

Air Drag Force on a Yarn and Use of a Coaxial Jet for Yarn Operation

HATTA Kiyoshi^{a,*}, KINARI Toshiyasu^b, SHINTAKU Sukenori^b^a *Ishikawa National College of Technology, Kitacyujyo, Tsubata, Kahokugun, Ishikawa 929-0392, Japan*^b *Faculty of Engineering, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan*

Received 30 March 2006; accepted for publication 29 June 2006

Abstract

Various kinds of airflow are used for operating yarn during textile processes. In this study, we calculated numerically compressible airflows past a yarn in a thin pipe in order to operate yarn using both a circular jet and an annular jet. We proposed the way to arrange air drag coefficients of yarns by Reynolds numbers adopted the yarn length exposed to the airflow as the representative length for the higher range of pressured airflows taking their compressibility into consideration. Simulated results elucidated both the air velocity and density profiles in a thin pipe for both jets. In the circular jet, the influence of the potential core was strong but it disappeared comparatively earlier. At higher supplying pressure, the compressed air was not able to fully accelerate in the pipe because it kept high density and took under-expansion. On the other hand, in the annular jet, the influence of the potential core was small, thus the compressed air fully accelerated and expanded in the pipe even at higher supplying pressure. Furthermore, yarn operation experiments showed that increasing supplying pressure was not effective to accelerate yarn running speed, and yarn troubles such as yarn twist or entanglement occurred at supplying pressure higher than 0.3MPa for both jets.

Key Words: Yarn operation, Air drag force, Coaxial circular jet, Coaxial annular jet, Power-saving

糸に作用する空気抗力と同軸噴流の糸操作への利用

八田 潔^{a,*}, 喜成年泰^b, 新宅救徳^b

1. 緒言

多くの繊維機械において、糸端を保持する、移動する、飛ばすなど、糸を自在に操る方法として空気流がよく利用されている。このとき利用される空気流の強さは、現場で経験的に調整されるが、糸操作の確実性を期待して必要以上に強く設定されることが多い。しかし、この状況は空気動力を無駄に消費するばかりでなく、糸や最終製品の品質低下にもつながっている。

空気流を利用した代表的な例としては、エアジェットルームにおける緯入れがあげられるが、筆者らが開発したカバーリング準備工程における中空スピンドルへの糸通し装置[1] (Fig. 1)でも噴流と吸込流を組み合わせ糸通しの自動化を実現している。いずれの場合も細い管路内に高圧の噴流が作用しているところが特徴と言える。

噴流を利用した糸の操作では、糸が細い管路を通過するため測定器の挿入が不可能で、管路内における空気流の状態を

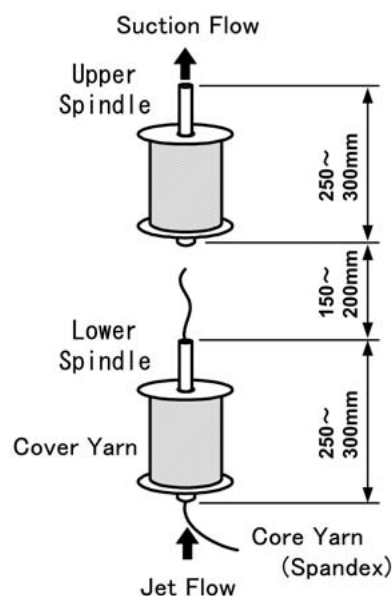


Fig. 1 Drawing-in device into hollow spindle.

* 連絡先: 石川工業高等専門学校 929-0392 石川県河北郡津幡町北中条, E-mail: hatta@ishikawa-nct.ac.jp, Tel/Fax: +81-76-288-8099

把握することは極めて困難である。詳しい解析を行おうとしても、出入口での圧力変化や糸に働く全抗力、すなわち糸根元での張力を測定する程度の情報しか得ることができない。本研究では、汎用熱流体解析ソフトによる流れのシミュレーションを併用して糸に作用する空気抗力の算定を行うとともに、実験を通して、噴流形態の違いによる糸操作性の差異や品質を損なうことなく効率的に糸を操作するための条件などについて検討を行った。

2. 糸の空気摩擦抗力

2.1 空気流の形態

Fig. 2のように大小2つの円管が組み合わされた場所に噴流が作用する形態としては、噴流が中心から作用する円形噴流と噴流が外周部分から作用する環状噴流の2つがあげられる[2]。円形噴流は、中空スピンドルへの糸通しがこれに相当し、スピンドルの中心に細い噴き出し口を挿入して外周部分から糸を挿入する。一方、環状噴流は、ジェットルームのメインノズルがこれに相当し、糸は中心部分の導糸管から挿入され空気流によって加速管へと送り出されていく。両者は、噴流の作用形態と糸の挿入位置が若干異なるものの、空気流を使った糸の操作としては同じ扱いを受けることが多い。ただし、実際に糸を操作してみると、糸の空気抗力や挙動において多少異なる傾向を示すことが経験的に知られている。しかし、理論的な説明は十分になされていない。

2.2 従来の研究

流れに平行に置かれた円形断面を有する糸の空気摩擦抗力 D_f は、

$$D_f = (1/2) C_f \rho (V - V_y)^2 \pi d l \quad (1)$$

- C_f : 空気摩擦抗力係数
- ρ : 空気の密度
- V : 空気流速
- V_y : 糸速 (糸拘束時は0)
- d : 糸直径 (a : 糸半径)
- l : 空気流にふれる繊維長

と表される。この空気摩擦抗力係数 C_f については、GouldとSmith[3]、清水ら[4]、GlauertとLighthill[5]、White[6]、樋口と笠原ら[7]が、糸の構造、拘束条件、空気流の状態など、様々な角度から検討を行っており、概ね、糸半径 a を代表長さとする半径レイノルズ数 Rea および空気流にふれる繊維長 l を代表長さとする長さレイノルズ数 Rex を使って整理することが有効であることが示されている。

筆者らも、吸込流に対する実験から、半径レイノルズ数 $Rea < 500$ において、

$$C_f = K Rea^{-n} \quad (2)$$

なる実験式が適用され、両端固定条件で係数 $K = 0.22$ 、指数

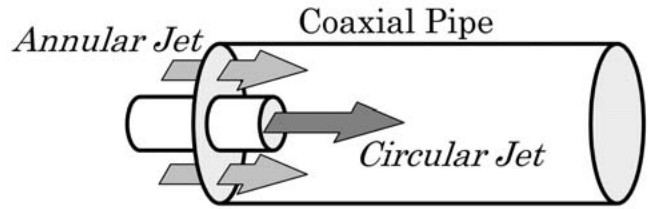


Fig. 2 Types of jet flow in coaxial pipe.

