

# 作業索の曲げ応力について

山 本 誠

(農学部林業工学研究室)

## Calculations and Experiments on the Bending Stress of the Wire Rope for Logging Cableway

Makoto YAMAMOTO

(Laboratory of Forestry Engineering, Faculty of Agriculture)

Operating cables for logging aerial cableway are used with many sheaves and are subject to repeated tests under tensions and bendings such as S-bending or W-bending.

An empirical study has been conducted to see the effects of the cross load per square millimeter.

- 1) It will be most logical and safest, and will produce the best result, if the angle difference of the operating cable is maintained at  $6^{\circ} \pm 1^{\circ} 20'$  per square millimeter.
- 2) It is desirable if the diameter of the sheave is kept at least at 7000 times that of the wire.
- 3) The true modulus of elasticity of the wire rope in use may be arrived at most closely by multiplying a coefficient ( $k$ ) to the standard modulus of elasticity of the wire.
- 4) For the use of the wire rope of  $6 \times 19$ , it may be more appropriate to select wire having the bending modulus of elasticity of  $6000 \sim 9000 \text{ kg/mm}^2$ .

### I. はじめに

架空線集材装置には種々の鋼索が使用されているが、その一つの作業索は、その寿命が極端に短かいことで知られている。

作業索とは、巻揚索、引戻索、エンドレス索の総称であるが、巻揚索、エンドレス索の損耗は特に激しい。

これらの鋼索の寿命が他分野のそれより短命な理由については、これまでにいくつかの報告<sup>1)~3)</sup>がなされているが、それらが述べているところによれば、寿命を支配する主要な、力学的な因子は、くり返し荷重によるものであるとしている。すなわち、鋼索が滑車上を通過する際に生じる「曲げ」と「引張」のくり返しによるものである。

架空線集材装置における鋼索は集材装置の機構、使用する地形、等の制約から「曲げ」と「引張」の応力が常に働らくのはいたしかたないことであろう。

鋼索の寿命を長らえるには、これらによる曲げ応力、引張応力が0に近いほど有効なことは常識的な解答であるが経済性を加味して考える場合は、最も適正な負荷値の存在が推察できる。そこで本論では、鋼索に働らく「引張応力」「曲げ応力」の合理的な値、ならびにその条件を考究した。

### II. 既往理論式の展開

林業用鋼索は  $6 \times 7$ 、 $6 \times 19$ 、等の構造で、作業索等の動索に用いられているものは普通撚りである。このため滑車、ドラム等への接触は点接触による曲げの状態を呈する。すなわち、図-1において張力  $T$  の作用している素線  $\delta$  に輪圧荷重  $Q$  が作用する場合を考えると、点  $p$  での曲率半径が  $\rho$  のとき、 $\eta$  は  $\eta_p$  となり、 $\eta_p$  のところで  $\rho$  は (1) 式で表わされている。

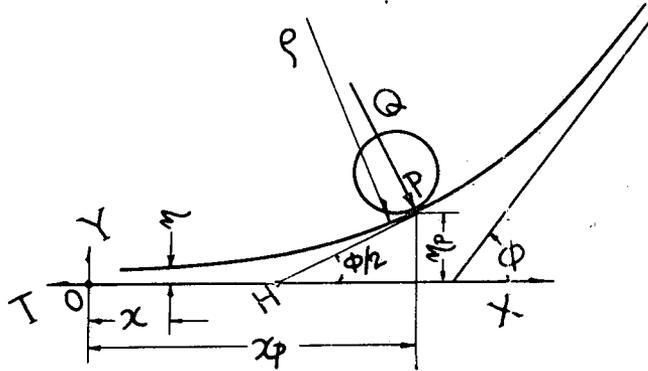


Fig. 1 The wire rope under the conditions of tension and bending

$$\rho = \frac{2}{Q} \cdot \sqrt{EI_0 \cdot T} \quad \dots\dots\dots (1)$$

但し,  $E$ : 索線の弾性率

$I_0$ : 索線の断面二次モーメント

したがって索線  $\delta$  に生じる最大曲げ応力は

$$\sigma_{b \max} = E \frac{\delta}{D} = E \frac{\delta}{2\rho} = \frac{Q\delta}{4} \sqrt{\frac{E}{I_0 T}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

