

## Dynamical Behaviour of a Nylon Climbing Rope

By

Gunji SHINODA, Nobuo KAJIWARA and Hidcaki KAWABE

(Department of Applied Physics and Precision Machinery)

### Abstract

Dynamic behaviour of a nylon climbing rope was studied. Nylon 11mm stands up to  $\sqrt{H/L}=1.3$  while Manila 12mm breaks at  $\sqrt{H/L}=0.3$  for a falling weight of 55kg,  $H$  being the height of the falling weight and  $L$  the length of the rope. These correspond to impulsive load of nearly 600kg for both ropes. Calorimetric study was made during shock test and compared to the result of the measurement of temperature rise during statical tension test. Nearly 600kg which coincided to above figure was obtained. Nylon ropes show good characteristics for shock loading but they break easily by lateral file action of a sharp rock edge. This is a result of low melting point of it and fusing of the filament at the fracture is always observed.

### Introduction

As nylon has many advantages over manila or other vegetable fibres, its use as a climbing rope became popular since British Eastern Karakorum Expedition of 1946. In Japan, it was tried by members of the Mountaineering Club of our university at Mt. Kaerazu early spring of 1952.<sup>1)</sup> Nylon ropes of Tokyo Rope Co. were used by the 1953 and 1954 Manaslu Expedition Parties of the Japanese Alpine Club. Nylon in Japan was developed by Toyo Rayon Co., quite independent of western countries and belongs to nylon 6 and has good properties.

At the winter of 1954—5, three successive accidents due to breaking of nylon ropes had been occurred. These are

1. Dec.28, at eastern wall of Myojin, 11mm rope, one member of the Shinonome Club was injured.
2. Jan. 3, at eastern wall of Mae-Hotaka, 8mm rope, one member of the Ganryo Club died, and
3. Jan. 3, between third and fourth peaks of northern ridge of Mae-Hotaka, 11mm rope, one member of the Osaka City University Mountaineering Club was injured.

All these accidents are results of very small slip. Thus the investigation to

the causes of these accidents became a grave problem in Japan.

### Filaments of the Rope Broken

#### (a) Mechanical Properties

At first we must study whether there exist any defects or not. The samples of the ropes broken by the accident 3 were collected and subjected to the investigation of mechanical properties about its filaments. The results did not show any defects, as shown in Table 1. For the comparison the results of the

Table I. Properties of rope materials

#### (A) Construction

	Tokyo Rope Co.	British Ropes (Viking)
Diameter of rope	11mm (1 3/8)	11mm (1 3/8)
Structure	3/19/3/12/15	3/19/4/10/33
Total number of filaments	30,810	75,240
Diameter of filament	43 $\mu$	28 $\mu$
Weight	74 g/m	84 g/m
Minimum tensile strength	1500 kg	1900 kg

#### (B) Mechanical strength of filament and string

	Tokyo Rope Co.	British Ropes (Viking)
Tensile strength	25.4 kg	44.5 kg
Elongation	2.84 %	18.6 %
Tensile strength (dry ice)	25.4 kg	
Elongation (" ")	22.0 %	
Knot strength/ordinary strength	72 %	57 %
Tensile strength/denier	11 g	12 g
Tensile strength of rope, calculated	1448 kg	2537 kg

Measured by members of the Mizuno Sporting Goods Co.

Tokyo Rope shows any signs of low temperature brittleness. Also, it shows greater extensibility.

British Ropes (Viking) are also shown. All the values of mechanical properties are means of 19 strings; one strand of the rope consists of 19 strings. All the strings show good and definite mechanical properties. Thus we could not discover any defects in filaments materials.

## (b) Crystallographic Study

The results of the X-ray analysis with photographic method are as shown in Fig. 1. Both (a) and (b) show well developed fibre structure. Any distinction

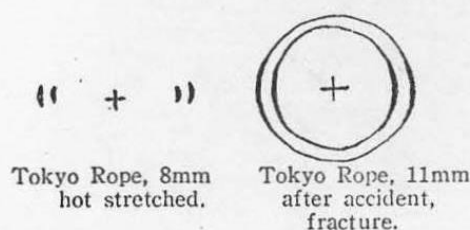
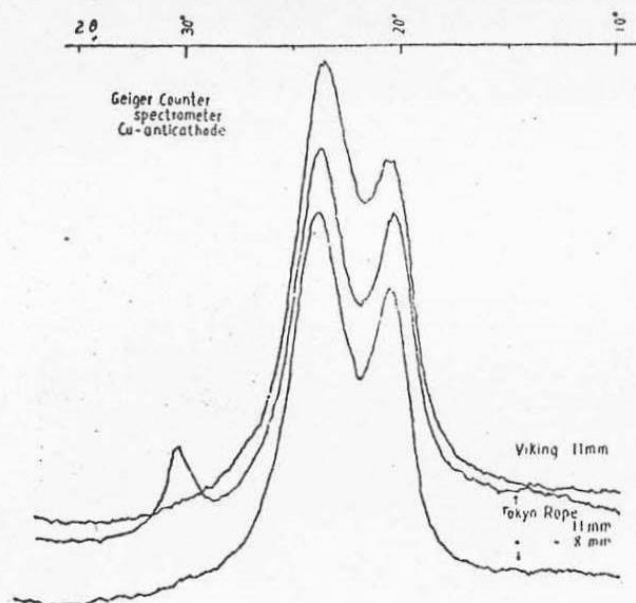


