切断時の索の挙動についての基礎実験—II.

磯崎 道利*・久々宮 久**

On the Motion of Broken Ropes—II.

Michitoshi ISOZAKI and Hisashi KUGUMIYA

Abstract

There are many works of handling ropes on board. And it is very dangerous to handle ropes when they are stretched tightly, because if they are to be cut, they fly rapidly towards the other point where the rope has been tied and are apt to cause the serious disaster. But the motions of these ropes have not thoroughly clarified yet.

We studied the phenomena using high speed photography. The camera can catch the motions every 2.5 ms and we arranged the mirror to be able to get the phenomena in the vertical plane as well as in the horizontal one.

The summary of the results are as follows:

- (1) Each area, which is to be drawn connecting maximum horizontal deviation of a flying rope, has a particular character defined by its twist.
- (2) Deviation, from where the rope is originally fastened, does not depend on the length of rope.
- (3) Relation between the shape of flying rope and its speed is clarified.
- (4) Flying speed of a broken rope depends on its potential energy and can be estimated by its tension given prior to the snap.

1. はじめに

船舶運行においては、索を取り扱う作業が多く、しかもそれにより発生する災害も多い。しかしながら切断後の索の運動は高速で、現象が短時間で終わるので、これを定量的に把握することが容易ではなく、研究例も少ない。

前報では主に木綿の細索に張力を与えて切断し、二次元的な索の暴れの状況と、切断端の速度の解析結果が報告された⁽¹⁾。今回は、三次元的な索の暴れの状況を解析すると共に、木綿索以外の索についてもさらに詳しく切断端の速度を推算することを目標とし、切断前の索のもっているポテンシャルエネルギーと、切断後に索の持っている運動エネルギーとを比較することによる推算方法について若干の知見を得た。そしてこの方法により、船舶で実際に多用されているビニロン（クレモナ）索について、ある条件で切断された場合の切断端の速度の推算を行なったので報告する。

2. 実験方法及び供試索

通常の引張り切断実験では、切断時の張力と切断箇所を一定にするのが難しく、更に撮影のタイミングをとるのも困難である。そこでまず、4.5mmφ以下の供試索については、供試索の一端Aを固縛し、他端Bに滑車を介して荷重をかけ、水平面上一定の高さの所に供試索を水平に展張した。そして索の一端を幅2cmの台の上で真上からカッターを用いて強制的に切断し、その後の索の挙動を上方から写真撮影した。写真には、索の水平面内の

* 正会員 航海訓練所（〒100 東京都千代田区霞ヶ関2-1-3）

** 正会員 東京商船大学（〒135 東京都江東区越中島2-1-6）

挙動と共に実験台上に平行に装備した鏡による索の鉛直面内の挙動も同時に記録出来るようにした。また挙動の解析に利用するための水平面座標と鉛直面座標も同じ写真画面に納まるようにした。しかし 6.0mmφ 以上の索については、東京商船大学の横型引張り試験機を使用して供試索に一定の張力を与えることにした。

図1 実験装置

図1に実験装置の概略を示す。

供試索は、三つ撚り (Z撚り) の木綿索 (1.4mmφ, 3.0mmφ, 4.5mmφ) とビニロン (クレモナ) 索 (2.2mmφ, 6.0mmφ, 10mmφ, 20mmφ, 40mmφ) を使用し、他に比較の為に二つ撚り (S撚り) のナイロン索 (0.7mmφ), モノフィラメントのナイロン索 (0.45mmφ) 及び切り口が扁平のゴム紐 (1.0×4.5mm) を使用した。表1に供試索の諸元を示す。

座標系は、固定点を原点とし、索の展張方向をX軸、鉛直方向をZ軸 (上向きを正)、水平方向をY軸とする右手系とした。そして固定点から切断点までの長さを代表長さ L として、索長 L などという。したがって索長 L の索では切断点の座標は $(L, 0, 0)$ と表わされ、切断後の切断端は $(L, 0, 0)$ から $(0, 0, 0)$ に向かって運動する。