こゝに索線が極く微細なものとするならば,  $\sin \phi/2 = Q/T$  がなりたつ。実際にも多くの場合  $Q$  は  $T$  に比し非常に小さいので  $\tan \phi = Q/T$  がなりたつ。よって索線の曲げ応力は

$$\sigma_{b \max} = \frac{Q\delta}{4} \sqrt{\frac{E}{I_0 T}} = \frac{\delta}{4} \tan \phi \sqrt{\frac{ET}{I_0}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

索線については (3) 式に示したが鋼索については以下のように考えた。

前述したように, 林業用鋼索は (6×7), (6×19) のような6撚りの構造であるが, こゝでは, 各ストランド中の索線が一体となって, あたかも1本の鋼棒よりなっていると仮定する。

各ストランド間は可動であるから,  $n$  本のストランドが並列に並んだものとみなし得るので (3) 式から鋼索の最大曲げ応力は

$$\sigma_{b \max} = \frac{ds}{4} \tan \phi \sqrt{\frac{nET}{nI}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

但し,  $p'$ : 芯線を除いての層数

$d_s$ : ストランドの径 =  $(2p' + 1)\delta$

$u$ : ストランドの個数

$T$ : ストランドの張力

$I$ : ストランドの断面二次モーメント

こゝに  $nT/nA = T/A$  ..... 索線引張応力

$$m_1 = A/A_0 = 0.75 \quad m_2 = I/I_0 = 0.75 \quad \therefore m_1 = m_2$$

$$nT = nA \cdot T/A = n m_1 A_0 T/A$$

$$nI = n m_2 I_0 = n m_2 A_0 (2p' + 1)^2 \delta^2 / 16$$

$$\therefore nT/nI = 16 \cdot T/A \cdot (2p' + 1)^2 / \delta^2$$

$$\begin{aligned} \therefore \sigma_b \max &= \frac{(2\rho' + 1)\delta}{4} \tan \phi \frac{4\sqrt{\frac{T}{A}}}{(2\rho' + 1)\delta} \sqrt{E} \\ &= \tan \phi \sqrt{\frac{T}{A}} \cdot \sqrt{E} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

以上は索線の直径がすべて等しい場合であるが、これの異なるもの、例えば Filler rope, Flattened strand rope, Seal rope などの曲げ応力は (5) 式より大きくなることは考えられない。

図 1 において  $\tan \phi \approx Q/T$  のとき索線  $\delta$  に  $T, Q$  が作用したために、標点距離  $l$  が  $h$  だけ移動したとすれば  $\tan \phi$  は  $4h/l$  となり、 $Q/T \approx 4h/l$  がなりたつ。したがって、もし  $T, Q$  が既知なれば、そのときの実際の移動量  $h'$  が測定され、 $h'$  から  $\phi'$  を求め得る。すなわち  $\tan \phi' = 4h'/l$ 、撚りのかゝった普通の鋼索が引張点接触の曲げの状態にある時は、索線間の摩擦の影響で鋼索は変形し、また、本来の剛性が変化するため (5) 式をそのまま使用することは不相当とみなされる。したがって係数  $k$  を (5) 式に乗じた (6) 式で表わすのがより現実的であろう。

$$\sigma_b = k \cdot \tan \phi \sqrt{\frac{T}{A}} \sqrt{E} \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{但し、} k = \frac{\sigma_b}{\tan \phi \sqrt{\frac{T}{A}} \sqrt{E}} \dots\dots\dots (7)$$

III. 理論値  $\sigma_b$  に対する実験的検定

材料および方法

引張点接触による曲げ試験は、索線、子繩、鋼索、それぞれの微小な変形を測定することが要求されるので、金属線ひずみゲージを電極として電気的に測定した。ひずみゲージは K-70A-1 型、長さ×幅=6.7 mm×0.6 mm、格子型、抵抗値 120Ω、ゲージファクター 2.1 の共和電業製の紙ゲージを供試した。又、引張および輪圧荷重の負荷は図-2 の装置によった。試験機は I 形鋼の枠に、スパン 2.200 mm の鋼索をソケットをとおして緊張調節できるようにした。鋼索の輪荷重としては直径 30 mm の小型シーブを介してレバーとバネを使って負荷した。なお輪圧荷重  $Q$  はホイールタイプのストレインゲージで、又鋼索のたわみ量は働長 150 mm のポテンシャルゲージで、それぞれ電気的に測定した。

