

# 合成纖維網糸の摩擦熱の影響について\*

深 沢 文 雄

On Relation between Production of Heat by Friction  
and Durability in Netting Thread

By

Fumio FUKASAWA

Earlier works suggest that the wearing process of netting-threads by friction may be explained in terms of the effect of heat. In synthetic fibers the adhesion mechanism caused by frictional heat is complex, and it is necessary to be explained by considering the effect of heat which is an important factor. In this paper, the effect of heat has been studied, based on the friction between the netting-thread and the low-carbon steel wire (B.S. No.20). The general arrangement of the apparatus to measure the temperature of wire by the thermocouple is shown in Fig. (1).

The heat given out by friction is expended in raising the temperature not only of the wire, but also of the thread. Some heat is lost in the radiation, and then the heat distributed along the surface of contact of the thread with the wire is proportional to the thermal diffusivity, but it is negligible. Hence the total heat of the wire is approximately equal to the heat produced by friction. The thread is driven by a motor at a frictional velocity  $V$  and a given normal force  $P$ , and its stroke is 10cm. If  $M$  is the heat capacity of wire,  $K$  the rate of the loss of heat per second and  $\mu$  the coefficient of friction between the thread and the wire, the heat given out by friction in the wire is  $dQ = P\mu V dt$ , and the loss of heat in a time  $dt$  is  $K(\theta - \theta_0) dt$ , when its temperature is raised from the temperature  $\theta_0$  of the air to  $\theta$ . The observations can be represented by the following forms :-

$$(\theta - \theta_0) = Q\{1 - \exp(-Kt/M)\}/K \quad (1)$$

$$(\theta' - \theta_0) = AP^\alpha \quad (2)$$

$$P = C\tau^\beta \quad (3)$$

where  $A$  and  $C$  are constants. Equations (2) and (3) are the relations among the temperature  $\theta'$  of thread broken by friction, duration and normal force. The values for  $(\theta - \theta_0)$  calculated from (1) are less than the observed values in the first period of sliding. This difference suggests that the coefficient of friction varies with temperature at a given  $(P, V)$ . The behaviour of  $\mu$  is represented by the following relation :-

\* 水産講習所研究業績 第245号, 1957年7月25日 受理

$$\mu = K(\theta - \theta_0) / PV \{ 1 - \exp(-Kt/M) \} \quad (4)$$

In practice, the temperature rises very rapidly at first, and then slowly, approaching the nearly stationary state. From equations (1), (2), and (4) the following expression for  $\mu$  is derived :-

$$\mu = K(\theta - \theta_0) / PV \text{ or } \mu = BP^{\alpha-1}$$

where  $B$  is  $AK/V$ . The frictional behaviour of threads used for the experiments is shown in Figures (2), (3), and (4).

## 緒 言

従来網糸の耐摩擦性について、網糸と他の物質並に網糸相互間の摩擦現象は多くの人々により色々と研究されている。然しながら現在多く使用されている合成繊維網糸では、繊維を形成する物質は繊維特有のヤング率や伸度を与えるために単なる高分子であるだけでなく複雑なる分子構造と組織とを有しているので、熱に対するその機械的性質は天然繊維である綿糸に比して非常に影響され易い。従つて網糸の耐摩擦性を考える場合には、単に摩擦回数や接触圧力等の要素のみでは不充分であつて上記の要素等により発生する摩擦熱及びそれによる網糸の熱効果の点を考慮することは重要であり且つ興味あることである。

## 実験方法及び材料

1) 実験に使用した装置は第1図に示す通りである。試料の網糸はモータによつて長さ5種の範囲を往復運動を行い、相手のライダー型に作られた (B.S. No. 20) の極軟鋼線 (針金) の凹部との間で摩擦される。針金は長さ4種でその両端は熱の不良導体にて絶縁され固定してある。往復運動の速度即ち摩擦速度は 10cm/sec, 5.1cm/sec, 3.2cm/sec の三種類に変速出

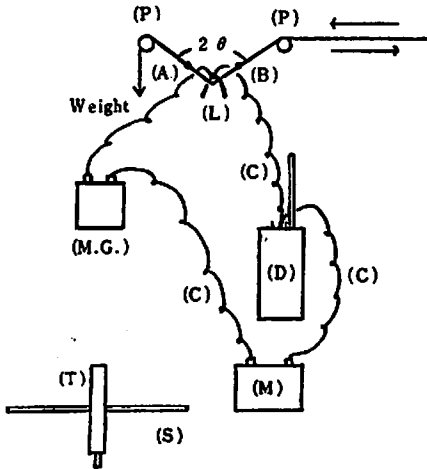


Fig. 1. Schematic diagram of wear tester.

