

# Friction Force Exerted on a Yarn in a Friction False Twisting Unit

## Part 1 : Analysis and Simulation

ENDO Tetsuhiko, SHINTAKU Sukenori, KINARI Toshiyasu, SASAYA Tomokazu

\*Faculty of Engineering, Kanazawa University, Kodatsuno, Kanazawa, 920-8667 Japan

Received 19 January 2001 ; accepted for publication 8 May 2001

### Abstract

The friction force acting on a yarn when twisted and for warded by the rotating disks of a false twisting unit is analyzed by the force balanced equations. The related mechanics is presented in basically the same formulation as reported earlier but the rotational motion of a yarn around its axis is newly taken into account besides the traveling in the axial direction. The analysis can evaluate separately two components of the friction force; one twists the yarn and another pushes the yarn forward. Further the change in yarn path on the disk surface as well as in yarn tension is simulated by integrating a set of differential equations. Also is proposed the way to cast the equations into dimensionless ones by which numerical case studies can be appreciably reduced in the number of trials.

**Key Words :** Friction twister; Disk type friction unit; Friction force; Yarn path; Yarn tension

## ディスク型フリクション仮撚における糸に働く摩擦力 (第1報) 定式化とシミュレーション

遠藤 哲彦\*, 新宅 救徳\*, 喜成 年泰\*, 笹谷 朋良\*

### 1. 緒言

工業的に広く用いられているディスク型摩擦仮撚装置では、複数の回転円板（以下ディスクと呼ぶ）の外周面に糸を順次接触して走らせ、ディスクから受ける摩擦力により、糸に回転と送り作用を与えている。筆者らは既報[1]において、曲面上を走る糸に加わる力の平衡について基礎的な解析を行った。この中で、ディスクを輪環面の外周面として数学的に定義し、糸がディスク外周面に接触して走行する場合の糸経路と糸張力を求める微分方程式を導くとともに、その数値積分結果と実験値の比

較を行った。この解析では、前提条件として、ディスク上での糸回転はないものと仮定し、実験も糸に撚りのかからない条件下で行った。

本報では、実際の仮撚加工により近い状態、すなわち、糸はディスク上で撚りのかかった状態で、かつ回転しつつ走行しているものとして解析を行う。このとき、1枚のディスク上での糸速、糸回転数、糸太さ、そしてディスク周速は一定であると仮定する。その上で、ディスク上の糸の走行経路、糸傾角、糸張力、そして、撚りトルクの変化を表す微分方程式を求めるとともに、適当な初期条件を与えて数値積分を行った結果を示す。

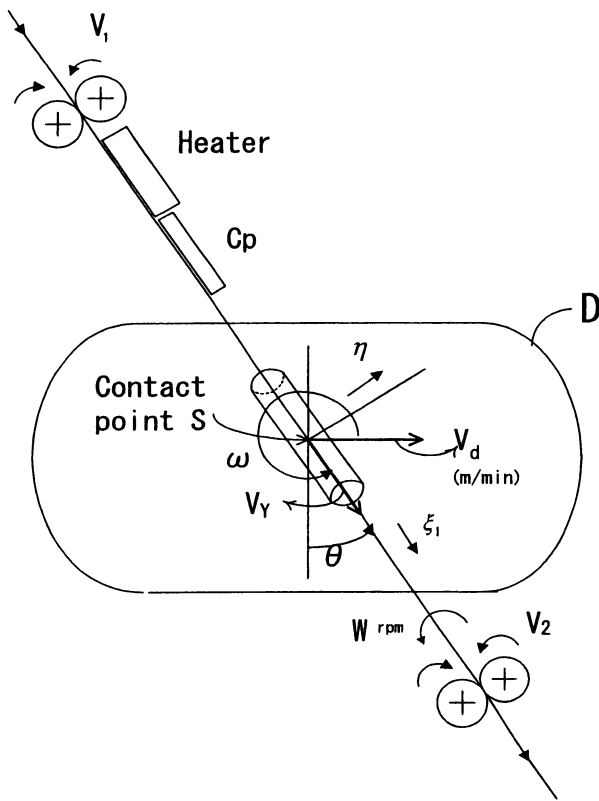


Fig. 1 Schematic diagram of false twisted yarn running and rotating while it is in contact with a rotating disk D.

