

# 繊維と円筒形ガイドとの摩擦に関する考察

## ナイロン糸のスティックスリップについて

A note on friction of nylon yarn round a cylindrical textile guide.

井 村 俊 一

### 1. 緒 言

糸の製造工程や製織準備工程に使用されている繊維機械には多数の糸ガイドが使用されている。そしてこの糸ガイドと糸の間の摩擦の状態が糸の品質に大きな影響をおよぼしている。この糸と糸ガイドの摩擦を測定するために糸を糸ガイドの上を走行させると糸が合成繊維、たとえばナイロン糸などの場合、特に糸の走行速度が遅い場合、スティックスリップ現象が観察される。スティックスリップとは付着 (stick) と滑り (slip) が交互におこり、運動が間欠的となる現象である。

スティックスリップについては繊維では Mercer が1945年にこの現象を利用して摩擦を測定して以来、Howell<sup>(1)</sup>や Pascoe-Tabor<sup>(2)</sup>が繊維と繊維の静摩擦や動摩擦の測定法を確立している。

本研究では実際の製織準備工程などにみられる糸と糸ガイドの摩擦の例として、走行糸としてナイロン糸を採り、糸ガイドとして梨地クロムメッキの表面処理をほどこした円筒形ガイドを使用して実験し、その結果得られたスティックスリップ現象を解析検討したので報告する。

### 2. 実験装置と方法

Fig. 1 の装置を使用し、試料糸の一端に荷重をとりつけ、円筒ガイドを経て他端を角ネジでもって一定速度で糸をガイド上を走行させ、ガイドの両側で糸の張力をA、Bの非接着型ストレインゲージにて測定し、AとBの張力差が円筒ガイドの摩擦力となる。本実験ではAとBの

非接着型ストレインゲージの張力波形を直記式電磁オシログラフにて記録した。なお、本実験に使用した計器および試料糸の詳細は以下に示す。

#### 2.1 使用計器

- (1) ダンパー付非接着型ストレインゲージ [A]  
TU-1 型、定格±100g 固有振動数500Hz
- (2) 非接着型ストレインゲージ [B]  
UT 型、定格±100g 固有振動数250Hz
- (3) 直記式電磁オシログラフ  
EMO-62型 使用振動子G-1000S-F  
G-600B-F、G2500A-F
- (4) 動歪測定器  
DS6/MTY型

#### 2.2 試料糸および試験円筒形ガイド

- (1) 東レナイロンモノフィラメント 40 デニール  
-6 ナイロン
- (2) テグス04番 (100デニール相当)

