

網糸の研究* (II)

糸の機械的性質に就いて (I)

増崎 謙二・深沢 文雄

Study on the Netting Cord
On the Mechanical Properties of Strand—I

By
Kenji MASUZAKI and Fumio FUKAZAWA

In order to investigate into the mechanical properties of netting cords, we observed the arrangements of the fiber in strand, the forces caused in each fiber and the elongation-mechanism of a loaded strand, etc.

As the results of the above mentioned observation, we admitted that the results of our experiments are considerably in accordance with the theoretical considerations made in case of the mono-filament yarn strands.

Moreover, the contraction of the diameter of a strand is influenced by Poisson's ratio and the deformation of fibers due to the compression between each fiber.

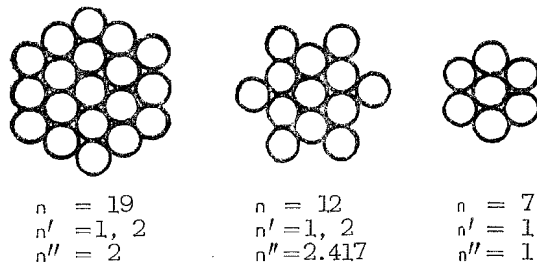
緒 言

本研究に就いては、最近漁網として次第に用いられつゝある合成繊維で作られた糸（トワイン或はロープ）の機械的な性質を研究する為、比較的幾何学的に正しい円形断面を有し、而も繊維の不同が少いサランの糸に就いて、繊維の配列、繊維にかかる力の分布、或は伸びの機構等に就いて考察して見た。尙実験試料は日本漁具漁網株式会社の研究部より提供された、サランのトワイン 1. 750d×9×3, 2. 750d×12×3, 3. 750d×15×3, 4. 750d×18×3, 5. 750d×21×3, 6. 750d×24×3の6種を用いた。

1. ストランドを構成する繊維の配列

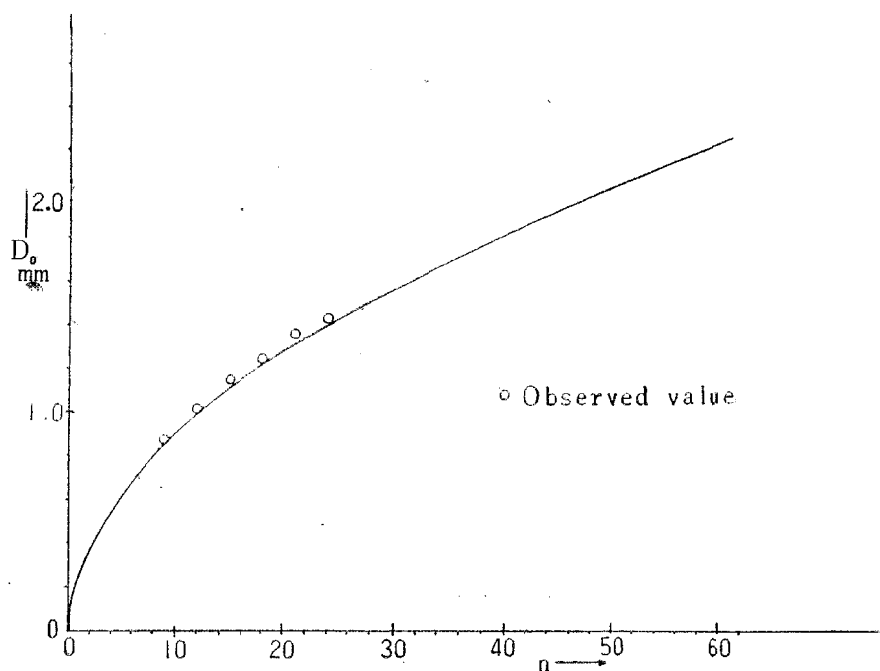
Fig. 1. の如くストランドを構成する繊維の配列が中心に心線を考えその周囲に6本の繊維が配列して方一列 ($n' = 1$) を作り更にその周囲に12本の繊維が配列して第二列 ($n' = 2$) を作つていると考えると、こうした一聯の関係は繊維の直径 $d_0 = 0.250\text{mm}$ の場合、Fig. 2 の如き n とストランドの外径 D_0 の関係で表され、1, 2, 3, 4, 5, 6 の試