## 2. ディスクと糸の相対速度ベクトル

図1は、接触点sでディスクに接触している糸の微小部分dsが速度 $V_Y$ (m/min)で $\xi_1$ の方向に走り、かつ回転数 $W$ (rpm)で回転している状態を示す。 $\xi_1$ は糸の接触点sでの接線方向単位ベクトルで、図のごとくディスク表面の移動速度 $V_d$ と $\omega$ の角度をなしているとする。また、図に示すとおり、ディスク回転軸と糸のなす角 $\theta$ を糸傾角として定義する。このとき、 $\theta$ と $\omega$ とは次の関係になる。

$$\theta = \omega - 3\pi/2 \quad (1)$$

このような状態の場合、接触点sにおける糸の速度ベクトル $\vec{V}_Y$ は次式で表される。

$$\vec{V}_Y = V_Y \xi_1 + 2\pi r_y W \eta \quad (2)$$

ここで、

$V_Y$ : 接触点sにおける糸の接線方向の速度(m/min)

$\xi_1$ : 接触点sにおける糸の接線方向単位ベクトル

$r_y$ : 接触点sにおける糸の半径(m)

$W$ : 接触点sにおける糸の回転数(rpm)

$\eta$ : 接触点sにおけるディスクへの接平面上で $\xi_1$ に直交する単位ベクトル

一方、ディスクは図1に示すように、糸と $\pi/2 - \theta$

の角度をもって動いているから、接触点sでのディスクの速度ベクトル $\vec{V}_d$ は次のように表される。

$$\vec{V}_d = V_d \sin\theta \cdot \xi_1 + V_d \cos\theta \cdot \eta \quad (3)$$

式(2)、(3)から接触点sにおけるディスクと糸の相対速度ベクトル $\vec{V}_s$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \vec{V}_s &= \vec{V}_d - \vec{V}_Y \\ &= (V_d \sin\theta - V_Y) \xi_1 + (V_d \cos\theta - 2\pi r_y W) \eta \end{aligned} \quad (4)$$

注目すべき点はこの式が、相対(滑り)速度の大きさのみならず、滑りの方向を示していることである。良く知られているように2物体間に働く摩擦力は互いの滑り速度と逆の方向に働くので、摩擦力をベクトル的に表すために式(4)を用いる。また、注意すべき点として、接触点sでの糸速は解熱後の糸速そのものではなく、撚り縮み率 $\epsilon$ を考慮した次の値をとることである。すなわち、糸速 $V_y$ は次式となる。

$$V_y = V_2(1 - \epsilon) \quad (5)$$

## 3. 相対速度ゼロの場合

ディスクが糸に与える摩擦力を考察する前に、ここで糸とディスクの相対(滑り)速度がゼロになる条件を式(4)を用いて求め、その物理的な意味を考察しておく。式(4)によれば $\vec{V}_s$ ゼロになるのは、次の式(6)、(7)が同時に成立するときである。

$$V_d = V_Y / \sin\theta \quad (6)$$

$$V_d = 2\pi r_y W / \cos\theta \quad (7)$$

ここで、撚りの入った糸を半径 $r_y$ の円筒状の棒と仮定し、図2に示すように撚り角 $a$ (図中では $a$ )を定義

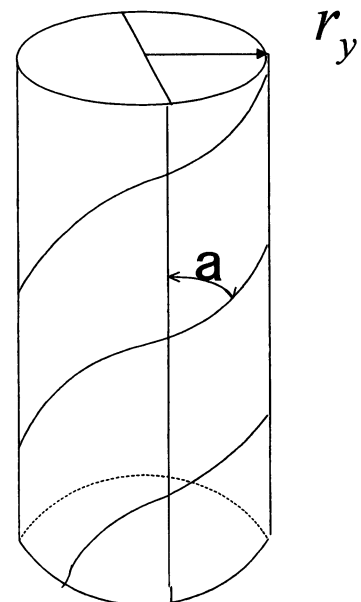


Fig. 2 The definition of twist angle a.

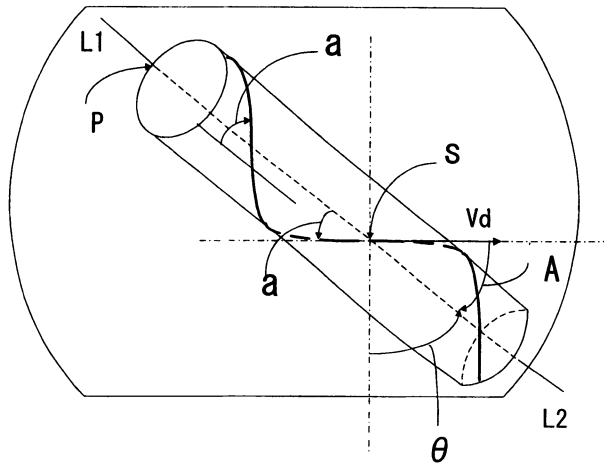


Fig. 3 Schematic diagram of filament orientation under the condition that A is equal to a.

