s}^{-1}$$

サクラ vs カツラ垂直

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	6.3	6.3				
2	6.2	6.3	6.4	-0.28	-21.6	-3.5
3	3.1	5.2	4.3	-0.90	-14.9	-2.8
4	-1.5	2.7	0.6	-1.19	-2.4	-0.6
5	-3.9	-2.1	-3.3	-0.76	27.9	18.7
6	-4.2	-3.6	-4.2	0.22	30.1	18.2
7	-3.1	-0.6	-2.0	0.90	10.7	5.2
8	0.3	2.3	1.4	0.85	-14.0	-9.9
9	3.0	3.3	3.4	0.23	-22.2	-12.7
10	2.4	3.3	3.0	-0.38	-14.5	-6.1
11	0.3	1.8	1.0	-0.62	0.1	3.0
12	-1.4	-0.3	-0.9	-0.45	10.1	7.4
13	-1.7	-1.7	-1.9	-0.02	15.7	10.5
14	-1.3	-0.8	-1.1	0.31	4.0	0.9
15	-0.3	0.4	0.1	0.30	-4.6	-4.4
16	0.7	0.8	0.8	0.11	-6.8	-4.6
17	0.8	0.8				
18	0.8	0.8				

$$A_+ = (-6.2 \pm 0.4) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -2.8 \pm 0.7 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-6.8 \pm 0.7) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 4 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.36 \pm 0.07$$

$$C = -4 \pm 4 \text{ s}^{-1}$$

チーク vs カツラ垂直ぶつぶつ

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	6.2	6.2				
2	6.1	6.1	6.1	-0.01	1.0	38.1
3	6.1	6.1	6.1	0.09	3.9	40.8
4	5.9	6.1	6.4	-0.56	-42.0	-3.1
5	0.7	3.9	2.3	-1.32	-2.6	11.7
6	-3.2	-0.4	-1.9	-1.06	17.8	5.9
7	-4.3	-3.8	-4.4	-0.20	33.5	6.9
8	-4.0	-2.2	-3.3	0.67	17.6	-2.2
9	-1.7	1.1	-0.2	0.90	-3.7	-5.2
10	1.5	2.9	2.4	0.56	-16.4	-1.9
11	2.9	3.2	3.3	-0.13	-24.0	-4.0
12	0.9	2.4	1.7	-0.57	-2.6	7.4
13	-1.1	0.6	-0.3	-0.52	6.0	4.3
14	-1.6	-1.3	-1.6	-0.15	15.4	5.6
15	-1.5	-1.0	-1.3	0.18	4.3	-3.6
16	-0.9	-0.1	-0.5	0.27	1.4	-1.8
17	0.1	0.6	0.4	0.20	-5.8	-3.4
18	0.7	0.7	0.7	0.04	-3.3	1.1
19	0.7	0.7	0.7	-0.01	0.3	4.6
20	0.7	0.7	0.7	-0.02	-0.9	3.3
21	0.6	0.6	0.6	-0.02	1.2	4.8
22	0.6	0.6				
23	0.6	0.6				

$$A_+ = (-5.8 \pm 0.5) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -2.4 \pm 0.8 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-6.3 \pm 0.3) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 5.2 \pm 0.5 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.39 \pm 0.05$$

$$C = -6 \pm 2 \text{ s}^{-1}$$



ここから 58p までは測定日:5 月 28 日,温度:26.3°C,湿度:60%くもり

ホウ vs ホウ垂直 1

$n$	$x_l$ [cm]	$x_r$ [cm]	$x$ [cm]	$v$ [m/s]	$a$ [ms <sup>-2</sup> ]	$a - Ax$ [ms <sup>-2</sup> ]
1	7.6	7.6				
2	6.2	6.8	6.8	-0.8	-33.5	12.3
3	1.9	2.9	2.4	-1.4	-3.3	13.0
4	-2.3	-1.7	-2.3	-1.0	30.0	14.7
5	-3.5	-3.5	-3.8	0.0	28.9	3.2
6	-2.5	-1.7	-2.3	0.8	14.9	-0.4
7	0.4	1.3	0.9	1.0	-2.8	3.1
8	3.1	4.0	3.8	0.5	-22.0	3.3
9	4.1	4.1	4.3	-0.2	-21.1	7.9
10	2.3	2.9	2.6	-0.6	-2.3	15.3
11	0.5	0.9	0.7	-0.5	7.0	11.4
12	-0.5	-0.4	-0.6	-0.1	14.2	10.3
13	-0.4	-0.2	-0.3	0.2	4.4	2.3
14	0.4	0.5				
15	1.1	1.1				