Fig. 1. Arrangements of fiber



料に就いての測定結果は○印で示した如くに現われてくる。此の場合測定値が僅かに大きく出

* 水産講習所研究業績第72号

Fig. 2. Relation between D_0 and n

ているのは、此の測定が顕微鏡下で無荷重でなされた為、繊維間の遊びの影響がきいてきたものと思われる。此の遊びの影響を考慮すれば、こうした配列を考え、こうした外径を用いる事は妥当であるとしてよい。此の場合 1, 2, 3, 4, 5, 6 のストランドの列数 n'' は Table 1 の如くなる。

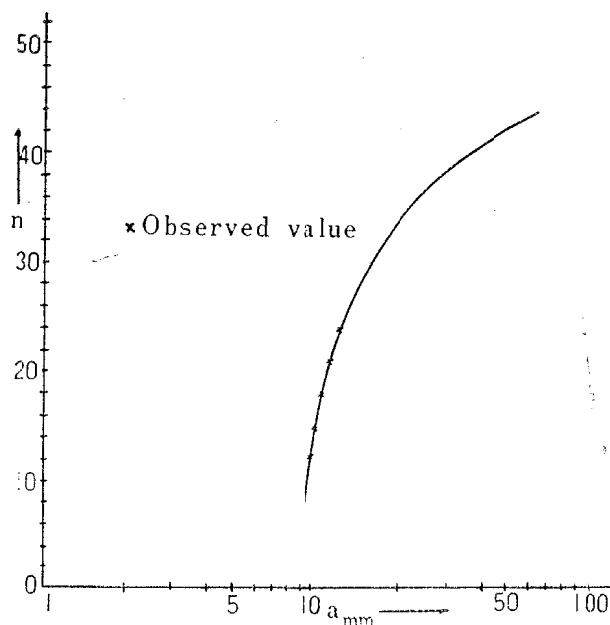
Table 1.

$n = 9$,	$n'' = 1.167$
$n = 12$,	$n'' = 1.417$
$n = 15$,	$n'' = 1.667$
$n = 18$,	$n'' = 1.917$
$n = 21$,	$n'' = 2.111$
$n = 24$,	$n'' = 2.278$

2. 繊維の受持つ力

糸は一般にヤーンを数本取り集めて下撚 M をかけ之を三子合せて逆に撚りを戻して下撚りに依る捩りモーメントの影響がなくなる迄撚りを戻して作る。此の場合戻した撚り N_2 が上撚りとなつている。此の $N_1 - N_2$ は一般に n が増加する程少である。即ちヤーンの描く螺旋線のピッチ a は n が大なる程大きい。此の関係を Fig. 3 に示す。

此の撚り数が適当であるか否かは繊維の不同率、繊維間の摩擦力、繊維の長さ（短い繊維の場合）或は繊維の捩りに対する強さ等に依て決めねばならぬ問題であるが此の事に関しては此

Fig. 3. Relation between n and a

所では論じない。

今 $n=7$ の場合に就いて、ストランドに荷重 P が加わった場合、心線にかかる荷重を P_s 、 $n'=1$ の列にかかる荷重を P_x とし、繊維の断面積を A 、繊維のヤング率を E とすると、 $P_s = AE\epsilon_s$ 、 $P_x = 6AE\epsilon_x$ 、此所で ϵ_s 、 ϵ_x はストランドの歪が ϵ_s の時、心線及び $n'=1$ の列の繊維の歪である。今長さ l なるストランドが Δl だけ伸びた場合を考えると

$$\epsilon_x = \frac{l + \Delta l / \sin(a + \Delta a) - l / \sin a}{l / \sin a}$$