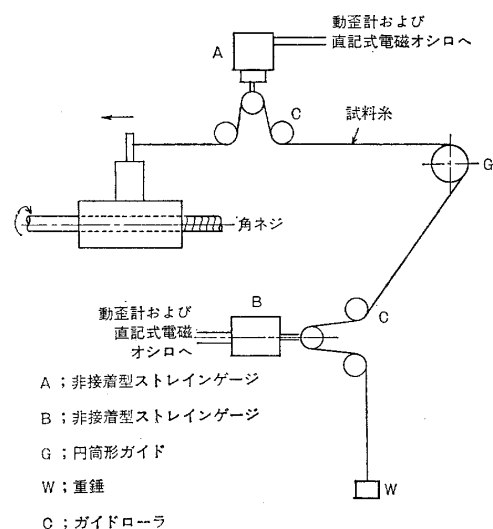


Fig. 1 実験装置

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

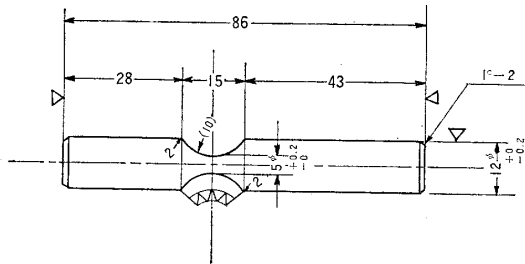


Fig. 2 梨地クロムメッキガイド

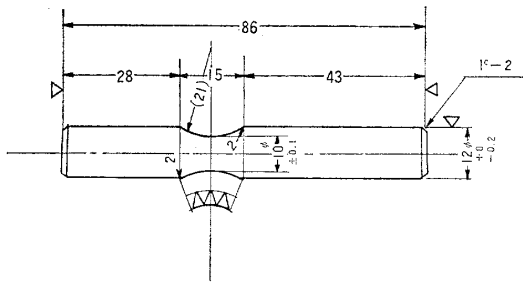


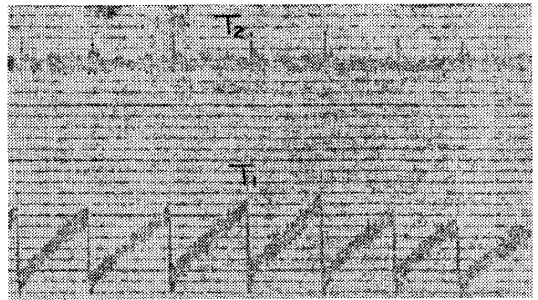
Fig. 3 梨地クロムメッキガイド

### 3. 実験結果

Fig. 4～Fig. 6はFig. 1に示される非接着型ストレインゲージAより記録した張力波形 $T_1$ 、と非接着型ストレインゲージBにより記録した張力波形 $T_2$ を示す。

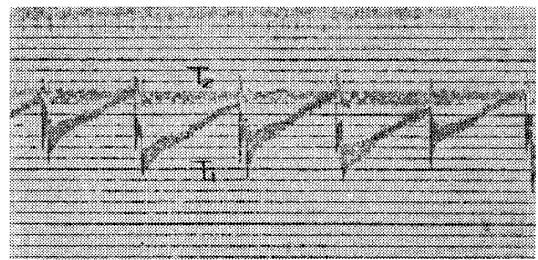
糸の走行スピード $V_0=1\text{mm/sec}$ 程度では顕著なスティックスリップ現象が観察される。

これはナイロン糸と梨地クロムメッキ処理をした糸ガイドの摩擦において、静止摩擦力と動摩擦力の大きさに差があるために生じる摩擦振動の一種である。つまりナイロン糸は弾性自由度をもっているので、糸が静止状態から $V_0$ で走行し始めるとき、はじめ糸のガイドとの接触部分は静止摩擦のために停止しているため糸は伸びてゆく。そして糸の伸びによる弾性復原力が最大静止摩擦力をこえ、糸のガイドとの接触部分は滑り出し、糸は動摩擦力の作用下で自由振動をおこなう。そして自由振動のためにまた糸はガイドの接触部分と相対静止の状態になると付着して接触部分は停止して、糸はまた伸び始める。このようにして前と同じ挙動をくりかえす。これがFig. 4～Fig. 6の張力波形として観察されるのである。



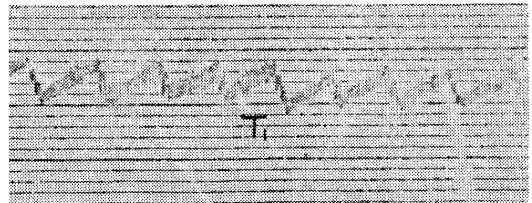
条件 試料糸 テグス04番  $V_0=0.84\text{mm/sec}$   
梨地5 $\phi$ ガイド  $W=10\text{g}$

Fig. 4 張力波形



条件 試料糸 東レナイロンモノフィラメント(40D)  $V_0=1\text{mm/sec}$  梨地10 $\phi$ ガイド  $W=15\text{g}$

Fig. 5 張力波形



条件 試料糸 東レナイロンモノフィラメント(40D) 梨地5 $\phi$ ガイド  
 $V_0=1\text{mm/sec}$   $W=10\text{g}$

Fig. 6 張力波形

### 4. 理論解析

#### 4.1 等価モデル

本実験で得られたスティックスリップ波形の構造を検討するために、Fig. 1に示される実験装置の等価モデルをFig. 7に示す。ここでFig. 1に示される装置の関係上、円筒形ガイドと糸はある接触角をもって接しているため、摩擦現象は一定の接触角を通じて糸に張力を発生させるわけであるが、取り扱いを簡単にするために円弧状になった糸の部分、直線上の糸の一点に摩擦力が集中して作用するものとする。そして