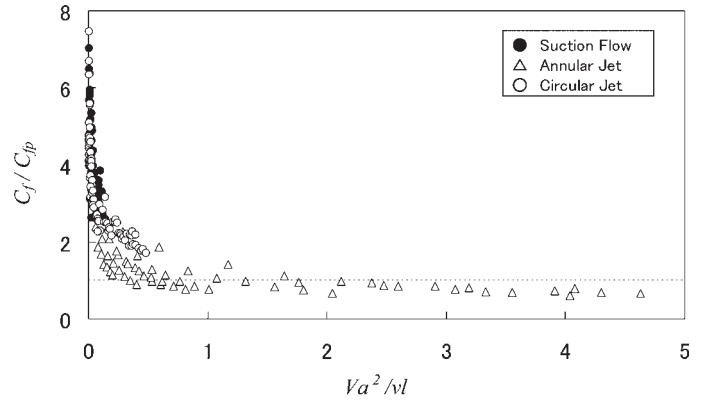


Fig. 3 Effect of curvature of yarn on air drag coefficient.

$n = 0.58$ 、自由端条件で K がほぼ2倍になるという実験値を得た[8]。さらに、噴流を使った圧縮性を考慮しない領域の実験データも加え、 $K = 0.33$ 、 $n = 0.58$ なる実験値を得た[9]。また、このとき適用される半径レイノルズ数は $Rea \approx 5000$ まで拡張できることも確認された。一方、さらに大きな Rea に対して、 C_f は平板理論の値に近づき、

$$C_f = K Rex^{-n} \quad (3)$$

(係数 $K = 0.074$ 、指数 $n = 0.2$) の形で表されることになる[10]。Fig. 3は、半径レイノルズ数に糸の細長さを含めた、

$$Rea (a/l) = Va/\nu(a/l) = Va^2/\nu l \quad (4)$$

を横軸に、糸と平板の空気抗力係数 C_{fp} との比を縦軸にとったものである。ただし、 ν は動粘度を表す。この図から、 $Va^2/\nu l < 0.5$ では糸の場合、平板よりはるかに大きな空気抗力係数を示すことが分かる。これは半径レイノルズ数による整理が適当であることを示しており、糸の曲率の効果が表れている領域と考えてよい。ただし、これらの解析結果が空気の圧縮性を考慮すべき流れに対して適用できるかどうかは不明である。本研究では、糸の空気抗力係数の考え方を空気流の圧縮性を考慮した領域まで拡張して検討し、円形噴流や環状噴流における管内空気流の違いと、それに伴う糸の抗力と挙動の違いについて明らかにする。

一方、空気流を用いて糸を操作する研究としては、エアジェットノズルに関する報告が数多くあり、深井[11]や、石田と岡島[12-14]がメインノズル内の流動特性を明らかにしている。また、岩木ら[15]が様々な糸に対する張力の解析を行っているほか、吉田ら[16]は紡績糸を使った糸張力変動について検討している。さらに、新谷ら[17, 18]は、ポリエステル加工糸を使って空気抗力や糸速度についての検討を行っ

ている。しかし、これらの報告は、管路直径・加速管長さなどの寸法効果や補助ノズル、エアガイドとの関係に着目したものが多く、メインノズル内における空気流の変化や糸の挙動について検討したものは少ない。また、直径を大きくしたモデル実験も行われているが、実際のノズルでは管路が細く計測器の挿入も困難である。このため、出入口の圧力、糸張力の変化程度しか捉えることができず、糸と空気流の関係を直接解析しているとは言い難い。本研究では、この点を数値シミュレーションによって明らかにし、実際の抗力や糸の挙動と比較することで、その妥当性を検証するとともに、噴流を利用する際に生ずる糸操作上の問題などを明らかにしていく。

3. 流れのシミュレーション

3.1 解析方法

解析に使用するシミュレーションソフトはCHAM社PHOENICSである。PHOENICSは有限体積法により質量、運動量、エネルギーなどの保存式を、定常または非定常計算で1～3次元空間において解く汎用熱流体解析ソフトである。なお、解析には理想気体を使った乱流 $k-\epsilon$ モデルを用いている。

3.2 円形噴流

円形噴流に対する解析領域をFig. 4に示す。直径4.0 mmの噴き出し管と直径6.0 mm、長さ300 mmの管路を組合せ、中心より圧縮空気を噴出させた。噴流を対象とする場合、流れの乱れや渦の発生を避けることはできないが、この場合は管路が比較的細く、そこに挿入される糸も半径方向への動きがかなり制限される。このため、糸に働く力のほとんどが流れに平行な摩擦抗力であると仮定する。また、管内の空気流は軸対称流であると仮定して計算することにした。半径方向を r 、周方向を θ 、軸方向を z とする円筒座標系をとり、管路を出た後の空気流は大気開放となるので直径30 mm、長さ500 mmの広い空間を設定した。グリッド数は $(r, z) = (50, 1000)$ とし、定常流れの計算を十分に収束が確認されるまで行った。境界条件はinletで0.1～0.45 MPaの圧力のみを与え、outletを大気圧0 MPa（ゲージ圧）とした。

Fig. 5にinletの圧力を0.1 MPaおよび0.3 MPaに設定した時

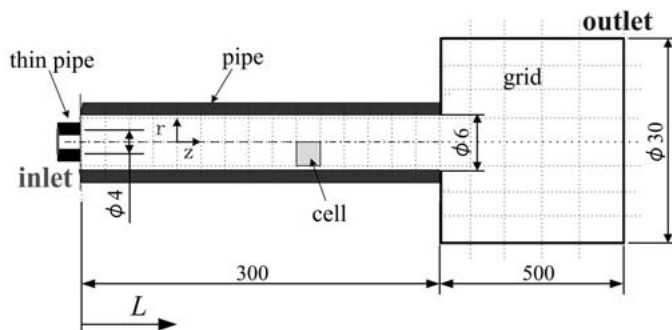


Fig. 4 Simulation model for circular jet.

