

# 靴紐の最大摩擦力測定装置の開発

宮城県仙台第三高等学校

## 0 要旨

私たちは、学校では上履きを履き、部活動では各競技専用のシューズを履く。その際、紐をしっかりと結んでも活動中に紐がほどけてしまうことがよくあった。私達はこの原因を調べるために実験を行った。先行研究<sup>1)</sup>より、靴紐がほどける原因は、衝撃による結び目の中心の変形、歩行動作による動的な揺れ、ひもと結び目の自由端の慣性力の複雑な相互作用によって破損が引き起こされることであることがわかっている。しかし、靴ひもの材質と表面仕上げの影響は調査されていなかった。そこで私たちは靴紐同士の摩擦力の強さに着目して、靴紐にかかる静止摩擦力を計測し、その結果より、靴紐の静止摩擦係数を求め、比較した。また、複数の靴紐の最大摩擦力を比較することでその特徴をまとめた。

## 1 背景と目的

靴紐は日常生活の中で非常に多く使用されている。そして靴紐が解けやすいと、日常生活の中で煩わしいものとなる。クリストファー氏<sup>1)</sup>によると、靴紐が解ける原因は繰り返される衝撃により結び目が緩み、向きの変化により靴紐が引っ張られることだという。さらに靴紐に加わる衝撃と加速度は最大で7Gに達するとされている。靴紐を解けにくくするためには、いくつかのアプローチが考えられる。一つは結び方を工夫すること。一つは靴紐自体をより解けにくいものとする。前者については紐が生み出された時から発展を続けていて、非常に多くの結び方が存在する。しかし後者は未だ十分に研究されているとは言えない。表面の加工による解けにくい靴紐<sup>2)</sup>という商品も存在するが、普遍的な法則は得られていない。さらに、クリストファー氏<sup>1)</sup>も、靴紐の素材や表面加工については研究の余地が残っているとしている。そこから私達は、先行研究では研究されていない靴紐の間の最大摩擦力に着目して、靴紐の素材や靴紐表面での摩擦による結び目への影響を研究し、更には紐の接触面積と最大摩擦力の関係を調べ考察することでほどけにくい靴紐の素材について決定することを最終目標にしている。

そのため以下の3つを目的とした。

- ・靴紐の最大摩擦力測定装置の開発
- ・開発した装置での様々な種類の靴紐の最大摩擦力の測定
- ・最大摩擦力の大きさを決定する要素の特定



図1 衝撃により結び目がほどける様子

## 2 実験の仮説

私たちは、先行研究<sup>1)</sup>の靴紐が緩み始めると急激に結び目がほどけるという結果から、靴紐のほどけにくさには、最大摩擦力の大きさが強い影響を与えると考えた。また、最大摩擦力は靴紐の素材と形状によってのみ変化すると考えた。(∵物理の教科書<sup>3)</sup>では、最大摩擦力が「 $F_0 = \mu mg$ 」という摩擦係数と垂直抗力の積で与えられる)

つまり仮説は、

- ①最大摩擦力は接触面積の変化には無関係であり、靴紐の素材と形状のみが影響を及ぼす。
- ②靴紐の形状よりも靴紐の素材のほうが最大摩擦力に影響を与えやすい。

## 3 検証方法・実験①

### 3-1 目的

靴紐同士の最大摩擦力を測定する装置を開発し、それぞれの条件で最大摩擦力の大きさを測定し、比べることで靴紐の最大摩擦力を評価する。そのために参考文献<sup>4)</sup>をもとに実験のための最大摩擦力測のための装置を開発し、それを用いて実験を行った。

最大摩擦力が垂直抗力に比例することと、靴紐同士の接触面積の違いによる誤差が十分小さいこと

を確認して、アモントン＝クーロンの法則<sup>5)</sup>が十分成り立つことを示し、実験装置を正しく開発することができたことを確認する。この実験では、靴紐が動き出す直前の靴紐にかかる張力を最大摩擦力としている。

3-2 手順

同種類の紐を2つの木材の板にそれぞれ巻き付け、1本の紐を2枚の木材の板の間に挟み、その上におもりをのせる。紐の先にばねばかりを取り付け、水平方向に引き、引いた紐が動き出す瞬間のばねばかりの値を記録する。同条件の実験を10回繰り返す。

