

紙ひもの強度

神坂 夏実
KAMISAKA Natsumi

小原 颯斗
KOBARA Hayato

土居 愛佳
DOI Manaka

長尾 風侑葵
NAGAO Fuki

1. 要旨・概要

プラスチック製のひもに代わる紙ひもを作り現在進められているプラスチック削減に役立てたいというのが研究の動機である。私たちは元の紙より紙ひもにしたほうが強度（ここでは強度を引張強度とする）が高くなる、伸びが大きいほど強度は高くなるという仮説を立て、紙ひもの強度を高くするための条件を知るため、紙ひもを自作し、その紙ひもの長さや伸びによる強度の違いを調べた。その結果、紙ひもを作成する過程で短冊状の紙をそのまま巻いて紙ひもにするより、濡らしてから巻き乾燥させたもののほうが強度が高くなるということが分かった。また、紙ひもの長さや伸びによらず強度は一定となった。そこで、巻く前の短冊状の紙と紙ひもの強度の違いについて調べた。その結果、私たちの予想と反して短冊状の紙と紙ひもでは強度は変わらないということが分かった。

2. 問題提起・研究目的

世界中でプラスチック削減が進められている現在、プラスチック製のひもに代わる紙ひもを作ることでプラスチック削減に貢献したいと思った。

海上技術安全研究所の「ロープに関する資料」よりプラスチック製のロープにはばね定数があり、伸び率が大きいほど強度が高いということが分かっている。(グラフ1)

そこで、安定した紙ひもの作り方を確立し、自作した紙ひもの長さや伸びと強度の関係性を調べることで紙ひもの強度を高くするための条件を知ることを目的とした。

3. 実験方法・結果・考察

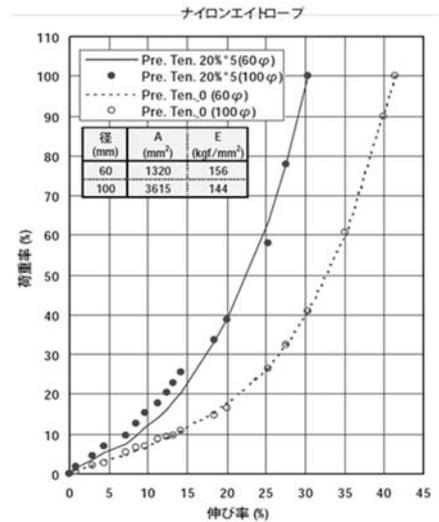
【実験①】

目的 短冊状の紙を乾いたまま巻いた時と水で濡らしてから巻いた時の紙ひもの強度の違いを調べる。そして、安定した紙ひもの作成方法を確立する。

仮説 紙ひもを作成したが、紙を巻くときに紙が破れたり、紙ひもが一樣にならなかつたりしてうまく巻くことができなかつたため、適切な紙ひもの作成方法ではないと判断した。原因として、クラフト紙は硬く、電動ドリルで均等に巻くことができず、紙の一部に負荷がかかっていることが挙げられ、紙を柔らかくすることで均等に負荷がかかり、強度も高くなるのではないかと考えた。そこで、短冊状の紙をドリルで巻く前に水で濡らすことにした。

方法【紙ひもの作成手順】

- 乾いたもの
 - クラフト紙を幅1cm、長さ42cm(A3の長辺の長さ)の短冊状に切り、片方の端を電動ドリルに挟み、反対側の端に重りを取り付ける。
 - ひねった回数をフォトゲートで観測しながら電動ドリルで100回回転させる。(写真1・図1)



グラフ1 ナイロンエイトロープの特性グラフ (海上技術安全研究所「ロープに関する資料」より抜粋)