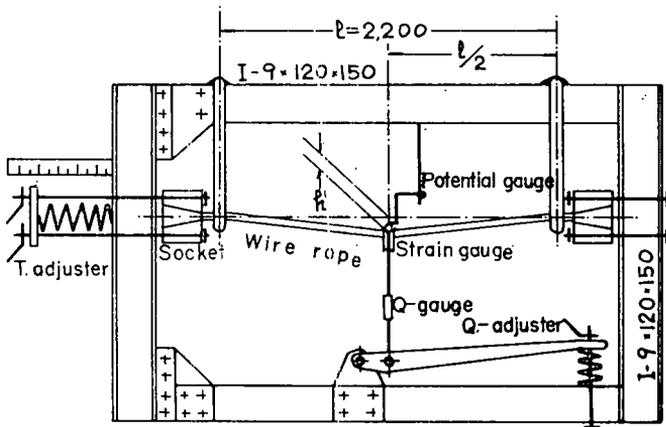


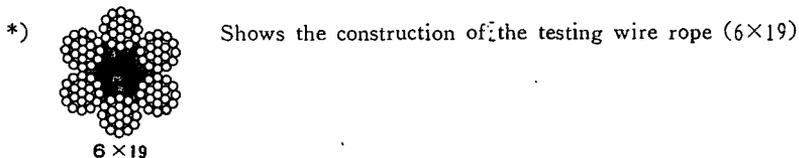
Fig. 2 The experimental instrument for the bending and tension

測定は、まず張力  $T$  を負荷したのち輪圧荷重  $Q$  を加えた。この為に  $T$  が増加するので、測定は  $T$ ,  $Q$  を順次調整してポテンシャルゲージによる  $h'$  を測定した。鋼索の曲げは、 $Q$  の反対側の面に paper strain gauge を貼付して測定した。

試験に供試した材料は表-1に示した。

Table 1. The parts of the testing wires, strands and wire ropes

Construction *)		Diameter (mm)	Class (Kg/mm <sup>2</sup> )	Effective sectional area (mm <sup>2</sup> )	Braking strength specified (t)	Pieces
Wire	Round bar	1.04	165	0.85	140.25	7
Strand	1 + 6	5.36	165	5.95	981.75	7
Rope	6 × 7	16.0	165	35.7	5890.50	7



測定結果およびその考察

図-2の装置の仕様と(7)式に基づき、表-1の試料に  $T$  と  $Q$  を加え  $h'$  から、 $\phi'$  および  $\epsilon_b'$  の測定結果を図-3、図-4、図-5に表わした。

§1. 素線の  $Q-h'$ ,  $\epsilon_b'-\phi'$  について (図-3a, 3b).

実験に供した素線は、直径 1.04 mm の2種に属するものであった。 $T$  は 5.0 kg から始めて、5.0 kg 毎に 45.0 kg まで負荷し、 $Q$  は 0.1 kg から始めて 25.0 kg まで負荷した。以上の条件での  $\phi'$ ,  $h'$  の最大値は  $\phi'=11^\circ 0'$ ,  $h'=136$  mm にまで至らせた。図-3bによると張力  $T$  が小さい間は  $h > h'$  ないし  $h = h'$  の関係を示すが  $T$  が大きくなれば  $h = h'$  の傾向を示すことが分る。