すると、次式が成立する。

$$\tan a = 2\pi r_y W / V_y \quad (8)$$

一方、式(6)、(7)から、式(8)の右辺は次の通り、となる。

$$\frac{2\pi r_y W}{V_y} \cdot \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = 1 \quad (9)$$

ここでθの余角(すなわちπ/2-θ)をAとすれば、三角関数の定義からtanA=1/tanθとなるので、tan a=tanAからa=A(10)を得る。

このことを、Morrisは文献のなかで“接触点における実質的な滑りをゼロにするためにA=aとする。”と述べている[2]。しかしながら、上記の解析から明らかなように実質的な滑りをゼロにするためには、A=aとするだけでは不十分で、もうひとつの条件である、Vdが式(6)を満たすことが必要である。すなわち、A=aとすることは、滑りをゼロにするための必要条件であるが、十分条件ではない。

A=aであることの物理的意味は図3に示すように、撚り糸の表面に表れる単糸が糸軸線となす角がaであることから、回転円板と糸の接触点sにおいて、円板の進行方向が表面単糸の軸線と一致していることである。この事実を指摘している文献は、これまでないように思われる。

#### 4. 実際の加工条件における相対(滑り)速度

筆者らの経験では、実際の糸加工条件においてはA=aがほぼ満たされる条件で加工されているが、Vdの値は式(6)を満たしていない。これは、安定した摩擦力を発生させるためには、“滑りゼロ”ではなく、むしろ適度な滑りを接触点で持たせることが必要であることを示唆していると思われる。

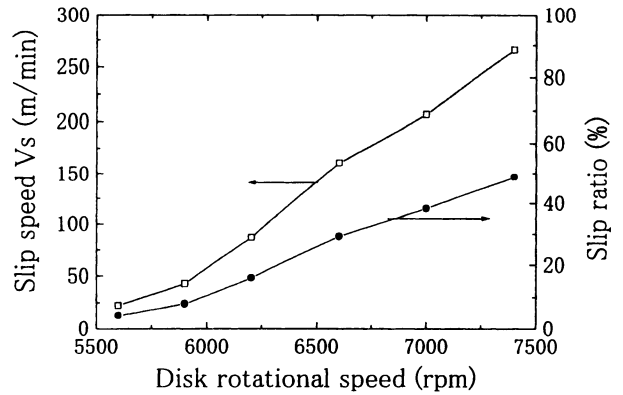


Fig. 4 Slip speed Vs & Slip ratio versus Disk rotational speed

Re : Texturing conditions

Raw material PET-POY 135d-36f

Textured yarn PET 75d-36f

Texturing speed 700m/min

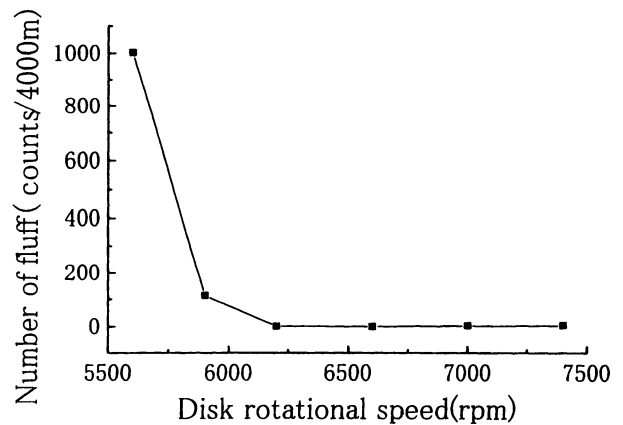


Fig. 5 Number of fluffs in textured yarn versus Disk rotational speed

Re : Under the same texturing conditions as mentioned in Fig. 4

一例として図4に、ポリエステル75d-36fの加工糸を700m/minで加工した際の、ディスク回転数と滑り速度の関係を示す。また、このとき得られた加工糸の毛羽の数を図5に示す。この結果からも最適加工条件はディスク回転数6200-7000rpmのところであり、滑り速度を糸速Vyで割った滑り率は20-40%になることがわかる。なお、糸速、ディスク回転数以外の加工条件は次の通りであった。

原糸：ポリエステル135d-36f 半延伸糸、

標準延伸倍率：1.80

熱板長さ：3m, 熱板温度：220℃

ディスク材質：ポリウレタンゴム、

ディスク枚数：10枚、

ディスク上糸傾斜角θ：36°、

計算撚り角度：52.4~53.9°

## 5. ディスクが糸に与える摩擦力

ディスクが接触点  $s$  において、糸に与える摩擦力  $\vec{F}$  を、次式で表す。

$$\vec{F} = \mu F e_s \quad (11)$$

ここで、 $\mu$ ：ディスク・糸間の滑り摩擦係数、 $F$ ：接触点において糸がディスクからその法線方向に受ける抵抗力、 $e_s$ ：滑り速度  $\vec{V}_s$  と同方向を向く単位ベクトル、すなわち

$$e_s = \frac{\vec{V}_s}{|\vec{V}_s|} \quad (12)$$

一方、ディスク周面に沿って走る糸にかかる力の釣り合いから、糸張力  $T$  について次の関係式が成り立つ[1]。

$$\frac{dT}{ds} \xi_1 + T(k_n e + k_g \eta) + Fe + \mu F \cdot e_s = 0 \quad (13)$$