但し a は螺線に引いた接線とストランドの軸に垂直な面とのなす角である。

これは螺線の半径の変化を無視した式である。

$$\therefore \epsilon_x = \epsilon_s - \epsilon_s \cos^2 a (1 + \epsilon_s) / (1 + \epsilon_s \cos^2 a)$$

$$\therefore P_x = 6AE\epsilon_x = 6 \{ \epsilon_s - \epsilon_s \cos^2 a (1 + \epsilon_s) / (1 + \epsilon_s \cos^2 a) \} AE$$

$$\therefore P_x / P_s = 6 \sin^2 a / (1 + \epsilon_s \cos^2 a)$$

故に荷重が極めて少い場合には $P_x / P_s = 6 \sin^2 a_0$ 、但し $a_0 = \tan^{-1} a / 2\pi d_0$

同様にして $n=19$ の場合は、 $n'=2$ の列にかかる荷重を P_y 、螺線に引いた接線とストランドの軸に垂直な面とのなす角を β とすると

$$P_y / P_s = 12 \sin^2 \beta / (1 + \epsilon_s \cos^2 \beta),$$

$$\therefore \text{荷重が少い場合は } P_y / P_s = 12 \sin^2 \beta_0 \quad \text{但 } \beta_0 = \tan^{-1} a / 4\pi d_0$$

$n=37$ の場合は $n'=3$ の列にかかる荷重を P_z 、同様な角を γ とすると

$$P_z / P_s = 18 \sin^2 \gamma / (1 + \epsilon_s \cos^2 \gamma),$$

$$\therefore \text{荷重が少い場合は } P_z / P_s = 18 \sin^2 \gamma_0 \quad \text{但 } \gamma_0 = \tan^{-1} a / 6\pi d_0$$

同様な事を $n=8$, $n=12$, $n=15$, $n=18$, $n=21$, $n=24$ について試みしかも繊維1本に就いて心線にかかる力とその周囲に位する繊維にかかる力との比 P^i / P_s の分布を各 n 及び n' について計算すると、Fig.4 で示す様な力の分布をなしている。此の場合 a, β, γ はストランドの引張による繊維相互間の圧縮力、繊維の軸方向の伸びに伴う径の縮小（ポアソン比）及び繊維自体の軸方向の伸びに依り変化するものであり、此の a, β, γ の変化に伴つて荷重が極めて少い場合の力の分布状態 Fig. 4 は当然変化しなければならない。而し乍ら簡単の為、此の力の分布状態は使用状態迄の荷重に対しては変らないものとして以下の推論を進める。

3. ストランドの伸びに伴う繊維相互の圧縮

螺線を描く一本の繊維を引張ると繊維には曲げモーメントと捩りモーメントが働き螺線の半径は縮小する。ストランドを引張った場合には此の半径の縮小はその内側の繊維の為に抵抗を受けて繊維相互の間に大きな圧縮力を生ずる。此の圧縮力を各繊維の受持つ力及び a, β, γ より計算すれば

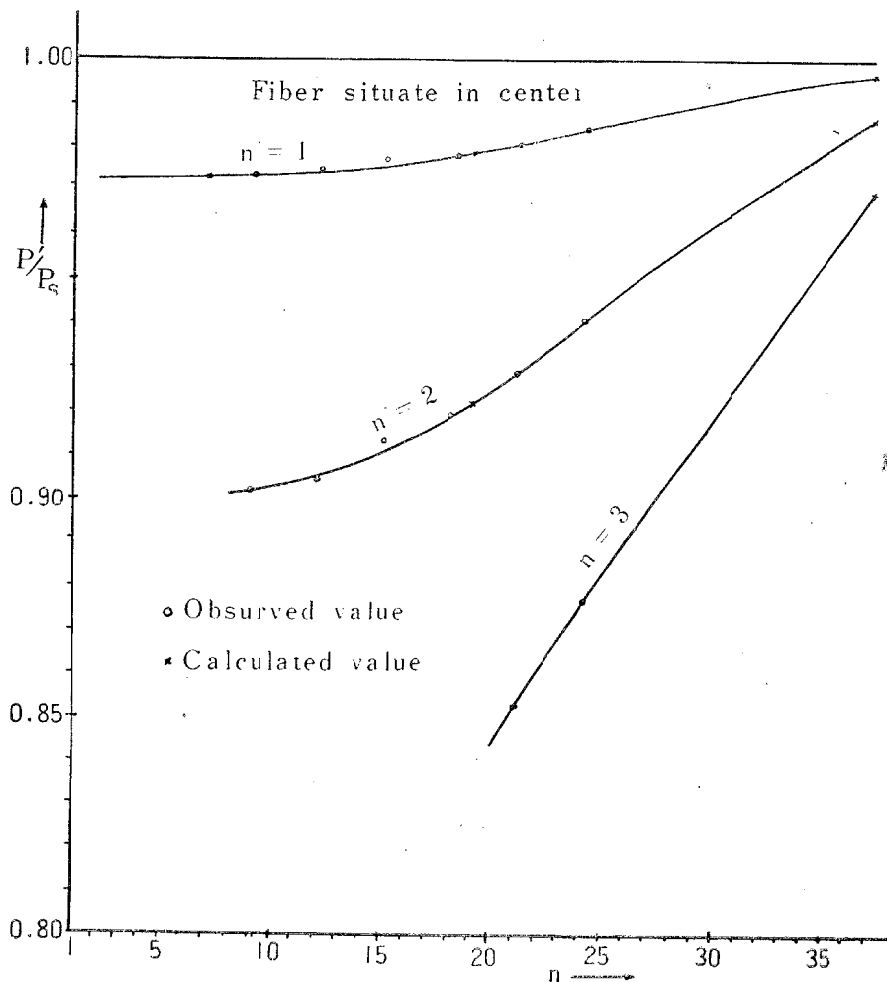
$$p_1 = P'_1 \cos a / r_1 \quad n' = 1 \quad \text{但 } 6P'_1 = P_x$$