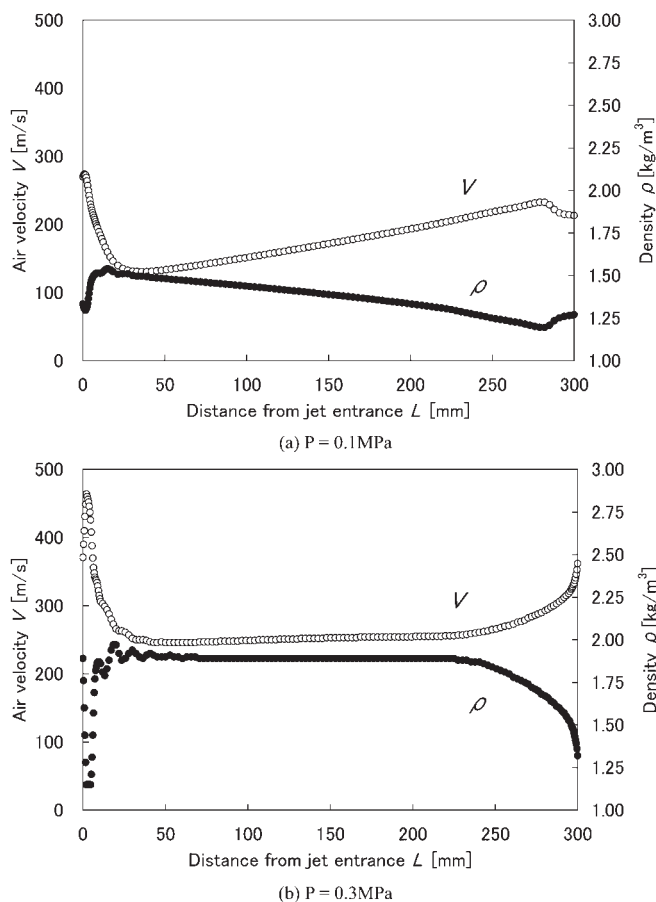


Fig. 5 Variation of air velocity and density along the centerline in circular jet.

の管路中心軸上における流速と密度の変化を示す。まず0.1 MPaの場合、噴き出し口から噴出された直後の空気流速は非常に高いが、そこから25 mm付近までの間に急激に減少している。これは、この場所でポテンシャルコアが生成されているためと考えられる。そして、25 mm以降から流速は徐々に上昇し始め、管路の出口 ($L = 300$ mm) 付近で空気流は拘束状態から大気開放となるので流速は変動する。一方、密度は噴き出し口から流速と対照的に上昇していき、25 mm付近から減少していく。以上のことから、円形噴流において空気流はその圧縮性のため管路内で拡散膨張して加速していることがわかる。

しかし、inletの圧力が0.3 MPaになると、最初は0.1 MPaのときと同様にポテンシャルコアの影響で噴き出し直後の流速は非常に高い値をとり、噴き出し口から25 mm付近まで急激に減少するものの、その後、流速の増加傾向は見られず、管路出口付近までほぼ変化していないことがわかる。密度に関しても同様に管路内ではほとんど変化がみられない。つまり、供給圧力が非常に高いと、管路内の空気は十分に膨張拡散することができず、高密度のまま一定速度で移動していることがわかった。この傾向は、0.4 MPaなどさらに高い圧力でも同様に確認された。

Fig. 6では0.3 MPaの場合における管路中心と管路外周部分(中心より2.75 mm)の流速の変化を比較した。これより、噴

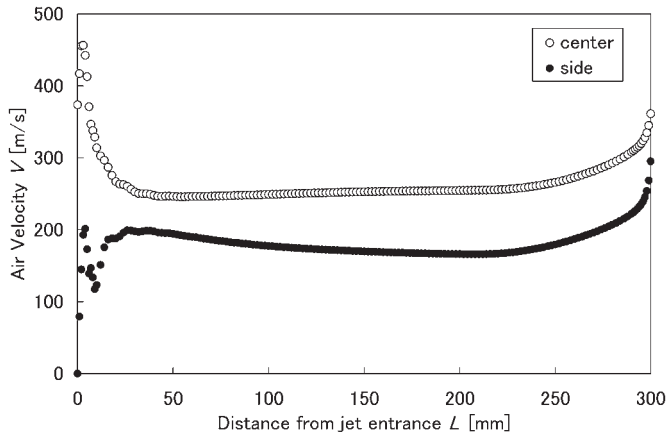


Fig. 6 Variation of air velocities along the centerline and near the pipe wall ($r = 2.75$ mm) in circular jet at $P = 0.3$ MPa.

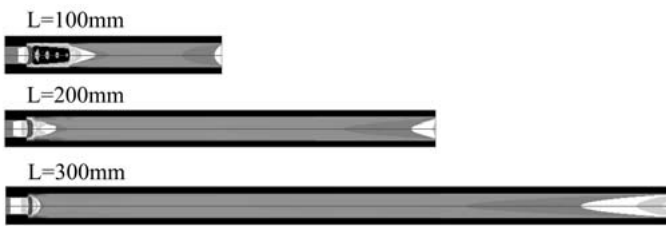


Fig. 7 Appearance of shock wave in short pipe.