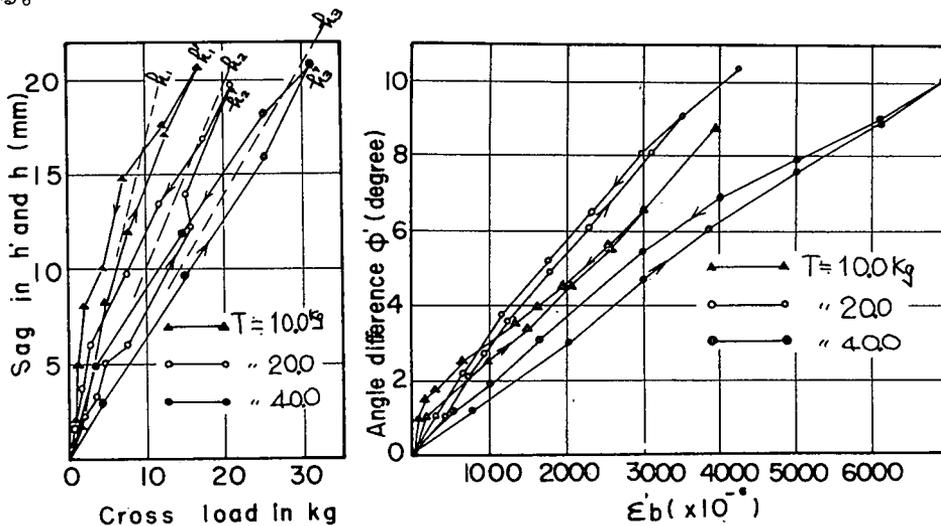


Fig. 3 (a), (b) Relations between the bending and the stress in the case of wire (diameter : 1.04 mm, effective area : 0.85 mm<sup>2</sup> and tension strength : 165 Kg/mm<sup>2</sup>)

§2. 子繩の  $Q-h'$  と  $\varepsilon_b'-\phi'$  について (図-4a, 4b)

子繩の直径は 5.36 mm のもので (1+6) の構造で両端を Zn でソケットングして測定した。 $T$  は 40.0 kg から 2,015 kg まで負荷,  $Q$  は  $\phi'=11^\circ 0'$ ,  $h'=136$  mm になるまで負荷し, 72.4 kg まで達した。即ち  $n$  値がかなり大きい範囲まで測定されたことになる。測定値  $Q-h'$  および  $\varepsilon_b'-\phi'$  は素線の場合とほぼ同じ傾向を示した。 $\varepsilon_b'-\phi'$  の相関が、やや乱れているのは試料製作技術のまづきによる素線張力の不ぞろいによるものであろう。

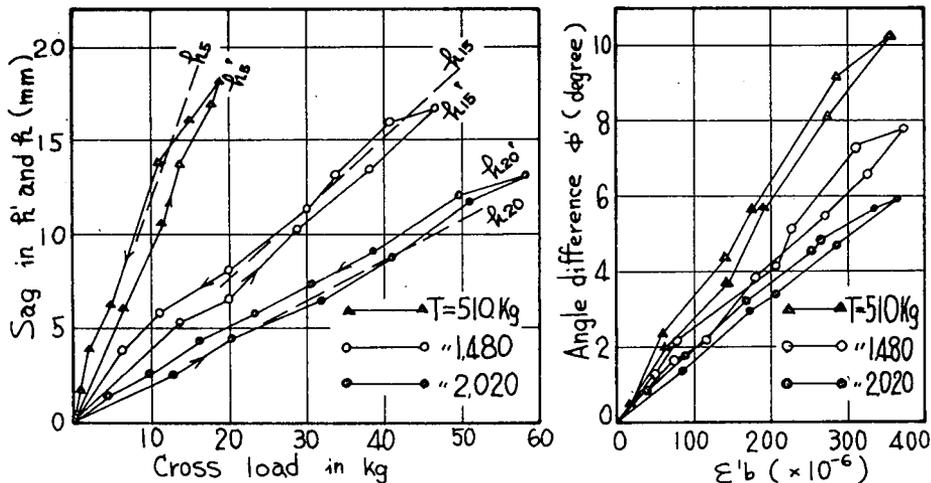


Fig. 4 (a), (b) Relations between the bending and the stress in the case of strand (diameter : 5.36 mm, effective area : 5.95 mm<sup>2</sup> and tension strength : 165 Kg/mm<sup>2</sup>)

§3. 鋼索の  $Q-h'$  と  $\varepsilon_b'-\phi'$  について (図-5a, 5b)

鋼索の曲げ応力は一般に  $\sigma_b = kE \cdot \delta / D$  で表わされていて、この  $k$  値は 1.0~0.25 まで採用されている<sup>5)</sup>。しかし、輪圧荷動  $Q$  の負荷が順次進むにつれて、鋼索を構成している各子繩は、その位置を変え、鋼索全体としては変形をおこす、更に  $Q$  の負荷が進むと子繩内の素線の移動が生じる。この結果、鋼索の曲げに対する抵抗が減少する以前に変形した子繩およびその中の素線の分離が進行するため、鋼索の曲げ応力は小さくなる。

この現象から推察すると、単然り索、例えば (6×7) の曲げ応力は輪圧荷重  $Q$  に対して、子繩の位置また子繩の中の素線の位置によって、曲げ応力の値はかなり異なるものと考えられる。