$$A_+ = (-6.5 \pm 0.3) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -2.4 \pm 0.8 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-7.0 \pm 0.4) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 13 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.52 \pm 0.07$$

$$C = -8 \pm 1 \text{ s}^{-1}$$

ホウ vs ホウ垂直 2

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	7.7	7.7				
2	7.2	7.4	7.4	-0.2	-9.7	40.9
3	5.4	6.1	6.0	-0.9	-28.4	12.9
4	1.4	2.1	1.7	-1.4	-0.1	11.8
5	-2.4	-2.1	-2.6	-0.8	33.5	16.0
6	-3.1	-3.1	-3.3	0.2	22.8	0.1
7	-1.9	-1.1	-1.6	0.8	14.0	2.9
8	0.9	2.1	1.6	0.9	-8.7	2.0
9	3.3	3.9	3.8	0.4	-21.0	5.3
10	3.7	3.8	3.9	-0.3	-18.1	8.6
11	1.9	2.2	2.0	-0.5	4.8	18.8
12	0.1	1.3	0.7	-0.4	3.7	8.2
13	-0.2	-0.2	-0.3	-0.1	12.6	10.3
14	-0.1	0.1	0.0	0.2	2.8	2.7
15	0.5	0.7				
16	1.0	1.0				

$$A_+ = (-6.3 \pm 0.2) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -2.5 \pm 0.5 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-7.4 \pm 0.9) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 13 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.5 \pm 0.1$$

$$C = -7 \pm 2 \text{ s}^{-1}$$

ホウ vs ホウ垂直 3

$n$	$x_l[\text{cm}]$	$x_r[\text{cm}]$	$x[\text{cm}]$	$v[\text{m/s}]$	$a[\text{ms}^{-2}]$	$a - Ax[\text{ms}^{-2}]$
1	7.5	7.5				
2	7.4	7.5	7.5	-0.1	-3.2	56.5
3	6.9	7.2	7.1	-0.2	-2.9	53.4
4	5.9	6.0	6.3	-0.8	-33.2	16.9
5	1.3	2.8	2.1	-1.3	-0.8	15.6
6	-2.3	-1.6	-2.2	-0.9	30.0	12.2
7	-3.1	-3.1	-3.4	0.1	26.1	-0.7
8	-1.7	-1.3	-1.7	0.9	19.8	6.1
9	1.8	1.9	2.0	0.9	-19.7	-3.5
10	3.5	3.7	3.7	0.3	-15.1	14.7
11	3.7	3.7	3.8	-0.2	-14.1	16.5
12	2.1	2.6	2.4	-0.6	-7.1	12.2
13	0.0	0.8	0.3	-0.4	15.6	17.6
14	-0.2	-0.2	-0.3	0.0	8.3	5.9
15	0.0	0.1	0.0	0.1	1.9	2.0
16	0.5	0.6				
17	0.9	0.9				

$$A_+ = (-9 \pm 1) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_+ = -0 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$A_- = (-7.2 \pm 0.6) \times 10^2 \text{ s}^{-2}, B_- = 13 \pm 2 \text{ ms}^{-2}$$

$$\mu' = 0.6 \pm 0.2$$

$$C = -7 \pm 3 \text{ s}^{-1}$$

### 3-3. 転がり摩擦係数

$d = 30.0$  cmである.