き出し口の直後では噴流の速度が極めて高く、外周部分の空気が噴流に引っ張られるように混合している様子がうかがえる。ただし、中心と外周で速度の大きく異なる領域は比較的短く、噴き出し口から25 mm程度進んだ位置では、両者の速度差は20%程度に減少している。

Fig. 7に管路の長さを100, 200, 300 mmと変化させたときの管路内の流速分布を示す。管路長さが $L = 100$ mmの場合、噴き出し口から出た直後、衝撃波が生じ、この部分での流速が不連続になっていることがわかる。これに対して、管路長さを $L = 200, 300$ mmと長くした場合は、衝撃波の発生が小さく、あるいは抑えられていることがわかる。さらに、管路出口付近に着目してみると、出口での流速はほとんど変わらないが、加速が始まる出口からの距離に管路長さの影響が現れていることがわかる。

3.3 環状噴流

環状噴流に対する解析領域をFig. 8に示す。エアジェットルームにおけるメインノズルの代表的な寸法としては、導糸管の径2.5 mm、加速管の径4.0 mm、加速管の長さ150 mmなどがあげられる。そのノズルの寸法形状をもとに3D-CADソフトSolid Edgeを用いてモデルを作成した。加速管から出た後の空気流は大気開放となるので、長さ300 mmの広い空間を設定した。座標系はCAD図面との関係から直交座標系を用い、グリッド数は $(x, y, z) = (50, 50, 185)$ とし、定常流れの計算を十分に収束が確認されるまで行った。境界条件は、inletで0.1~0.45 MPaの圧力を与え、outletは大気圧0 MPa

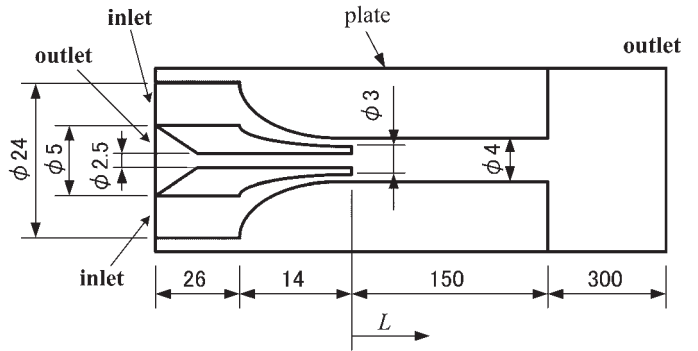
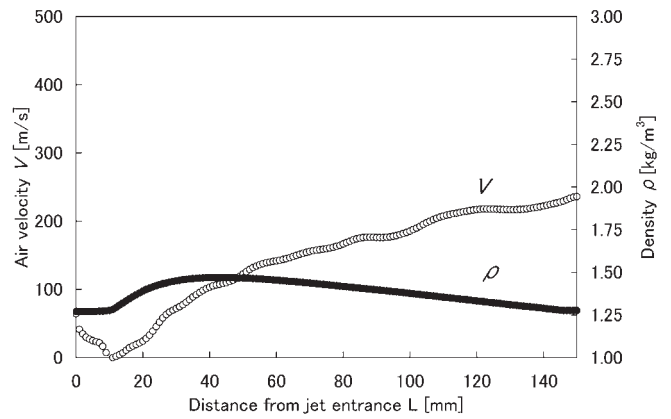
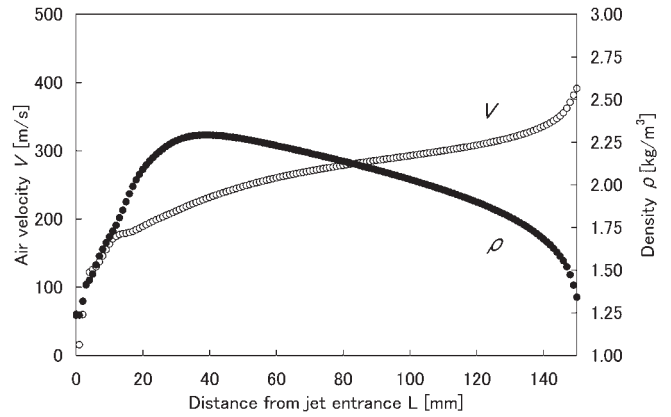


Fig. 8 Simulation model for annular jet.



(a) $P = 0.1$ MPa



(b) $P = 0.3$ MPa

Fig. 9 Variation of air velocity and density along the centerline in annular jet.

(ゲージ圧)とした。また、ジェットノズルでは、管路内の空気流に応じて導糸管で吸い込み流が発生する(場合によっては吹き出し流も起こる)ので、ここでは強制的な境界条件ではなく、outlet設定として出入り可能な条件を与えた。

Fig. 9にinletの圧力を0.1 MPaおよび0.3 MPaに設定した時の管路中心軸上における流速と密度の変化を示す。前節の円形噴流の場合とは異なり、噴流は管路の外周部分から作用し、管路中心では噴流の影響を直接受けることがないので、流速の初期値としては0に近い値となる。まず0.1 MPaの場合、噴き出し口から噴出された空気流は加速管内で中心部分の空気と混合され、緩やかに加速して密度は減少していく。つまり、円形噴流の0.1 MPaの時と同様、管路内で空気は膨張拡

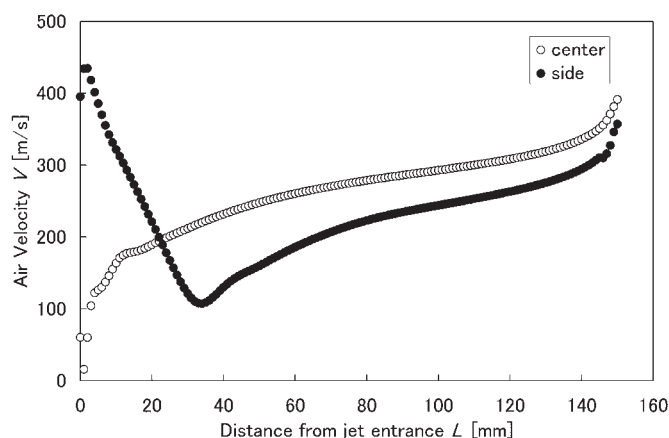


Fig. 10 Variation of air velocities along the centerline and near the pipe wall ($y = 1.75$ mm) in annular jet at $P = 0.3$ MPa.