Fig. 1. X-ray diffraction photograph.



was not discovered between those of new samples and broken one. Fig. 1 (a) is that of 11mm rope and (b) that of 8mm rope. As the latter is hot stretched, it shows slight superiority in degree of fibrous structure. Fig. 2 shows a record of intensity distribution along the equator of the diffraction

rings obtained by Geiger counter spectrometer with automatically variable time constant device, designed by our laboratory and constructed by the Shimadzu Seisakusho Ltd. As filaments of the British Ropes belong to nylon 66 their fibrous structures are not so remarkable. Thus we could not find any signs of damage in the broken rope.

Fig. 2. Geiger counter spectrograph record.

## Theoretical Considerations on Dynamical Behaviours

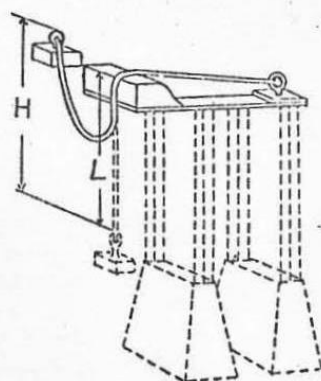


Fig. 3.

Many kinds of ropes are subjected to dynamical test at Gamagori Factory of Tokyo Rope, Co. The method is as shown in Fig. 3. The ropes are impulsively stretched by a falling body of 55 kg through 45° and 90° edge of hard granite.

As a first approximation, we assume that there is no slip at the edge of granite. Then we can say that the rope is fixed at its upper end. If the weight  $W$  is lifted  $H$  and released, the rope will elongate at first with impulsive force  $P$ . Then we have

$$P = \frac{Kx}{L} \quad (1)$$

and the work done is  $\frac{1}{2}Px$ . From energetic consideration, we have

$$W(H+x) = \frac{1}{2}Px \quad (2)$$

where  $W$  is the weight of the falling body. From (1) and (2), we have

$$x^2 - \frac{2WLx}{K} - \frac{2WHL}{K} = 0. \quad (3)$$

Therefore

$$x = \frac{WL}{K} + \frac{WL}{K} \sqrt{1 + \frac{2KH}{WL}} \quad (4)$$

and

$$P = W + W \sqrt{1 + \frac{2K}{W} \frac{H}{L}}. \quad (5)$$

As  $K/W$ , the second term of eq. (5) is larger than the first one, therefore

$$P \approx W \sqrt{\frac{2K}{W} \frac{H}{L}} \quad (5a)$$

and the impulsive force is roughly determined by  $H/L$ .

When friction exists between the rock edge and the rope, (2) becomes as

$$W(H+x) = \frac{1}{2}P'x + \frac{1}{2}P'\mu \frac{a}{L}x, \quad (6)$$

where  $a$  is the length of horizontal part of the rope. From (6) we have

$$P' = \frac{W}{1+\mu'} + \frac{W}{1+\mu'} \sqrt{1 + \frac{2K(1+\mu')H}{W} \frac{H}{L}}, \quad (7)$$

where  $\mu' = \mu \frac{a}{L}$ . Subtracting (7) from (4), we have

$$\Delta P = P' - P = \frac{W\mu'}{1+\mu'} \left(1 - \sqrt{\frac{KH}{2WL}}\right) \approx -\frac{W\mu'}{1+\mu'} \sqrt{\frac{KH}{2WL}}. \quad (8)$$

As  $P$  without frictional slip is nearly equal to  $W \sqrt{\frac{2KH}{WL}}$ ,  $\Delta P/P$  becomes

$$\Delta P/P = -\mu a/2L. \quad (9)$$

As  $\mu$  is greater than 0.5, this reaches to several tens per cent. Therefore with slide-fixing the shock will be reduced considerably.

Impulsive forces for manila and nylon ropes will be calculated from (5a),

and  $P = 490\sqrt{H/L}$  kg for nylon,

$P = 1050\sqrt{H/L}$  kg for manila.

Nylon rope breaks when  $H/L$  reaches to 1.3 and manila 0.3, as shown later, then the ultimate strengths become  $P = 560$ kg for nylon 11mm and 580kg for manila 12mm. The knot strengths of these ropes are nearly equal and about 650kg.



Therefore, the dynamical strength is not much lower than the knot strength. More rigorous treatment will be seen in Kanesaka's paper<sup>2)</sup> and Sherra Club Report<sup>3)</sup>.

