

## 繊維と円筒形ガイドとの摩擦に関する考察 (5)

—ナイロン糸を主体とした繊維摩擦の接触圧力  
依存性, 速度依存性, 接触時間依存性について—

井 村 俊 一

### Friction of yarn round a cylindrical textile guide (5th)

—The friction of yarns (mainly nylon yarns) round a  
textile guide and its dependence upon wrapping  
pressure round a guide, yarn speed, and sticking  
time of yarn to a guide. —

Toshikazu Imura

#### Abstract

In this paper, it is described that the test yarns do not as a rule obey Amonton = Coulomb's Law and the friction of yarns (mainly nylon yarns) is dependent upon wrapping pressure, yarn speed, and sticking time of yarn to the guide. In the experiment, the pear-skinned chromium plated steel guide is adopted as a textile guide.

The results obtained in this paper are as follows.

- (1) The coefficient ( $\mu_K$ ) of the dynamic friction of nylon yarn approximately obeys the equation,  $\mu_K = \alpha T_0^{n-1}$  where  $T_0$  is initial tension and  $n$  and  $\alpha$  are frictional constants. According to the experiment, value of  $n$  ranges from 0.58 to 0.84, and value of  $\alpha$  ranges from 0.28 to 0.42.
- (2) The dynamic friction of nylon yarn reduces slowly at low speeds, then, it increases slowly, or keeps constant, and increases rapidly as yarn speed rises. It could be assumed, therefore, that the region of contact between the yarn and the guide, may deform from plastic to elastic as yarn speed rises in this experimental conditions.
- (3) According to the experiment, maximum static frictional force of nylon yarn reduces as sticking time to the guide keeps less than about fifteen seconds as a maximum and about ten seconds as a minimum, and it would appear therefore, that the stick of nylon yarn to the guide attains approximately equilibrium state for about ten to fifteen seconds.

#### 1. 緒 言

本学学報第<sup>(1)</sup>21号～第24号に、わたって、繊維と円筒形ガイドとの摩擦について、考察してきたが、その解析では、実験目的の性格からし

て、摩擦現象が、アモントン＝クーロンの法則に従うものとして、取り扱ってきたが、ミクロ的に見れば、繊維材料の場合、一般には、その

法則に従わないことは、種々の報告でも、明らかである。そこで、本報では、摩擦現象の基本的性格に、立ちもどり、ミクロ的に、繊維の摩擦係数の接触圧力依存性、摩擦速度依存性、接触時間依存性について、実験し、基礎的データを解析したので、ここに報告する。また、実験試料糸としては、ナイロン糸を主体として、それに綿糸や、 $\beta$ -ガラス繊維を、採用している。

## 2. 摩擦係数の接触圧力依存性について

アモントン＝クーロンの法則によれば、一般に摩擦係数は、接触圧に無関係となるが、繊維材料は一般に、その法則からはずれ、指数法則が成立する。

### 2.1 実験装置と方法

本実験では、実験装置としては、Fig.1 の装置を使用し、実験試料糸としては、ボビンに巻かれている糸から約80cmの長さのものを切り出して、試料糸として、実験するが、最初の摩擦実験では、試料糸の各部における表面状態のバラツキが影響して、実験値が大きく変動し、摩擦力を特定することが非常に困難となるが、同一摩擦実験を繰返すと（これを本報告ではウォーミングアップと称する）、2～3回の繰返しで、摩擦力が安定し、以後あまり変動しなくなるという、摩擦履歴現象が、観察される。そこで、解析方法として、最初の摩擦力の大変動も含めた統計的処理方法も存在するが、本実験では、荷重依存性の追求という目的から、摩擦力として、ウォーミングアップ後の安定した状態の実験値を採用し、解析した。摩擦現象安定化のため、ナイロン（20D）、ナイロン（40D）は、3回、テグスは4回のウォーミングアップをおこなった。また、本実験の試料糸には製造工程上、少量の油剤が添加されているので、摩擦の種類に関しては、厳密には、試料糸の乾燥摩擦とはいえないが、本実験では、便宜上、乾燥摩擦として取り扱い、油剤の影響を考慮して、実験実施上、ウォーミングアップの各回ごと、また本実験の行なう前、必ず、ベンゼン、アセトンの2種類で、摩擦ガイドの表面洗浄をおこなった。