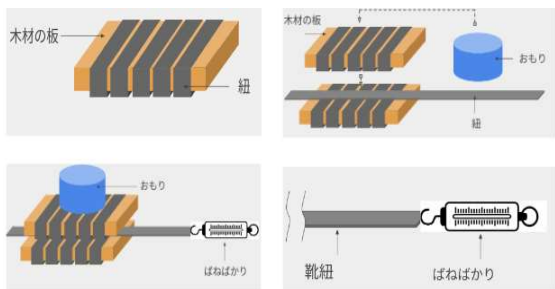


図2 実験手順

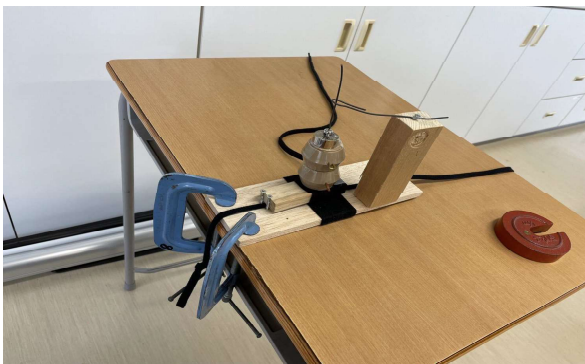


図3 実験装置の全体図

3-3 実験の条件

実験①では、開発した装置が正しく動作することを確認するため、以下の条件で実験を行った。すべての靴紐は新品であり、使用していない。

表1 実験1におけるおもりの質量条件

おもりの質量		
0.250 kg	0.500 kg	1.00 kg

表2 各靴紐の接触面積

靴紐の種類	接触面積 (cm <sup>2</sup> )	
平紐 (ポリエステル)	2.52	1.08
丸紐 (コットン)	0.667	0.423
丸紐 (面)	0.500	0.250

4 結果①

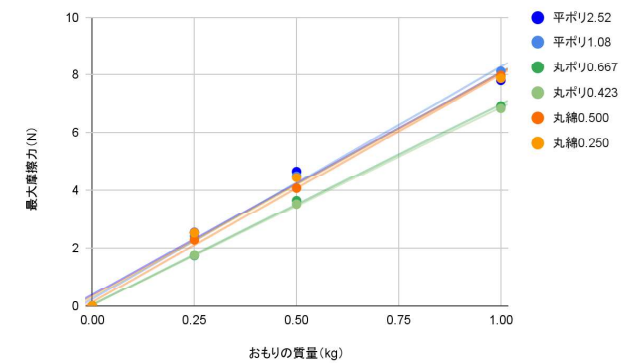


図4 実験①での結果の平均値

それぞれの靴紐の各接触面積におけるおもりの質量と最大摩擦力のグラフは図4のとおりになった。これ以降のグラフや表では平紐→平、丸紐→丸、ポリエステル→ポリ、綿→綿として、表記することとする。

以上のグラフを見ると、接触面積を変更したときとしていない場合での二本の直線はほぼ重なっていることがわかる。

このことから、仮説である「最大摩擦力は接触面積の変化には無関係である」ということを調べるために各グラフの近似直線の方程式を求め、相対誤差<sup>6)</sup>を計算して以下の表3にまとめた。

グラフ1からそれぞれのトレンドラインの方程式を求め、接触面積を小さくしたときの相対誤差を式1を用いて計算した。

接触面積が大きいときの傾きが $\theta$ 、小さいときの傾きが $x$ のとき、相対誤差 $E$ は次のように表される。

$$E = (x - \theta) \cdot \frac{1}{\theta} \cdot 100 \quad (\text{式1})$$

表3 グラフの傾きと相対誤差

靴紐	$x$	$\theta$	$E$
平ポリ	7.69	8.03	4.42
丸ポリ	6.94	6.83	1.59
丸綿	7.87	7.74	1.65

## 5 考察・結論①

### 5-1 考察①

各接触面積におけるおもりの質量と最大摩擦力のグラフ(図4)から、おもりの質量と最大摩擦力には、直線近似の関係があることが分かる。また、3種類の紐の接触面積で実験を行ったが、接触面積を変えても、最大摩擦力の大きさはほぼ変わらないことが確認できた。このことは、物理の教科書<sup>3)</sup>にある最大摩擦力を表す $F_0 = \mu N$ の関係にあてはめて考えることができ、今後の実験においてこの装置を用いて、接触面積は任意で異なる靴紐の最大摩擦力を測定することが可能になる。