$$p_2 = P'_2 \cos \beta / r_2 \quad n' = 2 \quad \text{但 } \begin{cases} 12(n''-1)P'_2 = P_y & (19 \geq n > 7) \\ 12P'_2 = P_y & (37 \geq n > 19) \end{cases}$$

$$p_3 = P'_3 \cos \gamma / r_3 \quad n' = 3 \quad \text{但 } 18(n''-2)P'_3 = P_z \quad (37 \leq n > 19)$$

此所で P'_1, P'_2, P'_3 は $n'=1, n'=2, n'=3$ の列の繊維1本の受持つ力。 r_1, r_2, r_3 は各列の螺線の半径、

此所で $7 \geq n$ の場合、圧縮力は p_1 だけでよいが $19 \geq n > 7$ の場合は $n'=1$ の列の圧縮力は p_1 の外に $n'=2$ の列による圧縮力 $p_2 = (n''-1) P'_2 \cos \beta / r_2$ をも合せて加はつてゐる為合計の

Fig. 4. Distribution of P'/P_s in each fiber

圧縮力は $p'_1 = \{P'_1 \cos \alpha / r_1 + (n'' - 1)P'_2 \cos \beta / r_2\}$ となる。今 α, β, γ は荷重の極めて小さい場合の値を用い $\alpha = \alpha_0, \beta = \beta_0, \gamma = \gamma_0, r_1 = d_0, r_2 = 2d_0, r_3 = 3d_0$ として計算すると、
 $19 \geq n > 7$ の時は、

$$n' = 1 \text{ では } p'_1 = 1/d_0 \{P'_1 \cos \alpha_0 + (n'' - 1)P'_2 \cos \beta_0 / 2\}$$

$$n' = 2 \text{ では } p'_2 = P'_2 \cos \beta_0 / 2d_0$$

同様にして $37 \geq n > 19$ の時は

$$n' = 1 \text{ では } p'_1 = 1/d_0 \{P'_1 \cos \alpha_0 + P'_2 \cos \beta_0 / 2 + (n'' - 2)P'_3 \cos \gamma_0 / 3\}$$

$$n' = 2 \text{ では } p'_2 = 1/d_0 \{P'_2 \cos \beta_0 / 2 + (n'' - 2)P'_3 \cos \gamma_0 / 3\}$$

$$n' = 3 \text{ では } p'_3 = P'_3 \cos \gamma_0 / 3d_0$$

これ等の式を各 n について計算した結果を Fig. 5 に示す。これは荷重の極めて小さい場合の p'/P_s の分布であるが、此の分布の変化に依る D の変化は小さいから、此の分布を各荷重の場合の分布として D の縮少を計算する。