写真1 フォトゲートと電動ドリル

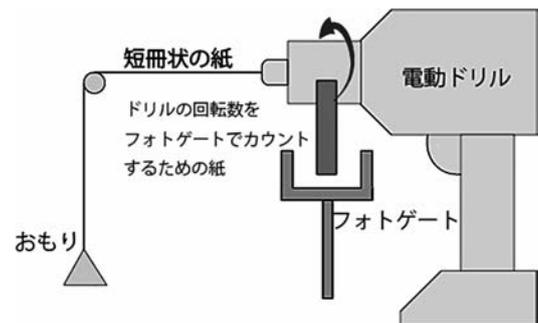


図1 写真1の簡略図

・濡らしたもの

- 1.クラフト紙を幅 1 cm, 長さ 42 cm (A3 の長辺の長さ) の短冊状に切り, 軽く水につけ, 水気を切ってから片方の端を電動ドリルに挟み, 反対側の端に重りを取り付ける。
- 2.ひねった回数をフォトゲートで観測しながら電動ドリルで 100 回回転させる。
- 3.電動ドリルで巻いた後は画びょうとセロハンテープで壁に固定し, 15 分間乾燥させる。

【測定装置の製作】(写真 2)

一定の速さで紙ひもを引っ張るために測定装置を作成した。

- 1.長さ 1.8mの合板を二枚重ね左端に手動ウィンチ右端にクランプスタンドを固定する。
- 2.手動ウィンチから出たワイヤーをハンディスケールに取り付ける。
- 3.ハンディスケールの持ち手部分の凹凸によるひずみをなくするため塩化ビニルのパイプをはめる。



写真 2 自分たちで作った実験器具の様子

【測定方法】

使用する紙ひもは長さ 17 cmとし, 実験は各 20 回程度行った。同じ長さの短冊状の紙を同じ回数巻き, その後それぞれの長さに測った。(図 2)

- 1.作成した紙ひもの中央付近で 17 cmに測り印をつける。その印をあわせて紙ひもを輪にしてハンディスケールの取っ手にくぐらせ, 木片で固定する。(写真 3)
- 2.手動ウィンチのハンドルを一定の速さで回すことで紙ひもを引っ張る。
- 3.紙ひもが破断するまで引っ張り続け, その間のハンディスケールの最大値を読み取る。

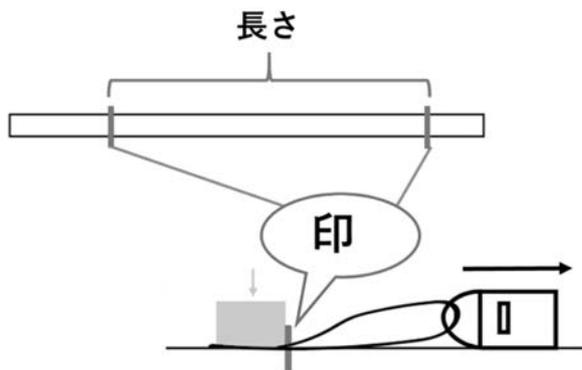


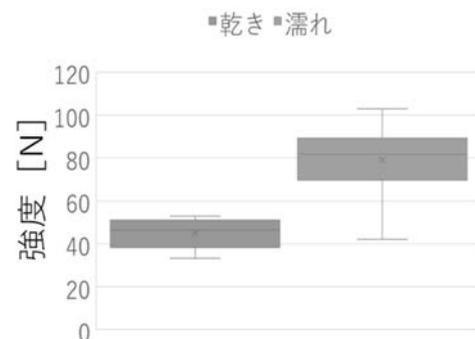
図 2 長さについて



写真 3 印を合わせてハンディスケールの取っ手にくぐらせ固定する様子

結果 水で濡らしてから巻いた紙ひもの強度の平均値は 85.5N, 乾いたまま巻いた紙ひもの強度の平均値は 45.0N となり, 水で濡らしてから巻いた紙ひもの方が乾いたまま巻いた紙ひもよりも強度は高くなった。(グラフ 2) 乾いたまま巻いた紙ひもはドリルで巻いている際に切れることも多かったのでその点からも濡らしてから巻いた紙ひもの方が強度が高いと考えられる。濡らしてから巻いた紙ひもでは作成途中で切れることもなく, 安定して作成することができた。

