

Analyzing the Path and the Tension of a Yarn under a False-twist Process Using a Doubly Stacked Multi-disk Spindle

KANEDA Naoto, SHINTAKU Sukenori*, KINARI Toshiyasu, SHIMOKAWA Tomotsugu

Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University,
Kakuma-machi, Kanazawa 920-1192, Japan

Received 5 April 2007; accepted for publication 13 September 2007

Abstract

The path followed by and the tension generated along a yarn under a false-twist process using an enlarged model unit of a doubly stacked multi-disk spindle are measured and analyzed on the basis of a theory, an extension of authors' earlier proposition. The geometrical quantities necessary to reproduce the yarn path, *i.e.* the inclination angle made by the yarn against a disk surface, the length along which the yarn runs on the disk, etc., are estimated from the CCD image of the yarn configuration. The twisting tension, the inter-disk yarn tension, and the untwisting tension of the running yarn are also detected. It is revealed that the theoretical analysis can successfully elucidate and predict the inter-disk yarn tension as well as the relation between the twisting tension and the untwisting tension only if the yarn configuration is observed. This study will give a novel and useful clue to the manufacturing technology related to false-twist processing using multi-disk spindles.

Key Words: Textured yarn, Doubly stacked multi-disk spindle, Friction twisting, Yarn tension, Yarn path

2軸型ディスクフリクション仮撚における糸の経路と張力の解析

金田直人, 新宅救徳*, 喜成年泰, 下川智嗣

金沢大学大学院自然科学研究科

1. 緒 論

仮撚加工法において回転体の表面の摩擦力を利用し直接糸に撚りを与える摩擦仮撚法は、高速生産の安定性が高い、解撚張力が低く毛羽が発生しにくいといった理由から3軸型ディスクフリクションが主流として知られており、Thwaites[1, 2]やDuら[3, 4]をはじめとして多くの研究者がその糸経路や付加張力について報告している。多くの研究者が糸経路や付加張力に興味を持つ理由は、仮撚加工糸の品質(風合い)を最も大きく左右する要因の1つとして解撚張力(すなわちユニット内での付加張力)があげられ、その付加張力に大きな影響を及ぼす要因がユニット内での糸経路であるためである。著者らの研究グループも3軸型ディスクフリクション仮撚について、微分幾何学とベクトル解析を用いてディスク上の糸傾角を解析し、糸経路や付加張力について詳細に検討してきた

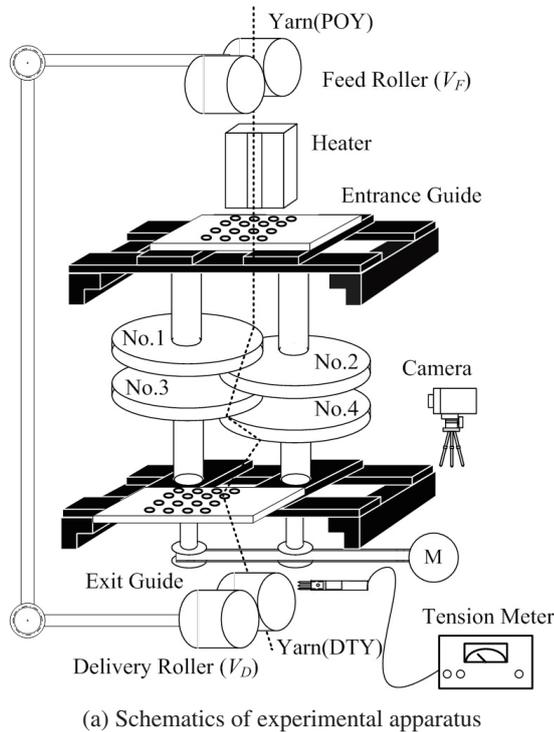
[5-10]。それらの成果として、ディスクフリクションユニットの寸法と運転条件から解撚張力を従来よりも高精度で計算することが可能となり、仮撚機の設計に有益な資料が提供できたと考えている。

一方近年、2軸型のディスクフリクション仮撚機も使用されるようになってきた。その利点としては、3軸型よりも解撚張力が高いためピンタイプの仮撚機に近い風合いの良い加工糸ができること、設計上単純でコストが低いことなどがあげられている。しかしながら、2軸型の実機データはほとんど公表されていない。そこで本研究では、2軸型ディスクフリクション仮撚機の設計資料を得るため、モデル機を用いて仮撚ユニット内の糸の張力と経路を測定する。加えて、その測定結果を先に提案した張力および経路の理論的解析手法[5, 6]による計算結果と比較し、提案した解析手法の摘要の妥当性を検討する。

* 連絡先：金沢大学自然科学研究科機能機械科学専攻 920-1192 金沢市角間町
E-mail: sintaku@t.kanazawa-u.ac.jp, Tel: +81-76-234-4693, Fax: +81-76-234-4695

2. 仮撚ディスクユニット内の糸の張力と経路の測定

2軸型ディスクフリクション仮撚のモデル機を作製し、加工中のディスクフリクションユニット内（各ディスクの間）における糸の経路および糸張力を測定した。



本研究に用いた2軸型ディスクフリクション仮撚（4枚ディスク）のモデル機の概略をFig. 1(a)に示す。本モデル機では、まず原糸（ポリエステルマルチフィラメント 140 dtex 36F / POY糸）がフィードローラーによって取り込まれ、一定の延伸を受けつつ、加熱された状態でヒーターを通過することで熱固定される。そしてディスク上の特定の糸経路を通過した後解撚され、羊毛のような風合いを持つ加工糸（83 dtexのDTY糸）を作り上げる機構となっている。Fig. 1(b)に実験に用いたディスク1枚の概略図を示す。ディスクは輪環面（後述のFig. 7(b)参照）の「内側の空洞」を無くした形状をしており、実機では直径 $D = 50$ mm程度のディスクを用いることが多いが、本モデル装置においては $D = 200$ mm、厚さ24 mm