$V_1 \sim V_2$ [km/h]	$\mu_r$	$\Delta\mu_r$	$V_1 \sim V_2$ [km/h]	$\mu_r$	$\Delta\mu_r$
1.13~1.07	0.017	0.004	0.42~0.34	0.008	0.001
0.40~0.33	0.007	0.001	1.09~1.03	0.017	0.004
0.77~0.70	0.013	0.003	1.19~1.13	0.018	0.004
1.01~0.95	0.015	0.004	2.11~2.03	0.043	0.008
1.35~1.29	0.021	0.005	0.88~0.82	0.013	0.003
1.41~1.34	0.025	0.005	0.58~0.52	0.009	0.002
0.40~0.31	0.008	0.001	1.80~1.74	0.028	0.007
0.41~0.34	0.007	0.001	1.17~1.11	0.018	0.004
0.87~0.81	0.013	0.003	1.67~1.61	0.026	0.006
1.14~1.08	0.017	0.004	1.39~1.32	0.025	0.005
1.23~1.17	0.019	0.004	2.35~2.26	0.054	0.009
1.30~1.24	0.020	0.005	1.94~1.88	0.030	0.007
1.78~1.70	0.037	0.006	1.63~1.57	0.025	0.006
1.01~0.95	0.015	0.004	2.81~2.72	0.07	0.01
2.66~2.57	0.06	0.01	2.23~2.17	0.035	0.008
1.51~1.43	0.031	0.005	2.18~2.10	0.045	0.008
2.25~2.18	0.041	0.008	2.39~2.31	0.049	0.009
2.16~2.07	0.050	0.008	2.00~1.94	0.031	0.007
2.04~1.97	0.037	0.007	1.98~1.92	0.031	0.007
2.30~2.21	0.053	0.008	1.81~1.74	0.033	0.007
2.31~2.22	0.053	0.008	1.68~1.62	0.026	0.006
1.56~1.50	0.024	0.006	1.91~1.83	0.039	0.007
1.27~1.20	0.023	0.005	1.47~1.42	0.019	0.005
2.59~2.51	0.053	0.009	1.66~1.59	0.030	0.006
1.51~1.46	0.019	0.006	1.82~1.76	0.028	0.007
2.47~2.37	0.063	0.009	1.79~1.72	0.032	0.007
1.88~1.82	0.029	0.007	1.85~1.78	0.033	0.007
2.18~2.10	0.045	0.008	1.74~1.66	0.036	0.006
2.82~2.74	0.06	0.01	1.62~1.56	0.025	0.006
2.41~2.32	0.056	0.009	1.84~1.77	0.033	0.007
2.84~2.76	0.06	0.01	1.42~1.36	0.022	0.005
2.37~2.28	0.055	0.009	1.88~1.80	0.039	0.007
0.61~0.54	0.011	0.002	2.37~2.31	0.037	0.009
0.77~0.71	0.012	0.003	2.16~2.08	0.044	0.008
1.64~1.58	0.025	0.006	1.87~1.80	0.034	0.007

$d$ の誤差は無視して $\Delta V = 0.1 \text{ ms}^{-1}$ ,  $\Delta\mu_r = \frac{V_1+V_2}{mg} \Delta V$ として誤差を計算する.

この結果を縦軸に $\mu_r$ , 横軸に $V := \frac{V_1+V_2}{2}$ をとってグラフにプロットすると2次関数のようであったので,

$$\mu_r = aV^2 + bV + c$$

として重みつき最小二乗法を用いて計算すると

$$a = (6.2 \pm 0.5) \times 10^{-3} \text{ km}^{-2}\text{h}^2$$

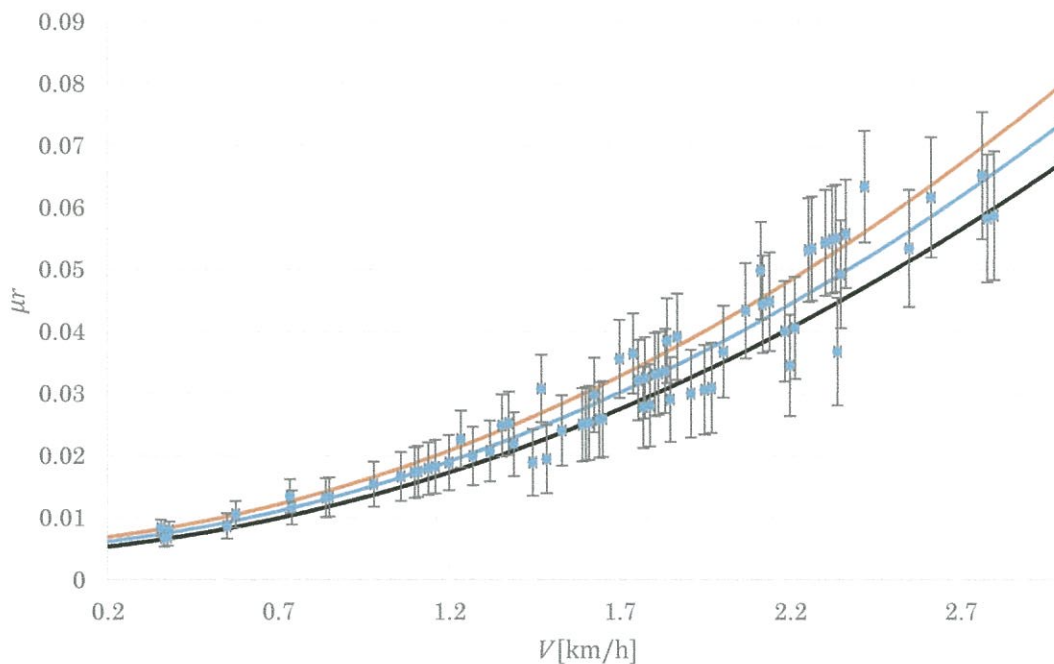
$$b = (4.2 \pm 1.1) \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}\text{h}$$

$$c = (5.1 \pm 0.7) \times 10^{-3}$$

となる.