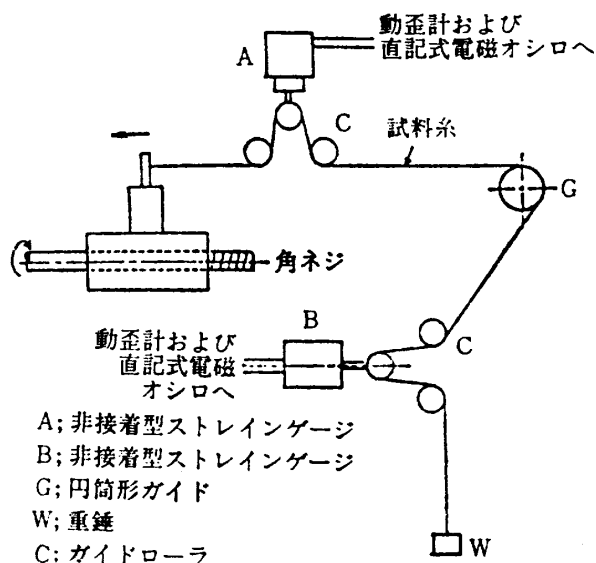


Fig.1 実験装置

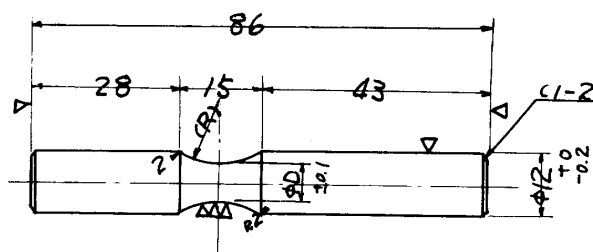
### 2.2 実験条件

#### (1) 実験試料糸

- ナイロンモノフィラメント（20デニール） 6 ナイロン，東レ製
- ナイロンモノフィラメント（40デニール） 6 ナイロン，テイジン製
- テグス04番（100デニール相当）

#### (2) 摩擦ガイド

梨地クロムメッキガイド； $\phi 5$ ， $\phi 7$ ， $\phi 10$ ，（3種類）Fig.2 参照



寸法 ガイド径	D	R
φ5ガイド	5.07	10
φ7ガイド	7.68	14
φ10ガイド	8.82	21

梨地クロムメッキ系ガイド

Fig.2 摩擦ガイド

#### (3) 糸速，試料糸接触角

$V_0 = 1 \text{ mm/sec.}$

$\theta = 2.26 \text{ radian, } 2.22 \text{ radian}$ （2種類）

#### (4) 荷重（初期張力付加用）

1.2g, 2g, 3g, 5g, 10g, 20g, (6種類)

