

スーパーサイエンスラボ I 教材「綱引き姿勢の力学的検証」

【1. はじめに】

嵯峨野高校のスーパーサイエンスラボにおけるテーマ検討の指導に際しては、普段はあたり前のこととして見過ごしている身の回りの現象に目を向けてみることを勧めている。このことを体感してもらうため、スーパーサイエンスラボ I における実習として、綱引きにおいてなにげなくとっている姿勢、すなわち体を伸ばした上で後傾姿勢をとることがなぜ有利なのかを実験により確かめる実習を毎年導入実験として行っており、ここではその内容について報告する。

【2. 原理および実験方法】

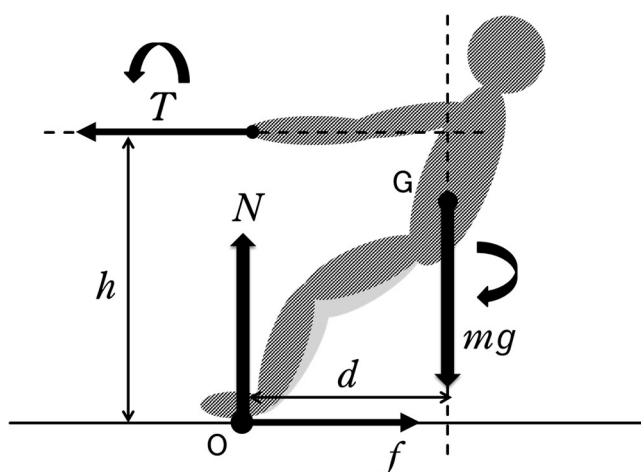
綱引きにおいては、綱を引く人には【図 1】に示すような力が作用している。 T は綱から人が受ける張力の大きさ、 mg は人にはたらく重力の大きさ、 N は人が床から受ける垂直抗力の大きさ、 f は人が床から受ける静止摩擦力である。点 G は人の重心、点 O は垂直抗力および摩擦力の作用点である。点 O から張力 T の作用線上におろした垂線の長さを h 、点 O から重力の作用線上におろした垂線の長さを d とする。張力は水平方向に作用するものとする。このとき、力のつり合いの式および O 点回りの力のモーメントのつり合い式は以下ようになる。 μ は静止摩擦係数である。

$$mg = N \quad \dots \quad \text{①}$$

$$T = f \leq \mu N \quad \dots \quad \text{②}$$

$$Th = mgd \Leftrightarrow T = mg \frac{d}{h} \quad \dots \quad \text{③}$$

③式より、綱引きにおいて、できるだけ d を大きくとり、 h を小さくとれば、綱引きにおいてより大きな張力 T に対して姿勢を保持できることが判る。



【図 1】綱引きをする人に作用する力

実験装置のレイアウトを【図 2】に、実際の写真を【図 3】に示す。実験においては、綱引きをする人を角材で置き換えて実験を行った。角材は $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ × 約 500 mm のものを用いた。角材の長さを予め測定し、

その長さの半分を L [mm] とする。

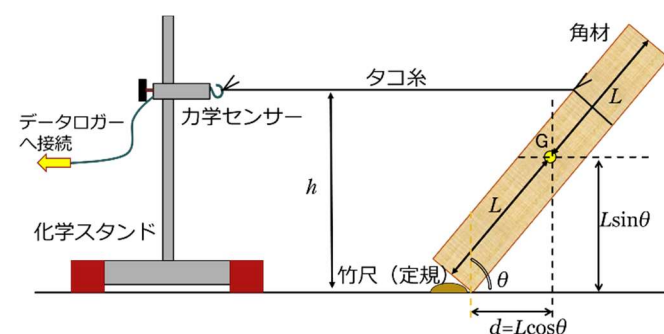
力学センサーおよびデータロガーとしては EasySense (DATA HARVEST 社 / (株) ナリカ) を用いた。具体的に我々が用いたものは、力センサ (測定範囲 50 N , 最小表示 0.1 N) をデータロガー V-Hub4 に接続し、iPad に Bluetooth 接続してデータを取り込んだ。

角材にタコ糸 (5・6 号程度) を結び付け、実験中にずれないようにセロハンテープでタコ糸の結び目を角材に固定した。タコ糸の一端を力学センサーに結び付けた。力学センサーは化学スタンドに固定した。一方、角材の下端が滑らないように、竹尺をセロハンテープで実験台に固定し、滑り止めとした。実験中は、タコ糸が水平を保つように力学センサーの高さと化学スタンドと角材の距離を調整しながら行った。