その摩擦力の大きさは円弧形態のときに作用した摩擦力の大きさとする。

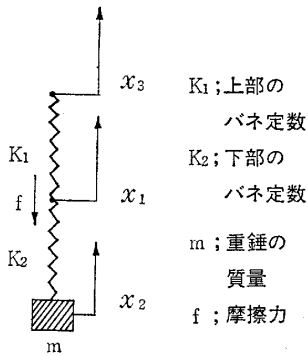


Fig. 7 実験装置の等価モデル

#### 4.2 理論式のための仮定

- (1) 糸は粘性のない一自由度バネ質量系として、糸の質量を無視してバネ定数のみを考慮するものとする。
- (2) バネ定数  $K_1$ 、 $K_2$  は本実験方式では糸の走行と共に変化するはずであるが、本実験での実験条件、走行速度が 1 mm/sec 程度で、データ検出の糸距離が高々 1 cm 以内のため  $K_1$ 、 $K_2$  の変化を無視して  $K_1$ 、 $K_2$  を一定とみなして解析してもさしつかえないと考える。
- (3) 本実験では糸の定常状態を問題にする。

#### 4.3 理論式

Fig. 7 の等価モデルのように座標を定め、座標基準点は重錘が作用した位置とする。

$$K_1(x_3 - x_1) - K_2(x_1 - x_2) - f = 0 \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 x_2}{dt^2} = K_2(x_1 - x_2) \quad (2)$$

$$x_3 = V_0 t \quad (3)$$

但し、 $V_0$  : 糸の走行速度

$f$  : 摩擦力  $\begin{cases} fk ; \text{動摩擦力} \\ fs ; \text{静摩擦力} \end{cases}$

$t$  : 時間

とする。

$$(1) \text{式より } x_1 = \frac{K_1 x_3 + K_2 x_2 - f}{K_1 + K_2} \quad (4)$$

(3)式と(4)式を(2)式に代入すると

$$m \frac{d^2 x_2}{dt^2} + K x_2 = K V_0 t - \frac{K}{K_1} f k \quad (5)$$

但し、 $K = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2}$  とする。

- 1) 付着時 ( $0 \leq t \leq t_1$ )

$$x_3 = V_0 t$$

$$t_1 = \frac{fs}{K_1 V_0} \quad (6)$$

- 2) 滑り時 ( $0 < t' < \frac{\pi}{n_0}$ )

$$t' \equiv t - t_1 = t - \frac{fs}{K_1 V_0} \text{ とおいて、} t' \text{ より}$$

(5)式をみると(5)式は

$$m \frac{d^2 x_2}{dt'^2} + K x_2 = K V_0 t' - \frac{K}{K_1} f k \quad (7)$$

としてもよく

$$K_1(x_3 - x_1) - K_2(x_1 - x_2) - f k = 0 \quad (8)$$

(7)式の微分方程式を解くために

$$x_2 = A \sin(n_0 t') + B \cos(n_0 t') + V_0 t' - \frac{f k}{K_1}$$

$$\text{但し、 } n_0 = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

とおいて、

$$\text{初期条件 } t' = 0, x_2 = -\frac{fs}{K_1}, \frac{dx_2}{dt'} = 0 \quad (9)$$

とすると、 $x_2$  は (7) 式の微分方程式を満足するから、

$$x_2 \Big|_{t'=0} = B - \frac{f k}{K_1} - \frac{f s}{K_1} \quad (10)$$

$$(10) \text{より } B = \frac{f k - f s}{K_1} \quad (11)$$

$$\frac{dx_2}{dt'} \Big|_{t'=0} = A n_0 + V_0 = 0 \text{ より} \quad (12)$$

$$A = -\frac{V_0}{n_0} \quad (13)$$

$$\text{以上より、 } x_2 = -\frac{V_0}{n_0} \sin(n_0 t') + \frac{f k - f s}{K_1} \cos(n_0 t') + V_0 t' - \frac{f k}{K_1} \quad (14)$$

$$(8) \text{式より } x_1 = \frac{K_1 V_0 t' + K_2 x_2 - f k}{K_1 + K_2} \text{ で(14)式を代}$$