散し加速していることがわかる。

次にinletの圧力を0.3 MPaにした場合、外周部分から噴出された圧縮空気は、中心部分の空気流と混合され流速が加速管内で緩やかに増加し、密度は減少している。また、inletの圧力が高くなると、加速管から大気へ開放される際、急激に拡散している様子がかがえる。特に、円形噴流でinletの圧力が高くなると、空気流は高密度のまま十分に膨張できず、流速は一定速度で推移していたが、環状噴流では加速管内の空気流は一定速度で留まることなく加速していることがわかる。

Fig. 10では0.3 MPaのときの管路中心と管路外周部分(中心より1.75 mm)の流速の変化を比較した。これより、噴流が中心部分の空気と混合するのに要する距離は、円形噴流の場合よりかなり長くなり、外周部分と中心軸上の流速がほぼ同じ割合で加速するようになるのは $L = 60 \sim 70$ mmであることが分かる。従って、高密度のポテンシャルコアの影響について考えると、円形噴流では高速で強いコアが短い距離に作用するのに対し、環状噴流ではそれほど局所的な作用はないものと考えられる。

4. 空気抗力値

4.1 円形噴流

第3章のシミュレーションで得られた各位置での空気流密度と速度をもとに(1)式より空気抗力を算出し、糸長さ全体にわたる空気抗力(張力)を計算した。ここで空気抗力係数はFig. 3の考え方にに基づき、(2)式あるいは(3)式を適用した。この空気抗力値を実験値と比較した結果をFig. 11に示す。この図は、円形噴流の中にナイロン糸1号(267dtex)を通した場合の結果である。実験では空気抗力の変動が大きいため、測定値の最大値と最小値をシミュレーションの結果とともに示した。

シミュレーションの値は糸が管路中心に存在しているという仮定のもとに計算した結果であるが、実験における最大値とほぼ一致している。すなわち、糸が管路中心にあることは、実験においてポテンシャルコアの影響を最大限に受

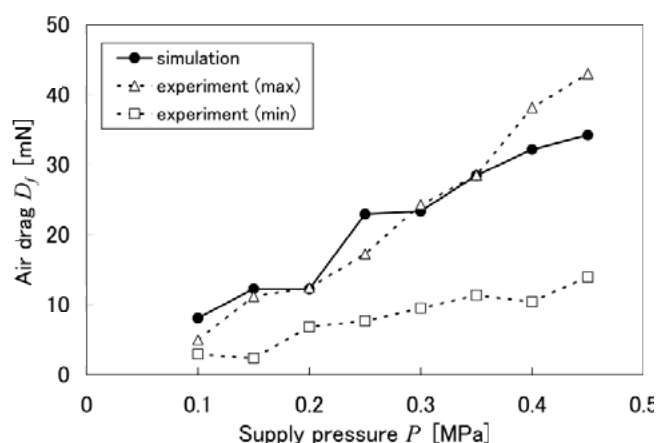


Fig. 11 Air drag of yarn: experimental result and simulated one in circular jet.

けた状態を再現しているものと考えられる。シミュレーションでは、0.25 MPaにおける値が実験値よりも若干高くなっているが、この付近の圧力では前章でも見たように、加速する流れからチョーキングする流れへと変化する。実際シミュレーションにおいても、初期値の与え方によっては計算が発散したり、収束に時間を要するなどの状況が多く確認された。

4.2 環状噴流

同様に環状噴流についてもシミュレーションと実験から得られた空気抗力値の比較を行う。Fig. 12はナイロン糸1号における結果である。環状噴流でも実験における抗力変動があるため測定値の最大値と最小値をプロットし、シミュレーションでは糸が中心部分にあると仮定した場合(center)と、外周部分(中心より1.75 mm)にあると仮定した場合(side)の2種類をプロットした。この図から、シミュレーション結果が実験値の最大値と最小値の中間に位置することがわかる。

シミュレーションによる結果をもとに、空気供給圧力が0.1 MPaのときと0.3 MPaのときに注目すると、圧力が低いときは糸が管路の周辺部にある方が糸の抗力値は大きくなるが、空気供給圧力が高くなってくると糸が管路中心にある方

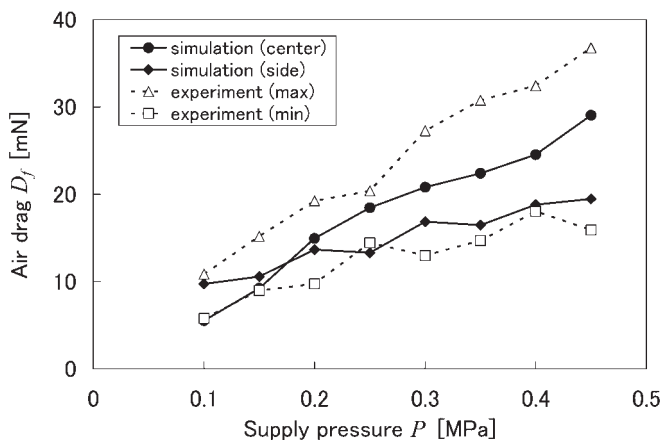


Fig. 12 Air drag of yarn: experimental result and simulated one in annular jet.