### (5)実験場所

恒温恒湿室, 室温18.5℃, 相对湿度70%

## 2.3 実験結果と考察

動摩擦係数と初期張力の関係を両対数グラフで表示したものを, Fig.3~Fig.5に示す。

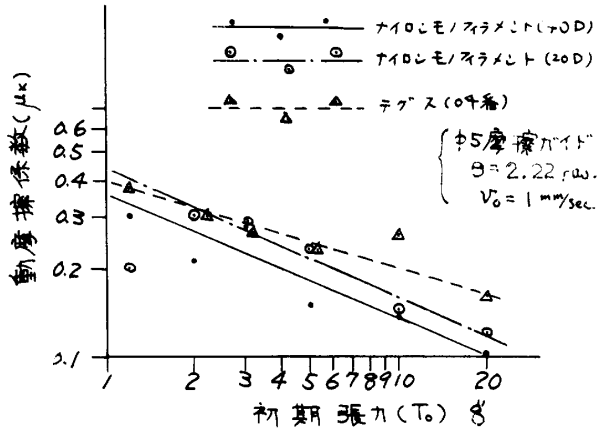


Fig.3 初期張力と動摩擦係数

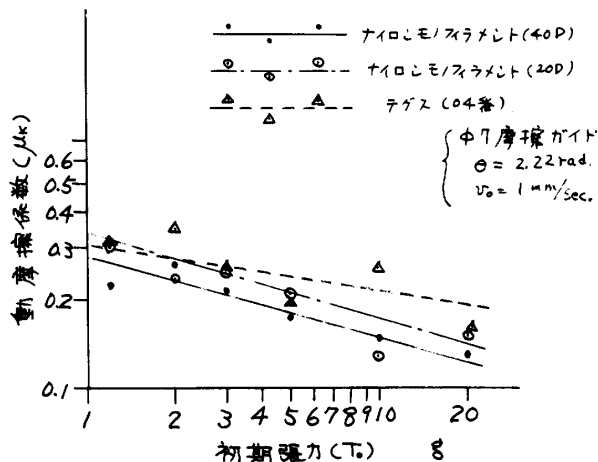


Fig.4 初期張力と動摩擦係数

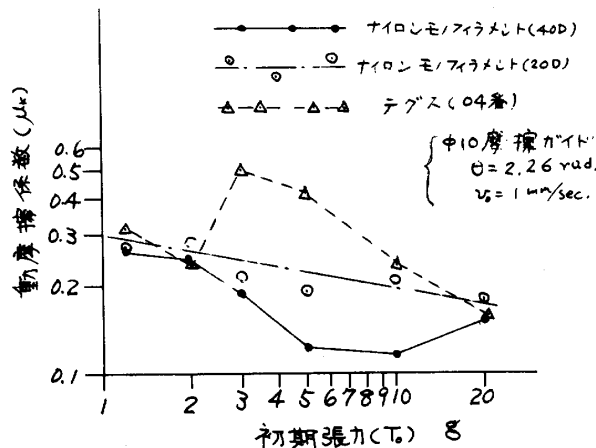


Fig.5 初期張力と動摩擦係数

本実験では摩擦力のデータはウォーミングアップ (安定化操作) の後で, 採っているの, そ

れは一種の平均値を示しているものと解釈される。また, ナイロンモノフィラメント (20D), (40D), テグスにおいては, 糸速,  $v_0 = 1 \text{ mm/sec.}$  では, スティックスリップ現象を起すので, 動摩擦係数は, スティックスリップの理論解析から求めている。一般に, H. G. Howellは, 繊維材料について, 摩擦力 ( $F$ ) は  $F = \alpha R^n$  ( $\alpha, n$ ; 定数,  $R$ ; 接触圧力) なる指数法則を提案しているが, これによると  $\mu = \frac{F}{R} = \alpha R^{n-1}$  ( $\mu$ : 摩擦係数) となり, 本実験では, 接触圧力 ( $R$ ) に相当する初期張力 ( $T_0$ ) を使って,  $\mu_K = \alpha T_0^{n-1} = \alpha T_0^{-1}$  ( $\mu_K$ ; 動摩擦係数) を導入すると, Fig.3では, ナイロンモノフィラメント (20D) では,  $\mu_K = 0.42 T_0^{-0.42}$  が想定され,  $n = 0.58, \alpha = 0.42$  となり, ナイロンモノフィラメント (40D) では,

$\mu_K = 0.35 T_0^{-0.42}$  となり,  $n = 0.58, \alpha = 0.35$  となり, テグス (04番) では,  $\mu_K = 0.39 T_0^{-0.29}$  即ち,  $n = 0.71, \alpha = 0.39$  となる。また Fig.4では, ナイロンモノフィラメント (20D) は  $\mu_K = 0.32 T_0^{-0.26}$ , 即ち,  $n = 0.74, \alpha = 0.32$ , ナイロンモノフィラメント (40D) では  $\mu_K = 0.28 T_0^{-0.26}$ , 即ち,  $n = 0.74, \alpha = 0.28$  となり, テグス (04番) では,  $\mu_K = 0.31 T_0^{-0.16}$ , 即ち,  $n = 0.84, \alpha = 0.31$  となる。また Fig.5では, ナイロンモノフィラメント (40D) とテグス (04番) は指数関係式から, データの変動が大きく, 実験式の設定が不可能で, ナイロンモノフィラメント (20D) のみ,  $\mu_K = 0.29 T_0^{-0.17}$ , 即ち,  $n = 0.83, \alpha = 0.29$  となる。