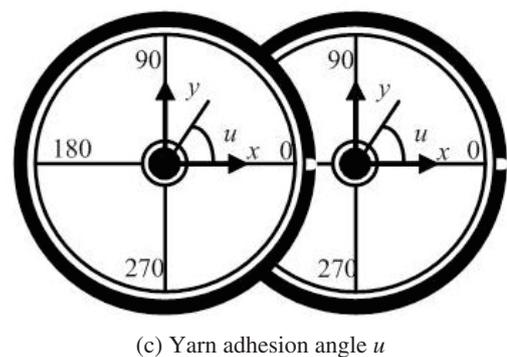
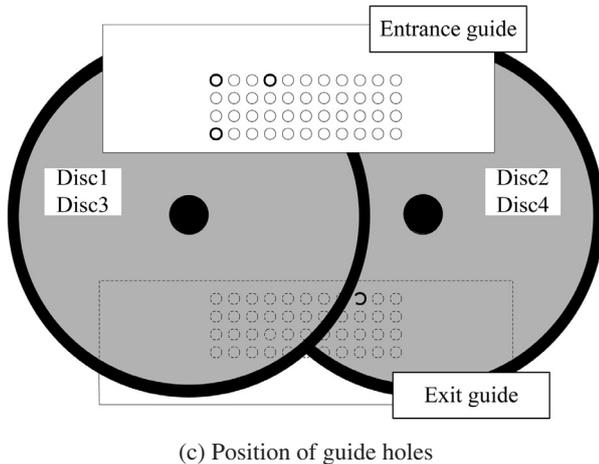
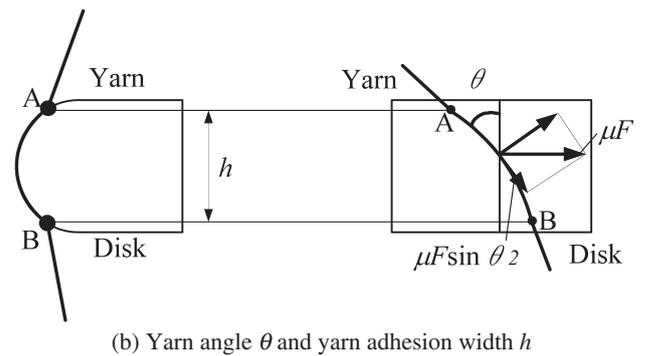
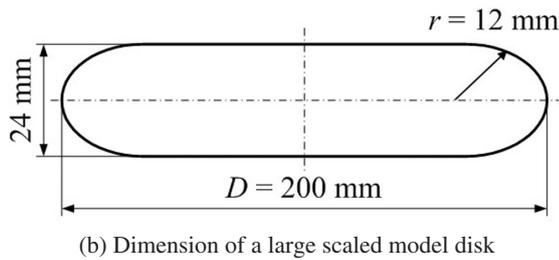
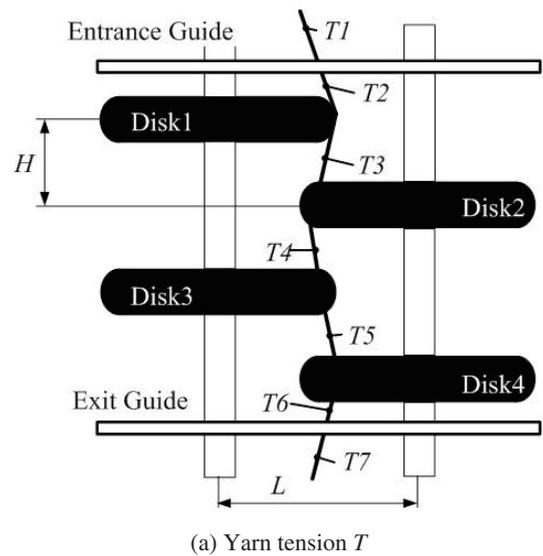


Fig. 1 Outline of a model machine.

Fig. 2 Measurement parameters in an experiment.

で、糸と接触する面にクロムコーティングを施したディスクを用いた。ディスク径を大きくし、ディスク間の距離を広げたため、糸経路を観察しやすく、ディスクとディスクの間の糸張力を測定できるようになっている。ディスクと実験に用いた糸の摩擦係数は過去の実験結果[5]より $\mu = 0.15$ とした。また、ディスク部分の入口と出口にそれぞれFig. 1(c)に示す入口ガイドおよび出口ガイドを設けて糸付け点を固定した。それぞれのガイドには列方向、行方向ともに10 mm間隔で、直径6 mmのガイド孔を4行11列に空け、Fig. 1(c)左上隅のガイド孔を(1-1)、右上隅のガイド孔を(1-11)、同じく左下隅のガイド孔を(4-1)、右下隅のガイド孔を(4-11)と行列表示で呼ぶことにする。入口ガイドは(1-6)孔が、出口ガイドは(4-6)孔がそれぞれディスク1, 3と2, 4の交点上になるように設置した。

摩擦仮燃法において加工糸を生産する上で製品である仮燃加工糸の品質（風合い）を決定づける重要な条件の一つに、加燃張力および解燃張力がある。そこで本実験では糸の延伸比（糸の巻取り速度／糸の供給速度： V_D/V_F ）を一定に保ち、加燃張力 $T1$ 、ディスク間張力 $T2 - T6$ 、解燃張力 $T7$ を張力計（英光産業製 CM250-RまたはCM100-PS）を用いて測定した（Fig. 2(a)）。また糸の経路を把握するため、糸がディスクに対

して接触する糸傾角 θ （Fig. 2(b)）、糸がディスクに接着している量を示す糸接着幅 h （Fig. 2(b)）、糸がディスクのどの部分（円周360°）に接着しているかを示す糸接着角度 u （Fig. 2(c)）も同時に、CCDカメラを用いて撮影し、画像処理を施すことによって測定した。実験条件をTable 1に示す。