が糸の抗力値は大きくなることがわかる。すなわち、緩やかな流れと噴流による強い膨張拡散が起こっている流れでは、管路内部の流れが若干異なり、糸に作用する空気抗力や糸の挙動も異なってくるのが推測できる。実際、加速管出口での糸の様子を観察からも、空気流が緩やかなとき糸ははためきにより加速管壁に近づく傾向にあるが、流れが高速になると糸は中心にひきつけられるとともに強い旋回を起こすようになる。このことは、管内の空気流が軸対称流であるというシミュレーションの仮定が、現実とは必ずしも一致していないことを示している。

4.3 円形噴流と環状噴流の比較

シミュレーションの結果から円形噴流と環状噴流を比較したところ、inletでの圧力が高い場合、円形噴流では管路内の空気流は不足膨張を生じ流速はほとんど増加しないことがわかった。また、空気密度と流速の極めて高いポテンシャルコアの存在により、糸は局部的に大きな空気抗力を受けることになる。このため、糸に対する空気抗力は、糸全体に均等に作用するのではなく糸の根元に集中的に作用する可能性がある。これに対し環状噴流では、inletが高圧であっても管路内流速の増加傾向に変化は見られず、低圧の時と同様に空気流は加速膨張し続けていることがわかった。つまり、糸を飛走させる場合、糸先端ほど大きな空気抗力が作用し糸を前方へ牽引しやすい状態にあるということを示している。

また、環状噴流の方が円形噴流よりも張力が安定している現象について、シミュレーションによる管内空気流の密度・速度分布からも示すことができる。円形噴流は中心から圧縮空気が噴出されるので、ノズル噴出後に生じるポテンシャルコアの影響によって糸の飛走経路が変化し、大きな空気抗力が作用したり、逆に糸が壁面などに貼り付いて空気抗力を低下させる恐れがある。これに対し、環状噴流ではinletを高圧にしても、円形噴流よりもポテンシャルコアの規模は小さく空気流の混合に要する距離も長い。さらに糸は常に管路中心を飛走するので、ポテンシャルコアの影響で糸経路が大きく変化する恐れは少ないと言える。このことから、円形噴流と環状噴流とで空気抗力変動が異なることを示すことができる。

Fig. 13に、実験におけるナイロン02号(55 dtex)と1号の張力(空気抗力の総和)の標準偏差を円形噴流と環状噴流の場合で比較した結果を示す。全体として見れば、円形噴流、環状噴流ともに供給圧力が高くなれば、張力の変動も大きくなるのがわかる。円形噴流では、空気供給圧力の上昇とともに張力変動は単純に増加している。一方、環状噴流では、空気供給圧力が低い場合、張力変動が比較的大きく現れているのに対し、空気供給圧力が0.35~0.4 MPa程度を境に張力変動の増加傾向が抑制されることがわかる。すなわち、円形噴流では、空気供給圧力を増加すると糸に作用する張力の変動(振動)も増大するが、環状噴流では、最初空気供給圧力の低い条件で変動するものの、高圧になるとその変動はほぼ一定になることがわかる。これを糸操作の点から考えてみると、円形噴流では空気供給圧力を増すとポテンシャルコアの影響

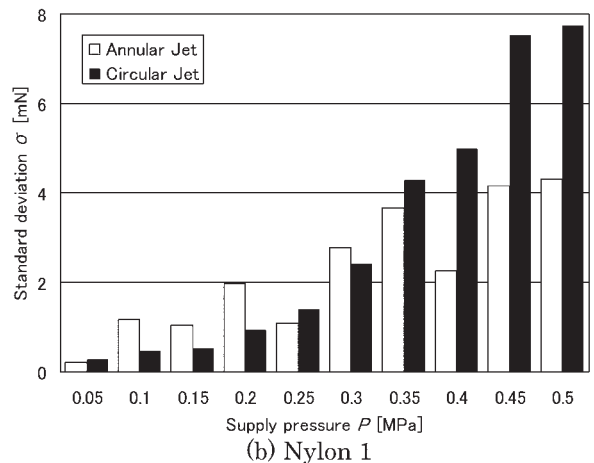
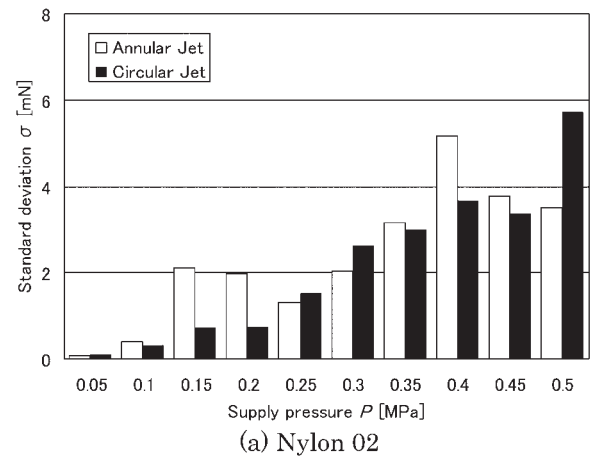


Fig. 13 Standard deviation of air drag in circular jet and annular jet.

を受ける場合と受けない場合で糸に作用する空気抗力は非常に大きく変化するのに対し、環状噴流ではある程度空気供給圧力を増すことで、糸の空気抗力を安定させることができる。

5. 糸の操作

5.1 糸の飛走速度

実際の作業においては、空気流によって糸をどの程度うまく操れるかが最大の関心事となる。特に、糸を遠くへ飛ばしたり糸端を引き渡したりする場合には、糸をいかに高速かつまっすぐに飛ばすかが重要なポイントとなる。ここでは、管路から出た糸の飛走速度を計測し、円形噴流と環状噴流で空気供給圧力ならびに糸の種類によってどのような違いが見られるのかを検証する。

Fig. 14は糸の飛走速度を測定する実験装置の概略である。糸に空気抗力を作用させる部分はこれまでの空気抗力測定の実験装置と同様であるが、重力による速度への影響を除外するため管路は水平に設置した。管路の出口に200 mmの間隔で幅20 mmのレーザーエリアセンサ(KEYENCE LV-H100/51M)を配置し、そこから300 mm離れた距離にもう1対のセンサを配置した。この間を通過するのに要した時間をプログラマブルコントローラ(KEYENCE KV-1000)にて計測

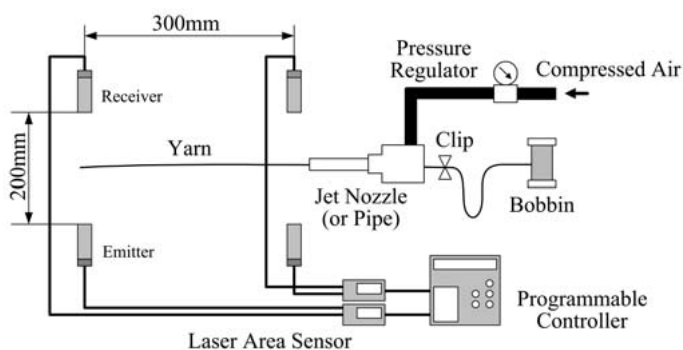


Fig. 14 Measurement system for yarn flying speed.