ここで、 $e$  は接触点におけるディスク表面の法線方向単位ベクトルである。また、 $\xi_1$ 、 $\eta$  は図1に示す通りの方向を持つ単位ベクトル、 $k_n$  は糸が曲面上で描く曲線の法曲率、 $k_g$  は糸が曲面上で描く曲線の測地的曲率である。

式(4)を式(12)、(13)に代入して、記号を簡単にするため  $|\vec{V}_s| = \nu_s$  と表すと、次式を得る。

$$\frac{dT}{ds} \xi_1 + T(k_n e + k_g \eta) + Fe + \mu F \left( \frac{V_d \sin \theta - V_y}{\nu_s} \xi_1 + \frac{V_d \cos \theta - 2\pi r_y W}{\nu_s} \eta \right) = 0 \quad (14)$$

互いに直交する各ベクトル成分ごとに整理して、以下の式を得る。

$$(e \text{ 方向}) T k_n + F = 0 \quad (15)$$

$$(\xi_1 \text{ 方向}) \frac{dT}{ds} + \mu F \left( \frac{V_d \sin \theta}{\nu_s} - \frac{V_y}{\nu_s} \right) = 0 \quad (16)$$

$$(\eta \text{ 方向}) T k_g + \mu F \left( \frac{V_d \cos \theta}{\nu_s} - \frac{2\pi r_y W}{\nu_s} \right) = 0 \quad (17)$$

ここで次の物理量はディスク上で変化する変数とみなす。

$\theta$ ：糸傾角  $T$ ：糸張力  $F$ ：曲面が糸に及ぼす法線抵抗力

$\nu_s$ ：接触点での滑り速度の絶対値

$k_g$ ：糸の曲面上の測地的曲率

$k_n$ ：糸の曲面上の法曲率

他方、次の量はディスク上で変化しない定数と仮定する。

$V_d$ ：ディスク周速  $V_y$ ：糸の接線方向速度

$W$ ：糸の回転速度

$\mu$ ：摩擦係数  $r_y$ ：糸の半径

式(15)から、ディスクに接触している点での糸張力

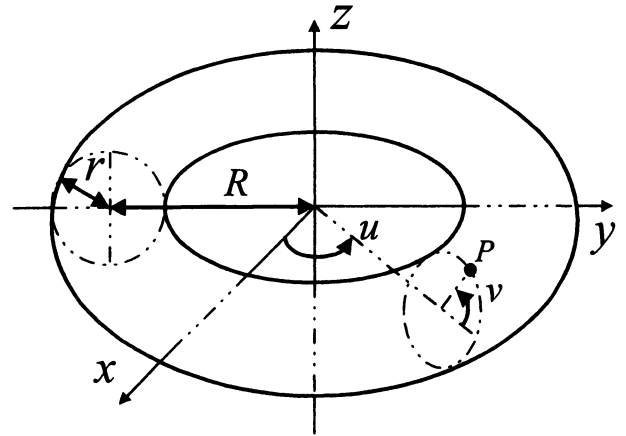


Fig. 6 The geometry of a torus whose outer surface represents a friction disk

$T$  とその点での糸の法曲率  $k_n$  が求めれば、法線方向効力  $F$ 、従って摩擦力  $\vec{F}$  が以下のようにベクトルの求められる。

$$\vec{F} = \mu F e_s = -\mu T k_n \cdot e_s = -\mu T k_n \left( \frac{V_d \sin \theta - V_y}{\nu_s} \xi_1 + \frac{V_d \cos \theta - 2\pi r_y W}{\nu_s} \eta \right) \quad (18)$$

これを糸軸 ( $\xi_1$ ) 方向と糸軸に直角 ( $\eta$ ) 方向に内積をとって分けると次のようになる。

$$\vec{F} \cdot \xi_1 = -\mu T k_n (V_d \sin \theta - V_y) / \nu_s \quad (19)$$

$$\vec{F} \cdot \eta = -\mu T k_n (V_d \cos \theta - 2\pi r_y W) / \nu_s \quad (20)$$

ここで、ディスク表面の幾何学的形状を既報[1]と同様に図6に示す輪環面で表す。このとき、法線方向ベクトル  $e$  を輪環面の内から外に向くように定義すると、法曲率  $k_n$  は次式で表される。

$$k_n = -\frac{\cos \nu}{R + r \cos \nu} \sin^2 \theta - \frac{1}{r} \cos^2 \theta \quad (21)$$

ここで、図6からもわかるとおり、 $\cos \nu$  は輪環面の外周面では常にプラスとなる。したがって、 $k_n$  は常にマイナスの値となることがわかる。このことから、摩擦力の糸軸方向の成分は、 $(V_d \sin \theta - V_y)$  がプラスであればプラスになり、糸を送る力になる。また、摩擦力の糸軸に直角方向成分は  $(V_d \cos \theta - 2\pi r_y W)$  がプラスであれば糸を回転させる力になり、この項がマイナスであれば、糸の回転を止めようとする力になる。