結果から、最大摩擦力はおもりの質量に比例し、接触面積に依存しないことがわかる。この実験装置では、木の板と靴紐の重さはおもりの質量に対して十分に小さく、無視できるため、最大摩擦力は垂直抗力に比例する。このことより、アモントン＝クーロンの法則が成り立つため、この実験装置による測定結果は正しいと考えられる。

### 5-2 結論①

実験の仮説では、「最大摩擦力が摩擦係数と垂直抗力の積で与えられることから、接触面積は無関係である。」と考えていたが、これまでの実験結果からこの仮説を裏けることができた。また、おもりの質量(垂直抗力)が、最大摩擦力に比例していることも、結果から作成したデータから読み取ることができたので、今後の実験装置を用いて、正確な比較ができると考えられる。

## 6 実験②

摩擦力を測定する靴紐の種類を増やし、対照実験を行い、靴紐の素材と形状が靴紐の最大摩擦力に与える影響について考察する。

### 6-1 実験条件

表4 実験②におけるおもりの質量

おもりの質量		
0.250 kg	0.500 kg	1.00 kg

### 実験における靴紐の種類

- ・平紐A (綿)
- ・平紐B (綿)
- ・平紐C (綿) ※使用済み
- ・平紐D (ポリエステル) ※滑り止め加工あり

### 6-2 結果②

実験①と実験②での各靴紐の静止摩擦係数を以下の図5にまとめた。

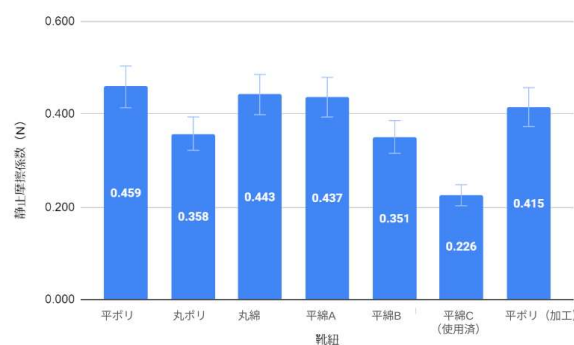


図5 各靴紐の静止摩擦係

また、静止摩擦力を求める際には以下の記述と、図6に基づいて行った、アモントン＝クーロンの法則より、式2, 3を用いてそれぞれの靴紐の静止摩擦係数を求めた結果、図5の結果が得られた。ここでは最大摩擦力を靴紐と靴紐の片面での接触時に発生するものとしている。

おもりの質量 $m$  [kg]、静止摩擦係数 $\mu$ 、重力加速度 $g$  [m/s<sup>2</sup>]のとき、最大摩擦力 $f$  [N]は次のように表される。

$$f = \mu mg \quad (\text{式2})$$

また、摩擦力は靴紐の上下の面両方に加わるから、靴紐が動き出す直前の靴紐にかかる張力 $F$ は、力の釣り合いにより、次のように表される。

$$F - 2f = 0 \quad (\text{式3})$$

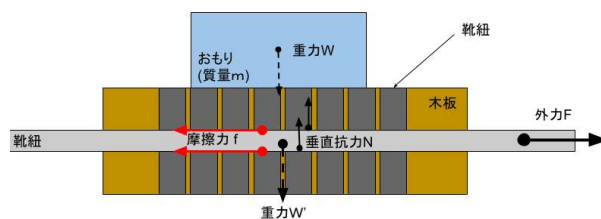


図6 装置が受ける力の図示

## 7 結果・考察②

実験結果より、同素材同士、同形状同士で静止摩擦係数を比較すると、素材、形状の違いによる優位的な関係性は見られない。これは靴紐自体の横幅の長さや靴紐自体の厚み、紐の編み方等が影響しているのではないかと考えられる。また、素材、形状がどちらも同じであっても、静止摩擦係数に大きな違いが見られることから、素材、形状以外に静止摩擦係数に影響を与える要素が存在すると考えられる。使用済みの靴紐の静止摩擦係数が著しく小さいことから、靴紐を長く使うことは摩擦力を低下させ、ほどけやすさが増すのではないかと考えられる。