3. 実験結果と考察

Fig. 3にディスク間距離 $H = 50$ mm、軸間距離 $L = 130$ mm、入口ガイド孔(1-1)の場合の張力および糸経路におよぼす周速度比、すなわち糸の送り速度 Y （この実験では糸の巻取り速度 V_D と同じ）に対するディスク最外径の回転速度 D の比 D/Y の影響の実験結果を示す。同図において縦軸はそれぞれ(a)糸張力 T 、(b)糸傾角 θ 、(c)糸接着幅 h を、横軸は D/Y をとっている。同図(d)では横軸にディスク番号をとって、各 D/Y に対する糸接着角度 u の変化を示している。Fig. 3(a)より、 D/Y の増加に伴い加燃張力 $T1$ およびディスク間張力 $T2 - T6$ は増加傾向にあるが解燃張力 $T7$ には減少傾向がみられた。またFig. 3(b)より、 D/Y の増加に伴いディスク1とディスク2の θ は減少傾向にあるが、ディスク3とディスク4の θ は増加傾向にあることがわかった。Fig. 3(c)、Fig. 3(d)において、 h および u は D/Y が増加しても値の変化は小さくほぼ一定の値を示し、どのディスクにおいても周速度比は糸接着幅および糸接着角度に影響を与えないことが明らかとなった。

Fig. 4にディスク間距離 $H = 90$ mm、軸間距離 $L = 130$ mm、入口ガイド孔(1-1)の場合の張力および糸経路におよぼす周速度比の影響の実験結果を示す。縦軸、横軸および図中の記号はFig. 3の場合と同様である。Fig. 4(a)より、 D/Y によらず $T1 - T4$ はほぼ一定の値を示しているが、 D/Y の増加に伴い $T5$ 、 $T6$ および $T7$ は減少傾向にあることがわかる。また、Fig. 4(b)より、 D/Y の増加に伴いディスク2の糸傾角 $\theta2$ は減少傾向、ディスク3の糸傾角 $\theta3$ は増加傾向にあることがわかる。一方ディスク1の糸傾角 $\theta1$ およびディスク4の糸傾角 $\theta4$ には値の変化はみられなかった。ここで、Figs. 3(a)、(b)とFigs.4(a)、(b)を比較すると、それぞれ全く異なる値を示している。これはディスク間距離 H が変更されることによって糸傾角 θ が変化し、すなわち糸送り効果（Fig. 2(b)に示した $\mu F \sin\theta2$ ）が変

Table 1 Experimental conditions.

Yarn : Polyester multi-filament yarn (before draw 126D36F, after draw 75D36F)	
Disk Dimensions (mm)	$R=90, r=12$ (thickness 24)
Frictional Coefficient μ	0.15
Draw Ratio (V_D/V_F)	1.68
Heater Temperature (K)	463
Yarn Feed Speed Y (m/min)	15
Entrance Guide (line)	1-1, 1-4, 4-1
Exit Guide (line)	1-9
Distance between Disks H (mm)	50, 90
Distance between Spindles L (mm)	130, 140, 150
Speed Ratio α (D/Y)	1.5, 2.1, 2.7, 3.8, 4.7, 5.1

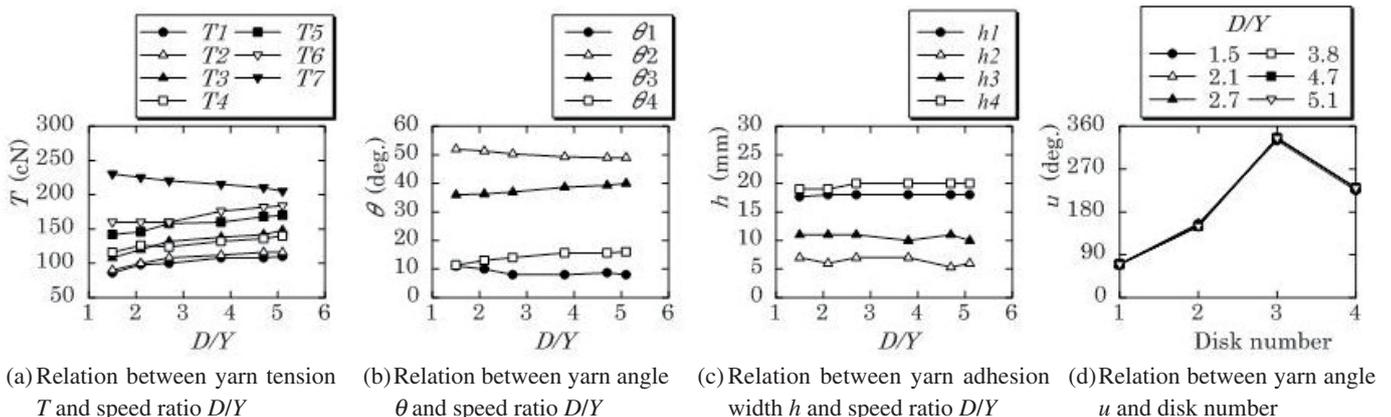
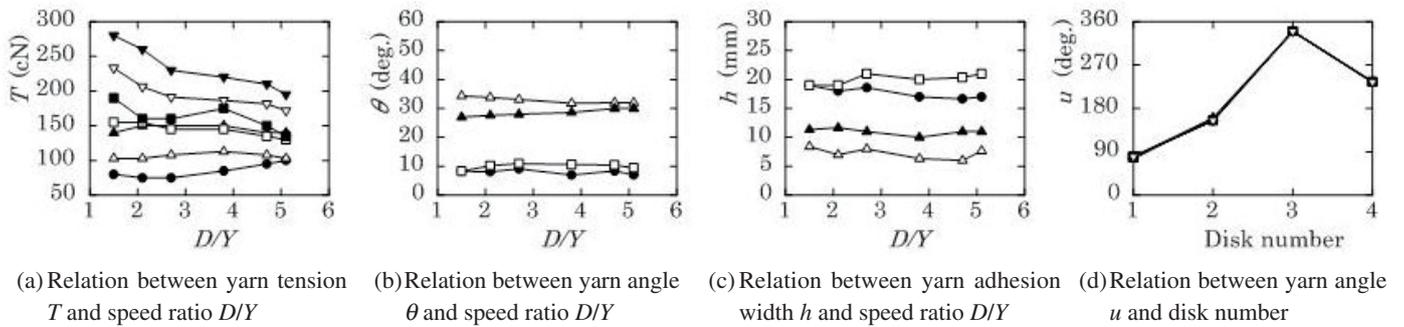
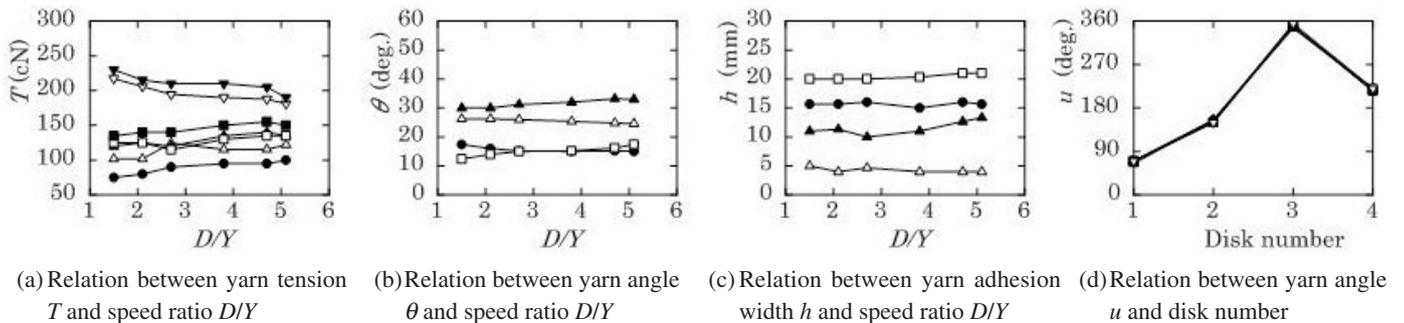