入すると

$$x_1 = V_0 t' - \frac{f k}{K_1} + \frac{1}{K_1 + K_2} \left\{ \frac{K_2}{K_1} (f k - f s) \cos(n_0 t') - \frac{V_0}{n_0} K_2 \sin(n_0 t') \right\} \quad (15)$$

(15)式で  $V_0$  小さくて結局  $\frac{K_2}{K_1 + K_2} \frac{V_0}{n_0} \ll 1$  とみなすことができる場合は、

$$x_1 \approx V_0 t' - \frac{f k}{K_1} + \frac{1}{K_1 + K_2} \left\{ \frac{K_2}{K_1} (f k - f s) \cos(n_0 t') \right\} \quad (16)$$

となる。

ここで非接着型ストレインゲージAによって検出される張力波形 $T_1$ は

$$T_1 = K_1 (V_0 t' - x_1) + T_0 \quad (17)$$

但し、 $T_0$ は重錘側の張力で  $T_0 = m g$   $g$ :重力加速度である。(17)式を(16)式を使って簡単にすると

$$T_1 = K_1 \left\{ \frac{fk}{K_1} - \left( \frac{1}{K_1 + K_2} \right) \left( \frac{K_2}{K_1} \right) (fk - fs) \cos(n_0 t') \right\} + T_0 \quad (18)$$

### 3) 再び付着する時

再び付着するための条件は  $\frac{dx_1}{dt'} = 0$  であるから

$$\frac{dx_1}{dt'} = V_0 - \frac{1}{K_1 + K_2} \left\{ \frac{K_2}{K_1} (fk - fs) n_0 \sin(n_0 t') \right\} = 0$$

$$\sin(n_0 t') = \left( \frac{V_0}{n_0} \right) \left( \frac{K_1 + K_2}{fk - fs} \right) \left( \frac{K_1}{K_2} \right) \quad (19)$$

$\left( \frac{V_0}{n_0} \right) \left( \frac{K_1 + K_2}{fk - fs} \right) \left( \frac{K_1}{K_2} \right) \div 0$  と見なせるような条件下では

$$\sin(n_0 t') \div 0, \quad t' \div -\frac{\pi}{n_0} \text{ となり、}$$

その時に再び付着する。

以上のようにして再付着の時間が求まったがこの理論解析の結果と実験波形を比較のための便宜上、Fig. 7の等価モデルにおいて  $K_1 = K_2$  となるようにして実験波形を検出した関係上(18)式の張力理論式は

$$x_1 = V_0 t' - \frac{fk}{K_1} + \frac{1}{2 K_1} (fk - fs) \cos(n_0 t') \text{ より}$$

$$T_1 = fk - \frac{fk - fs}{2} \cos(n_0 t') + T_0 \quad (20)$$

ここで再付着時の張力は

$$t' = -\frac{\pi}{n_0} \text{ を(20)式に代入すると}$$

$$T_1 = fk + \frac{fk - fs}{2} + T_0 = \frac{3fk - fs}{2} + T_0 \quad (21)$$

また非接着型ストレインゲージBによって検出される張力波形 $T_2$ は

$$T_2 = K_2 (x_1 - x_2) + T_0 \quad (0 < t' < \frac{\pi}{n_0}) \text{ より}$$

$$T_2 = K_1 \left\{ V_0 t' - \frac{fk}{K_1} + \frac{1}{2 K_1} (fk - fs) \cos \right.$$

$$\left. (n_0 t') + \frac{V_0}{n_0} \sin(n_0 t') - \frac{(fk - fs)}{K_1} \cos(n_0 t') - V_0 t' + \frac{fk}{K_1} \right\} + T_0$$

$$T_2 = K_1 \left\{ \frac{V_0}{n_0} \sin(n_0 t') - \frac{fk - fs}{2 K_1} \cos(n_0 t') \right\} + T_0$$

$$\frac{K_1 V_0}{n_0} \ll 1 \quad (K_1 V_0 \text{ が } n_0 \text{ に比較して小さいとき})$$

$$T_2 \div T_0 - \frac{fk - fs}{2} \cos(n_0 t') \quad (22)$$

$$t' = 0 \text{ のとき、 } T_2 = T_0 - \frac{fk - fs}{2} = T_0 + \frac{fs - fk}{2}$$

$$\text{再付着時 } t' = -\frac{\pi}{n_0}, \quad T_2 = T_0 + \frac{fk - fs}{2} \text{ となる。}$$