青の線は上の2次関数を書いたものであり, おおよそデータがこの中に収まっていることが分かる.

また, 参考程度に $\Delta\mu_r = \sqrt{(V^2\Delta a)^2 + (V\Delta b)^2 + (\Delta c)^2}$ として $\mu_r \pm \Delta\mu_r$ のグラフも上下に書いた.



重みつき最小二乗法の計算方法は下に示したようにした.

$n$ 回目の測定において $x_n = V$ ,  $y_n = \mu_r$ ,  $y_n$ の誤差 $\Delta y_n$ として(上のグラフのエラーバーを見ても分かる通り $x_n$ の誤差は $y_n$ の誤差に対して無視できる.)

$$J := \sum_n \left( \frac{y_n - ax_n^2 - bx_n - c}{\Delta y_n} \right)^2$$

を最小にする係数 $a, b, c$ を求める.

$J$ を $a, b, c$ で偏微分したものを0とおいて

$$\frac{\partial J}{\partial a} = \sum_n -\frac{2x_n^2(y_n - ax_n^2 - bx_n - c)}{(\Delta y_n)^2} = 0$$

$$\frac{\partial J}{\partial b} = \sum_n -\frac{2x_n(y_n - ax_n^2 - bx_n - c)}{(\Delta y_n)^2} = 0$$

$$\frac{\partial J}{\partial c} = \sum_n -\frac{2(y_n - ax_n^2 - bx_n - c)}{(\Delta y_n)^2} = 0$$

よって

$$A_k := \sum_n \frac{x_n^k}{(\Delta y_n)^2}$$

$$B_k := \sum_n \frac{x_n^k y_n}{(\Delta y_n)^2}$$

として

$$aA_4 + bA_3 + cA_2 = \sum_n \frac{x_n^2 y_n}{(\Delta y_n)^2}$$

$$aA_3 + bA_2 + cA_1 = \sum_n \frac{x_n y_n}{(\Delta y_n)^2}$$

$$aA_2 + bA_1 + cA_0 = \sum_n \frac{y_n}{(\Delta y_n)^2}$$

より

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_4 & A_3 & A_2 \\ A_3 & A_2 & A_1 \\ A_2 & A_1 & A_0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} B_2 \\ B_1 \\ B_0 \end{pmatrix}$$

また誤差の伝播則より

$$\Delta B_k = \sqrt{\sum_n \left[ \frac{x_n^k}{\Delta y_n} \right]^2} = \sqrt{A_{2k}}$$

よって係数の誤差は

$$\begin{pmatrix} \Delta a \\ \Delta b \\ \Delta c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_4 & A_3 & A_2 \\ A_3 & A_2 & A_1 \\ A_2 & A_1 & A_0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta B_2 \\ \Delta B_1 \\ \Delta B_0 \end{pmatrix}$$

で求めることができる。

## 4. 考察

### 4-1. 静止摩擦係数

#### 4-1-1. はじめコルクの摩擦が測れなかった理由

立方体のもので実験した場合、力のつりあいより

$$f = mg \sin \alpha, N = mg \cos \alpha$$

またモーメントのつりあいより

$$l_1 N = lf$$

よって

$$\frac{l_1}{l} = \tan \alpha$$

となり  $l_1 \leq l$  だから

$$\alpha \leq \frac{\pi}{4}$$

となる。

つまり  $\mu_0 \geq 1$  のときは  $\alpha = \pi/4$  でころがりおちてしまうのだ。

このことは物体の横幅を大きくすることで解決できる。

#### 4-1-2. 湿度との関係

湿度が高い方が若干高いことが分かる。これは後述の動摩擦係数と同様と考えられる。

#### 4-1-3. やすりで磨くことについて

木目が平行なほうが摩擦係数が大きいと期待されるがやすりで磨いたことにより小さくなっている。このことは常識的にも当たり前である。

## 4-2. 動摩擦係数

### 4-2-1. 垂直とななめと平行

データを眺めると傾向として

$$\text{平行} > \text{ななめ} \cong \text{垂直}$$

となっていることが分かる。

これは次のように考えれば説明がつく。

つまり、木目が平行な時はくぼみ同士がかみ合うところが多く、その分そのかみ合いをはずすのに必要な力が大きくなり、ななめと垂直とではかみ合っている部分はあまり変わらないのでほぼ同じになる、ということだ。