### Results of the Shock Test\*

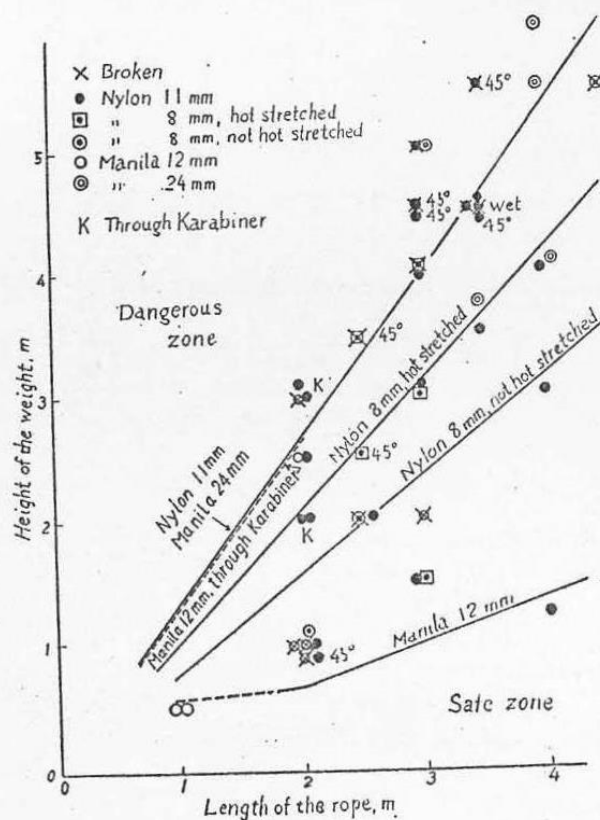


Fig. 4.

From the results of nearly 100 tests a graph shown in Fig. 4 was obtained. Curves show the boundaries between safe and dangerous regions and they are nearly straight when  $H$  and  $L$  are not so small. Therefore, breaking stress must be a function of  $H/L$ , as theoretically expected. Nylon shows much superior impulsive characteristics compared to manila. Nylon rope with 11mm in diameter is as strong as that of manila with 24mm in diameter. In short, we can say that as to the impulsive strength nylon is more than four times as strong as manila.

### Calorimetric Study

Fig. 5 shows the temperature rise during statical tension test. The curves are corrected for heat loss during tension test. As the work required to break 11mm

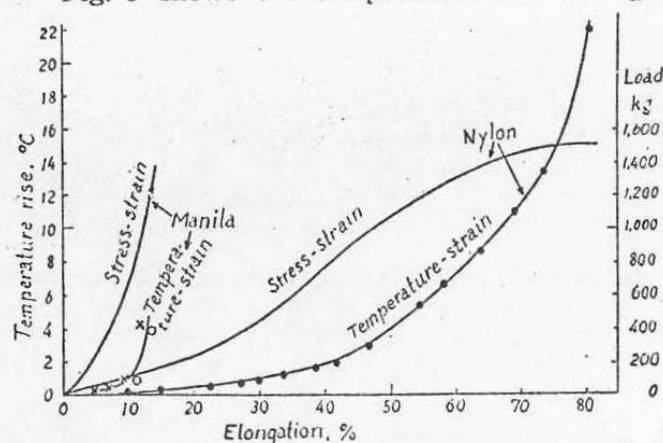


Fig. 5.

nylon rope by statical tension test is 15 cal., if the total work is converted to heat, the temperature must rise about 45°C. Therefore, about 56% of the energy is converted to heat. From the stress-strain curve, work re-

\* For many kinds of climbing manila ropes, a study was made by Minamiōdi.<sup>4)</sup>

quired to stretch the rope from 60% to 80% is 6.7 cal. and corresponds to temperature rise of 20°C. On the other hand, actual temperature rise is 16.5°C and about 80% of the total energy is converted to heat at this stage. On the contrary, at the initial stage, i.e. 0~40%, 3.6 cal. of work corresponding to the temperature rise of 11°C is required, while the actual temperature rise is only 1.6°C. Therefore at the initial stage, the most of the work done by stretching is stored as an elastic energy.

In dynamical tests, either in actual ropes or in model experiment, after several up and down oscillation the falling body ceases its motion. During this last stage almost all the elastic energy of the rope will be converted to heat and then the temperature must rise. The result of the measurement of the temperature rise is as shown in the following table.

Table II.  
Temperature rise during dynamical test

No.	Sample	L,m.	H,m.	Temperature rise, °C.			Distance of the observed point from the rock edge, mm.
					obs.	calc.	
1	manila 12	3	2	broken	1.2	1.2	
1	manila 12	3	2	broken	2.2	2.2	150
2	nylon 11	3	4	safe	5.0	4.0	200
3	nylon 11	3	5	broken	4.0	5.4	400
4	nylon 8	3	3	broken	4.3	5.8	400
5	nylon 8	3	2.5	safe	4.2	4.7	400

As we can see in the table, temperature rise in nylon do not much exceed 4°C except at the experiment No. 2. At No. 2 as the temperature was measured at a point 200mm apart from the edge of the rock, while the slip of about 300mm has been observed, the rise of temperature would be influenced by frictional heat evolution. Then 4°C is nearly the limit of the temperature rise and an energy exceeding the corresponding amount will remain as a residual kinetic energy of the falling body. From this temperature rise, the work to be done to break the rope and consequently ultimate impulsive strength may be calculated. This becomes about 500kg and nearly coincides with the above-mentioned value, 560kg, calculated from eq. (5a).