Fig. 3 Experimental result ($H = 50$ mm, $L = 130$ mm, line 1-1).

Fig. 4 Experimental result ($H = 90$ mm, $L = 130$ mm, line1-1).Fig. 5 Experimental result ($H = 90$ mm, $L = 150$ mm, line1-1).

化したため糸張力 T も異なつたと考えられる。以上より、ディスク間距離 H は糸張力 T および糸傾角 θ に影響を与えることが確認できた。Figs. 4(c), (d)より, Fig. 3(c), (d)同様, 周速度比 D/Y が増加しても h や u の値の変化は小さくほぼ一定の値を示した。これより, 糸接着幅 h および糸接着角度 u はディスク間距離 H に依存しないと考えられる。

Fig. 5にディスク間距離 $H = 90$ mm, 軸間距離 $L = 150$ mm, 入口ガイド孔 (1-1) の場合の張力および糸経路におよぼす周速度比の影響の実験結果を示す。縦軸, 横軸および図中の記号はFig. 3およびFig. 4の場合と同様である。Fig. 5(a)より, 糸張力 T はFig. 4(a)同様, $T_1 - T_5$ はほぼ一定の値を示し, T_6, T_7 は D/Y の増加に伴い減少傾向にあることがわかる。またFig. 5(b)においてもFig. 4(b)同様, D/Y の増加に伴いディスク2の糸傾角 θ_2 は減少傾向, ディスク3の糸傾角 θ_3 は増加傾向にあることがわかる。一方ディスク1の糸傾角 θ_1 およびディスク4の糸傾角 θ_4 には値の変化はみられなかった。Figs. 5(c), (d)ではFigs. 3(c), (d)同様, 周速度比 D/Y が増加しても値の変化は小さくほぼ一定の値を示した。

ここで, Figs. 4(a), (b), (c)とFigs. 5(a), (b), (c)を比較すると, 軸間距離 L の増加に伴い T は減少し, θ_1 が増加, θ_2 が減少, h_1 および h_2 が減少していることが確認できる。これより, 軸間距離 L の増加は糸傾角 θ_2 および糸接着幅 h に影響を与え, その結果, 糸張力 T を減少させることが明らかとなった。これは, 軸間距離 L が増加することで, 糸とディスクの糸接着幅 h が減少し, それに伴い糸とディスク間の接着部の摩擦力が減少するため, 糸張力 T が減少したと考えられる。また, Fig. 3(d), Fig. 4(d), Fig. 5(d)どの図においても u は D/Y によらず, ほぼ一定値を示していることから, 2軸型ディスクフ

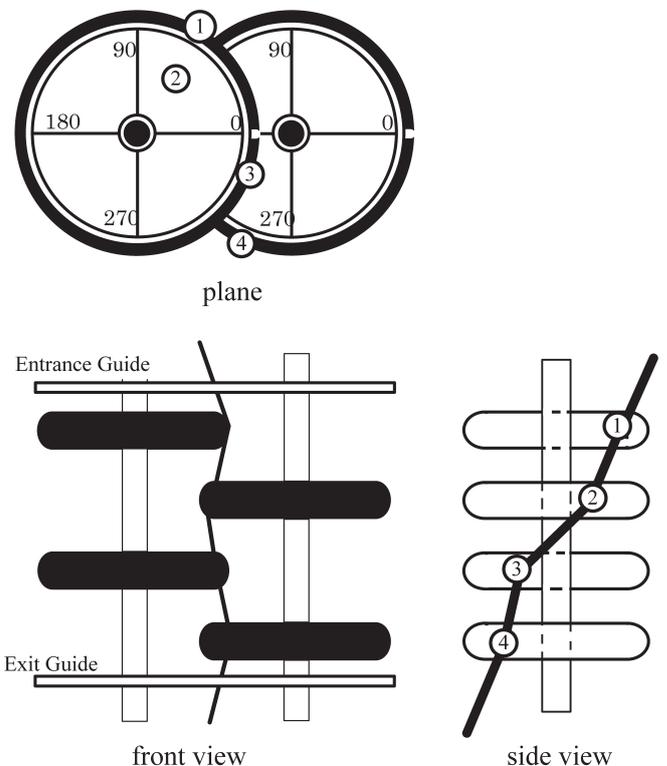


Fig. 6 Yarn path in a friction-twisting process using a doubly stacked multi-disk spindle.