表1 供試索諸元

Name	Cotton (1.4mmφ)	Cotton (3.0mmφ)	Cotton (4.5mmφ)	Nylon (0.7mmφ)	Nylon (0.45mmφ)	Rubber String (1.0×4.5mm)	Vinylon (2.2mmφ)	Vinylon (6.0mmφ)	Vinylon (10mmφ)	Vinylon (20mmφ)	Vinylon (40mmφ)	単位
Mass	8.79×10^{-4} (8.07×10^3)	4.76×10^{-3} (4.28×10^4)	9.50×10^{-3} (8.55×10^4)	3.01×10^{-4} (2.71×10^3)	2.08×10^{-4} —	5.01×10^{-3} —	2.74×10^{-3} (2.47×10^3)	2.16×10^{-2} (1.94×10^3)	6.00×10^{-2} (5.40×10^3)	2.45×10^{-1} (2.21×10^3)	9.70×10^{-1} (8.73×10^3)	(kg/m) (denier)
Density	0.583 583	0.673 673	0.593 593	0.783 783	1.31 1310	1.11 1110	0.722 722	0.763 763	0.764 764	0.783 783	0.772 772	(g/cm ³) (kg/m ³)
Breaking Strength	12.2	46.7	79.3	6.80	13.1	—	33.4	330	950	3550	12900	(kgf)
Twist	780	262	194	715	—	—	374	164	100	56	26	(Twist/m)

3. 切断後の索の暴れ

3.1 実験の概要

索に「はねられる」現象を追究する為に、索が初期張力を与えられて展張されている状態から切断後上下左右に暴れながら運動する状況を定量的に計測した。計測は、暗室内で通常の 35mm カメラに、高感度フィルムを装填しシャッタースピードを1秒とし、ストロボスコープを 2.5ms 間隔に発光させて写真撮影し、運動している索の輪郭をとらえることによって行なった。

前報では、二次元での計測の結果、木綿索について、初期張力をその索の引っ張り強さに対する百分率で表わした値 (以後張力比と言う) が大きくなるほど暴れの量は小さくなるが、張力比が15~20%を越えるとその変化の差は小さくなる特徴が報告された⁽¹⁾。

これを参考にして、今回の実験では、木綿索 (1.4mmφ) で張力比を16%に固定し、索長 L を 10cm から 60cm まで 10cm 毎に変化させて行なった。同じ条件の実験を 15~20 回反復実施した。得られた写真画面から、 $X = 0, 5, 10, \dots, 60$ (cm) の13個の X 座標の測定面 (YZ 平面) を通過する切断後の索の運動軌跡の最大値を読みとった。各測定面に於ける同一実験の最大値の平均を求め、スプライン補間法で運動軌跡の包絡線を作成した。また比較の為に二つ撚り (S撚り) のナイロン索 (0.7mmφ) 及びモノフィラメントのナイロン索 (0.45mmφ) についても実験を行なったが、これらについては索長を 50cm とし、張力比をそれぞれ29%, 15%とした。

3.2 暴れの状況

図2は、Z撚りの木綿索 (1.4mmφ) の実験結果を XY 平面 (水平面) について、索長 L を 10cm から 60cm ま

図2 Z 撚りの索の暴れの包絡線(水平面) 木綿索 1.4mmφ

図3 Z 撚りの索の暴れの包絡線(鉛直面) 木綿索 1.4mmφ

図4 S 撚りの索の暴れの包絡線(水平面) ナイロン索 0.7mmφ

で変化させた時の包絡線の作図であり、図3は図2と同様の実験結果をXZ平面(鉛直面)について作図したものである。また、図4は、S撚りのナイロン索(0.7mmφ)の実験結果をXY平面について作図したものである。

これらの実験結果から、索の暴れの状況には次のような特徴があることがわかった。

- (1) XY平面での索の暴れ量は、索の撚りによって異なり、Z撚りの索はYの正の側に偏し、S撚りの索は負の側に偏する、この傾向は切断点に近いほど著しい。これは切断端が必ず、暴れの偏位する側にはねることによって起る。この性質は、撚りの無いモノフィラメントのナイロン索では現われない。
- (2) 固定点におけるYの正・負による暴れ量の偏位は、Z撚りの木綿索については正の側へ約50%、S撚りのナイロン索については負の側へ約25%、それぞれ大きい。
- (3) YZ平面における索の暴れ量は、索の撚りによって顕著な変化は無く、 $X = X_0 - 20(\text{cm})$ (X_0 は切断点座標)付近でZの正の側に極大値を持つ。
- (4) 固定点に於ける暴れの量については、索長Lの相違による顕著な変化は無い。