### 4-2-2. 湿度との関係

5/7 測定 of ホウ vs ホウ垂直と 5/28 測定 of それを比較すると 5/28 測定の方が大きい。

数値的には 5/7 は 0.3~0.4 が共通部分であるのに対し 5/28 は 0.45~0.59 が共通部分である。

これはその日の天気を見ると前者が晴れで後者が曇りであることから納得がいく。

なぜかという、曇りの方が湿度が高くなり木材が吸収する水分量も増え木材は膨張する。そのときに、木材表面の非常に細かい部分は埋められてしまっ、そのことにより真実接触面積が増えることが期待される。その結果摩擦力も大きくなるという算段である。

### 4-2-3. 速度依存性

$C \sim -5 \text{ s}^{-1}$ であるから摩擦係数の速度依存性としては $g$ で割って $1 \text{ ms}^{-1}$ 増えるごとに0.5減るくらいである。しかし、これは大きすぎやしないだろうか。摩擦係数のオーダーが0.4くらいであるからだ。その計算では負の摩擦係数というものがでてしまう。

また、このことは次の計算からも不都合であることが分かる。

$\mu' = \mu'_0 + \xi v$ として運動方程式は

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \xi g \frac{dx}{dt} + \frac{k_1 + k_2}{m} x = c_{\pm} = \text{const.}$$

となって振動解が出てくる条件は

$X$ についての2次方程式

$$X^2 + \xi g X + \frac{k_1 + k_2}{m} = 0$$

が虚数解を持つことで判別式が負であることから

$$(\xi g)^2 < 4 \frac{k_1 + k_2}{m}$$

より

$$|\xi g| = |C| < 2 \sqrt{\frac{k_1 + k_2}{m}} = 2\sqrt{-A}$$

であるが、ホウ vs ホウ垂直の場合について  $C \cong 7 \text{ s}^{-1}$ ,  $A \cong -6.5 \text{ s}^{-2}$ であるから明らかにこれは満たされて



おらず、この計算では振動しないことになるが、これは実際の現象と異なっている。

この理由を考えよう。

たとえば $|x|$ と $|v|$ は(いったん摩擦を無視して)エネルギー保存を考えれば分かるように片方が大きくなればもう片方は小さくなるという傾向を持っている。なので、 $a-x$ グラフを直線近似したことによる誤差が影響して見かけ上そのようになっていることが考えられる。

この直線近似の誤差は $\mu'$ の速度依存性だけでなくバネの Hooke の法則からのずれもあるだろう。

たとえば Hooke の法則に $x^2$ に比例する項を付け加えると運動方程式にも $x^2$ に比例する項が存在するようになり、 $x > 0$ の領域では下に凸ないし上に凸となっておよそ直線的にずれることが考えられる。このことは Step1. でバネ係数を測定したときに周期の差として表れていたことでもある。

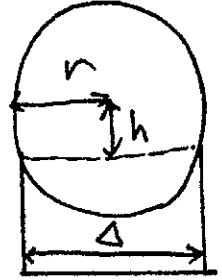
### 4-3. 転がり摩擦係数

非常に速度に依存しているのが見て取れる。

しかし、これは球の並進速度に対する依存性であり、それよりも回転運動を考慮して球とレールの接している点での速度との関係性を測る方が妥当であるといえる。その測り方を以下に示そう。

レールの横幅 $\Delta$ 、球の半径 $r$ 、球とレールの接点と中心の距離 $h$ として

$$h = \sqrt{r^2 - \left(\frac{\Delta}{2}\right)^2}$$



である。

球の質量 $m$ 、転がる時に受ける摩擦力 $f = \mu_r mg$ 、球の並進速度 $V$ 、回転運動の角速度 $\omega$ としてレールとの接点における速さ $v$ は

$$v = |V - h\omega|$$

また球の中心軸の周りの慣性モーメント $I$ は

$$I = \frac{2}{5}mr^2$$

このとき並進運動、回転運動の運動方程式を立てると

$$m \frac{dV}{dt} = -f$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = fh$$