## 6. ディスク上の糸傾角と糸張力の変化

式(15)から  $F = -T k_n$  であるから、これを式(17)に代入して、式(22)を得る。

$$k_g - \mu k_n \left( \frac{V_d \cos \theta}{\nu_s} - \frac{2\pi r_y W}{\nu_s} \right) = 0 \quad (22)$$

ここで、糸の法曲率  $k_n$  は上の式(21)で表され、糸の測地的曲率  $k_g$  は次の式(23)で求められる[1]。

$$kg = \frac{d\theta}{ds} + \frac{\sin\nu}{R+r\cos\nu} \sin\theta \quad (23)$$

また、輪環面の幾何学から次の関係式が成り立つ。

$$\frac{du}{ds} = \frac{\sin\theta}{R+r\cos\nu} \quad (24)$$

$$\frac{d\nu}{ds} = -\frac{\cos\theta}{r} \quad (25)$$

したがって、

$$\frac{du}{d\nu} = \frac{\sin\theta}{R+r\cos\nu} \times \frac{-r}{\cos\theta} = \frac{-\tan\theta}{\rho+\cos\nu} \quad (\text{ただし、}\rho=R/r) \quad (26)$$

これらの式を式 (22) に代入して、糸傾角  $\theta$  を表す次の微分方程式を得る。

$$\frac{d\theta}{ds} = -\mu \left[ \frac{\cos\nu}{R+r\cos\nu} \sin^2\theta + \frac{1}{r} \cos^2\theta \right] \left[ \frac{V_d \cos\theta}{\nu_s} - \frac{2\pi r_y W}{\nu_s} \right] - \frac{\sin\nu}{R+r\cos\nu} \sin\theta \quad (27)$$

また、輪環面の子午線方向の角度  $\nu$  を独立変数とした場合は次式となる。

$$\frac{d\theta}{d\nu} = \mu \left[ \frac{\cos\nu}{\rho+\cos\nu} \sin^2\theta + \cos^2\theta \right] \left[ \frac{V_d}{\nu_s} - \frac{2\pi r_y W}{\nu_s \cos\theta} \right] + \frac{\sin\nu}{\rho+\cos\nu} \tan\theta \quad (28)$$

ここで、ディスクと糸の滑り速度の絶対値は  $\nu_s$  次式 (29) で与えられる。

$$\nu_s = \{(V_d \sin\theta - V_y)^2 + (V_d \cos\theta - 2\pi r_y W)^2\}^{1/2} \quad (29)$$

次に、張力  $T$  に関する微分方程式を求める。上記式 (15), (16), (21) より次式を得る。

$$\frac{dT}{ds} = \mu T k_n \left[ \frac{V_d \sin\theta}{\nu_s} - \frac{V_y}{\nu_s} \right] = -\mu T \left[ \frac{\cos\nu}{R+r\cos\nu} \sin^2\theta + \frac{1}{r} \cos^2\theta \right] \left[ \frac{V_d \sin\theta}{\nu_s} - \frac{V_y}{\nu_s} \right] \quad (30)$$

式 (30) を式 (25) を用いて変換し、子午線方向の角度  $\nu$  の変化に応じた張力  $T$  の変化を表す次式を得る。

$$\frac{dT}{d\nu} = \frac{\mu T}{\cos\theta} \left[ \frac{\cos\nu}{\rho+\cos\nu} \sin^2\theta + \cos^2\theta \right] \left[ \frac{V_d \sin\theta}{\nu_s} - \frac{V_y}{\nu_s} \right] \quad (31)$$

ここで、上記式 (28), (31) において、 $\theta = \omega - 3\pi/2$ ,  $W = 0$  と置き、

Case 1 :  $V_y = 0$  (糸の走行なしの場合), Case 2 :  $\frac{V_d}{V_y} = \alpha$  (ディスク対糸の周速比が  $\alpha$  の場合) と置けば、既報[1]の対応する式と一致する。

式 (31) の観察でもうひとつわかることは、右側括弧内に糸の滑り速度ベクトルの糸軸 ( $\xi_1$ ) 方向成分が入っていることである。他の成分  $\nu_s$  (滑り速度の絶対値) は必ず正であり、 $\cos\nu$ ,  $\cos\theta$ ,  $\sin^2\theta$ ,  $\cos^2\theta$  も正であるから、右側括弧内、すなわち、 $V_d \sin\theta - V_y$  が正のときには、 $T$  は  $\nu$  の減少 ( $\nu$  は入口から出口に向けて減少し出口では