#### Vibration of a Falling Body after Dynamical Test

Fig. 6 is a sketch of a high speed photograph of a nylon rope. It shows large up and down motion and very slow lateral motion appeared when the falling

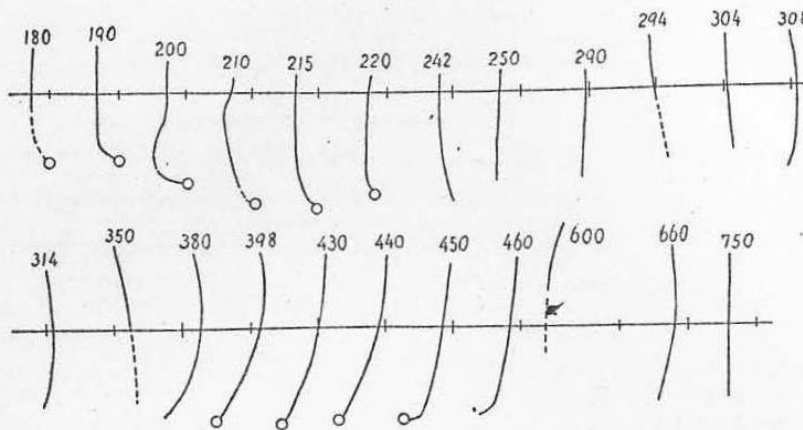


Fig. 6

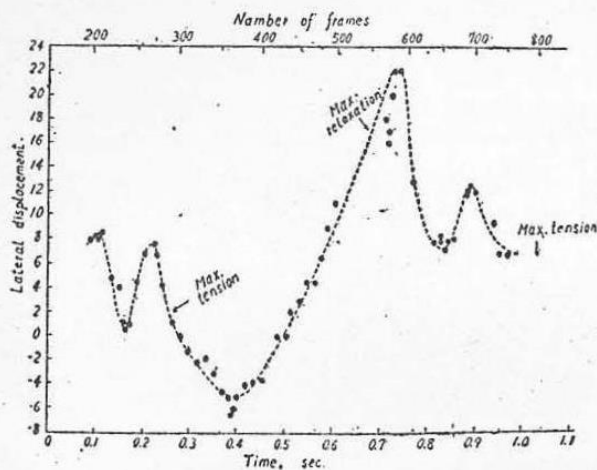


Fig. 7

body is raised by a restoring force of the rope. Displacement *vs.* time curve of the latter is as shown in Fig. 7.

Next, model experiments were done using 3mm nylon strings (3 strands) and a lead falling body of 3kg and high speed motion pictures were taken. The upper end of the string is tied with sailor's knot. Up and down motion is very remarkable. Fig. 8 has been drawn