リクシオンにおける糸経路はFig. 6に示すように, それぞれ①, ②, ③, ④点で各ディスクと接し, 安定していると考えられる。

4. 曲面上を動く糸の理論式

前節より2軸型ディスクフリクション仮燃における糸の加工工程ではディスク部分で複雑な糸経路が形成されることが明らかとなった。ここで我々が以前に報告した、曲面上を移動する糸の理論式[5]および面外の点から曲面に接する糸の理論式[6]を用いて、このモデル仮燃機における糸の理論経路および理論張力を求める手順を述べる。そして得られた理論値と実験結果とを比較検討し、用いた計算手順の妥当性を検討する。

4.1 回転するディスク上を動く糸の理論式

ディスクフリクション仮燃における糸の理論経路を導くにあたり、糸が曲面上に密着している場合の糸の平衡を考える必要がある。そこでFig. 7(a)に示すように曲面上に糸が密着している場合、糸の平衡を考えた力の釣り合い式は式(1)となる。

$$\frac{dT}{ds} \xi_1 + T(k_n e + k_g \eta) + Fe + \mu Fe_s = \mathbf{0} \quad (1)$$

ここで T は曲面上の糸の張力の大きさ、 F は糸に作用する外力の大きさ（本報では糸が張力 T でディスクに接触する反作用としてディスクから受ける垂直抗力）、 ξ_1 は単位接ベクトル、 k_n は法曲率、 k_g は測地的曲率、 e は曲面の単位法線ベクトル、 η は $e \times \xi_1$ のベクトルとする。ディスクの曲面はFig. 7 (b)に示すトーラスモデルと仮定する。一定の送り速度 Y で送られている糸が周速度 D で回転しているディスクに接触($D/Y = \alpha$)している場合、糸の糸経路と張力は以下の式を数値解析することによって求められる[5]。

$$\frac{du}{dv} = \frac{1}{(\rho + \cos v) \tan \omega} \quad (\text{ただし } \rho = R/r) \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dv} = \frac{\mu\alpha}{\sqrt{\alpha^2 - 2\alpha \cos \omega + 1}} \times \left(\frac{\cos v \cos^2 \omega}{\rho + \cos v} + \sin^2 \omega \right) - \frac{\sin v}{(\rho + \cos v) \tan \omega} \quad (3)$$

$$\frac{dT}{dv} = \frac{\mu T(\alpha \cos \omega - 1)}{\sin \omega \sqrt{\alpha^2 - 2\alpha \cos \omega + 1}} \times \left(\frac{\cos v \cos^2 \omega}{\rho + \cos v} + \sin^2 \omega \right) \quad (4)$$

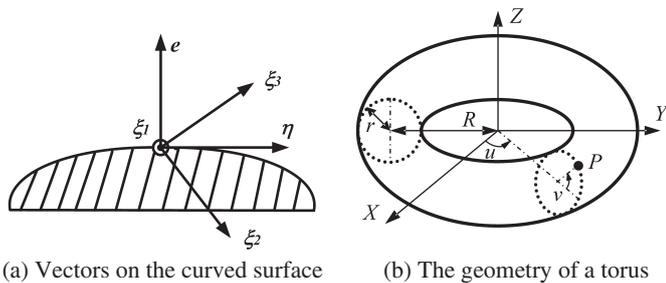


Fig. 7 Course of a thread on a torus model.

4.2 糸の始点Qおよび進入点Pから得られる糸進入角 ω_P

糸経路を近似計算するにあたり、初期値 ω, u, v, T を設定する必要がある。そこで本研究では実験で得られた値を代入して、理論経路 ω, u, v および理論張力 T を求める。また、糸がディスクに接着している座標点 (u, v) については実験結果より求めることができるが、進入角 ω については進入点Pにおける進入角 ω_P をあらかじめ解析する必要がある。ここで進入点Pにおける進入角 ω_P の導出手順は以下の通りである[6]。

円環の中心までの距離を R 、円環の半径を r とし、端面の子午線方向の角度を v 、ディスクの緯線方向の角度 u と置くと、円環面上の曲面座標は式(5)のようになる (Fig. 7(b)参照)。

$$\vec{P}(x, y, z) = \vec{P}(u, v) = ((R + r \cos v) \cos u, (R + r \cos v) \sin u, r \sin v) \quad (5)$$

Fig. 8に示すディスクの輪環面に座標 (f, b, k) なる始点Qから糸が送られてきて、進入点P (u_1, v_1) でディスクに接しているとする[6]と、次式を得る。

$$\begin{vmatrix} f - (R + r \cos v_1) & b - (R + r \cos v_1) & k - r \sin v_1 \\ -\sin u_1 & \cos u_1 & 0 \\ -\sin v_1 \cos u_1 & -\sin v_1 \sin u_1 & \cos v_1 \end{vmatrix} = 1 \quad (6)$$

ここで、 $g = R - f \cos u_1 - b \sin u_1$ とすると、

$$\sin v_1 = \frac{rh \pm g \sqrt{k^2 + g^2 - r^2}}{k^2 + g^2} \quad (7)$$

となる（複合は正しい v_1 を与える方のみとする）。式(7)は、 k, b, h を一定とした場合に u_1 が増加するにつれて変化する v_1 を

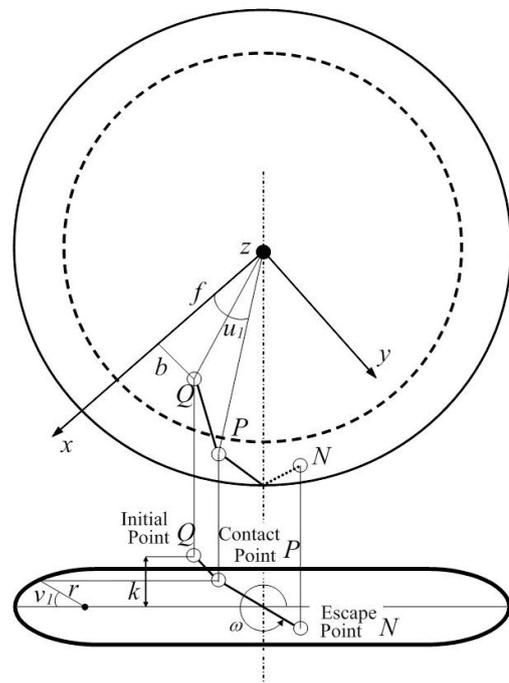


Fig. 8 Yarn path from the initial point Q (f, b, k), through the contact point P, to the escape point N on the disk.