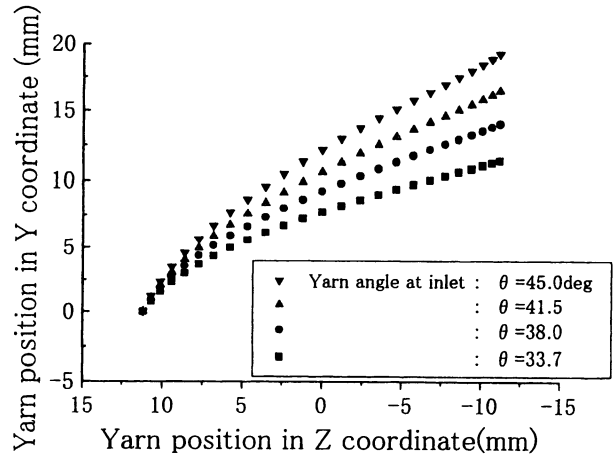


Fig. 7 Yarn path on a disk surface (In case the yarn is rotating)

負となる。)に伴い張力  $T$  は減少する。これは、前節の最後の部分での摩擦力の糸軸方向成分に関する考察とも一致するものである。

## 7. 糸経路と糸張力のシミュレーション結果

前節で導いた式 (26), (28) の連立微分方程式は非線形であり解析解を得るのは難しい。そこで設計変数、運転定数、そして、糸のディスク入口での初期条件、 $\nu_0$ ,  $\mu_0$ ,  $\theta_0$  を与えて、数値積分によりディスク上の糸経路を求める。

図7に下記条件での糸経路の計算結果を示す。

運転および初期条件：

$$V_d = 33.9 (m/min), V_y = 15.17 (m/min),$$

$$W = 37,092 (rpm), \mu = 0.15, r_y = 0.000075 (m),$$

$$\nu_0 = 1.2 (rad), \mu_0 = 0 (rad)$$

以上を共通条件として、入口糸傾角  $\theta_0$  に次の4条件を与える。すなわち

$$\theta_0 = 0.5876 (rad) \text{ or } 33.7 (deg),$$

$$0.6632 (rad) \text{ or } 38.0 (deg),$$

$$0.7243 (rad) \text{ or } 41.5 (deg),$$

$$0.7854 (rad) \text{ or } 45.0 (deg)$$

一方、糸の回転がなくディスク上を斜めに走行する場合、既報[1]で導いた式を用いて求めた糸経路を図8に示す。計算条件は上の運転条件で  $W = 0$  とし、他はすべて同じとしている。両者を比較すると、入口糸傾角が  $33.7 \sim 45.0$  deg とかなり広範囲な条件下でも、糸経路はほとんど変わらないことがわかる。

同様に式 (28), (31) に初期条件、 $\nu_0$ ,  $\mu_0$ ,  $\theta_0$  およびディスク入口張力  $T_1$  を与えれば、ディスク上の張力変化を求めることができる。図9はこうして求めた糸張力の計算結果である。ここで入口糸張力は  $580$  mN とした。

また図10には、 $W = 0$  とした場合の計算結果を示す。

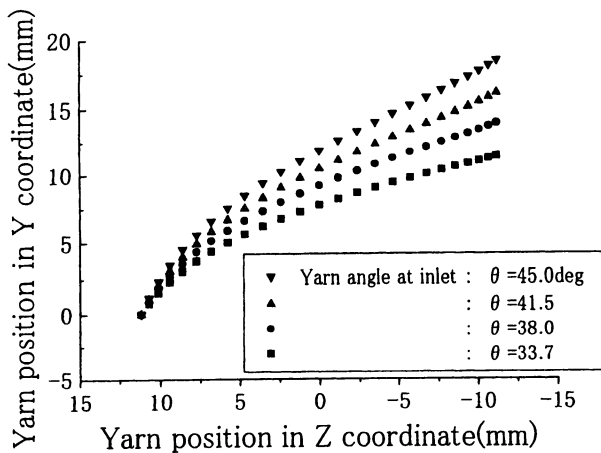


Fig. 8 Yarn path on a disk surface  
(Without yarn rotation)

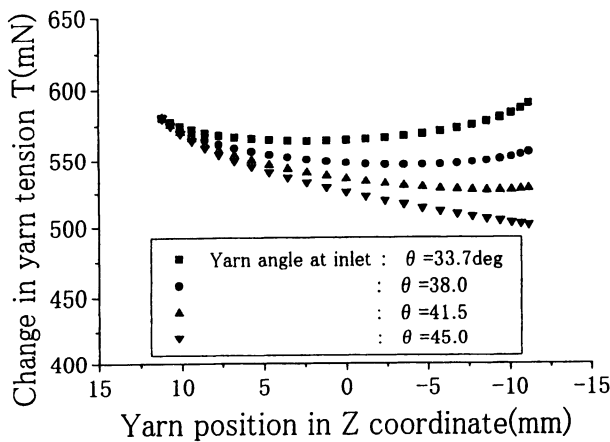


Fig. 9 Change in yarn tension over the disk  
(In case the yarn is rotating)