更に、他の靴紐に比べてほどけにくい<sup>2)</sup>とされる表面に滑り止め加工を施した靴紐の静止摩擦係数は他の靴紐と同程度であることから、最大摩擦力のみが靴紐のほどけやすさに影響を与えるとは考えにくい。ただしこの靴紐は動き出したときの加速度が他に比べて小さかったため、動摩擦力がほかに比べて大きいと考えられる。

## 8 実験③

### 8-1目的

靴紐の最大摩擦力に影響を与える要素を特定するため、靴紐の表面の状態を観察する。

### 8-2実験方法

靴紐の表面を電子顕微鏡を用いて観察する。

### 8-3結果

図7～9の結果が得られた。

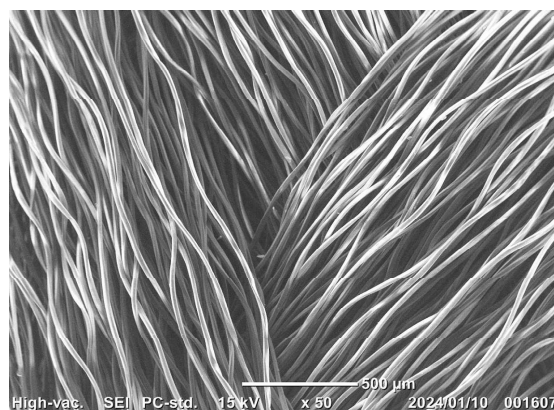


図7 丸ボリの表面

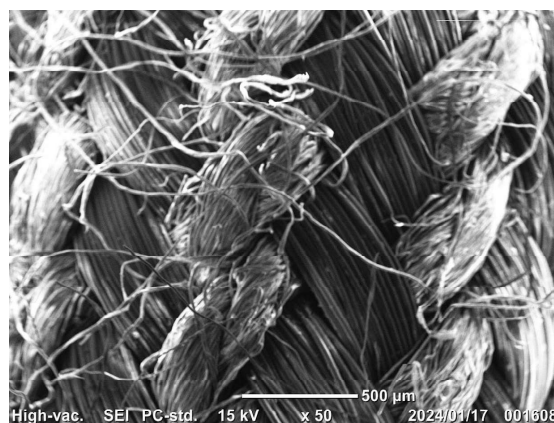


図8 丸綿の表面

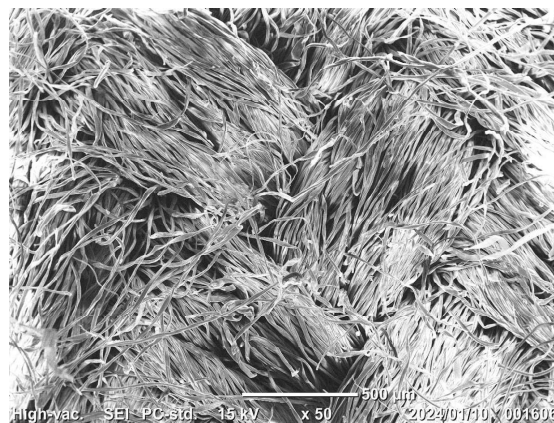


図9 平綿Bの表面

### 8-4考察

靴紐表面の毛羽立ちや、繊維の太さが靴紐によって異なり、最大摩擦力に影響を与える可能性がある。

### 8-5 仮説

以上の実験結果より、以下の仮説を立てた。



- 靴紐の静止摩擦係数は、素材や形状よりも、靴紐表面の状態に強く依存する。
- 靴紐の表面の状態は使用により変化し、最大摩擦力を低下させる。
- 靴紐の解けにくさは最大摩擦力よりも動摩擦係数に強く依存する。