表しているの、接点の軌跡を与えている。ディスク上の点Pにおける緯線方向単位ベクトルは、

$$\mathbf{t} = (-\sin u_1, \cos u_1, 0) \quad (8)$$

である。またベクトル \vec{QP} の成分は、

$$\{(R+r\cos v_1)\cos u_1-f, (R+r\cos v_1)\sin u_1-b, r\sin v_1-k\} \quad (9)$$

である。したがって、 \mathbf{t} と \vec{QP} のなす角 ω_p は次式で求められる。

$$\omega_p = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{QP} \cdot \mathbf{t}}{|\vec{QP}|} \right) \quad (10)$$

以上に述べた理論経路および理論張力はディスクが1枚の場合について求めたものである[5, 6]。そこで、本モデル機での4枚ディスクにおいては、Fig. 9に示すような計算手順によって理論経路 ω 、 u 、 v および理論張力 T を求めた。すなわち、手順1では、ディスク1を輪環面と考えた場合の中心に座標軸原点をとり、点Qの座標（入口ガイド孔の位置）、進入点Pの座標の測定値を与えて(6)~(10)式によりP点での ω を求める。続いてこの結果と加撚張力 $T1$ を与え、(2)~(4)式により点Pから離脱点Nに至るまでのディスク上での糸経路と糸張力を求める。手順2では新たにディスク2の輪環面の中心に座標軸原点をとり、ディスク1からの糸の離脱点Nをディスク2に対する点Qとおき、進入点Pの座標の測定値を与えて手順1と同様な計算を繰り返す。このときのディスク1とディスク2の間の張力 $T3$ としては、手順1で求めた計算値を使うことができる。手順3、手順4はそれぞれディスク3輪環面の中心、ディスク4の輪環面の中心に座標軸原点において同様の計算を進め、最後にディスク4の離脱点Nとともに解撚張力 $T7$ が得られる。この計算手順では、点Qと点Pの座標は測定結果を与える必要はあるが、張力は $T1$ から $T7$ まで連続して計算することができ、ディスク間隔が狭い、(そのため張力測定が困難な)実機のディスクユニットにおいても、糸経路を観測できれば、ディスク間の張力を含めて、加撚張力と解撚張力の関係を把握することが可能となる。

5. 糸張力の実験値と理論値の比較・考察

Fig. 10にディスク間距離 $H=90$ mm, 軸間距離 $L=130$ mm, 入口ガイド孔(1-1)における、糸張力 T の理論値と実験値($T1$ - $T7$)を示す。糸経路を直感的に理解しやすくするため、Fig. 11(a)に示すように、入口ガイド($Z=200$ mm)と出口ガイド($Z=-200$ mm)の中間点を原点とした右手座標系を本モデル機の上において、Fig. 10の各図の横軸はFig. 11(a)のZ座標に、縦軸は糸張力 T をとり、周速度比 D/Y 別に比較した結果である。Fig. 10より、いずれの D/Y においても糸張力 T は入口ガイド($Z=200$ mm)から $Z=135$ mm付近のディスク1, $Z=45$ mm付近のディスク2, $Z=-45$ mm付近のディスク3, $Z=-135$ mm付近のディスク4を通過して出口ガイド($Z=-200$ mm)に向かうにしたがい、理論張力および実験張力ともに増加している。糸の進行により張力が増加する現象は $V_D/V_F=1.68$ の延伸しながらの仮撚工程なので当然のことではあるが、周速度比の増加に伴い、理論張力および実験張力に減少傾向がみられる。加えてFig. 10の各々のディスク2の部分($Z=45$ mm付近)では張力はほとんど増加していないか、あるいは若干減少している。これはFig. 11(b)に示すように、ディスク2部分での糸送り効果の影響が考えられ、 D/Y の増加に伴い、糸送り効果が増大したためであると考えられる。また、Fig. 10よりそれぞれの糸張力 T の増加傾向を比較すると、理論経路から得られる張力と実験から得られる張力がほぼ一致している結果が確認できる。糸経路の理論計算を行うにあたり初期値 ω 、 u 、 v 、 T に実験値を用いたために「よく一致する」のは当然だとも考えられるが、糸の接触状態を観察することによって、測定が困難なディスクユニット内の張力を予測できることには意義があると考えられる。以上より、ディスク部分の糸張力 T を解析するにあたり、用いた理論式および解析手順は妥当であると考えられる。

ここで、本研究で用いた理論式および解析手順の妥当性を糸経路の観点から確認する。Fig. 12にFig. 10と同一条件で、周速度比 $D/Y=1.5$ の場合の糸経路の計算値を◇で、測定値+でプロットした。同図より、いずれのディスクにおいても、