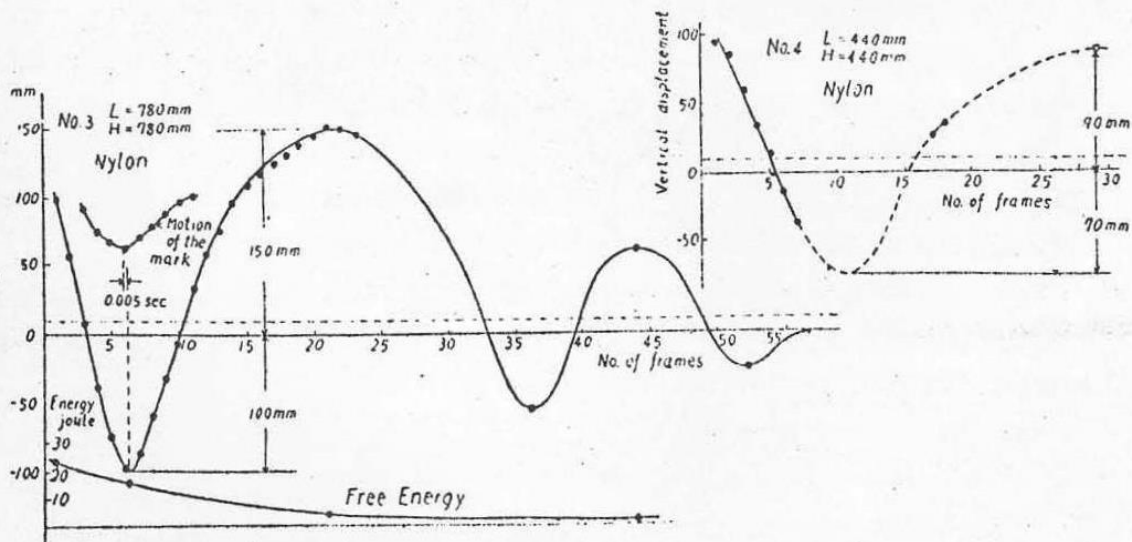


Fig. 8

from these photographs. The falling body sinks at first and the string is stretched. Then the body is raised by the restoring force of the string. The motion of the falling body below the natural length of the string is sinusoidal while jumping by restoring force above the natural length is parabolic. The amplitude becomes almost zero after several up and down motion. Free energy of the system decreases as a manner shown in a curve Fig. 8. The gain of potential energy when the falling body reaches to the maximum height is about 11.5 joule and 50% of the initial potential energy before the body is fallen. The curve (a) of the Fig. 8 shows change of the length of a part of the string near the weight. The maximum elongated state of this part occurs slightly before the lowest state of the falling body, i.e. the longest state of the over-all length of the string. This latter state will be the very instance when the initial tension wave has just reached to upper end of the string. As this time interval becomes about 0.005 sec, the velocity of this tension becomes about 300m/sec. This figure is smaller than the expected value. But as the stress-strain curve of nylon rope belongs to a typical S-type, the velocity of tension wave will be fairly small when tension is fairly small. If tension increases, the velocity will increase also. Therefore, when the velocity of impulse is high enough the wave started at one end after the string is elongated will superpose upon the wave started in an early stage. And this place means a dangerous spot as the stress concentration will occur at this point. In climbing ropes, as the velocity of fall is not so high, such superposition will not be appeared and the dangerous spot will always coincide with the knot or the fixed point of the rope.

### Nylon as a Climbing Rope

Nylon climbing ropes have greater tensile strength and extensibility and resist shock loading. They are flexible and easy to handle, even when wet or part-frozen. There is no danger of deterioration through rot and mildew. These properties offer the greatest advantage to the climber. But among the advantageous properties mentioned above, high resistance to shock loading involves some ambiguities. It is true, as to our experiments of actual ropes nylon shows greater strength than manila, i.e. about four times as strong as manila. Notwithstanding, nylon ropes has been broken with very small shock loading. This contradiction will be a serious problem for the climber.

A key to solve this problem lies on the difference of the mechanism of fracture. At a rope which is broken by sudden fall, abrasion due to longitudinal sliding is not observed but melting and welding of the filaments at the fractured



section. On the contrary, ropes subjected to the experiments and shown high resistance to shock loading show remarkable surface abrasion due to longitudinal sliding on the granite edge. Considerable part of the kinetic energy of the falling body would be released by this sliding friction. Therefore if such longitudinal sliding occurs, the rope will not be easily broken. On the other hand, if such sliding is not present the impulsive forces concentrate at the knot or fixed point and a dangerous state will occur. When this fixed point is a Karabiner, the rope will resist against considerable amount of tensile shock load. This will also be true in a knot.

If the edge is as sharp as a cutting tool, the rope will be cut with extremely small load. Mukoyama and Kinoshita<sup>5)</sup> obtained 219kg for 53°21' steel wedge and Ishioka<sup>6)</sup> 69kg for 47° wedge. (8 mm) Once lateral slip occurs in addition to the wedging action of the sharp edge of a rock, as the work to move the rope laterally is fairly large, abrasion will occur always at the same section of the rope. Then the heat evolved by this cutting action of the rock edge becomes a considerable amount and the temperature is raised and a dangerous state will occur. That is softening at the local section. Therefore, breaking of the nylon ropes at above-mentioned accidents must be attributed to such melting, or softening action of the edge of the rock. Melting and fusing of the filaments will be seen. Crystal structure of the filaments near the fractured part of the rope broken by the third accident above was studied by Mukoyama and Kinoshita with X-ray method and by E. Tanaka<sup>7)</sup> with polarizing microscope method. The former demonstrated inferior degree of fibrosity due to melting and the latter observed scattering of the crystal axis of the filament near the broken part. All these show melting or softening due to heat evolution. According to the experiment of Toyo Rayon Co., 8mm nylon rope was broken by 40 kg tensile load with lateral slip of only 25cm on a sharp edge of a rock collected at Mt. Tsurugi. Therefore, if such lateral sliding occurs in addition to the wedge action of a sharp edge, the rope becomes to a very dangerous state. If coefficient of friction is 0.5 and all the energy is converted to heat, evolved heat becomes about 12 cal; this quantity is enough to melt the rope of 2mm length. Such easy melting or softening is due to low melting point of nylon.

With polarizing microscopic study of fracture of stretched nylon fibre, we found flow and distortion of crystallites near the fracture surface for a specimen cut by a filing. For a fibre cut by a sharp knife, any signs of deformation of crystallites were not observed even at an immediate vicinity of the fracture surface.

Thus, most part of the work to cut the fibre is converted to heat to raise

the temperature of it.

On the other hand, manila do not break with such short lateral sliding. But its resistance to shock loading is very low.

Above experiments on actual ropes were performed at Gamagori Factory of Tokyo Rope Co. The authors wish to express their sincere thanks to late K. Oka, E. Takayanagi, S. Koreki and other members of the Company. Also the authors wish to thank to the helps of members of the Technical Research Laboratory of the Mizuno Sporting Goods Co.