(A) (B), Thread; (C), Cu-Constantan thermocouple; (D), Dewer bottle; (L), Low-carbon steel wire; (M), Multiplier; (M.G.), Mirror galvanometer; (P), Pulley; (S), Scale; (T), Telescope.

来るようになってきている。今、上記のライダー型針金の両側の網糸の間の角を  $2\theta$  とすれば (第1図参照), 接触圧力  $P$  は網糸の一端に掛けた荷重が  $W$  なるときは,  $P = 2W \cos \theta$  となる。接触点の温度は、銅-コンスタンタン熱電対 ( $0.16\phi$ ) と反照検流計 (感度  $8.1 \times 10^{-10}A$ ,  $10.8 \times 10^{-7}V$ , 周期  $7SEC$ ) とによつて測定され、この熱電対の一つの接点はライダー型針金の中に埋められ他の接点はジュアー瓶の中で  $0^\circ C$  に保たれてある。

2) 本実験に使用した網糸は、見掛上太さの大体同じで且つ同程度の抗張力のものを選びその種類は、アミラン、クレモナ5号(長繊維)、クレモナ万漁(短繊維)、サラン、綿糸の五種類であつた。各網糸は第1表に示す性能を有しており、この中の軟化点及び温度の第2次転移点は文献による値である。実験は温度  $26 \sim 30^\circ C$  湿度  $78\% \sim 84\%$  の条件の下で実施した。

Table 1. Specification of threads used for the experiment.

Kind of material	Number or Denier	Ply/No. of yarn	Number of the twists per 10 cm of length		Tensile strength Kg	* Softening point °C	* Second-order transition temperature °C
			Upper twists	Lower twists			
Amilan	210 D	3/75	12	23	65.3	210	80
Saran	1000 D	3/54	7.3	7.6	66.5	116-137	70-80
Cremona No.5.	500 D	3/51	10	11	55.0	190-200	70-90
Cremona Manryo	20'S	3/81	9.1	23	62.8	190-200	70-90
Cotton	20'S	3/90	12	29	41.6		

\* Taken from reference

### 実験結果及びその考察

1) 網糸の摩擦熱による温度上昇について網糸と針金との接触点における摩擦による発熱量は、摩擦速度  $V$ 、網糸と針金との間の摩擦係数  $\mu$ 、接触圧力  $P$  等によつて変化する。

今摩擦によつて毎秒発生する熱量  $Q$  は網糸並に針金に毎秒供給される熱量で  $Q = P\mu V$  で表わされる。針金から毎秒失われる熱量はその逃げる割合を  $K$  とすれば  $K(\theta - \theta_0)$  である。但し  $\theta_0$  は周囲の温度で  $\theta$  は任意の時間  $t$  における網糸の温度である。針金の熱容量を  $M$  とすれば針金の毎秒の温度上昇は、後述するように網糸に伝わる熱量は小さいので省略すると

$$\{Q - K(\theta - \theta_0)\} / M$$

である。従つて  $dt$  時間には

$$d\theta / \{Q - K(\theta - \theta_0)\} = dt / M$$

上式を積分して  $t=0$ ,  $(\theta - \theta_0) = 0$  の条件を入れると

$$(\theta - \theta_0) = \theta \{1 - \exp(-\frac{K}{M}t)\} / K \dots \dots \dots (1)$$