以上の結果より, ナイロン糸では,  $n = 0.58 \sim 0.84$  となり,  $\alpha = 0.28 \sim 0.42$  となり, 特に  $n$  の値が  $\frac{2}{3}$  に近い場合は, Hertz の接触の理論によれば, 糸と摩擦ガイドの接触部の接触圧力による変形が, 弾性変形に近いことが予想され, かつ指数関係式がほぼ成立していることから, ナイロン糸では, 凝着せん断破壊が, 摩擦力の主原因となっていることが, 明らかとなった。また Table.1 より, ナイロンモノフィラメント (20D) とナイロンモノフィラメント (40D) の  $n$  の値が等しい, このことは Fig.3 と Fig.4 の両対数目盛のグラフで, 両者のグラフが平行となっ

ていることから示される。このことは、両方とも6ナイロンから製造されていることより、20デニールから40デニールぐらゐの糸の太さの変化では $n$ に影響をおよぼさず、 $n$ は糸の材質と摩擦ガイドの関係における接触部変形の性質に主として起因する定数であろう、という予想が考察される。また、 $\alpha$ は試料糸の直径と摩擦ガイドに關係する接触部変形の性質に主として起因する定数であろうことも考察される。また、 $n$ と $\alpha$ には相互関連性があるかないか、などこのようなことがらを確認するためには、今後の詳細な実験が必要とされる。また、摩擦ガイドの観点から考察すると、摩擦ガイドの直径が、小さくなる程、 $n$ が小さくなることから、糸とガイドの接触部で、同一試料糸に対する摩擦ガイドの直径が小さい程、接触圧力の変化に対する、糸の摩擦接触部変形の割合が大きくなる。つまり、圧力依存性が大きくなることが、両対数グラフの勾配が大きくなることから考察される。また、 $n = \frac{2}{3}$ の弾性変形の場合をほぼ中心として $n$ の値が0.58~0.84と変化しているのは、接触部変形が、塑性変形と弾性変形の両方の性質の混合割合が変化するような、粘弾性変形をしているものと解釈される。そして、糸の太さが、20デニールから40デニール程度の変化では、グラフが平行であることから、圧力依存性は変わらず、テグス(04番)のように、100デニール程度まで変化すると、グラフの勾配が小さくなる、即ち、圧力依存性が小さくなることがわかる。また、本実験のデータの特徴としては、摩擦ガイドの太さが大きい程、また、試料糸の太さが大きい程、バラツキが大きくなり、このことは摩擦の原因となる接触表面の範囲が大きくなる

(1)  $\phi 5$  摩擦ガイド

試料糸	$\alpha$	$n$
ナイロンモノ (20D)	0.42	0.58
ナイロンモノ (40D)	0.35	0.58
テグス (04番)	0.39	0.71

(2)  $\phi 7$  摩擦ガイド

試料糸	$\alpha$	$n$
ナイロンモノ (20D)	0.32	0.74
ナイロンモノ (40D)	0.28	0.74
テグス (04番)	0.31	0.84

(3)  $\phi 10$  摩擦ガイド

試料糸	$\alpha$	$n$
ナイロンモノ (20D)	0.29	0.83

Table 1 摩擦ガイドと定数 $\alpha$ ,  $n$

ことにより、接触安定度が低下することが原因であると、考察される。また、初期荷重の小さい範囲のデータのバラツキが大きくなることも、わずかの接触表面状態の変化が接触圧に大きく影響することが推察され、このことより説明可能である。