### References

- 1) *Annual Report of the Osaka University Mountaineering Club*, 1952. (in Japanese).
- 2) I. Kanesaka, *Sangaku (J. Japanese Alpine Club)* 48, 1 (1953) (in Japanese.)
- 3) R. Leonard, *Sherra Club Report*, 1943.
- 4) K. Minamiodi, *R.C.C. Report*, 5, 1 (1932) (in Japanese).
- 5) Mukoyama and Y. Kinoshita, *Toyo Rayon Technical Report* No. 1021 (1955) (in Japanese).
- 6) Private communication.
- 7) Private communication.

昭和31年 大阪大学工学部から発行された  
欧文による論文を邦訳したもの。

訳者、名古屋大学理学部大学院学生

江口 昇 次

熊崎 昭 一郎

名古屋大学工学部大学院学生

伊藤 孝次郎

注 この邦訳は、たしか32年に行なわれました。小生当時、原本を  
持っていたと思いましたが、現在みあたりません。近く阪大の  
図書館で探してみるつもりです。しかしこの邦訳に誤りは  
ないと考えますので、原本とのチェックなしで印刷しました

(51.6.3. 石岡記す)

# ナイロンザイルの力学的挙動

篠田軍治・カミラノフ・川辺秀次

## 内容

ナイロンザイルの力学的挙動が研究された。55kgの落下重量に対して11mm ナイロンは  $\sqrt{H/L} = 1.3$  で切れないうえ、12mm マニラは  $\sqrt{H/L} = 0.3$  で切れる。；  $H$  = 落下する錘りの高さ、 $L$  = ロープ長さ、これは、両ロープに対して殆んど600kgの衝撃荷重に相当する。熱量的研究は衝撃試験の内になされて、それと又静的な引張り試験のとき生ずる温度上昇の測定の結果と比較した。上述の数値に一致した殆んど600kgが得られた。ナイロンロープは衝撃荷重に対して良い性能を示すが鋭い岩角の横にすり切る作用において容易に切れる。これはナイロンロープの熔融点の結果であり、そしてその切れ目において常に繊維の熔融が見られる。

## 序論

ナイロンはマニラや他の植物繊維に比べて多くの長所を有するのでそのザイルとしての用途は1946年の英国の東部カラコルム探険以後普及した。我国に於ては、当大学の登山クラブのメンバーによってカエラズ岳に於て1952年の初春にその使用が試みられた。東京製鋼のナイロンロープは1953年と1954年の日本山岳会のマナスル探険隊によって使用された。我国のナイロンは外国と全く無関係に東洋レーヨンK.K.によって発達したものでナイロン6に属し良い性質をもっている。1954年から1955年の冬にナイロンザイルの切断による三つの事故が続けて起った。それらは次のものである。

1. 12月28日 明神岳東壁・11mmのザイル  
東雲山岳会の一員負傷。
2. 1月2日 前穂岳東壁・8mmのザイル  
岩稜会の一員死亡。



3. 7月3日 前穂岳の北稜の第3ピークと第4ピークの間. 11mmザイル  
大阪市大山岳部の一員負傷.

これらの事故の総ては非常に僅かのスリップによって起っている. この  
様にして我国に於いてこれらの事故の原因調査は重大な問題と  
なったのである.

### 切断したザイルの繊維.

#### a) 力学的性質.

まず最初に欠点があるかどうか研究されなければならぬ. 3つの  
事故によって切れたザイルと同等なものを集めてその繊維につ  
いて力学的性質の調査を行った. その結果 第1表にある如く  
少しも欠点が無かった. 比較の為に英国製ザイル (バベング) の  
結果も又載せてある.

Table 1.

これらの力学的性質のすべての値は19本の糸束 (string) の  
平均を取ったものである. ザイルの一斑 (strand) は19の糸  
束よりなる. 全部の糸束は良好な且、一定の力学的性質  
を示す. それで繊維材料には、少しも欠点が発見されなかった.

#### b) 結晶学的研究.

写真法によるX線解析の結果は図1に示した如くである. (a)  
(b) 共に、良く発達した繊維構造を示す. 新品と同様  
事故ザイルのX線図の間には、少しも区別がない. 図1に於  
ては、(a) は 11mm ザイルのX線図であり、(b) は 8mm の図  
である. (b) は 烈しく引張った ~~後~~ 時に 繊維状構造の程度  
が僅かばかり優れている. 図2は我々の研究室で考案し  
島津製作所が作った自動的に変化する時間一定の装置  
付きのガイガーカウンター分光器によって得られた回析写真の  
直ちに 得た強度分布である. 英国製ザイルの繊維状  
構造は それ程著るしくない. この様に 事故ザイルに少し

損傷の徴候を發見し得なかつた。

### 力学的拳動に関する理論的考察

ロープの多くの種類が東京製綱蒲郡工場における力学的試験に供せられた。その方法は図3に示した如くである。ロープは硬い花崗岩の45°と90°のエツグを通して55kgの落下する錘りにおて急に引張られる。第一近似として花崗岩のエツグではスリッパが滑ると仮定する。それ故にロープは、その上端で固定されておると云える。重量  $W$  から  $H$  迄持ち上げられるならロープは最初衝撃力  $P$  で伸びるから、次の式が得られる。