が得られる。比例常数  $K$  は輻射並に伝導によつて毎秒失われる熱量の割合であるから各網糸によつて定まる。次に網糸がある摩擦速度で往復運動を行うのであるから針金との接触点附近の空気は攪乱される。この場合輻射によつて失われる熱量は小さく、 $V$  を変化させて  $K$  値を求めて見た時殆んど  $K$  は一定であることから空気の攪乱による影響は省略しても差支えない程度である。更に亦接触点に発生する熱量は、試料の網糸と針金の両者に分配される。その分配される割合は両者の熱伝導率  $\lambda$ 、比熱  $c$ 、密度  $\rho$  等に関係する。金属の場合はその温度伝導率  $\lambda/c\rho$  を考慮すればよいが、網糸ではそれ以外に水分と空気の含有率を考えなくてはならない。従つて、網糸と水分と空気の三者の組合はさつた時の状態を考えるとその熱伝導率  $\lambda_0$  は

$$\lambda_0 = \lambda_1(V_1) + \lambda_2(V_2) + \lambda_n(V_n)$$

で示される。 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_n$  は夫々繊維、水、空気の熱伝導率で  $V_1, V_2, V_n$  は繊維、水、空気の容積比(%)である。上式の空気の  $\lambda_n$  は水の  $\lambda_2$  に比べて  $1/4$  程度で且つ繊維間の空気胞が微小にして時流を起さず輻射が吸収されるものと考え、含有する空気の影響は無視出来て上式は

$$\lambda_0 = \lambda_1(V_1) + \lambda_2(V_2)$$

となる。吸湿量の影響を考慮すると、網糸の温度伝導率  $k$  は

$$k = \lambda_1(V_1) + \lambda_2(V_2) / c_1\rho_1(V_1) + c_2\rho_2(V_2)$$

で表わされる。但し  $c_1, \rho_1, c_2, \rho_2$  は繊維及び水の比熱と密度である。 $c, \rho, \lambda$  の値を入れて温度

伝導率を計算してみると針金では  $k=1.57 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ , サランでは  $k=5.29 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$  である。

相接触している物体間に分配されて伝わる熱量の割合は、各物体の温度伝導率に比例するものとすれば、サランと針金の間の分配比は (1:300) 程度となり摩擦による発熱量は殆んど針

金に移り、網糸側に流れる熱量は省略しても差仕えない。他のアミランでは (1:180) クレモナでは (1:190), 綿糸が (1:280) 程度であるからサランの場合と同様に取扱える。

従つて針金の温度を測定することにより網糸の温度を知ることが出来る。実際に第1図の装置で測定してみると温度と時間との関係は第2図で示すようになる。その実験式を求めてみると

$$(\theta - \theta_0) = a \{ 1 - \exp(-bt) \} \dots (1)'$$

が得られる。ここで (1) と (1)' を比較してみると

$$a = Q/K = \mu PV/K$$

$$b = K/M$$

である。然し乍ら、 $(\theta - \theta_0)$  の測定値と (1)' 式よりの算出値とを比較してみると各網糸とも、 $t$  が短い期間では  $P$  が大なるに

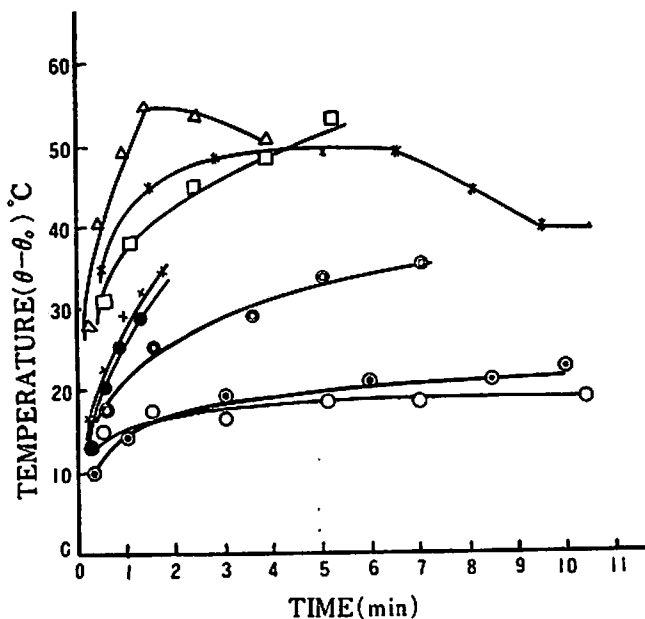


Fig. 2. Relation between temperature (observed values) of the thread given out by Friction and sliding time. ○, Amilan P=1.8 Kg; ●, Cotton P=1.8 Kg; ◎, Cremona No. 5 P=1.8 Kg; ●, Saran P=1.8 Kg; ×, Cremona Manryo P=1.8 Kg; □, Cremona No. 5 P=2.7 Kg; \*, Amilan P=2.7 Kg; △, Amilan P=2.7 kg.