以上により、理論的な張力波形 $T_1$ 、 $T_2$ をFig. 8とFig. 9に示す。

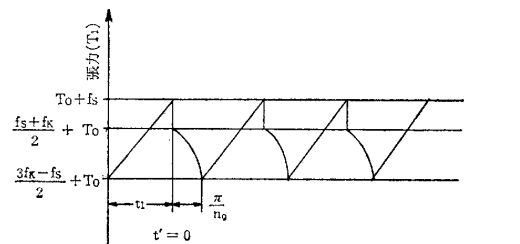


Fig. 8  $T_1$ の張力波形 (理論)

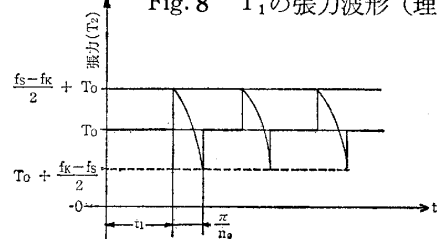


Fig. 9  $T_2$ の張力波形 (理論)

## 5. 考 察

実験で求めた張力波形 Fig. 4 ~ Fig. 6 と理論解析から求めた張力波形 Fig. 8 と Fig. 9 を比較検討すると、きわめて良好な一致が見られる。それ故に本報告で適用した理論解析の妥当性が裏付けられた。なお Fig. 4 の張力波形はテグス04番 (100デニール相当) の場合でこの場合

$$n_0 = \sqrt{\frac{K}{m}}, \quad K = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2}, \quad K_1 = K_2 \text{ で}$$

$K = \frac{K_1^2}{2 K_1} = \frac{K_1}{2}$  で Fig. 5、Fig. 6 のナイロンモノフィラメント40デニールにくらべて  $n_0$  は大き

い。故に $\frac{\pi}{n_0}$ は小さくなり、滑り時の張力降下は急激になっている。

〔注〕 理論式による張力波形図は厳密には近似式を使っている。ところが速度 $V_0$ が小さい場合、本実験条件では $V_0$ は高々1 mm/secで、 $\frac{V_0}{n_0} \ll 1$ 、と考えて良い。

## 6. 結 言

- (1) ナイロン糸と梨地クロムメッキ処理のガイドとの摩擦は走行速度が遅い場合（高々1 mm/sec）顕著なスティックスリップ現象が観察され、これは摩擦振動の一種である。
- (2) スティックスリップの張力波形は理論と実験とが良好に一致し、滑り時は

$$T_1 = f_k - \frac{f_k - f_s}{2} \cos(n_0 t') + T_0$$

$$T_2 = T_0 - \frac{f_k - f_s}{2} \cos(n_0 t') \text{ を張力波形を示す}$$

理論式として採用して良い。但し、この式は $\frac{V_0}{n_0} \ll 1$ となる条件の場合に有効である。

以上より、スティックスリップ波形を解析することにより、ナイロン糸と糸ガイドの静止摩擦力と動摩擦力を決めることが可能となったので、今後の研究として摩擦力の定量的測定をおこなっていくつもりです。なお、本研究を行うにあたり御指導を賜った金沢大学工学部吉村先生に深甚な感謝の意を表します。

〔注〕

- (1) H.G. Howell ; J. Text. Inst. 42 T521 (1951)
- (2) M.W. Pascoe, D. Tabor ; Proc. Roy. Soc., A235 210(1956). J.A Chapman. M.W. Pascoe, D.Tabor ; J. Text. Inst, 46, P3 (1955)