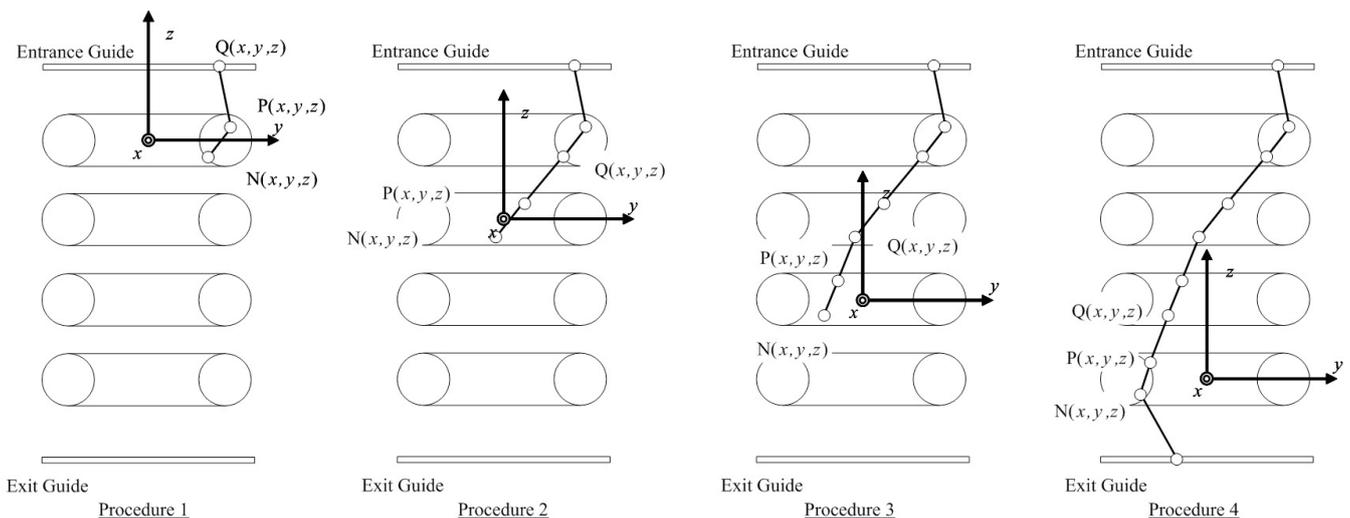


Fig. 9 Calculation procedure.

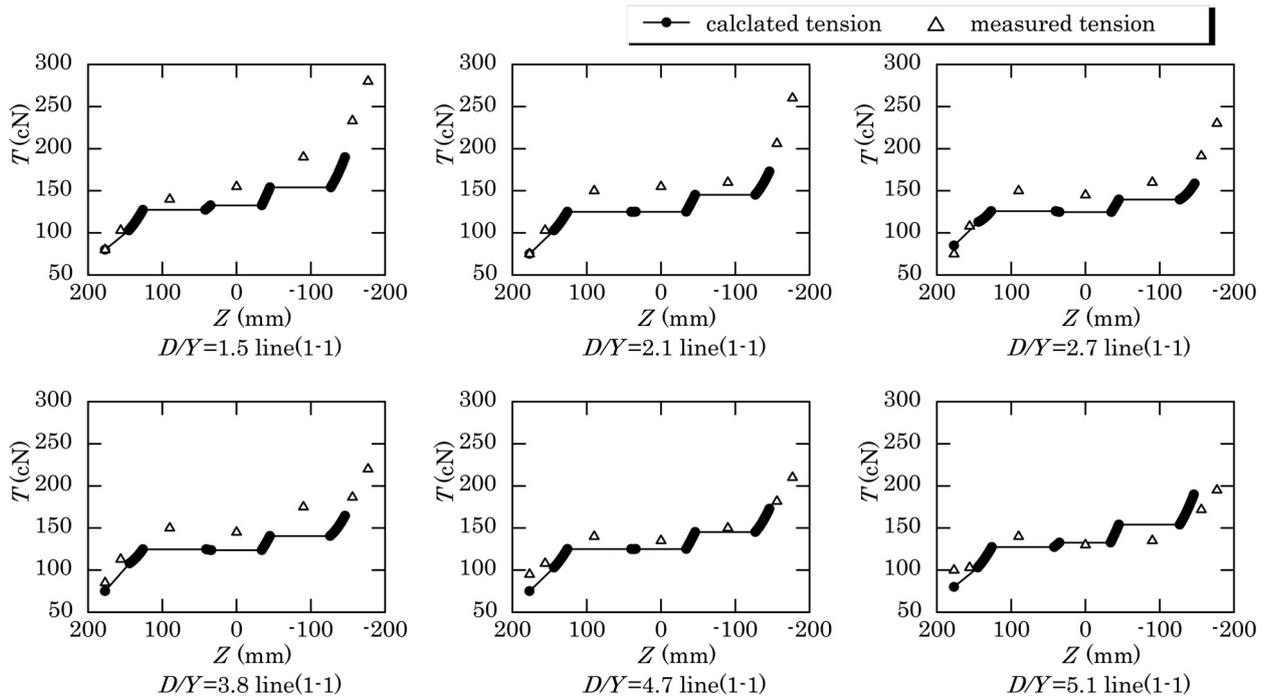


Fig. 10 Comparison result of yarn tension.

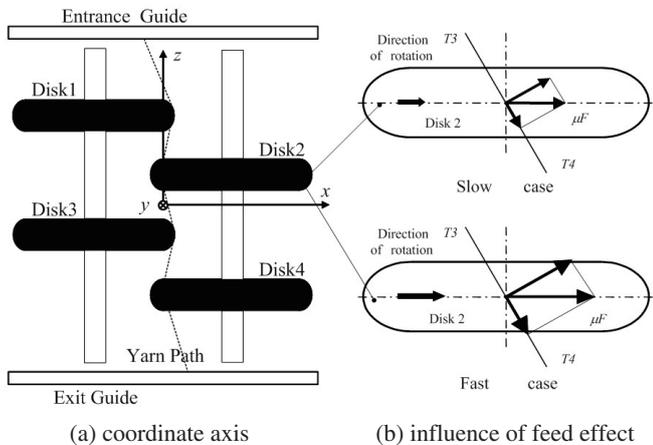


Fig. 11 Influence of the speed ratio (D/Y).