従つて測定値の方が大きい値を示している。 $P$  が小さくなるにつれて、その差の次第に小さくなり (1)' 式の値に近付いてくる。時間に対する温度の変化は一般に、最初は急激に上昇し次第に緩かになり殆んど定常状態に近付くがその中でもアミランが最も緩かで、次いで綿糸でサラン、クレモナの順である。アミランは破断直前に温度が下る傾向がある。これは他の網糸に比べて破断が緩かに起るために接触面積の減少によるものと考えられる。本実験で第1表に示した性質を有する網糸では、破断時の温度は同一の  $(P, V)$  の条件ではクレモナ5号が最高でクレモナ万漁、サラン、アミラン、綿糸の順で低くなつた。このことは各網糸の摩擦係数  $\mu$  の大小及びその性質によるもので  $\mu$  については(4)で述べる。

## 2) 破断時の温度と接触圧力との関係

網糸の摩擦個所の破断時の温度  $\theta'$  と接触圧力  $P$  とは実験の結果第3図から次の実験式が得られる。

$$(\theta' - \theta_0) = AP^\alpha \quad 0 < \alpha < 1 \dots (2)$$

但し  $V=10 \text{ cm/sec}$  である。 $A$  は比例常数である。

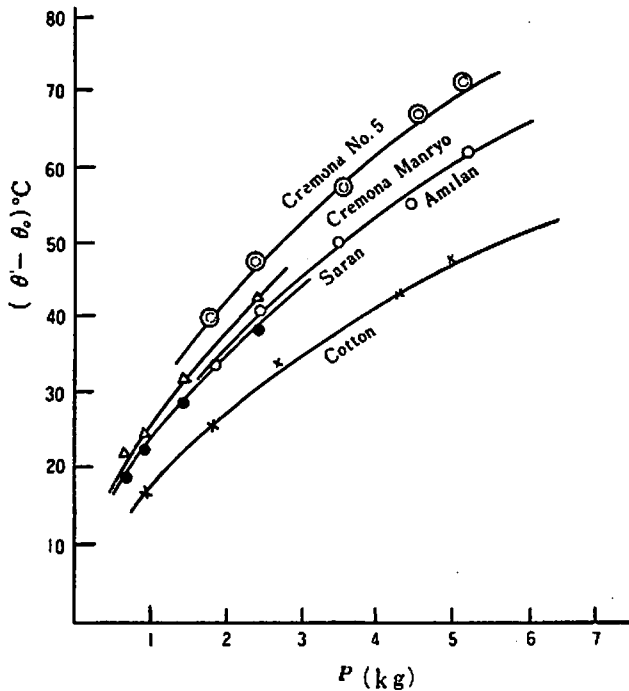


Fig. 3. Relation between temperature  $\theta'$  of the thread broken by friction and normal force  $P$ .

A,  $\alpha$ の値は第2表に示す通りである。

Table 2. Values of constants in equation (1),(2),(3).

Kind of material	$\alpha$	$\alpha - 1$	$A \times 10^{-3}$	$B$	$\beta$	$C \times 10^7$	$K \times 10^{-3}$
			°C/dyne			Dyne/sec	Cal/°C.sec
Amilan	0.558	-0.442	11.2	15.5	-0.283	1.62	0.330
Saran	0.545	-0.456	13.5	12.4	-0.400	1.01	0.219
Cremona No.5	0.543	-0.464	17.6	19.8	-0.419	3.06	0.268
Cremona Manryo	0.536	-0.457	14.8	15.9	-0.618	3.04	0.256
Cotton	0.588	-0.412	5.58	3.33	-0.483	2.99	0.143