Table 1 Count and diameter of sample yarns.

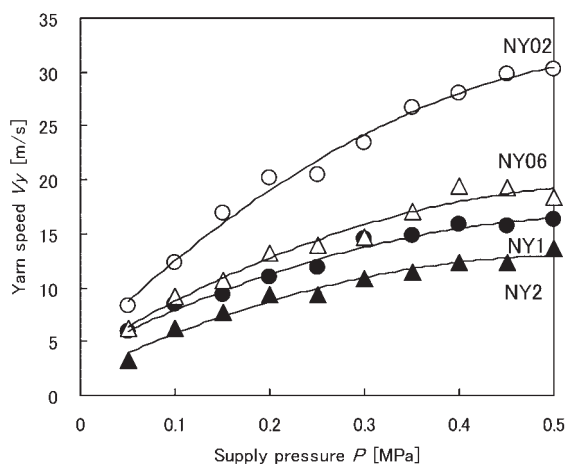
Type	sample	Count [dtex]	Diameter [mm]
Monofilament yarn	Nylon	02	55
		06	170
		1	267
		2	556
Multifilament yarn	Polyester (1000t/m)	75D	83
		150D	167
		225D	250
Stretch yarn	Spandex	20D	22
		70D	78
		140D	156
		420D	467

し、糸の飛走速度を計算することができる。なお、糸はソレノイドを利用したクリップにはさまれており、飛走時に抵抗が生じないようにあらかじめボビンから引き出されている。実験に使用した糸の直径と線密度を Table 1 に示す。

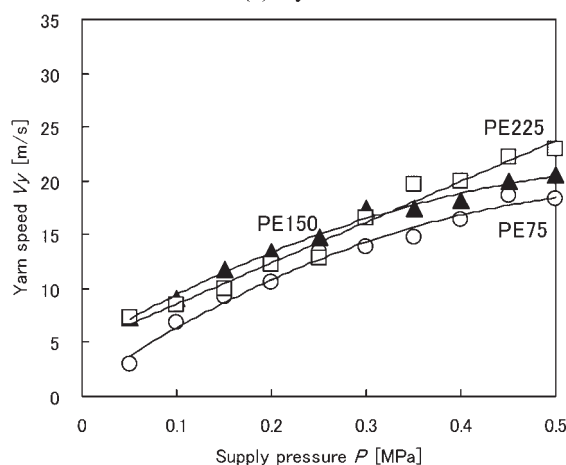
Fig. 15 に、環状噴流において空気供給圧力を変化させたときのナイロン糸、ポリエステル糸、スパンデックス糸の飛走速度を示す。まずナイロン糸の場合、飛走速度は線密度が小さい糸ほど空気の流れによって速くなる。ただし、いずれの糸においても 0.3 MPa 程度を境にその増加率が小さくなる。この傾向は、円形噴流においても確認されており、糸の飛走速度増加を期待して空気供給圧力を大きく増加させても、糸の飛走速度はそれほど上昇しないことが明らかとなった。

次にポリエステル糸の場合、飛走速度は線密度の大きさに関係なく、空気供給圧力の増加とともに飛走速度も増加していくことがわかった。これは、ポリエステル糸では空気流の影響により開織や撚り戻りが起こり、糸は実際の断面積より非常に大きな表面積をもつことで非常に大きな空気抗力が作用し推進力が得られるからだと考えられる。

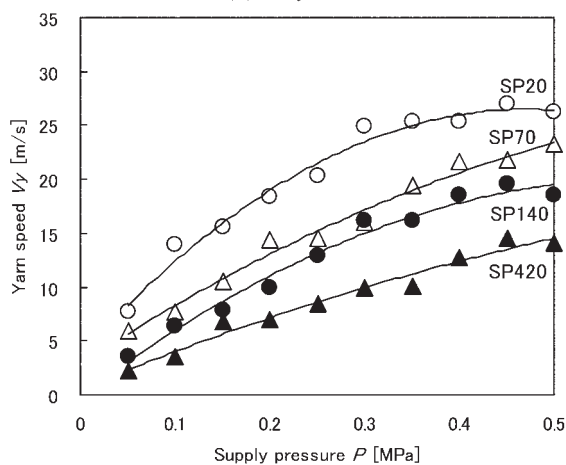
さらに、スパンデックス糸の場合、飛走速度はナイロン糸の場合と同様、線密度が小さい糸ほど空気の流れによって速くなっている。また、ナイロン糸の場合と同じように 0.3 MPa 前後を境にその増加率が減少することも確認された。円形噴流では、空気供給圧力が 0.2 MPa 以下ではやや不安定な傾向を示したが、スパンデックス糸は伸縮性や柔軟性が極めて高いので、空気供給圧力が低いと糸をうまく送り出すことができず、逆に空気供給圧力が高くなると今度は伸び縮みが激しくなって糸の操作が困難となる。したがって、スパンデック



(a) Nylon



(b) Polyester



(c) Spandex

Fig. 15 Yarn flying speed for various yarns in annular jet.