考察 水素結合が解けて柔らかくなったためドリルで巻く際に破れにくくなった。また, 乾燥した際に縮み密度が高くなったからだと考えた。



グラフ 2 乾いたまま巻いた時と水で濡らしてから巻いた時の強度の違い

これにより濡らしてから巻いた紙ひもでは安定して作成することができたので、今後の実験では全て濡らしてから巻いた紙ひもを使用することとした。

【実験②】

目的 紙ひも作成時のドリル側（写真4の赤丸の部分）とおもり側（写真4の青丸の部分）の紙ひもの強度の違いを調べる。

方法 使用する紙ひもの長さは42cmの短冊状の紙をひねって作った紙ひものおもり側10cm、ドリル側10cmとし、実験は各20回行った。

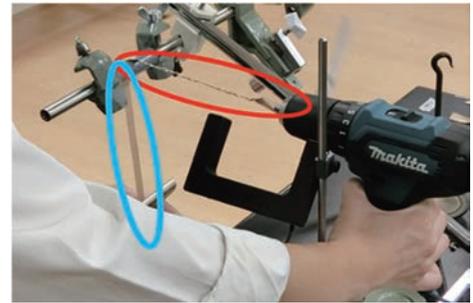


写真4 ドリル側とおもり側について

【計測について】

デジタルフォースゲージ(ZTA-500N/株式会社イマダ)、電動計測スタンド(MXZ-500N/株式会社イマダ)を使用した。(写真5) 実験①で用いた装置と原理は同じで引張強度を測ることができる。また、この装置では紙ひもが破断した瞬間の紙ひもの引張強度のほか、紙ひもが破断するまでにかかった時間を計測することができる。なお、実験2では他の実験とは違い10cmの紙ひもを輪にせず上下のクランプに取り付け実験を行う。そのため、(図3)のように紙ひもを輪にしているときは負荷が2本分に分散されるが、輪にしていないときは1本にすべての負荷がかかるため、得られる値は紙ひもを輪にして実験を行ったときの半分になる。



写真5 デジタルフォースゲージと電動計測スタンド

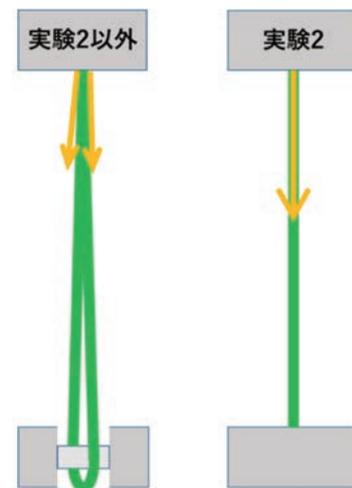


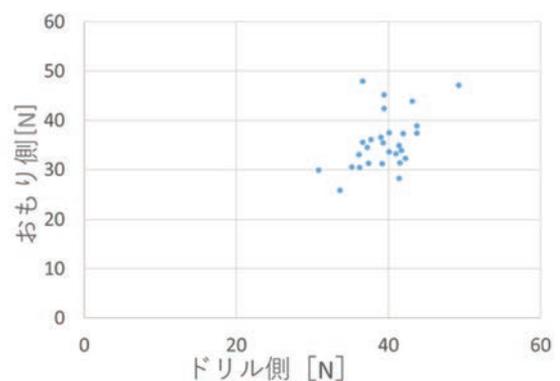
図3 負荷のかかり方の違い

- 1.紙ひもを真ん中で切断した後ドリル側、おもり側のそれぞれ中央付近10cmを測り、印をつける。
- 2.電動計測スタンドの上下のクランプで紙ひもを挟み、紙ひもを0.5mm/sで引っ張る。
- 3.紙ひもが破断するまで引っ張り続け、その間のデジタルフォースゲージの値の最大値を読み取る。