3) 接触圧力 $P$ と破断時間 $\tau$ について

$P$ と $\tau$ との関係は、 $V=10\text{cm/sec}$ なる場合第4図に示すような曲線として表わされる。即ち

$$P = c\tau^\beta \quad \beta < 0 \dots\dots(3)$$

$C$ は比例常数であつて、本実験の試料では $C, \beta$ の値は第2表に示す通りである。

各網糸の破断時間 $\tau$ を見ると長繊維の合成繊維の網糸では、 $\tau$ が急激に減少し始める附近の $(P, \theta)$ で耐熱性の特色を良く表わしている。アミランでは $(P=3.6\text{kg}, \theta' = 80.7^\circ\text{C})$ の附近から $\tau$ は急激に減少する。このことは多くの研究者によつて報告されているように、アミランの伸度は温度の上昇と共に増加し温度の第2次転移点 $\theta_s$ である $80^\circ\text{C}$ 附近までは僅かに上昇しているだけであるが、それ以上の温度になると急激に伸度は増加し破断に到る性質によく

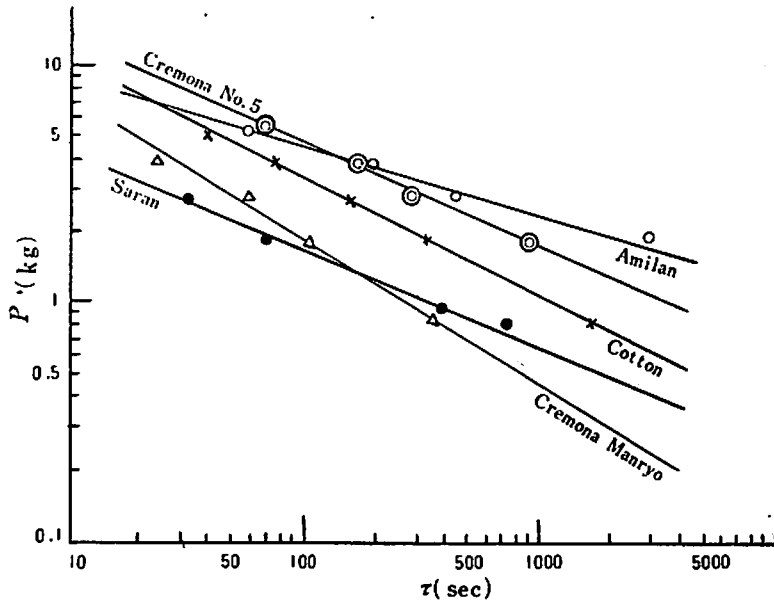


Fig. 4. Relation between normal force  $P$  and duration  $\tau$  of the thread.

あるため熱的影響より摩耗による影響の方が大であるからである。

サランは ( $P=1.8\text{kg}$ ,  $\theta'=64.1^\circ\text{C}$ ) で  $\tau=76.9\text{sec}$  でこの辺りから  $\tau$  は急激に減少する。サランの  $\theta_s$  は  $80\sim 70^\circ\text{C}$  であるにもかかわらず  $\theta_s$  以下で  $\tau$  が減少し始めるのは、サランは熱的性質において他の繊維より劣っているためで文献によればサランの引張伸度は  $40\sim 50^\circ\text{C}$  で  $40\sim 50\%$  に達している。

従つて、重要なことは各網糸の第2次転移点に達する条件が問題となる由であるから ( $P$ ,  $\mu$ ,  $V$ ) について考えてみると、 $\mu$  は各網糸について一定と考えられるが実際は  $\mu$  は温度の函数であり換言すれば  $P$  及び  $V$  の函数であり温度が上昇すれば  $\mu$  は小さくなる性質を有している。その詳細は (4) に述べる。  $P$  及び  $V$  が大になると短時間で  $\theta_s$  に達し耐久時間は小になり破断に到る。即ち各網糸の耐久性は第2次転移点を界として急激に悪化する。第三表は綿糸

Table 3. Relation between  $\tau'$  and  $W/T$  of threads.  $T$ , Tensile strength;  $T'$ ,  $T/T(\text{Cotton})$ ;  $\tau'$ , Duration rate  $\tau'/\tau(\text{Cotton})$ .