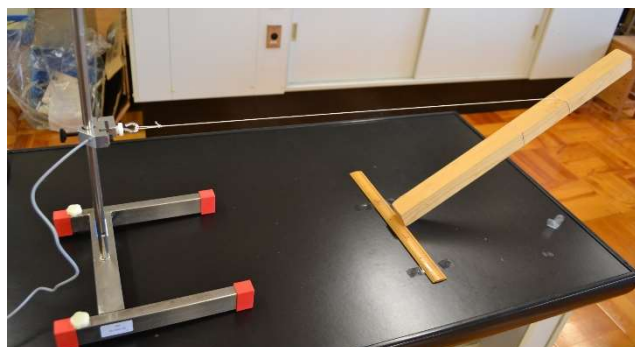
タコ糸が水平であることを確認した後、力学センサーで張力を読み取り、このときのタコ糸の高さ h と重心の高さ (図 2 中の $L \sin \theta$) を読み取る。実際に測定が必要な値は図 2 中の d ($= L \cos \theta$) であるが、測定がしづらいので $L \sin \theta$ を測定して、 d を計算により算出することとした。

力学センサーの高さと化学スタンドと角材の距離を調整することにより、角材の傾角 θ を変化させながら、同様に張力とタコ糸の高さ、重心の位置を測定し、5 点ほどのデータを測定した。

測定したデータをもとに、張力 T を d/h に対して表計算ソフトを用いてプロットし、直線関係を示すことから③式が成立していることを確かめた。また、直線近似により傾きを計算し、傾きが角材に働く重力に一致することを確認した。



【図 2】実験装置レイアウト図



【図 3】実験装置レイアウト写真

【3. 授業の展開と指導上の留意点】

本実験実習では、身の回りの現象への着目、実験方法のデザイン、表計算ソフトを用いたデータ整理と簡単な解析を体験させることを目的としている。課題研究の導入として実施するのであれば、2 時限を用いる計画で実施することが好ましい。以下の展開は 2 時限での実施を想定している。人数は各班 3 名～4 名が適正と思われる。

- (1) 普段当たり前のこととして見過ごしている身の回りの身近な事象にも、すぐに説明ができないことがあることを伝える。
- (2) (実際の綱引きの映像や写真を見せ、) 例えば、綱引きはなぜこのような姿勢をとるのか、グループで考えさせる。机間指導しながら、適宜ヒントを与える。その後、グループごとに意見を述べさせる。
- (3) 【図 1】を示しながら、「綱引きの後傾姿勢は力のモーメントで説明できるのではないか」という「仮説」を提起する。
- (4) (2)の「仮説」を明らかにするためにどのような実験をデザインすればよいか、グループごとに具体的に考えてみるよう指示する。机間指導しながら、適宜ヒントを与える。その後、グループごとに意見を述べさせる。
- (5) 【図 2】を示しながら、実験のデザインにおいては、必ずしも最初からリアリティを追求する必要はなく、シンプルなモデル化を行えばよい旨を伝える。
- (6) 実験方法を指示し、データをとるよう指示する。その際、予め Excel などの表計算ソフトを起動させ、データ(角材の長さの半分 L 、張力 T 、タコ糸の高さ h 、重心の高さ ($L \sin \theta$))を記録するよう指示する。実験にあたっては、以下のような状況がよく見られるので、巡回して適宜個別に指導する。
 - ・角材に結び付けたタコ糸の結び目が適切な位置でないため、角材が安定せず倒れる。
 - ・角材の傾斜角度を変える際、タコ糸の長さをいちいち変えようとするなど、非効率な条件変更を行っている(力学センサーの高さを変えた後、タコ糸が水平になるように化学スタンドの位置を前後させればスムーズである)。
- (7) データが収集できたことを確認後、表計算ソフトで以下のデータ処理について説明し、実施させる。
 - ・重心の高さ ($L \cos \theta$) と角材の長さの半分 (L) から $L \cos \theta = d$ を算出する。
 - ・張力 T を d/h に対してプロットさせる。 T と d/h が比例関係になっているか確認し、なっていないければ適宜指導する。