### 3. 摩擦力の速度依存性について

#### 3.1 実験装置と方法

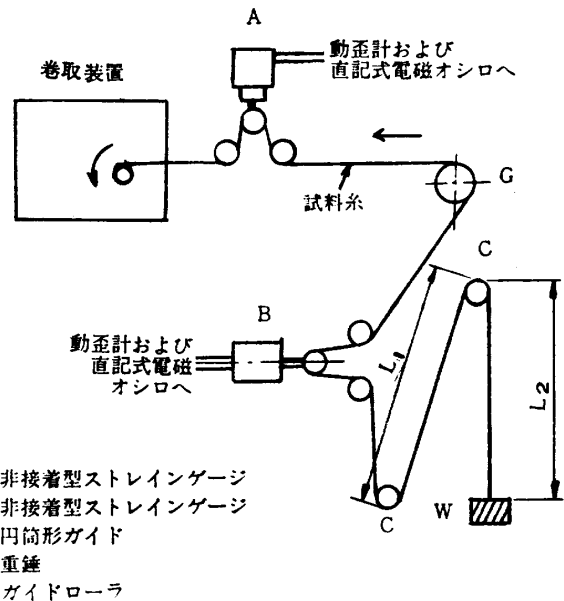


Fig. 6 実験装置

Fig.6に実験装置を示す。糸速変化のため、ギヤの組合せ交換で、低速域から高速域まで、15段階に変化できる巻取装置を使用した。試料長としては、高速域を考慮して、12mの長さを採用し、実験ごとに、ベンゼン、アセトンの2種類で摩擦ガイドを洗浄した。また、データ採取にあたって、本実験のような、糸速が大なる領域での実験では、摩擦力の張力波形は非常に大きく変動するのが常である。そこで、データとしては平均値である所の張力波形の中心値を採用して、解析した。また、摩擦係数になおさず摩擦係数そのものを解析した。

#### 3.2 実験条件

##### (1) 実験試料糸

- ナイロンモノフィラメント (20デニール)
- 6 ナイロン 東レ製
- ナイロンモノフィラメント (40デニール)

- 6 ナイロン                      テイジン製  
 ○テグス (04番) (100 デニール相当)  
 ○コットン双糸 (30S)  
 ○β-ガラス繊維

(2) 摩擦ガイド

梨地クロムメッキガイドφ5 Fig.2 参照

(3) 糸速

0.25mm/sec, 0.84mm/sec, 1.13mm/sec,  
 2.5mm/sec, 3.77mm/sec, 5.1mm/sec,  
 8.4mm/sec, 11.3mm/sec, 15.1mm/sec,  
 37.7mm/sec, 50.24mm/sec, 50.9mm/sec,  
 67.8mm/sec, 226.1mm/sec, 305.2mm/  
 sec, (15段階)

(4) 荷重 (初期張力付加用), 試料糸接触角, 試料糸条件

10g,  $\theta = 2.26 \text{radian}$   $L_1 = 6 \text{m}$ ,  $L_2 = 5 \text{m}$ .