ストランドを引張ると此の様な圧縮力による繊維の断面の変形の為にも r は縮少せねばならない。今内圧 p が働いた場合、接触した繊維と繊維の近よりを ξ とすれば $\xi = KP'^{2/3}$ なる関係が成立つ。此の関係は HERTZ が弾性球と弾性球との接触による近よりの式として求めたものであるから、此の場合常数 K に幾分の補正を加えなければならない。即ち K の値は

HERTZ の理論より導いた値より小なる値でなければならぬ。今 HERTZ の理論式を書いて見ると、両弾性体が等質等径である場合には

$$\xi = \{9\pi^2 / 16 \cdot P^2 (2k)^2 d / d^2 4\}^{1/3} = (9\pi^2 k^2 P^2 / d)^{1/3}$$

但 $k = 2(1 - m^2) / \pi E$ m はポアソン比

此の式に $m = 0.2$ $d = 0.250$ を代入して計算すると

$$K = K' E^{-2/3} \quad K' = 3.72 \quad \text{となる。}$$

即ち K はヤング率に依る変る常数である。

4. 螺線の半径 r の変化

ストランドに P なる力を加えた場合、螺線の半径 r は繊維にかかる荷重に依る伸びに伴う繊維の径の縮小と、繊維相互の圧縮力に依る繊維の変形による近より ξ との和であると考え、 $19 \geq n > 7$ に対して $n' = 2$ の螺線の半径は、

$$r_2 = d_0 \{1 - m \varepsilon_s P'_1 / P_s - K p_1'^{2/3}\} + n'' d_0 / 2 \{1 - m \varepsilon_s P'_2 / P_s - K p_2'^{2/3}\}$$

であらわされる。次に $n' = 1$ の螺線の半径は

$$r_1 = d_0 \{1 - m \varepsilon_s P'_1 / P_s - K p_1'^{2/3}\}$$

これ等の式に各 n の数値を入れて計算すると

$n = 9$	$r_2 = 0.396 - 0.075 \varepsilon_s - 0.041 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3}$
	$r_1 = 0.250 - 0.049 \varepsilon_s - 0.025 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3}$
$n = 12$	$r_2 = 0.427 - 0.081 \varepsilon_s - 0.047 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3}$
	$r_1 = 0.250 - 0.049 \varepsilon_s - 0.030 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3}$
$n = 15$	$r_2 = 0.458 - 0.087 \varepsilon_s - 0.051 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3}$
	$r_1 = 0.250 - 0.049 \varepsilon_s - 0.033 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3}$
$n = 18$	$r_2 = 0.490 - 0.093 \varepsilon_s - 0.056 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3}$
	$r_1 = 0.250 - 0.049 \varepsilon_s - 0.035 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3}$

更に $37 \geq n > 19$ に対して $n' = 3$ の螺線の半径は

$$r_3 = d_0 \{1 - m \varepsilon_s P'_1 / P_s - K p_1'^{2/3}\} + d_0 \{1 - m \varepsilon_s P'_2 / P_s - K p_2'^{2/3}\} + (n'' - 1) d_0 / 2 \{1 - m \varepsilon_s P'_3 / P_s - K p_3'^{2/3}\}$$

次に $n' = 2$ の螺線の半径は

$$r_2 = d_0 \{1 - m \varepsilon_s P'_1 / P_s - K p_1'^{2/3}\} + d_0 \{1 - m \varepsilon_s P'_2 / P_s - K p_2'^{2/3}\}$$