両者を比較すると、出口張力で約10%の差異が生じている。前記条件は既報 [1] との比較のため設定した条件であるが、糸速  $V_y$ 、ディスク周速  $V_d$ 、糸回転数  $W$  がいずれも実際の加工条件より低い値になっている。そこで、これらの条件を種々変更してシミュレーションを行うこ

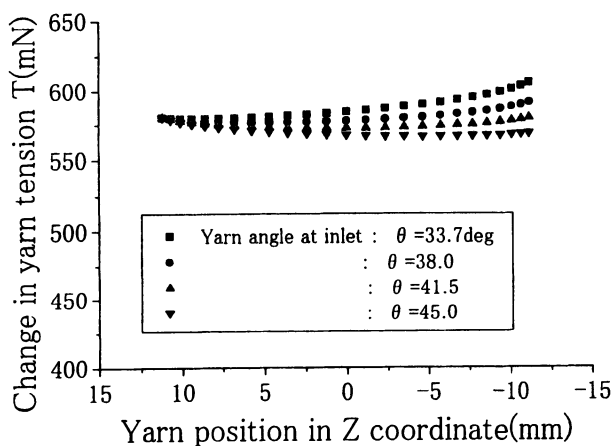


Fig. 10 Tension change over the disk  
(Without yarn rotation)

とも可能であるが、シミュレーションの事例数を減らすためにも本章で導いた微分方程式を無次元化する。

## 8. 方程式の無次元化

式(26) はディスク形状に関する無次元量  $\rho = R/r$  を用いてすでに無次元化されている。次に式(28)を見ると、左辺は無次元量であるから右辺も無次元量である。しかし  $v_s$  は式(29)で表され、変数を含むので  $v_s$  (滑り速度) で速度量を無次元化するのは適当ではない。そこで次式で定義する無次元量、 $\alpha$ 、 $\beta$  を用いる。

$$\alpha = V_d/V_y \quad (32)$$

$$\beta = 2\pi r_y W/V_y \quad (33)$$

$\alpha$  は工業的にDY比と呼ばれている。ただし、 $V_y$  は加撚状態の糸の線速度を表し、解撚後の糸速  $V_2$  とは撚り縮み率を介して式(5)で表されることは前に述べた通りである。

ここで、撚り縮率  $\epsilon$  につき補足すると、仮撚強撚糸の場合は織度、張力、撚り数によって決まる。筆者らの測定結果では、PET150d-48f、張力50cN、撚り数2350T/mで  $\epsilon$  は0.25~0.26となり、PET75d-36f、張力30cN、撚り数3360T/mで0.27~0.28となった。

ところで、 $\alpha$  の物理的意味はディスク周速と糸速の比であり、 $\beta$  は式(8)の右辺と同じ量であるから、図2で定義する撚り角  $a$  の  $\tan$  である。これは加撚長基準の単位長さ当たりの撚り数  $W/V_y$  と、そのときの糸半径  $r_y$  で決まる。別の表現をすれば、 $\beta$  は糸の回転周速と軸方向線速度の比を表している。

また、ディスク上の長さに関する無次元化は、環半径  $r$  で除すことで可能である。すなわち、

$$z/r = r \sin \nu / r = \sin \nu \quad (34)$$

$$y/r = (R + r \cos \nu) \sin \nu / r = (\rho + \cos \nu) \sin \nu \quad (35)$$

$$x/r = (R + r \cos \nu) \cos \nu / r = (\rho + \cos \nu) \cos \nu \quad (36)$$

また、糸張力  $T$  に関しては、式(31)の観察から、両辺を入口張力  $T_1$  で除してやれば無次元化できる。これらの無次元量 (Non-dimensional Parameter) を用いて、式(28)、(31)を変換した結果を以下に示す。

$$\frac{d\theta}{d\nu} = u \left[ \frac{\cos \nu}{\rho + \cos \nu} \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \right] \left[ \frac{1}{\{(\alpha \sin \theta - 1)^2 + (\alpha \cos \theta - \beta)^2\}^{1/2}} \right] \left[ \alpha - \frac{\beta}{\cos \theta} \right] + \frac{\sin \nu}{\rho + \cos \nu} \tan \theta \quad (37)$$

$$\frac{d(T/T_1)}{d\nu} = \frac{\mu(T/T_1)}{\cos \theta} \left[ \frac{\cos \nu}{\rho + \cos \nu} \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \right] \left[ \frac{\alpha \sin \theta - 1}{\{(\alpha \sin \theta - 1)^2 + (\alpha \cos \theta - \beta)^2\}^{1/2}} \right] \quad (38)$$