実験の供試材は 6×19 c/o 2種 61 mm を子繩の場合と同じく Zn でソケットングしたものとした。 $T$  は 40 kg から 7,050 kg まで、 $Q$  は  $\phi'=11^\circ 0'$ ,  $h'=136$  mm になるまで負荷し, 0.3 kg から 99.1 kg にまで達した。この結果から求められる  $kE$  は Czitary<sup>4)</sup> が示した値  $E \cos^2 \omega_1 \cdot \cos^2 \omega_2$  ( $\omega_1, \omega_2$  は素線、子線のより角) に比べると過小となる。

今回の実験では、この点を明確にすることができなかったが、著者は以下のように解釈した。すなわち、鋼索の子繩は、中心軸 (或いは中立軸) に対して引張側、圧縮側が同一構造をなしていない。換言すれば応力の作用方向は鋼索の中心線に対して、 $\omega$  の撚り角をもつ、これがために各子繩間の応力分布は中立軸からの距離に対照的には偏らなことが起こってくる。このような場合には、むしろ曲げ応力の最大値は輪圧荷重  $Q$  の作用点側にあるとも推量できる。

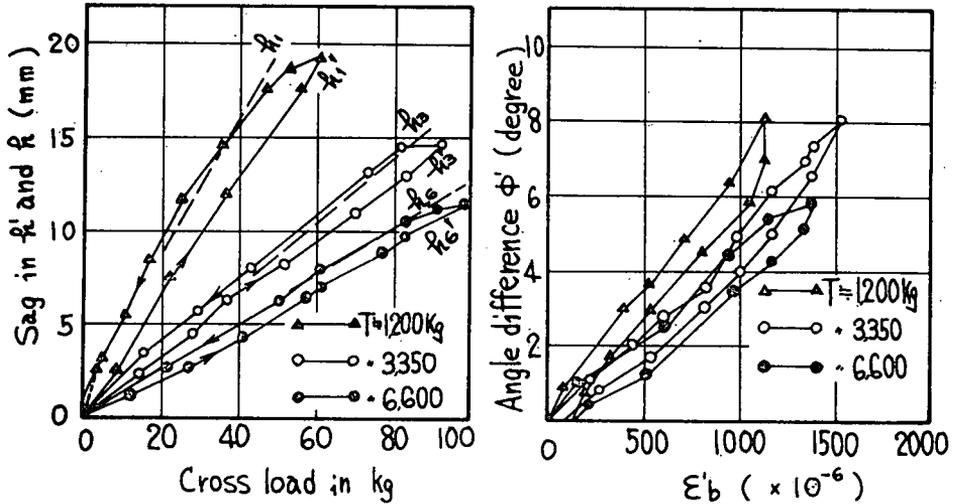


Fig. 5 (a), (b) Relations between the bending and the stress in the case of wire rope (diameter, 16 mm, effective area: 35.7 mm<sup>2</sup> and tension strength: 165 Kg/mm<sup>2</sup>).

#### IV. 理論値と実験値に対する検討

##### §1. 曲げ応力と弾性率

索線、子繩、鋼索のそれぞれの  $kE$  を、 $\epsilon_b' - \phi'$  図より求めた。一般には鋼索が溝車にある場合の  $\sigma_b = k'E \cdot \delta / 2\rho$  における  $k'$  よりはやゝ小さい値を示すが、本実験における  $k$  は、実験装置の支間が比較的短かいこと、輪荷重の作用輪の直径が小さいことなどにより小さいものと思われる。いづれにしる僅少の差故、 $k \approx k'$  とみることが許されようから、 $kE = k'E$  で表わすことにする。すなわち、索線、子繩、鋼索の  $k$  値は、図が示すように10%程度のバラツキの間にある。 $k$  値の分布幅が比較的狭い区間にあり傾向が一定している。ゲージによる被測定箇所、すなわち輪圧荷重  $Q$  の作用点の反対側における点の  $k$  値の平均値は、

$$\text{索線: } k_w E = 0.93 E$$

$$\text{子繩: } k_r E = 0.71 E$$

$$\text{鋼索: } k_r E = 0.48 E$$

この鋼索の  $k_r E$  値は興味ある値であったので、試るみに、各子繩のうち最大引張応力、あるいは最大圧縮応力の起こる索線にゲージを貼付して、同上の実験をした結果、 $Q$  の作用点の対角線上の子繩は、前記  $k$  値にはゝ等しく  $k_r E \approx 0.48 E$ 、その左側の子繩のものが  $k_r E = 0.53 E$ 、右側の子繩が  $k_r E = 0.60 E$ 、そして圧縮側の  $Q$  の作用点の左側のものが最大で  $k_r E = 0.72 E$ 、右側の子繩が  $k_r E = 0.63 E$  となった。このことはとりもなおさず鋼索中の応力分布は一様に変化するのではなく子繩の位置によって曲げ応力の大きさが異なることを意味する。