(5) 実験場所

恒温恒湿室, 室温18.5℃ 相对湿度70%

### 3.3 実験結果と考察

実験結果を Fig.7, Fig.8 に示す。

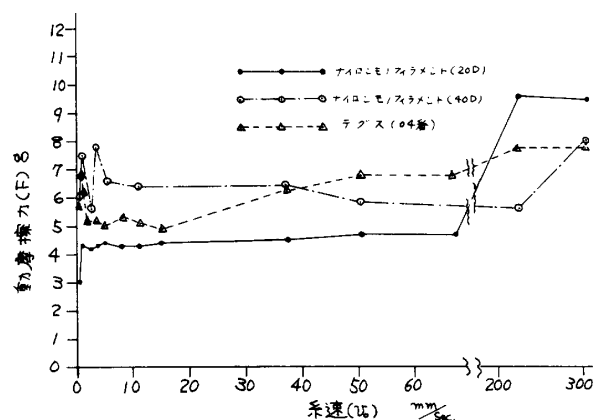


Fig.7 糸速と動摩擦力

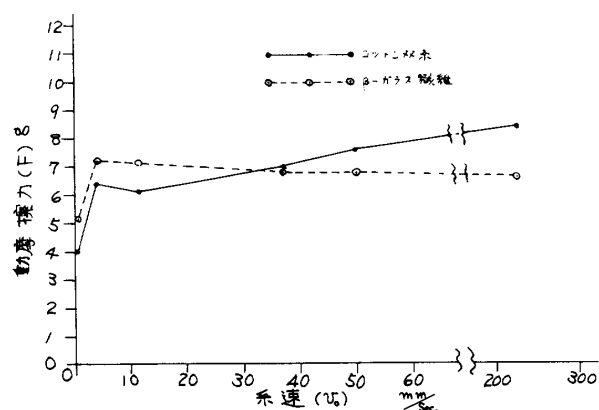


Fig.8 糸速と動摩擦力

Fig.7 では、ナイロン糸 3 種類については、糸速 0.25mm/sec. ~5mm/sec では動摩擦力は相当変動していて、不安定であるが、5mm/sec ~67.8mm/sec までは、ほぼ安定した傾向を示し、ナイロンモノフィラメント (20D) はほぼ一定、ナイロンモノフィラメント (40D) は漸減し、テグス (04番) は漸増し、67.8mm/sec ~226.1mm/sec ではナイロンモノフィラメント (20D) は急増し、ナイロンモノフィラメント (40D) は 220mm/sec 程度まで漸増的に推移している。Fig.8 では、コットン双糸は 5mm/sec 程度 ~200mm/sec 程度ではほぼ漸増し、β-ガラス繊維は、5mm/sec 程度 ~200mm/sec ではほぼ一定という、結果が得られている。このような結果は繊維の摩擦の速度依存性は一般に、接触部の状態が低速域のマイクロレオロジカルな状態から、本実験の速度領域である、中速域のクリープ領域内における、接合部破壊が塑性流動破壊の状態では動摩擦力は糸速の増大に伴って、減少し続いて速度が増大して延性破壊の状態に移るにつれて、動摩擦力は増大するという報告に個々の試料糸の塑性破壊や延性破壊の速度領域は相違するが、ほぼ、あてはまる結果となった。

## 4. 摩擦力の接触時間依存性について

### 4.1 実験装置と方法

実験装置は Fig.1 を使用した。そして、摩擦ガイドと試料糸との接触時間を数種類定めて、最大静止摩擦が、どのように変化するかを観察した。また摩擦ガイドとして、圧力依存性が、顕著なφ5ガイドを使用した。

### 4.2 実験条件

#### (1) 実験試料糸

- ナイロンモノフィラメント (20デニール)  
 6 ナイロン                      東レ製
- ナイロンモノフィラメント (40デニール)  
 6 ナイロン                      テイジン製
- テグス (04番) (100 デニール相当)

#### (2) 摩擦ガイド

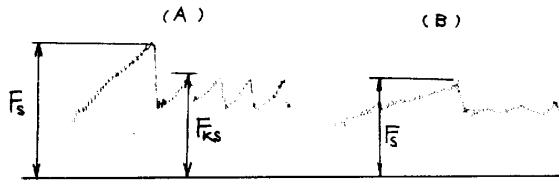
梨地クロムメッキφ5 Fig.2 参照

#### (3) 糸速, 初期荷重 ( $T_0$ ), 糸接触角

$v_0 = 1 \text{mm/sec}$ ,  $T_0 = 10 \text{g}$ ,  $\theta = 2.25 \text{radian}$

(4)糸接触時間

Table.2 参照



ナイロンモノフィラメント (40デニール) (6ナイロン)

接触時間 摩擦係数	25分 後	15分 後	5分 後	3分 後	2分 後	1分 後	30秒 後	15秒 後	10秒 後	5秒 後	30秒 後
$F_s$ (g)	5.2	5.2	4.9	4.9	4.9	5.1	4.9	4.4	3.7	3.4	3.0
$F_{Ks}$ (g)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0

ナイロンモノフィラメント (20デニール) (6ナイロン)

接触時間 摩擦係数	20分 後	10分 後	5分 後	3分 後	2分 後	1分 後	30秒 後	15秒 後	10秒 後	5秒 後	30秒 後
$F_s$ (g)	14.9	7.3	6.4	5.9	6.5	6.5	6.5	4.0	4.0	4.0	4.0
$F_{Ks}$ (g)		4.6	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

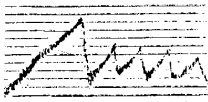
テグス04番 (100デニール相当)

接触時間 摩擦係数	20分 後	10分 後	5分 後	3分 後	2分 後	1分 後	30秒 後	15秒 後	10秒 後	5秒 後	30秒 後
$F_s$ (g)	8.2	7.6	7.0	7.3	5.3	7.9	7.9	6.7	5.8	5.8	5.8
$F_{Ks}$ (g)	6.5	4.9	4.6	4.6	4.0	5.5	5.5	4.6	3.7	3.7	3.7

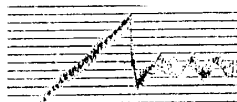
(実験条件) 初期荷重: 10g, 糸地クロム×ナイロンガイド  
糸速:  $v_0 = 1 \text{ mm/sec}$ , 糸接触角:  $129^\circ$