これらの式を使って数値積分した結果をグラフに示す。図11に無次元化された糸経路、図12には糸傾角 $\theta$ のシミュレーション結果を示す。このときの無次元化変数 $\rho, \alpha, \beta$ は図中に記入した通りである。なお、図中に $\alpha_2$ として記入した量は参考として、解燃後の糸速 $V_2$ でディスク周速 $V_d$ 除したものである。また、このときの摩擦係数 $\mu$ は0.15としている。これらのシミュレーション結果は、設計条件であるディスク外径、厚み、端部 $r$ が異なるものにも広く当てはまるものである。また、糸速度、ディスク周速、糸の撚り角度等の運転条件が大きく異なる場合の予測にも使えるものである。今後、これらの条件を変えたシミュレーションを行うとともに、本報で行った解析がどの程度現象を正確に表しているか、実験により検証していきたい。

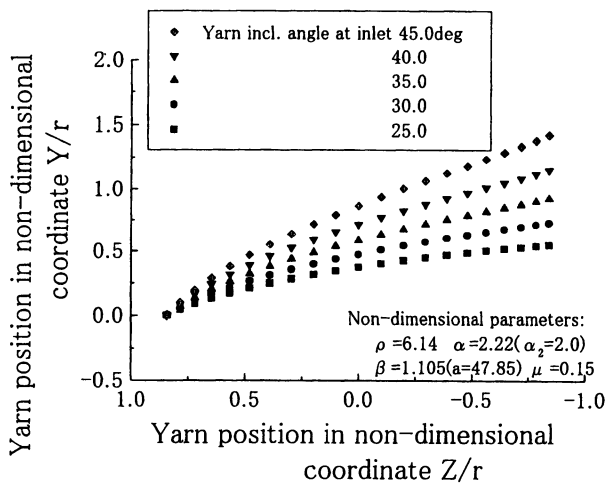


Fig. 11 Non-dimensionalized yarn path on a disk surface

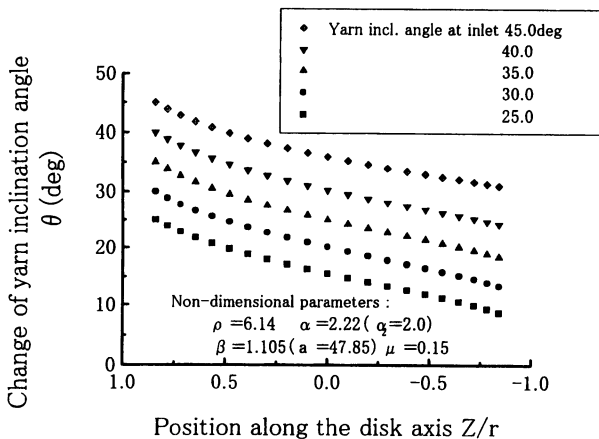


Fig. 12 Change of yarn inclination angle along the disk axis

## 9. 結 言

ディスク型フリクション仮燃において、ディスク周面に接触しつつ走行する糸について、糸の撚り縮みと糸回転を考慮した場合の速度ベクトルを求め、これとディスク周面の速度ベクトルの差から、糸とディスクの接点における相対（滑り）速度ベクトルを求めた。その結果を用いて相対速度ゼロとなる条件を数学的に求め、既出文献の不備を指摘するとともに、物理的に正しい意味を説明した。また、実際の加工条件下では滑り速度は糸速の20~40%になることも示した。

次に、ディスク周面に糸傾角 $\theta$ で接触しつつ回転、走行する糸に加わる摩擦力ベクトルを求めた。摩擦力を糸軸方向成分とこれに直角方向成分に分けて考察し、これまで経験的にいわれてきた“ $\theta$ が大きくなれば糸送り力が増し、出口張力が下がり、撚り数が減る”ことを数学的に説明した。摩擦力の大きさは摩擦係数 $\mu$ 、糸張力 $T$ そして糸が接するディスク周面の法曲率 $K_n$ に比例することも示した。さらに、ディスク周面を輪環面と仮定した場合のディスク上の糸経路と糸張力を求める微分方程式を導いた。これらは非線形で解析解を求めることができないので、数値積分によりいくつかの代表的な条件下でシミュレーションを行った。その結果、他の条件が同じであれば、糸回転有無による糸経路（糸傾角）の違いはほとんどないことがわかった。一方、出口側糸張力は糸回転有無で約10%の差異が生じることがわかった。また、微分方程式を無次元化するためのパラメータを提案し、代表例についてシミュレーションを行った結果をグラフで示した。これらの結果、ディスク形状、運転条件の広い範囲で滑り速度、糸経路、糸張力の予測が可能となった。これらの予測がどの程度の範囲まで正確に現象と一致するか、今後ディスク上の糸経路と1枚ごとの入口、出口張力を測定することにより、明らかにしていきたい。

本研究を進めるに当たり、実験データおよび数値計算に関する貴重な情報を提供してくれた多田正市君、玉村亮君に感謝します。

## References

- [1] Shintaku, S., Endo, T., Kinani, T., Tamamura, R.; J. Text. Mach. Soc. Japan, 52, T217 (1999)
- [2] Morris, W. J., Macknight, D. R. (Ernest Scragg & Sons Ltd.); JP. Pat. 56-52141 (1981)