## 9 まとめ

- 自分たちが開発した装置での靴紐の最大摩擦力の測定に成功した。
- 靴紐の最大摩擦力は靴紐同士の接触面積に依存しないことを、相対誤差を比較することによって確認することができた。
- 靴紐の最大摩擦力に影響を与える要因としては、素材と形状だけでは結論づけることができなかった。つまり自分たちが日常生活で用いる靴紐に関しては任意の靴紐で、良いことになる。しかしながら、図5からも分かる通り、長年靴を履くことにより、靴紐がすり減ってしまうと、摩擦力が低下してしまうため、月日が十分に立ったら、靴紐を交換したほうがほどこにくく済む。

## 10 今後の展望

今回の実験では最大摩擦力(静止摩擦力)を求めたが、実験②より動摩擦力も関係しているのではないかと考えた。そこで、それぞれの靴紐の動摩擦力を測定し、静止摩擦力と動摩擦力が靴紐のほどこにくさとどう関連しているのかを調べたい。また、実験から素材と形状に優位的な関係性が見られなかったため、何が摩擦力に影響を与えているのかということも調べたい。今後も観察し、違いを特定することに努める。

## 11 実験の提案

靴紐の最大摩擦力だけではほどこにくい靴紐を結論づけるのは難しいことがわかったので、参考文献<sup>7)</sup>と自分たちが開発した装置を組み合わせて、動摩擦力を測定できる装置

を提案する。図は以下の通りである。

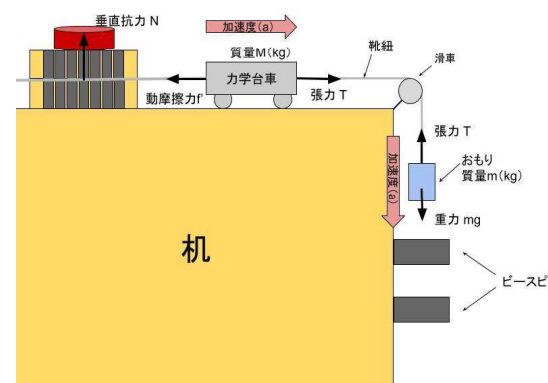


図10 動摩擦力測定装置の図

この装置により、まずビースビでの速度変化を調べることににより、加速度 $a$ がわかる。

これより運動方程式から、

$$Ma = T - f' \quad (\text{式1})$$

また、 $ma = mg - T$  (式2) ( $g$ :重力加速度の大きさ)

さらに、 $f' = \mu' N$  (式3) ( $\mu'$ :動摩擦係数)とすることで $\mu'$ の大きさがわかる。

以上(1~3)式より $\mu' = \frac{mg - (M+m)a}{N}$ と求められる。

(※また木板の質量は無視して扱った。また垂直抗力 $N$ はおもりの質量に等しいとした。)

今後はこの装置を用いて靴紐の動摩擦力を測定し、ほどこにくい靴紐を特定しようと考えている。

## 12 参考文献

1) The roles of impact and inertia in the failure of a shoelace knot.  
<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2016.0770>

2) ほどこにくいスポーツ専用の靴紐「ゼログライドシューレース」発売,ミズノ株式会社,2024.7.7.閲覧,

<https://corp.mizuno.com/jp/news-release/2020/20201012>.

3) 総合物理1-力と運動・熱-(高等学校検定教科書)数研出版株式会社

4) 引っ張り法による摩擦係数の測定ビデオ  
画像の解析

<https://www.jpho.jp/2015/2015-1st-chall-exp-report/1531011.pdf>

5) Hiroshi MATSUKAWA, Department of Physics, 表面科学 Vol. 24, No. 6, pp. 328—333, 2003,

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsssj/24/6/24\\_6\\_328/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsssj/24/6/24_6_328/_pdf/-char/ja).

6) [https://shikaku.pepenoheya.blog/basic\\_information\\_error\\_4kinds/](https://shikaku.pepenoheya.blog/basic_information_error_4kinds/)

7) 簡易速度測定器「ビースピ」を用いた  
力学実験キットの開発

[https://www.naruto-u.ac.jp/course/sci/sci/class/kyouiku\\_kadai\\_tankyuu/2007/1/beespi.pdf](https://www.naruto-u.ac.jp/course/sci/sci/class/kyouiku_kadai_tankyuu/2007/1/beespi.pdf)