$n' = 1$ の螺線の半径は

$$r_1 = d_0 \{1 - m \varepsilon_s P_1 / P_s - K p_1'^{2/3}\}$$

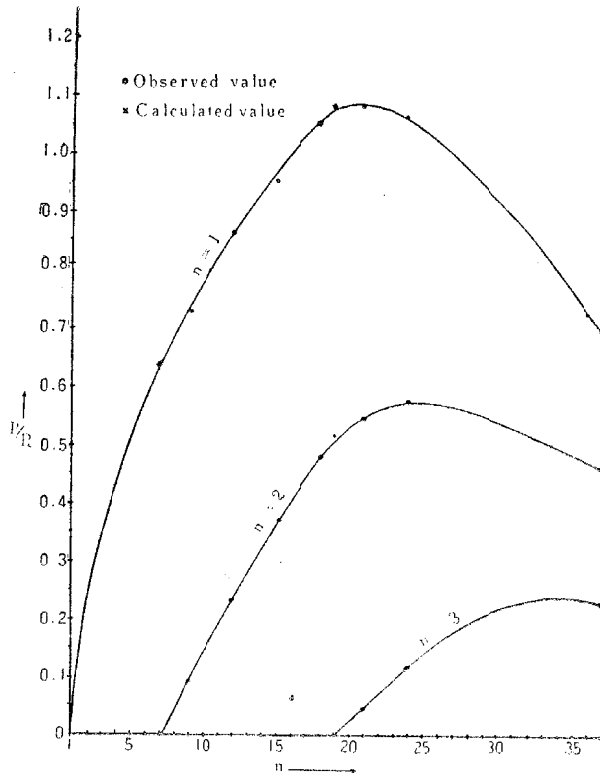


Fig. 5. Distribution of P/P_s between each fiber

上と同様に各 n の数値を入れて計算すると、

$$\begin{aligned}
 n=21 \quad r_3 &= 0.639 - 0.119 \varepsilon_s - 0.069 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3} \\
 r_2 &= 0.500 - 0.095 \varepsilon_s - 0.058 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3} \\
 r_1 &= 0.250 - 0.049 \varepsilon_s - 0.036 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3} \\
 n=24 \quad r_3 &= 0.660 - 0.124 \varepsilon_s - 0.070 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3} \\
 r_2 &= 0.500 - 0.096 \varepsilon_s - 0.058 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3} \\
 r_1 &= 0.250 - 0.049 \varepsilon_s - 0.035 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3}
 \end{aligned}$$

以上の r を用いてストランドの外径を求める式を立てると $19 \geq n > 7$ に対しては

$$D = 2r_2 + d_0(n' - 1) (1 - P'_2 m \varepsilon_s / P_s)$$

同様に $37 \geq n > 19$ に対しては

$$D = 2r_3 + d_0(n'' - 2) (1 - P''_3 m \varepsilon_s / P_s)$$

之等の式に各 n の数値を代入して計算すると

$$\begin{aligned}
 n=9 \quad D &= 0.834 - 0.158 \varepsilon_s - 0.081 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3} \\
 n=12 \quad D &= 0.959 - 0.113 \varepsilon_s - 0.093 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3} \\
 n=15 \quad D &= 1.084 - 0.204 \varepsilon_s - 0.102 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3} \\
 n=18 \quad D &= 1.209 - 0.228 \varepsilon_s - 0.112 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3} \\
 n=21 \quad D &= 1.306 - 0.243 \varepsilon_s - 0.137 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3} \\
 n=24 \quad D &= 1.389 - 0.261 \varepsilon_s - 0.140 K \varepsilon_s^{2/3} E^{2/3}
 \end{aligned}$$

5. K' に 就 いて

以上の D の式に於いて第一項は無荷重の時の直径 D_0 第二項はポアソン比に依る径の縮少、第三項は繊維相互の側圧に依る繊維相互の近よりによる径の縮少をあらわす。此の第三項に含まれる K' が補正を必要とする事は、3、に於いて説明した通りであるが、実際にストランドを引張つて見て径の縮少とストランドの伸びを測定し、 D の式に代入して K' を求めて見た結果、Fig. 6 に示す様な結果を得た。此の実験は温度 $28^\circ \sim 31^\circ \text{C}$ 、湿度 70% の室内で各 n の