理論経路および実験経路がほぼ一致していることがわかる。これより糸経路の観点からも、本研究で用いている理論式および解析手順は妥当であることが確認できる。

以上のことから、2軸型ディスクフリクション仮撚において、曲面に接触する初期値 ω_p, u_1, v_1 および T_I を把握しておけば、任意の糸経路における ω, u, v および糸張力 T の近似値を求めることができることが明らかとなった。

6. 結論

本研究では2軸型ディスクフリクション仮撚における糸の経路と張力を、モデル仮撚機を用いて実験的に確認し、そこで得られたデータを基にモデル機における糸の理論経路および理論張力を求め比較・検討することで以下の結論を得た。

1) 糸送り速度に対するディスク周速度の比 D/Y を増加させると糸張力 T は全体的に減少した。これはディスク周速の増

加により糸送り効果が増加し、糸とディスク間の摩擦力が減少するためであると考えられる。

2) ディスク間距離 H および軸間距離 L は、それぞれ糸傾角 θ に大きく影響を与え、それによって糸張力 T が変化する。

3) 本モデル機においては、ディスク2の糸送り効果が顕著に見られた。すなわち、解撚張力をはじめとして、ディスク2以下の張力はディスク2における糸とディスクの接触状態に依存する。

4) 2軸型ディスクフリクションにおいて、糸とディスクの接触状態を把握していれば、糸経路および糸張力 T の近似値を求めることができる。

本研究を進めるに際し、実験装置製作にご協力いただいた金沢大学技術支援センターに感謝する。

References

- [1] Thwaites JJ (1984) J Text Inst, **75**, 285–297
- [2] Thwaites JJ (1985) J Text Inst, **76**, 157–170
- [3] Du Guang-Wu, Hearle JW (1991) Text Res J, **61**, 289–297
- [4] Du Guang-Wu, Hearle JW (1991) Text Res J, **61**, 347–357
- [5] Shintaku S, Endo T, Kinari T, Tamamura R (1999) J Text Mach Soc Japan, **52**, T217–T224
- [6] Shintaku S, Endo T, Kinari T, Tamamura R (2000) J Text Mach Soc Japan, **53**, T53–T61
- [7] Shintaku S, Endo T, Kinari T, Kobayashi S (2000) J Text Mach Soc Japan, **53**, T155–T164
- [8] Endo T, Shintaku S, Kinari T, Sasaya R (2001) J Text Mach Soc Japan, **54**, T119–T125
- [9] Endo T, Shintaku S, Kinari T (2003) Text Res J, **73**, 139–146
- [10] Endo T, Shintaku S, Kinari T (2003) Text Res J, **73**, 192–199

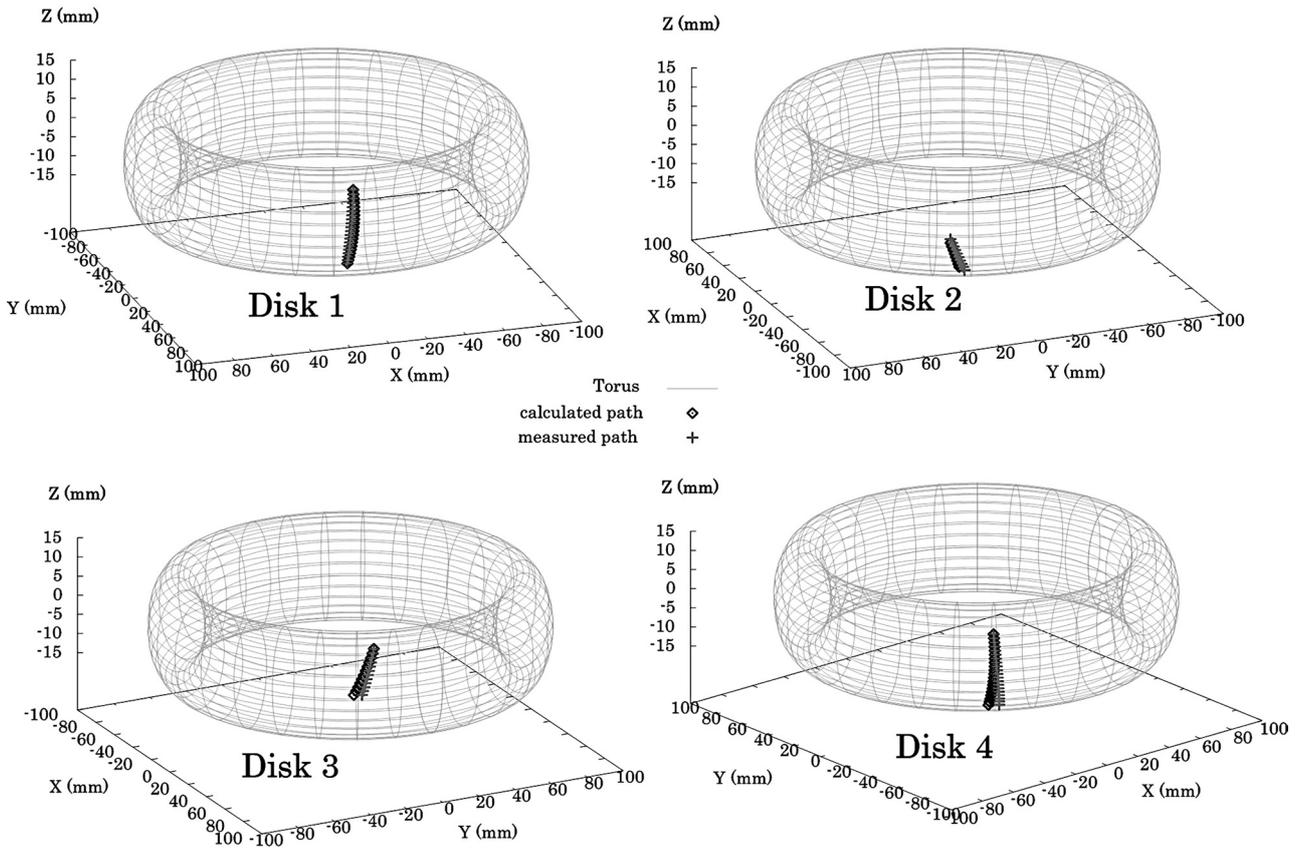


Fig. 12 Comparison result of yarn path.