4. 高速度撮影による索の挙動及び速度解析

4.1 実験概要

ドラム式高速度カメラを使用して、索切断後の運動の状況を2.5ms 間隔に撮影した。なお本実験装置では、撮影可能範囲が約50cmに限られるので、索の長いものについては主に切断端付近を撮影した。また、索に張力を与えてから、切断するまでの時間間隔を各実験とも一定(3分間)とした。

4.2 索の挙動の一般的傾向

写真1は、木綿索(3.0mmφ)で初期張力9.70kgf、張力比21%の撮影結果の一例であり、索長50cmの実験である。索は画面の右端で切断され左に向かって運動する。写真は、鉛直面と水平面との画像2つでカメラの1ショットとなっている。写真1からは、索は固定点から約25cmの範囲では細かな波状を呈し、残りの部分では比較的大きな波を形成する。しかし、索を長くした場合の撮影結果からは、索は細かな波状は呈さず、比較的大きな波だけを形成することがわかった。このことは木綿索の直径や初期張力によらず一定で、ビニロン(クレモナ)索についても同様であった。つまり、索は張力を持った状態で切断されると、固定点に近い部分では比較的

写真1

木綿索 (3.0mmφ) $L=50\text{cm}$

細かな波状を呈し、残りの部分では比較的大きな波だけを形成することがわかった。しかし、この細かな波状を呈する範囲については、索の材質や直径により多少変化がみられた。これは後述する切断直後の速度が、細かな波状を呈する固定点に近い区間の方が、そうでない区間に比べて小さいからである。つまり切断された索は全体として固定点に向かうのであるが、固定点に近いところでは速度が遅いため後から来る部分がそれを追い越そうとして細かな波状を呈し、索が折り畳まれるようにして運動するのである。

比較の為に行なったほぼ完全な弾性体と考えられるゴム紐での実験結果では、ゴム紐は切断されるとあまり顕著な波状を呈する事なく固定点に向かって運動することがわかった。

4. 3 張力を与えられた索の持つポテンシャルエネルギーの推算

張力を持ち、一定の長さで水平に展張されている索がどれだけのエネルギーをもっているのかを推算した。

張力をかける前の一定の長さ（以後基準長 L_0 、という）の供試索に規定の初期張力をかけ水平に展張し、伸びがほぼとまった時点での長さを実測し、それから徐々に張力を減少させ、張力が0になるまでの長さを順次実測した。図5に伸びと張力の関係の一例を示す。図中には、初期張力と張力比を記入してある。

図5 伸びと張力の関係

このようにして求めた伸びと張力との関係線と横軸とで囲まれる面積を求め、これを基準長の供試索の放出するエネルギー量とした。そしてこのエネルギー量を、初期張力を持って索長 L に展張されている供試索全体が

持つ量に改正して、これを索の持つポテンシャルエネルギー E_p とした。

4. 4 切断直後の速度

供試索に規定の張力を与え、そして索の伸びがほぼとまった時点で、索に 5cm 間隔の測定点マークを記入した。測定点マークは切断点から固定点に向かって付した。そして索に規定の張力をかけてから3分間経過した後、索を切断し撮影を開始した。

得られた写真画面から各測定点の X 座標を得て、撮影時間間隔 (2.5 ms) から連続する2つの測得 X 座標の間点における速度を求めた。そして同一測定点での速度を X 座標値の1次近似式で表わした。さらに、切断後索

全体に渡って張力が消滅したと考えられるX座標値に、各測定点が達した時の速度をこの1次近似式により求めた。そしてこれを各測定点における「切断直後の速度」とした。

このようにして切断直後の速度を各測定点毎に求めた。そして、各測定点の固定点からの長さと、切断直後の速度との関係を求めた。

図6は、木綿索（1.4mmφ）で初期張力 1.94kgf、張力比16%で索長 L を 10cm から 60cm まで 10cm 毎に変化させた実験での切断直後の速度である。図6によると切断端付近の切断直後の速度は、索長 L の増大に伴って大きくなるのだが、 L を十分に長くすれば、一定の値に収斂するように見える。