Kind of material	T Kg	T'	Weight $W=1\text{Kg}$		Weight $W=1.5\text{Kg}$		Weight $W=2.5\text{Kg}$	
			W/T	$\tau'$	W/T	$\tau'$	W/T	$\tau'$
Amilan	65.3	1.56	0.0153	8.91	0.0229	2.88	0.0382	2.41
Cremona No.5	55.0	1.32	0.0182	2.64	0.0273	2.11	0.0455	2.36
Cremona Manryo	62.8	1.50	0.0159	0.373	0.0238	0.381	0.0397	
Saran	66.5	1.61	0.0150	0.227	0.0228	0.135	0.0375	
Cotton	41.6	1.00	0.0240	1.00	0.0360	1.00	0.0600	1.00

の抗張力及び破断時間を単位にとつて、他の各網糸の抗張力と破断時間を表わしたものであ

合致する。同様にクレモナ5号は ( $P=3.6\text{kg}$ ,  $\theta'=87.2^\circ\text{C}$ ) で  $\tau$  が減少するのは  $\theta_s=90\sim 100^\circ\text{C}$  であることから了解出来る。クレモナ万漁が同じクレモナでも ( $P=1.8\text{kg}$ ,  $\theta'=66.3^\circ\text{C}$ ) で  $\tau=100.3\text{sec}$  となり、クレモナ5号に対して  $\tau$  が  $1/10$  程度であるのはクレモナ万漁は短繊維 (長繊維のクレモナ5号とは製法が多少異なる) で

る。 $V(=10\text{cm/sec})$  を一定にして  $P$  を変えた時、アミランでは  $P$  が小で  $0.9\text{kg}$  ( $W=0.5\text{kg}$ ) 以下では  $\theta' < \theta_s$  で、破断時間が綿糸に比べて遙かに長く20倍以上にもなるが、 $P$  が大となつて  $\theta' > \theta_s$  となると破断時間は短くなり綿糸との比  $r'$  は1に近付いてくる。クレモナ5号もアミランと同じ傾向の性質を示すが低荷重ではアミラン程綿糸に対して破断時間  $\tau$  は大でないが  $P$  が大きくなるに従つて  $\tau$  の減少がアミランより緩やかである。サラン、クレモナ万漁は綿糸に比べて摩擦に対しては全く弱いが、サランとクレモナ万漁では低荷重においてはサラン高荷重においてはクレモナ万漁の方が  $\tau$  が大きい性質を有している。然し以上述べた  $\tau$  の比較は試料の網糸が全く同一の条件を有していないから厳密には定量的に綿糸に対して何倍の耐久力があると言えないが近似的には第三表の数値(実験値)は妥当性を有している。例えば抗張力においてクレモナ5号及びアミランは綿糸の1.3~1.5倍でありその  $\tau$  の比はそれ以上であるから綿糸の方が耐摩擦性は劣っている。

$P$  が大になると  $r'$  が1に近付き  $r'$  が1.3~1.5以下になつて綿糸の方が抗張力の割合には耐摩擦性が大であると言ふことが出来る。

サラン、クレモナ万漁は抗張力においては綿糸の1.5~1.6倍でありながら  $P$  の大小にかかわらず常に綿糸の  $\tau$  に比べて小さくその耐摩擦性は綿糸に劣っている。

#### 4) 摩擦係数 $\mu$ について

1) で述べた  $t$  と  $(\theta - \theta_0)$  の関係において、摩擦の初期の  $(\theta - \theta_0)$  が (1)' 式より求めた値が測定値より小さい原因を考えると、 $V$  を一定にして  $P$  を大にすることは  $(\theta - \theta_0)$  が大になることである。亦各網糸とも大体  $t = 2$  分前後で定常状態に近付くことが測定される。定常状態になることは

$$Q = K(\theta - \theta_0) \text{ 或は } P\mu V = K(\theta - \theta_0)$$

であつて上式は (1) の  $t \rightarrow \infty$  とおいた場合である。そこで  $K$  と  $\mu$  は各網糸毎に一定の値を有するものと考えられる。所が  $(\theta - \theta_0)$  の測定値と (1)' 式よりの算出値の方が大でその差は  $P$  が大なる程大となるが、このことは  $\mu$  が温度の函数であり、温度は一定の  $(P, V)$  では時間と共に変化するから (1) より