結果

グラフ3より同一のひもにおいて強度に差がほとんどないということが分かる。

紙ひものどの位置においても強度が一定であったため、作成した紙ひもは一様であると考えられる。



グラフ3 ドリル側とおもり側での強度の違い

【実験③】

目的 紙ひもの長さによる強度の違いについて調べる。

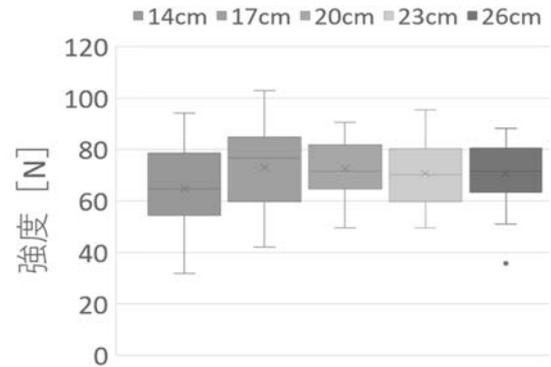
仮説 市販の紙ひもはどの長さでも強度は一定になるので、長さによって強度は変わらない。

方法 使用する紙ひもは、長さ 14 cm、17 cm、20 cm、23 cm、26 cm の 5 種類。実験回数は各 20 回、計測は実験①と同様に行った。

結果

表 1 各長さの中央値

紙ひもの長さ	14cm	17cm	20cm	23cm	26cm
中央値 [N]	64.8	76.7	71.5	70.3	71.5



グラフ 4 紙ひもの長さによる強度の違い

どの長さの紙ひもにおいても強度は長さによらず一定である。(表 1, グラフ 4)

市販の紙ひもは長さによらず強度は一定になるので紙ひもを一様に作成できているといえる。これにより安定した紙ひもの作り方が確立できたと言える。

【実験④】

目的 紙ひもの伸びと強度の関係を調べる。

〈伸びの定義について〉(図 4)

先行研究では実験にプラスチック製ロープを用いており、プラスチック製ロープは力を加えたときの変形の仕方のほとんどが弾性変形(力を加えるのをやめると力を加える前の全長に戻る変形)であるため、破断した瞬間の全長から力を加える前の全長(自然長)を引いたものがプラスチック製ロープの伸びとなる。しかし、紙ひもは力を加えたとき弾性変形と塑性変形(力を加えるのをやめても力を加える前の全長には戻りきらない変形)の 2 種類の変形をするため、力を加える前と後では自然長が変化している。そのため、弾性変形による伸びは、破断した瞬間の全長から破断後の全長をひくことで求めることができる。この研究ではこれを紙ひもの伸びと定義する。また、伸びは故意的に変化させることが不可能であったため実験を行って測った値となっている。

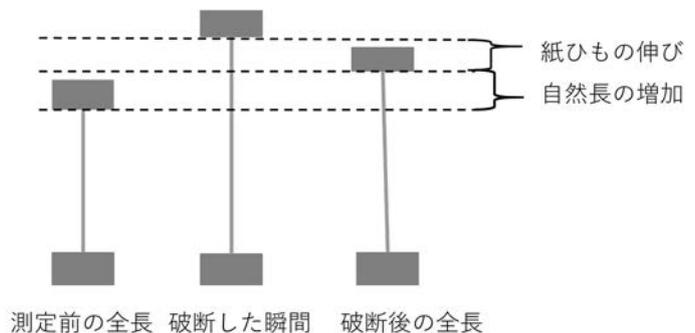


図 4 伸びの定義について

仮説 先行研究と同じように伸びが大きいほど強度は高くなる。

方法 使用する紙ひもはすべて 20 cm とし、実験回数は各 20 回で行った。

【計測について】

実験②で述べた既製の装置を使用した。ただし実験②の下のクランプを塩化ビニルパイプ(実験①で用いたハンディスケールの取っ手に対応する)に取り換え、紙ひもを輪にして塩化ビニルパイプにくぐらせ、上のクランプで固定して実験を行う。