図6 切断直後の索の各部分の速度

図7 切断直後のゴム紐の各部分の速度 $L=50\text{cm}$

図7はゴム紐（1×4.5mm）で $L=50\text{cm}$ 、初期張力 320gf の切断直後の速度である。固定点に非常に近いところは測定出来なかったが、図7によると、ゴム紐では、切断直後の各測定点はほぼ同じ速度を持っている。

これらの実験により、索長 L を十分に大きくすると、固定点に非常に近いところを除けば、各測定点の切断直後の速度は、一定の値に収斂すると見られる。

そこで木綿索（1.4mmφ, 3.0mmφ, 4.5mmφ）と、ビニロン（クレモナ）索（2.2mmφ, 6.0mmφ）について索長 L を出来るだけ大きくして実験を行なった。

図8 切断直後の切断端付近の速度

図8にその結果の一例を示す。これによると切断端付近の速度は、索長と共に微増するが、索長 L が 1.0m 以上になると一定の値に収斂する。また固定点に近いところでは、測定点間の速度の差が大きい。これらの事実は、木綿索の場合のみでなく、ビニロン（クレモナ）索についても同様であることが分かった。そして、測定点間の速度の差が大きい部分は、4.2 で述べた細かな波状を呈している部分に当たっていることがわかった。

4.5 切断した索の運動エネルギー

切断直後に索が持つ運動エネルギー E_K は、索の質量 m と速度 V によって求められる。質量は索に張力をかけ

る前の値を測定しておき、張力をかけて伸びた分だけ補正した。また速度については、索長 L を長くすれば切断端付近の速度は一定の値に収斂するという4.4の結果により、切断端の速度で代表させた。

図9 索長 L とエネルギー比の関係

このようにして、木綿索とビニロン（クレモナ）索の E_K/E_P と索長 L を比較したのが図9である。図9によると、索を長くすれば両エネルギーの比 E_K/E_P （以後エネルギー比と言う）は、1.0に近くなる。

図10 張力比とエネルギー比

また、図10は、木綿索（1.4 mmφ）及びビニロン（クレモナ）索（6.0 mmφ）において、張力比 T_r を変化させた時のエネルギー比を示している。これによると、張力比を変化させても同一の索で索長 L が等しければエネルギー比はほぼ同じであることが分かる。

以上より、張力を持った索は急激に切断されることにより、切断前に持っているポテンシャルエネルギーのほぼ全量を運動エネルギーに変化させると考えられる。

4.6 切断端速度の推算方法

索のポテンシャルエネルギー E_P がすべて運動エネルギーに変化するものとし、切断直後に索の持つ速度が索全体にわたって等しいとする。そのとき索の速度を V_c 、質量を m とすると

$$V_c = (2 \times E_P / m)^{1/2}$$

として V_c を求めることが出来る。4.4で測定した切断端速度 V_e と V_c との比（以後速度比という）と索長との関係を表わしたのが図11である。これによれば索を長くすれば速度比は1.0に近くなることが分かる。また、速度比と索長比（索長と索の直径との比のことを言う。以下同じ）との関係を示したのが図12である。これによっても索長比が大きくなれば速度比は1.0に近くなることが分かる。そして索長比が400以上であれば、ほぼ満足できる精度で切断端の速度が推算できる。これは10 mmφの索では4m、20 mmφの索で8m、40 mmφの索で16mに相当する。

図11 索長 L と速度比の関係

図12 索長比と速度比の関係

4.7 切断端速度の推算方法の問題点

4.6で述べた索の切断端速度の推算方法は、切断直後の速度が索のどの部分でも等しいということを前提にした方法である。本実験では装置の制約から長い索を切断した場合、その索すべてを同時に撮影することができない。したがって切断端にのみ注目して測定してきた。索長 L を長くすることによって切断端付近（約50cm）の速度は一定の値に収斂するのでこのような仮定をたてたのである。

ところでその仮定を確かめる為に、木綿索（4.5mmφ）で索長 3m の切断実験において、 $X=1.5m$ 付近を撮影することにより、索の中央付近の切断直後の速度を測定した。そして切断端付近の切断直後の速度と比較したのが図13である。これによると、索の中央付近の速度は、それが切断端付近であるのと比べて、多少小さくなっ