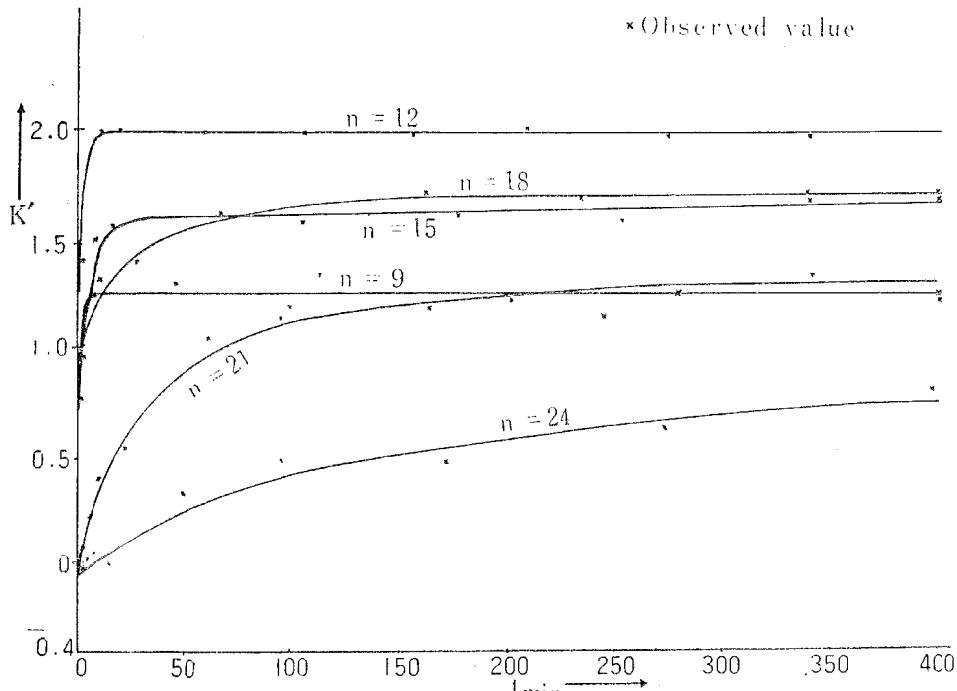


Fig. 6. Relation between K' and t

ストランドに同一の荷重 4.87kg をかけて 400 分間放置しその各時間に於ける伸びと径の縮少を 1/50mm 精度のカセットメーター並びに 1/100mm 精度のマイクロメーターに依て測定したのであるが、荷重の不手際による伸び過ぎの影響が入つて居り ($n=12$) 此の影響が最後迄いきいてくる為、 K' が幾分大きく出過ぎたものがあるが、兎も角も n が小さいものでは 10 分以内位で繊維と繊維の間の遊びの影響がなくなり K' が一定となるのが見られる。 $n=18, n=21, n=24$ 等のストランドに就いては、繊維 1 本当りの荷重が少い為、遊びの影響が 200~300 分位迄残り、それ以前では K' が小さく出ているのが認められる。特に $n=24$ に於いては最後迄遊びの影響が残つているものと考えられる。結局此の K' は一定値になつた後の値を用ひねばならぬ事が推論される。更に繊維と維維の間の遊びの状態も此の $K'-t$ の曲線から定性的に伺われ、遊びの影響を考慮した低荷重に於けるストランドの伸びに対する理論式を導く手がかりになると考えられる。

此の一定となつた後の K' の平均値を求めると、 $K'=1.576$ となり、本実験に用いた試料に就ては之が常数 K' と考えられる。此の K' を D の式に代入して求めた D の変化は糸の伸びを論ずる時に重要な要素となつて来る。

考 察

此の K' がきまれば、

$$P = P_s + P_x \sin \alpha + P_y \sin \beta \quad 19 \geq n > 7 \text{ の場合,}$$

$$P = P_s + P_x \sin \alpha + P_y \sin \beta + P_z \sin \gamma \quad 37 \geq n > 19 \text{ の場合,}$$

の式に各 n , 各 n' の繊維の描く螺旋線の半径 r を代入して求めた式よりストランドの伸びの機構は理論的に解折されるが此の式の計算結果及び実験値との対比は(其の二)に於いて論じ度い。

最後に本研究に於て御指導にあずかつた田内森三郎博士に深甚の謝意を表する。

文 献

1. 田内森三郎：“水産物理学”，朝倉書房（1949）.
2. 石 橋 正：撚線ばねに就いて，未完稿.
3. S. T. MOSENKO：“STRENGTH of MATERIALS,” part II, 556~559.
4. チモセンコ：井坂富士難，江崎伸市，森徹共訳 弾性体の力学 292~304.
5. J. PRESCOTT：“APPLIED ELASTICITY” Longmans, Green and Co. London (1924).
6. 小野 鑑 正：材料力学，丸善出版株式会社.