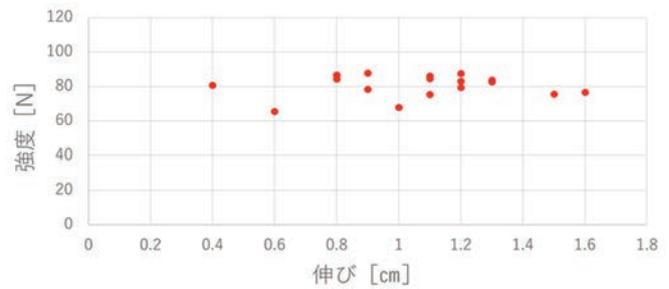
1. 紙ひもを中央付近で 20 cm に測り印をつける。

2. 電動計測スタンドの塩化ビニルパイプにくぐらせ、上のクランプで固定し、紙ひもを 0.5 mm/s で引っ張る。

3.紙ひもが破断するまで引っ張り続け、紙ひもが破断した瞬間のデジタルフォースゲージの値を読み取る。

結果 伸びによらず強度は80Nほどで一定であった。(グラフ5)

この結果は私たちの仮説に反するものであったため、さらに詳しく調べるため紙ひもより大幅に伸びの小さい元の短冊状の紙と紙ひもの強度の違いについて調べることにした。



グラフ5 紙ひもの伸びによる強度の違い

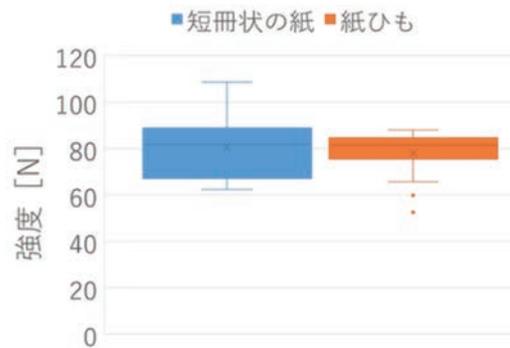
【実験⑤】

目的 短冊状の紙と紙ひもの強度の違いについて調べる。

仮説 市販の紙ロープはねじって売っているものが多いことから、元の短冊状の紙より紙ひもにした方が強度が高くなる。

方法 使用する紙ひも、短冊状の紙はすべて長さ20cmとし、実験回数は各20回、計測は実験④と同様に行った。

結果 短冊状の紙の強度の中央値は81.7N、紙ひもの強度の中央値は81.6Nとなり、短冊状の紙と紙ひもでは強度に差が見られなかった。しかし、ばらつきは短冊状の紙のほうが紙ひもよりも大きかった。(グラフ6)



グラフ6 短冊状の紙と紙ひもの強度の違い

考察 一般的に、紙には繊維方向があり、繊維方向への力には強く、繊維方向と垂直な方向には弱くなっている。しかし、私たちが使用したクラフト紙を顕微鏡で観察すると、(写真6, 7)のように一般的なコピー用紙よりもクラフト紙のほうが繊維の長さが明らかに長かった。このことから、クラフト紙は繊維の長さが長く繊維同士が複雑に絡み合っているため、一般的な紙に見られる繊維方向がクラフト紙にはほとんどないと推測できる。よって、紙ひもと短冊状の紙で強度に差が見られなかったと考える。

次に、実験時における紙ひもと短冊状の紙それぞれの破断場所に注目すると、短冊状の紙はクランプで挟んでいる部分で破断しているサンプルの割合が大きかったのに対し、紙ひもは塩化ビニルパイプとクランプの中間で切れているサンプルが多く見られた。つまり、短冊状の紙は他の物体と接している部分から大きな力を受けるため、取り付け時の引っ張り方向に対する角度の微妙なずれが結果に影響を及ぼしたと考える。一方、紙ひもは縦横に柔軟に変形することが可能なため、取り付け時の影響は小さかっただろう。よって、ばらつきは短冊状の紙のほうが紙ひもよりも大きかったと考える。