図13 切断端付近の速度と中央付近の速度

ている。この事実が索長 L をさらに変化させた時、また、他の種類の供試索についても同様であるとは一概に言えないが、索を十分に長くすれば切断直後の速度がどの部分でも同一になるという仮定は、必ずしも正しくないということが分かった。

5. 切断端速度の推算結果

4. 6 の推算方法については、4. 7 で述べたように多少の問題があるのだが、この方法により索切断時の切断端速度を推算した。

図14 切断端速度の推算値

ビニロン（クレモナ）索（6.0mmφ, 10mmφ, 20mmφ, 40mmφ）について伸びと張力の関係を実測し E_P を求め、切断速度を推算したのが図14である。これらから回帰曲線

$$V_c = 3.05 T_r^{0.714} \quad (\text{m/s})$$

を得た。同材質の索であれば、直径が6～40mmまで変化しても、張力比によってよく整理されることが分かった。

6. おわりに

本実験により以下のことが分かった。

- (1) 細索切断時の燃りの違いによる暴れの相違
- (2) 切断時の索長 L の違いによる暴れの範囲
- (3) 切断後の索の波状と速度との関係
- (4) 木綿索、ビニロン（クレモナ）索の切断直後の切断端速度の推算方法
- (5) ビニロン（クレモナ）索においては、索の直径の異なったものでも、張力比によって切断端速度が推算されること

ところで、本実験では、索を強制的に瞬時に切断したが、実際の索の切断の状況は、ストランドが何本かずつ切れてゆく場合が多い。したがって本実験の結果がそのまますべてに当てはまるとは限らない。今後はこれらのことを考慮に入れながら実験を続け

るつもりである。

最後に実験にご協力いただいた東京商船大学・鶴田三郎助教授に深く謝意を表わします。

参 考 文 献

- (1) 久々宮久, 藤井照久: 切断時の索の挙動についての基礎実験, 日本航海学会論文集, 第73号, 1985年9月
- (2) 金田章治 他: 切断時の索の挙動に関する実験, 航海訓練所調査研究雑報, 第89号, 1986年8月
- (3) 繊維学会: 繊維便覧「原料編」, 「加工編」
- (4) J I S L2702 (綿ロープ), J I S L2703 (ビニロンロープ)
- (5) 眞島正市, 磯部孝: 計測法概論(上巻), コロナ社
- (6) 三宅静雄: 物理学通論, サイエンス社

質 疑 応 答

烏野 慶一: 大層複雑な問題かと存じますが, この索の挙動の研究成果は災害の防止にどのような形で反映されるのでしょうか, 御教示ください。

久々宮 久: 御討論をありがとうございます。御承知のように, 特に船上では索を取り扱う作業が多く, 作業者も監督者も, 索の切断や索がボラードやビットから外れることに起因する事故の防止には, 大変心を配っています。それでもなお, 索の暴れによる事故は無くなっておりません。その原因のなかに, 索の暴れの見込量の過小があるのではないのかとの疑問があります。私共の研究は未だ基礎実験の段階を出ておりませんが, 上述の目標を到達点に置いております。

今枝 彬郎:

1. 面白い基礎実験をやられましたが, 実際の船の索ではどの程度の暴れが予想されますか。
2. 索の切れ方によって暴れ方が違うと思います。例えば半分以上切断している索を切断した場合に, どの部分が既に切断していたかその場所によって(初期条件の差によって)暴れ方の方向などが異なり, さらに詳しい解析が得られると思われませんが, どのようなものでしょうか。

久々宮 久: 鋭い御指摘をありがとうございます。御質問の2点とも, 現在の私共の取り組んだ範囲を超えていて, 的確なお答えができません。いずれご指摘の項目に迫らなければならないことは自覚しておりますが。

乏しい知見の中からお答えできることは, 第一の点については, 索の材質によっても相異し, 展張されている索の両支点間長さの30%に及ぶ暴れを示すことが予想されること, 第二の点については, 私達の実験の最大制約条件(カッターによる瞬間的強制切断)となっております。もっとも, 実際場面で索がほとんど瞬間的に完全切断する例もあることも事実です。