P. 46. 下から9行目迄の式。

$\mu$  は0.5より大きいので、これは約10%に達する。それ故に可動固定においてショックは相当緩和されるであろう。

..... (式) 略

後に示す如くナイルロープは  $H/L$  から1.3になった時切れるが  $M=1$  は0.3の時切れる。その  $H$  の最後の力、11mm ナイルに対しては  $P=560\text{kg}$  になり、12mm  $M=1$  に対しては、580kgとなる。これらのロープの結び目の力は強んど等しくて約650kgである。それ故に力学的衝撃力は結び目の力よりそれ程大きくはない。もっと正確な取扱いは、金坂氏の論文にある。

### ショックテストの結果

殆んど100回に近いテストの結果から第4回のグラフが得られた。カーブは安全と危険の区域の境界を示す。

そして  $H$  と  $L$  があまり大きくないときは、強んど直線に近い。それ故に切断能力は、理論的に考えられる様に

H/Lの函数でなければならぬ。ナイロンはマニラに比較して非常に優秀な衝撃特性を有する。直径 11 mm のナイロンロープは直径 24 mm マニラと同程度の強度を有する。手短かに云えば衝撃力に関してはナイロンはマニラより 4 倍以上強いと云うことが出来る。

### 熱量的研究.

オ5 図は静的張力試験の時の温度上昇を示す。そのカーブは張力テストの間に起る熱損失を補正にある。静的張力試験において 11 mm ナイロンロープを切るに要する仕事は 15 cal の時 (全仕事は熱に換算されたもの) 温度は約  $45^{\circ}$  上昇しなければならぬ。それ故にエネルギーの約 56% が熱になっている。

前カ-張力曲線から分る通り ガイルを 60% ~ 80% おひし伸すのに必要の仕事は 6.7 カリーでありこれは  $20^{\circ}\text{C}$  の温度上昇に対応している。他方実際の温度上昇は  $16.5^{\circ}\text{C}$  であり全エネルギーの約 80% がこの場合熱に換えられたことになる。これに反して最初の場合即ち 0 ~ 40% ひし伸しの場合には、 $11^{\circ}$  の温度上昇に対しは、3.6 cal の仕事が必要となる。それにも関わらず、この場合は、実際の温度上昇は、たった  $1.6^{\circ}\text{C}$  にすぎなかった。従って最初の場合には、ひし伸しにおいて生じた仕事の大部分は、弾性エネルギーとして貯えられたのである。力学試験では、実際のガイルは、モデル実験に於いて散開の上下振動を行って後に、落下物は、運動をやめる。この最後の段階において、ガイルのほとんど全部の弾性エネルギーは、熱に換えられるのである。従ってその時には、温度は上昇するはずである。

## 表. (略).

表を見て 判る様に ナイロンの温度上昇は No 2 の実験以外は、 $40^{\circ}\text{C}$  を大きく越えることはない。No 2 に於ては、温度は 岩のエッジから  $200\text{ mm}$  は離れた点で測られたので、約  $300\text{ mm}$  のスリッパが観測されている間に、温度上昇はマサツ熱の発生により影響をうけているのであろう。それで  $40^{\circ}\text{C}$  は殆んど温度上昇の限界であり、この ( $40^{\circ}\text{C}$  の温度に) 対応する量以上のエネルギーは落下体の残留運動エネルギーとして (その物体に) 保持されるであろう。これは、約  $500\text{ kg}$  となり、(5a) 式から計算された上述の値、 $560\text{ kg}$  と殆んど一致する。

## 力学試験後の落下体の運動

6 図は ナイロンザイルの高速写真のスタックである。それは、大きな上下振動と落下体がザイルの復元力によってひき上げられるときに表われる非常に緩慢な横側運動を示している。変位-時間曲線は 7 図に示された如くである。次にモデル実験は  $3\text{ mm}$  ナイロン string (3 strands) と  $3\text{ kg}$  の鉛の落下体を使ってなされた。そして高速写真がとられた。string の上端は船員結ひ (sailor's knot) で結ばれた。上下運動は非常に著しいものであった。落下体は、まず沈み string が伸び、するとその物体の string の復元力によってひき上げられる。string のもとの長さの桌より下への落下体の運動は、もとの長さの桌より上へ向つての復元力によるはねかえり運動が拋物線を示すのに対して変曲線を示す。振幅は数回の上下運動の後には、ほとんど 0 になる。系の自由エネルギーは 8 図の曲線に示された様な具合に減少する。落下物体が最



高の高さに達したとき、ポテンシャルエネルギーの増額は約 11.5 joule となり、これは物体が落下する前の最初のポテンシャルエネルギーの約 50% に当る。8 図の曲線は鋼の近くの string の一部分の長さの変化を表わしている。この部分の最大伸長状態は落下体の最後状態即ち、string の全長が最も長くなる状態より少し前に起る。この後者の状態は最初の張力波 (tension wave) の速度 string の上端に達したときの状態そのものである。この時間間隔が約 0.005 sec となるので、この張力波の速度は約 300 m/sec となる。