この処理は、表計算に慣れていない生徒は時間がかかるので、実際の作業をプロジェクターで投影しながら説明するなど、丁寧に指導する必要がある。
- (8) 余裕がある班には、直線近似により傾きを算出し、角材質量との関係を確認させる。
- (9) さらに時間があれば、実際に体育祭などでよくみ

られる姿勢(腰を曲げた状態・しゃがんだ状態)はなぜ適切ではないのか、腹筋や背筋などの筋力がなぜ重要なのかなどについてもグループで討議させ、発表させる。

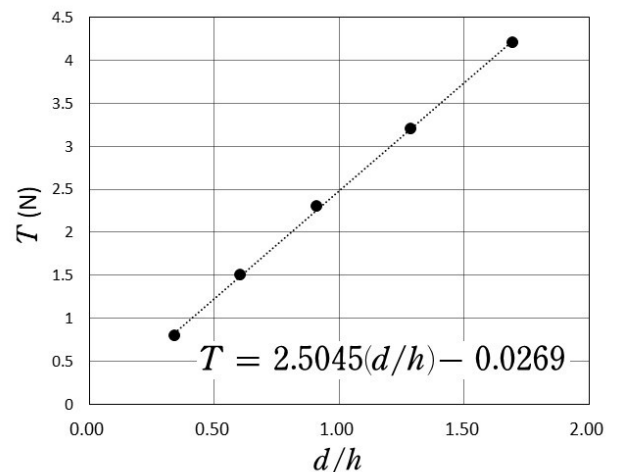
なお、1 時限 (50 分) で実施する場合は、(2)、(4)、(8)、(9)は割愛して実施している。

【4. 実践・考察】

【表 1】および【図 4】に実施例を示す。本実験実習では、学習用端末(本校では iPad)の活用も目的の一つに含んでいるため、データロガーや表計算ソフトを用いているが、精度は 0.1N まで測定できれば十分なので、バネ秤とグラフ用紙でも実験は可能と考えられる。

【表 1】実施例 (右欄は計算結果)

h(mm)	$L \sin \theta$ (mm)	T(N)	$\sin \theta$	$\cos \theta$	$d = L \cos \theta$	d/h
144	95	4.2	0.3626	0.9319	244.17002	1.70
180	122	3.2	0.4656	0.885	231.86203	1.29
229	158	2.3	0.6031	0.7977	208.99761	0.91
285	197	1.5	0.7519	0.6593	172.72811	0.61
338	235	0.8	0.8969	0.4421	115.84041	0.34



【図 4】実施例；張力 T と d/h の関係

近年は 50 分で実習することが多いが、50 分内で【図 4】のようなグラフの描画まで達するグループは 6 割程度であることが多く、できれば 2 限連続で取り組ませたい内容である。また、この検討結果だけでは見えてこないが、なぜ綱引きに背筋や腹筋などの筋力が必要であるかについて、体を剛体と化す必要があるためであることも触れておきたいところである。このような点についてさらに理解させるため、例えば角材を 2 分割し、蝶番などで接続して屈曲可能とし、圧電素子を挟むなどの方法で屈曲に対する抗力も測定可能とすれば、身体にかかる負荷についても考察でき、さらに学びの深い実験ができると考えられるので、今後さらに取り組んでみたい。

生徒には、本実習を参考に、普段見過ごしている身の回りの現象について目を向けさせ、「なぜ？」と考える習慣を身につけさせたい。

【参考資料】

実験実習で用いているスライド資料を抜粋して以下に掲載する。

SSL I 実習 (物理ラボ群)

綱引きの姿勢を 力のモーメントで考える

(嵯峨野高校課題研究【SSL I】導入実験より)

課題研究の進め方とデータロガーを用いたデータ測定・整理

嵯峨野立寄野野原 基本 習

1

実験のデザインと現象のモデル化

- 実際の現象について、そのメカニズムを調べたりするときには、リアリティを追求するのに限界があることが多い (特に高校生にとっては)
- 実際の研究では、実際の現象をモデル化・ミニチュア化することで実験をデザインし、実験データの解析から仮説の検証、あるいはモデル化の妥当性などを検討してさらに実験を改良するなどの過程をとることが多い
- 今回は、簡単な実験を通して身近な現象のモデル化を行い、データ測定を行う。