$$\mu = K(\theta - \theta_0)/PV \{1 - \exp(-\frac{K}{M}t)\}$$

で表わされる。破断時の  $P, \theta', \tau, \mu$  の間には (1), (2) 式より

$$\mu = KAP^{\alpha-1}/V \{1 - \exp(-\frac{K}{M}\tau)\}$$

或は 
$$\mu = BP^{\alpha-1} / \{1 - \exp(-\frac{K}{M}\tau)\}$$

なる関係がある。

定常状態になれば  $\mu$  も一定の値を示すからその場合は

$$\mu = K(\theta - \theta_0)/PV$$

特に破断の場合には上式と (2) より

$$\mu = BP^{\alpha-1} \quad \alpha - 1 < 0 \quad B = AK/V$$

で表わされる。以上述べたように  $\mu$  は温度と共に変ることは、その表面状態が温度により変化するからである。更に燃数による表面状態の異りに対する  $\mu$  の変化を調べてみると、網糸をストランドの状態にして摩擦実験を行う時その温度は燃糸の場合と大差なく、その差は  $2^\circ\text{C}$  前後で、殆んど燃数の影響はないことが判る。

### 5) K値の計算

摩擦実験において毎秒失われる熱量の割合であるKは、前述の(1)'式から求めることが出来る。各網糸は夫々熱伝導率、比熱、密度等が異なるから同一条件の(P, V)で計算してみれば当然異ってくる。その結果は第二表に示す値をとる。即ちアミラン、クレモナ5号、クレモナ万漁、サラン、綿糸の順序でこの大きさの頃は丁度摩擦熱が網糸と針金とに分配される比率の順序に一致している。各網糸のKの値を平均してみると $K=0.243 \times 10^{-3} \text{cal}/^{\circ}\text{C sec}$ である。

Kを求める他の方法として摩擦の初期において摩擦の仕事量から

$$\mu PVt = (\theta - \theta_0) MJ$$

J: 熱の仕事当量

が得られ、上式からKを求めることが出来る。第2表をみるとKの値は綿糸が他の網糸に比べて小さいが、これは綿糸は短繊維であるから摩擦中に摩擦された繊維が針金の周囲に附着して保温の役目をするからと考えられる。

## 要 約

- 1) 従来の網糸の摩擦試験では、摩擦回数、接触圧力等の影響から網糸の衰退を取扱っているが複雑な熱的性質を有する合成繊維網糸では上記の要素により発生する摩擦熱の熱効果を考えるべきであるから本実験ではこの摩擦熱を測定し網糸の衰退と摩擦熱との関係を調べてみた。
- 2) 合成繊維網糸では第二次転移点を境界として、摩擦熱による影響が急激に変化する。
- 3) 摩擦熱は(P,  $\mu$ , V)によるから、P, Vが一定ならば $\mu$ が問題となる。 $\mu$ は一定でなく温度の函数であり換言すればP及びVの函数でもある。特に定常状態になれば破断時の時には $\mu = BP^{\alpha-1}(V=一定)$ で表わされる。

又網糸のような弾性的物質では幾何学的な表面状態の変化(例えば撚数による変化)はPが非常に小さい時でない限り余り $\mu$ には関係しない。

- 4) 破断時間による耐摩擦性はアミラン、クレモナ5号は低荷重では綿糸より遙かに優秀であるが高荷重では綿糸の方が優秀である。サラン、クレモナ万漁は荷重の大小にかかわらず綿糸より劣る。破断時間と接触圧力との関係は(3)式で表わされる。

- 5) 摩擦速度Vを変化させた時の(P,  $\theta$ )の関係はアミランでは

$$V=10\text{cm/sec} \cdots \alpha=0.558 \quad V=5.1\text{cm/sec} \cdots \alpha=0.552 \quad V=3.2\text{cm/sec} \cdots \alpha=0.544$$

でVが極端に変化しない限り $\alpha$ は殆んど一定と見做しても差支えない。Kについても同様である。

終りに御指導を賜わった本所の神谷鐘吉教授並に材料入手に御便宜を賜わった日本漁網下関工場試験室の長田、中村両氏に厚く感謝する。

## 文 献

- 1) 成田時治編: 1955. 化学繊維の性能とその応用. 東京, 至文堂.
- 2) 繊維学会: 1953. 化繊便覧. 東京, 丸善.
- 3) 宮本秀明, 高山博光: 1955. 網糸と網糸とが擦れ合つて起る摩擦. 日誌, 21(3).
- 4) M. W. PASCOE and D. TABOR: 1956. The friction and deformation of polymers. *Proc. Roy. Soc. A*, 235 (1201).
- 5) 若杉松三郎: 1935. 保温材. 東京, 丸善.