写真6 クラフト紙の繊維 (20倍)

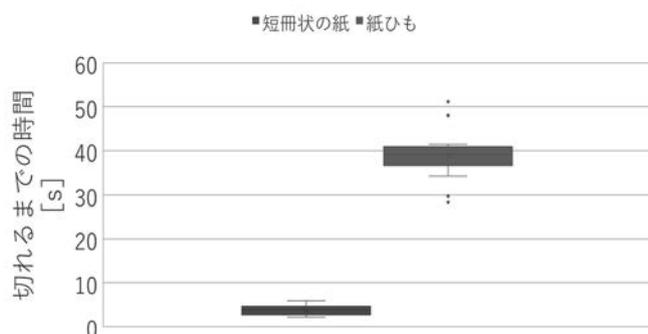


写真7 コピー用紙の繊維 (20倍)

この実験をしている際、紙ひもと短冊状の紙では破断までの時間が異なることに気がつき、それぞれの破断までの時間のデータをとった。

結果 破断までの時間の平均値は紙ひもが 38.9 秒、短冊状の紙が 3.8 秒となっており、紙ひものほうが短冊状の紙より明らかに破断するまでの時間は長かった。(グラフ7)

考察 自明のことではあるが、紙ひもは伸びるのに対して短冊状の紙は伸びない。これにより、伸びる余地がある分、紙ひものほうが短冊状の紙より破断する力に達するための時間が長かったのだと考える。そして、紙ひもは破断までの時間が長いいため、引っ張った際の時間に対する耐久性が高いと言える。



グラフ7 短冊状の紙と紙ひもの破断までの時間

4. 結論

目的の1つである安定した紙ひもの作り方を確立することができた。私たちの仮説に反して、クラフト紙の場合、紙ひもと短冊状の紙の強度は変わらなかった。しかし、破断までの時間は短冊状の紙より紙ひものほうが長く、引っ張った際の時間に対する耐久性が優れている。また、紙ひもを作るためには元の紙の強度が必要である。

5. 本研究の意義

一般に、短冊状の紙より紙ひもの方が強度が高いと認識されているが、クラフト紙の場合、実際には強度は変わらない。しかし、引っ張った際の時間に対する耐久性が高いということが示された。

今後環境的配慮から紙ひもが普及したり、災害時等に紙ひもを作成したりする際、一般の紙で作成することは困難であり、より性能の高い紙ひもを作成するにはクラフト紙のような繊維方向がほとんどない紙を使うことが望ましいと分かった。

6. 今後の展望

紙ひもの作成段階において、今回条件を合わせられなかった短冊状の紙に含ませる水分量を変えたり、乾燥時間を変えたりすることによって強度が変化するか調べる。

本実験では、クラフト紙でしか実験を行っていないため、ほかの種類紙でも同じような短冊状の紙と紙ひもで強度は変化しないという関係が成り立つのか調べる。

今回は幅 1 cm、長さ 42 cmの短冊状の紙を巻いた紙ひもで実験を行ったが、元の短冊状の紙の幅が変わるとクラフト紙を用いても今回と同じような短冊状の紙と紙ひもで強度は変化しないという関係は成り立たないかもしれない。そこで、クラフト紙で元の短冊状の紙の幅を変えても同じような関係が成り立つのか調べる。

7. 参考文献

海上技術安全研究所. “付録.1 ロープに関する資料”. 海上技術安全研究所ホームページ <https://www.nmri.go.jp/main/publications/paper/pdf/21/04/02/PNM21040201-18.pdf>
(参照 2021-12-10)

8. 謝辞

この研究にあたり、私たちの班の担当教諭である佐藤先生をはじめとした、高松第一高校の先生方にこの場を借りて深く御礼申し上げます。