この値は期待した値よりも小さい。しかしナイロンザイルの応力-張力曲線は代表的な S 型に属するので、張力波の速度は、張力がかかり小さいときには、これもかなり小さい~~なる~~。もし張力が増加するときには、速度も又増加するだろう。従って衝撃速度が充分高い時には、string が伸長した後、一端で発した波は、ある初期の状態で発生した波と交わるだろう。従ってこの場所には応力濃度がこの点に集るので危険点としての意味を持つてくる。登山用ザイルの場合には、落下速度は、それほど大きくないのでその様な重疊は現われないだろう。従って危険点はず常にザイルの結び目又は固定点と一致することになる。

### 登山糸網としてのナイロン

ナイロン登山糸網は相当大きな抗張力と伸長性を有し衝撃荷に堪える。又濡れていたり部分的に氷結していても曲げやすし取扱い易い。しかも腐蝕や徴による劣化の危険性は全く存在しない。これら諸性質は登山家に最大の利益を与えるものである。しかし

上述の好都合の諸性質のうちで、衝撃荷に対して大きな抵抗力をもつといふよりは、多少曖昧なものを含んでいる。実際のロープに対する我々の実験に関する限り、ナイロンがマニラ麻より大きな張力を有すること即ち約4倍の強度を有することは事実である。にも拘わらずナイロンロープは非常に小さな衝撃荷で破損している。この矛盾は、登山家にとって重大な問題である。

この問題を解く一つの鍵は破砕機構の差異にある。突然の墜落によって切れたロープは縦滑りにもとづく磨滅は観察されないが、しかし破砕断面にある繊維の融解と密着が観られる。これに反して実験に保せられて衝撃荷に大きな抵抗力を示したロープは、花崗岩エツダ(稜)上での縦滑りによる相当な表面磨滅があった。落下体の運動エネルギーの相当部分はこの滑り摩擦によって放出されるであろう。従つてもしかような縦滑りが起ればロープは簡単に切断しないであろう。他方もしかような滑りが存在しなければ衝撃力は結び目或いは固定点に集中し、危険状態が発生するであろう。この固定点から Karabiner である時には、ロープは相当量引張りの衝撃荷に対して堪えるであろう。このことは、結び目に於いても云えることであろう。もしもエツダが刃物のように鋭いときはロープは極端に小さな重さで切断されるであろう。

Mukoyama and Kinoshita	5)	53°21' の鋼のクギに対して	219 kg
Ishioka	6)	49°	69 kg

(いずれも 8 mm ナイロン)

岩の鋭い稜の割込みの作用 (wedging action) に加えて、  
 横滑りが起れば、ロープと横に動かす作用がかなり  
 大きいので、磨滅は常にロープの同じ部分(側)に  
 起るのである。そのとき岩の稜によるこの切削作用によ  
 って発生される熱は相当な量に達して温度が上げ  
 られ危険状態となるであろう。即ち一部分の軟化で  
 ある。従って上述の事故に於けるナイロンの破損は、  
 岩の稜のもつこのような融解或いは軟化作用に寄  
 られなければならぬ。繊維の融解と融合が  
 見られるであろう。上の第3番目の事故によって破損  
 したロープの破砕部近くの繊維の結晶構造は、  
 Mukayama 及び Kinoshita において X 線法で、  
 及び E. Tahaka において偏光顕微鏡法で  
 研究された。前者は融解による繊維性度の劣  
 化を示し、後者は破損部近くの融解或いは、  
 軟化を示している。東洋レーヨン会社の実験によれ  
 ば、8mm ナイロロープは、Tsurugi 山で集めら  
 れた岩の鋭いエッジに於いて 40kg の張力荷重と  
 き僅か 25cm の横滑りで切断された。従って  
 もしもこのような横滑りが鋭い稜の割込み作用に、  
 加えて起れば、ロープは全く危険な状態になる。  
 もし摩擦係数が 0.5 であれば、エネルギーが熱に  
 変えられるとすれば、発生する熱は約 ~~12~~ 12 cal  
 になる。この熱量は 2mm 長のロープを融かす  
 のに充分である。従って容易な融解或いは、  
 軟化現象はナイロンの低い融点に基因している。  
 伸張したナイロン繊維の破砕の偏光顕微鏡  
 による研究で、我々は鏡をかけた切れたものによ  
 り、破砕面近くの結晶域の流束と歪みと

見した。鋭い小刃で切らねば繊維系に対しては、  
破砕面の極く近傍でさえ、結晶領域の変形は全  
く見られなかった。かくして繊維を切る仕事の大部分  
熱に変えられて、繊維系の温度を上げる。他方  
マニラ麻は、かような短かい横滑りでは、切断しない  
がしかし衝撃荷に対する抗力は非常に小さい。  
以上の実際のロープについての実験は ~~栗山博士~~  
~~会社~~ 東京製糸会 K.K. の蒲郡工場で行われた。  
筆者は、故 K. Oka, E. Takeyanagi, S. Koreki  
及び全社の他の人々にその親切を ~~謝~~ 深く  
感謝する。更に 美津濃運動具店の技研研  
究室の方々の御援助に対してお礼申し上げる。

(全文終り)