ただし $V > h\omega$ とする。

このとき

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{f}{m} \left[ 1 + \frac{5}{2} \left( \frac{h}{r} \right)^2 \right] = -\frac{n}{m} f$$

ここで $n = 1 + \frac{5}{2} \left( \frac{h}{r} \right)^2$ とした。

$v \neq 0$ のとき $\mu_r(v) = av + b$  ( $a, b$  定数) と仮定すると

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{n}{m} (av + b) mg = -(av + b) ng$$

これを解いて

$$v = \frac{av_0 + b}{a} \exp(-angt) - \frac{b}{a} \quad (v_0 \text{ 定数})$$

これを運動方程式に代入し、これを解くと

$$V = \frac{av_0 + b}{an} (\exp(-angt) - 1) + V_0 \quad (V_0 \text{ 定数})$$

ここで $v = 0$ になると球は摩擦を受けず滑っていくと予想され、このとき

$$\exp(angt_s) = \frac{av_0 + b}{b}$$

$$t_s = \frac{a}{ng} \ln \frac{av_0 + b}{b} = \frac{1}{ang} \ln \frac{aV_0 + b}{b}$$

でありこのとき

$$V(t_s) = V_0 - \frac{v_0}{amng} = V_0 \left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

である。

ここで  $v_0, V_0$  は  $t = 0$  における  $v, V$  の値であるが、このとき  $\omega = 0$  とすると

$$v_0 = V_0$$

であることを用いた。

また、この状態になるまでに球が動く距離  $L$  は

$$L \sim V_0 t_s \cong \frac{V_0^2}{bng}$$

ここで  $aV_0 \ll b$  とした。

$V_0 \sim 0.5 \text{ ms}^{-1}, h \sim 2, g \sim 10 \text{ ms}^{-2}, b \sim 0.04$  として

$$L \sim 25 \text{ cm}$$

であり今回用いた実験装置では大体  $V_2$  を測定する点に相当することが分かる。

よって、 $V_2 = V_0 \left(1 - \frac{1}{n}\right)$  であり

$v \cong 0$  のとき  $t \cong t_s \cong \frac{V_0}{bng}$  だから  $angt \cong \frac{aV_0}{b} \ll 1$  より

$$V(t) \cong V_0 - (aV_0 + b)gt = (1 - agt) \frac{V_2}{1 - \frac{1}{n}} - bgt$$

よって  $V_1 \sim V_2$  の間は等加速度直線運動とみなせ、

また

$$v \cong \frac{aV_0 + b}{a} (1 - angt) - \frac{b}{a} = V_0 - (aV_0 + b)ngt$$

であり  $V = V_2$  のとき  $v = 0$  より  $V_1 \sim V_2$  の間の平均の  $v$  は  $\frac{V_1 - V_2}{2} n$  で与えられ、

これと  $\mu_r$  を比較すればよい。

$$\mu_r = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2dg}, v = \frac{V_1 - V_2}{2} n, \mu_r = av + b$$

より

$$\mu_r = \frac{2gbv}{2v - ndag} = -\frac{b}{nda} v - \frac{2b}{n^2 d^2 a^2 g} v^2 + \dots$$

となって実験結果の 2 次関数の係数と比較して

$$-\frac{b}{nda} = (6.2 \pm 0.5) \times 10^{-3} \text{ km}^{-2} \text{ h}^2$$

$$-\frac{2b}{n^2 d^2 a^2 g} = (4.2 \pm 1.1) \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \text{ h}$$

よって

$$ndag = 3.0 \pm 0.6 \text{ kmh}^{-1}$$

ここで  $\Delta = 8.04 \pm 0.03 \text{ mm}$ ,  $r = 11.01 \pm 0.02 \text{ mm}$  より

$$n = 3.17 \pm 0.02$$

$d = 30.0 \pm 0.01 \text{ cm}$ ,  $g = 9.80 \text{ ms}^{-2}$  より

$$a = 0.09 \pm 0.02 \text{ m}^{-1} \text{ s}, b = -0.041 \pm 0.003$$

しかし、これでは摩擦係数が負になる領域が存在し、不適。

よって、並進速度との関係式を結果として用いる。

しかし、結果が顕著であることに回転運動の影響は大きいだろう。今回不適となったのは接触した部分の速度と摩擦係数が1時間数的であるとみなした点にあるだろう。

## 6. 参考資料

[1] 松川宏 (2012). 摩擦の物理(岩波講座物理の世界) 岩波書店

7. 共同実験者と役割分担  
なし.