以上のことから (6×19) の  $kE$  は索線の 18,000~21,000 kg/mm<sup>2</sup> より可成小さい値を示すものとみなし得よう。すなわち、6,000~9,000 kg/mm<sup>2</sup>

##### §2. 鋼索の曲げ角度

以上3種の  $kE$  の考察から、索道設計に通常使われている弾性率 10,000 kg/mm<sup>2</sup> は、撚り角度の大きい普通撚り等の鋼索には適用可能であると思うが、運材用索道の曳索のように、撚り角度の小さいラング撚りで、しかも曲げ角度、曲げ頻度の大きい鋼索については過小な値ということに

なろう。このことは、Czitary の  $kE = E \cos^2 \omega_1 \cdot \cos^2 \omega_2$  の式のように撚り角の大きい鋼索の  $kE$  の値は小さくなることを証明している。

以上のことから、点接触ロープの引張曲げ応力は、(6) 式に  $k$  値を代入して、

$$\sigma_b \text{ mean} = (0.55 \sim 0.95) \tan \phi' \sqrt{\frac{T}{A}} \cdot \sqrt{E} \dots\dots\dots (8)$$

とみて差しつかえなからう。したがって、 $\phi = 3^\circ 45' \sim 6^\circ 16'$  となる。但し、種別(旧規格)が3種、特殊種と強度が大きくなれば、 $\phi$  を小さくとらねばならない。また逆に  $\sigma_b$  が大きければ  $T/A$  は小さいので  $\phi$  を大きくとることが許される。

## V. おわりに

作業索の切断事故は、日常茶飯事なので、なかば当然おこるものと言った風評も聞くが、作業索の切断事故の多くは、シーブ径と索線径の比率が過少なため輪圧荷重の荷重接触面積が小さく単位面積当りの横荷重による鋼索の変形ひずみを生ずること、シーブ1個当りの偏倚角が過大であること、等に基因している。

前述によって、

- 1) シーブ1個当りの鋼索の偏倚角は  $6^\circ \pm 1^\circ 20'$  とするのが、安全にして合理的な限度である。
- 2) 相当シーブ径と索線径比は約700倍を最小値とするのが望ましい。
- 3) 作業索(6×19)の曲げ弾性率は  $6,000 \sim 9,000 \text{ kg/mm}^2$  をとることができる。

## 要 約

架空線集材装置の作業索は多くの滑車によって、S一曲げ、Z一曲げ、W一曲げ、等のくり返し引張曲げがなされる。そのため鋼索の寿命は極端に短い。そこで曲げ角度、引張力に対する横荷重、および横荷重の受圧面比について実験的に検討した。

- 1) 溝車1個当りの鋼索の偏倚角は  $6^\circ \pm 1^\circ 20'$  とするのが理論的で、安全にして合理的な水準である。
- 2) 溝車径と索線径の比は約700倍を最小値とするのが望ましい。
- 3) 鋼索の弾性率算定に際しては  $k$  値を乗ずるのが、より真値に近似する。
- 4) 作業索(6×19)の引張曲げ弾性率は  $6,000 \sim 9,000 \text{ kg/mm}^2$  をとることが適当であろう。

## 引 用 文 献

- 1) 幅野禎太郎：巻上用ワイヤーロープの摩耗による性質の変化について、ワイヤー研講 5：77～93，1956。
- 2) 上田 実，富永 貢：林業用鋼索の疲労に関する研究(1)，林試研報 208：1964。
- 3) 福田次郎，村山茂明：集材機用作業索の耐用度に関する研究，日林関西支講 14：82～83，1956。
- 4) CZITARY, E：Seilschwebbahnen 2. Aufl.；98～104，Springer-Verlag Wien，1962。
- 5) 上田 実，ほか：林業用鋼索の疲労に関する研究(2)，林試研報 213：5～8，1968。

(昭和45年9月10日受理)