2

課題例

【課題】綱引きにおいて、どのような姿勢をとるのが効果的か？

なんとなくこんな姿勢をとるが…これはリーズナブルなのか？

3

課題例

【仮説】力のモーメントで説明できる

$mg = N$
 $T = f \leq \mu N$
 $Th = mgd \Leftrightarrow T = mg \frac{d}{h}$

- 仮説
- d を大きく
- h を小さくすれば
- 大きな T に対して
- 姿勢を保持することができる。

4

実験をデザインしてみよう (3分)

- このようなことを確かめるには、どのような実験を行えば良いか
- グループごとに話し合って、実験方法を考えてみよう。

5

各班発表 (1分)

- 実験の概要
- 必要な器具や物品

6

まずは、できるだけシンプルに； モデル化

まずはシンプルに、その後、実験を進めながらリアルに近づければよい

7

実験模式図

角材

タコ糸

データロガーへ接続

力学センサー

化学スタンド

竹尺 (定規)

L

L

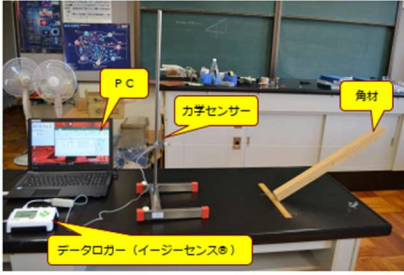
$L \sin \theta$

θ

$d = L \cos \theta$

8

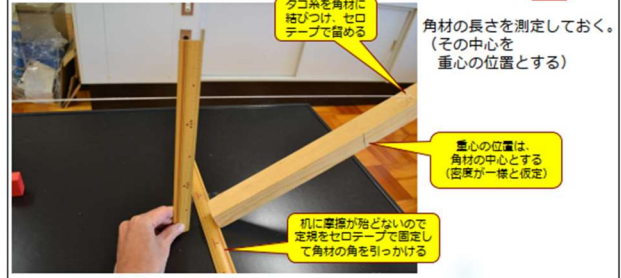
実験の準備



- 使用するもの
- ・角材
 - ・タコ糸
 - ・定規×2
 - ・化学スタンド
 - ・データロガー (イーザーセンス®)
 - ・カチセンサー

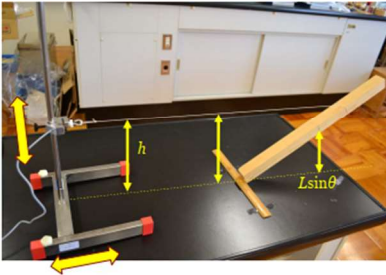
9

角材



10

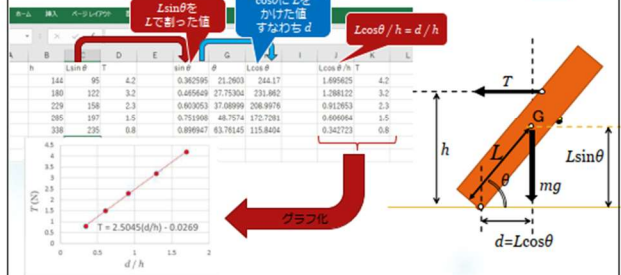
実験方法



- ① カチセンサーの高さを換え、スタンドを前後させてタコ糸が机に平行になるよう調整する。(2カ所でタコ糸の高さを測ればよい。)
- ② タコ糸の高さ (h) と、重心の高さ ($L\sin\theta$) を測り、記録する。(mm単位まで測る。)
- ③ カチセンサーで張力を読み取り記録する。
- ④ ①～③を繰り返し、5点ほどデータをとる。

11

Excelを用いたデータの処理



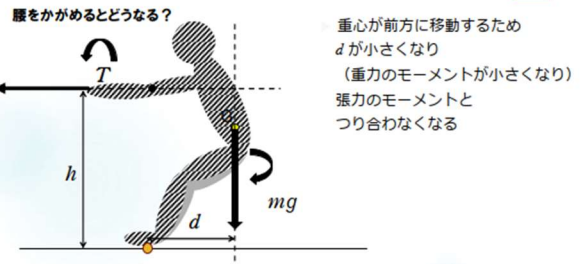
12

考察

綱引きは、体重(質量)が大きければ、それだけで強いのか？
前傾姿勢をとってしまうと、なぜよくないのか？
他に、日常的に「無意識にとっている」姿勢はないか？

13

考察・新たな課題への発展



14