Table.2 静止接触時間と最大静止摩擦係数

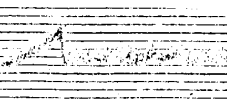
(20分静止)



(10分静止)



(5秒静止)



試料: テグス04番

糸地クロム×ナイロンガイドφ5

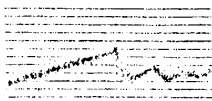
W=10g

接触角:  $129^\circ$

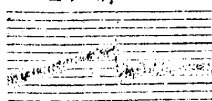
糸速:  $1 \text{ mm/sec}$

Fig.9 張力波形

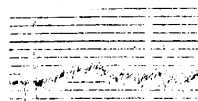
(5分静止)



(2分静止)



(10秒静止)



試料: ナイロンモノフィラメント

20デニール

糸地クロム×ナイロンガイドφ5

W=10g

接触角:  $129^\circ$

糸速:  $1 \text{ mm/sec}$

Fig.10 張力波形

(5)実験場所

恒温恒湿室 室温 $18.5^\circ\text{C}$ , 相対湿度70%

4.3 実験結果と考察

Table.2に実験データを示し, Fig.9とFig.10に, 実験波形の一部を示す. Table.2より, 最大静止摩擦係数 ( $F_s$ ) の実験値は, 接触時間が, 10秒ないし, 15秒を境にして, 2つに区分することができる. このことは, 凝着説が適用されるナイロン糸では, 摩擦接触部の静止凝着が, 10秒ないし15秒で, ほぼ平衡状態に達し, 10秒ないし, 15秒以下では, 静止凝着が進行中ということで, 静止時間が零秒に近づくにつれ,  $F_s$ が, 糸速 $v_0 = 1 \text{ mm/sec}$  時の静止摩擦係数 ( $F_{Ks}$ ) になり, スティックスリップ現象をおこしている. その波形パターンはTable.2の(A), (B)である. ところが $v_0$ が増大すると, スティックスリップ現象は消失して,  $F_s$ は動摩擦係数 ( $F_K$ ) に変化する. このことは横山らも報告しているように, 最大静止摩擦係数の静止接触時間依存性が確認され, 本学学報第22号や第24号での報告で, 摩擦ガイドを強制的に, 振動させ, 交番摩擦係数を発生, その時の解析で, 振動現象のため, ガイドと糸において, 摩擦接触部分の相対静止期が, 必ず存在するが, それは瞬間的に通過するため, 付着による静止摩擦は存在せず, 動摩擦のみの考察で, 解析した方法の妥当性を与える根拠となる.

5. 結 言

- (1)ナイロン糸においては, 動摩擦係数の接触圧力依存性は, 大略,  $\mu_K = \alpha T_0^{-1}$  なる, 指数法則に従うことが, 確認され,  $n=0.58 \sim 0.84$  であることから, 摩擦接触部の凝着部分が, 粘弾性的性質をもつことが考えられ, その部分のせん断破壊が動摩擦の主原因であることが, 考察される.
- (2)動摩擦の速度依存性は, 本実験速度領域ではナイロン糸, コットン双糸,  $\beta$ -ガラス繊維とも動摩擦は, 漸減, 一定, 漸増, 増加, と変化しこれは文献の報告の, 摩擦接触凝着部のせん断破壊が, 塑性破壊 (速度に対して摩擦は負特性) から延性破壊 (速度に対して, 摩擦は正特性) の状態にあることに適合する

ことが明らかとなった。

- (3) ナイロン糸の最大静止摩擦は静止接触時間に依存し、それが10秒から15秒を境にして、最大静止摩擦が減少することより、摩擦接触凝着が、10秒～15秒で平衡状態に達することが、考察される。また、本学学報第22号や第24号の報告の交番摩擦力は動摩擦のみ考えて、静止摩擦を考えない、解析方法が妥当であることの、根拠が得られた。

(注)

- (1) 井村，金沢美術工芸大学学報第21号  
p47 (1977)，第22号，p91 (1978)，  
第23号，p33 (1979)，第24号，p109(1980)
- (2) たとえば，H. G. HOWELL ; Text. Res.  
J, 23, 589(1953)
- (3) 繊維物理学（繊維学会編）（丸善）p352～p355
- (4) 横山，岡部；機械の研究 vol.21, NO.11  
p1505 (1969)