ス糸でもナイロン糸と同様、空気供給圧力を大きく増加させても、糸の飛走速度はそれほど上昇しないことが明らかとなった。

以上の結果より、糸の飛走速度は、空気供給圧力と密接に関係しているが、糸の種類によっては円形噴流と環状噴流でも異なり、糸の線密度にも大きく影響を受けることが確認された。

5.2 糸端の振動

エアジェットルームの緯入れでは、糸端をいかに速く織機の反対側まで飛ばすかが生産効率上の重要な鍵となるが、実際に糸を送っているのは多くのサブノズルであり、メインノズルは糸に張力を与えて糸を引き出す役割を担っている。従ってメインノズルは糸に十分な張力を与えることが第一の目的であり、続くサブノズルに確実に糸端を引き渡していくことが必要となる。そのためにはメインノズルから出た後の糸が、激しく振動したり、糸経路を大きく逸脱することは望ましくない。一方、噴流と吸込流を組み合わせる上下2本の中空スピンドルに糸を通す糸通し装置においても、スピンドル間にある150 mm～200 mmの空間を、芯糸であるスパンデックスが飛走し、次のスピンドル内に糸が吸い込まれるためには、糸端は大きく振動することなく一直線上の経路をたどることが望ましい。

そこで、管路を出た後の糸がどのような挙動を示すのかを観察した。Fig. 16のように、管路から出た後の糸の長さを100 mm, 200 mm, 300 mmとし、各空気供給圧力におけるいろいろな糸の端の横振動 W [mm] をストロボスコープとビデオカメラでモニタしながらスケールで測定した。

Fig. 17に、円形噴流下での線密度のほぼ等しいナイロン糸、ポリエステル糸、スパンデックス糸の空気供給圧力に対する糸端の振動を示す。ナイロン糸では、糸長さ100 mmの場合に横振動がやや小さいが、空気供給圧力による差は少ない。また、ポリエステル糸やスパンデックス糸でも、同様に空気供給圧力による横振動の変化は少ないと言える。糸種ごとに比較してみると、糸剛性が高く多少巻き癖の残るナイロン糸の横振動が最も大きく、ポリエステル糸、スパンデックス糸の順に糸が柔軟になるにつれ横振動は小さくなっていくことがわかる。Fig. 18に示す環状噴流や線密度の異なる糸の測定結果も含めて比較してみると、横振動はナイロン糸が最も大きく、糸の線密度（太さ）や長さとともに激しくなっていくが、ポリエステル糸では線密度や糸長さによる影響はわずかである。スパンデックス糸は、ナイロンやポリエステル糸に比べると振動そのものは小さいが、糸の線密度や長さによる影響が出やすい。

以上の結果より、管路を出た後の糸挙動、特に糸の横振動は、糸の種類によって多少傾向が異なり、ナイロン糸やスパンデックス糸は糸の線密度や長さの影響を受けやすいものの、ポリエステル糸は飛走速度の結果と同様に線密度の影響

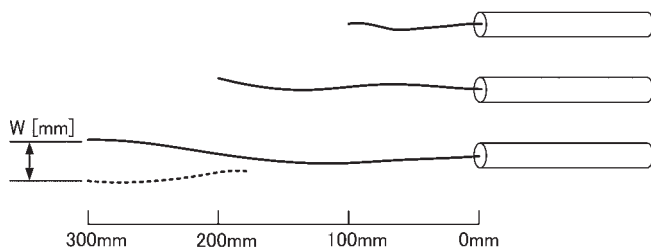
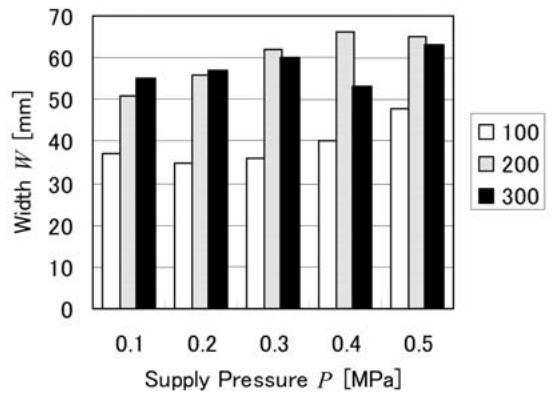
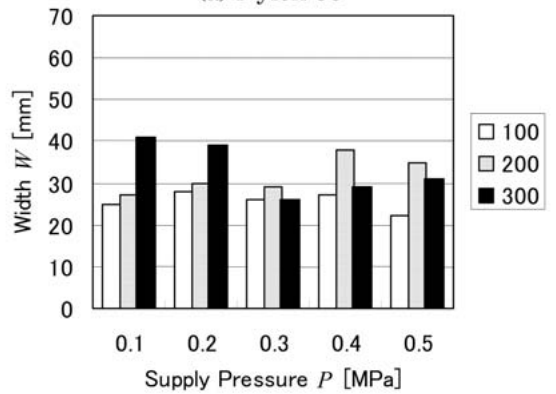


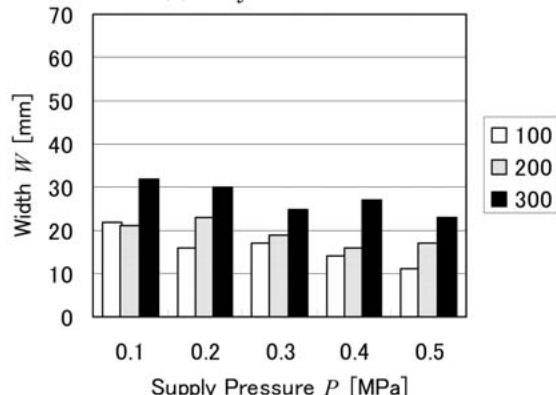
Fig. 16 Schematic diagram of measurement of vibration width at yarn end.



(a) Nylon 06



(b) Polyester 150D



(c) Spandex 140D

Fig. 17 Width of the vibration for various supply pressure in circular jet.

を受けにくいことがわかった。しかし、いずれの糸も空気供給圧力による変化は小さく円形噴流と環状噴流とで振動の大きさが変わることも確認された。実際に飛走している最中の糸の姿勢や挙動については、今後も継続的に検討していく予定である。

5.3 糸の損傷

ナイロン糸のように1本の繊維で構成される糸では特に問題とならないが、短繊維を紡績して作られる綿糸では強い空気が作用することにより糸がちぎれてしまう「吹き切れ」という現象がある。これまでの研究でも低速空気流における

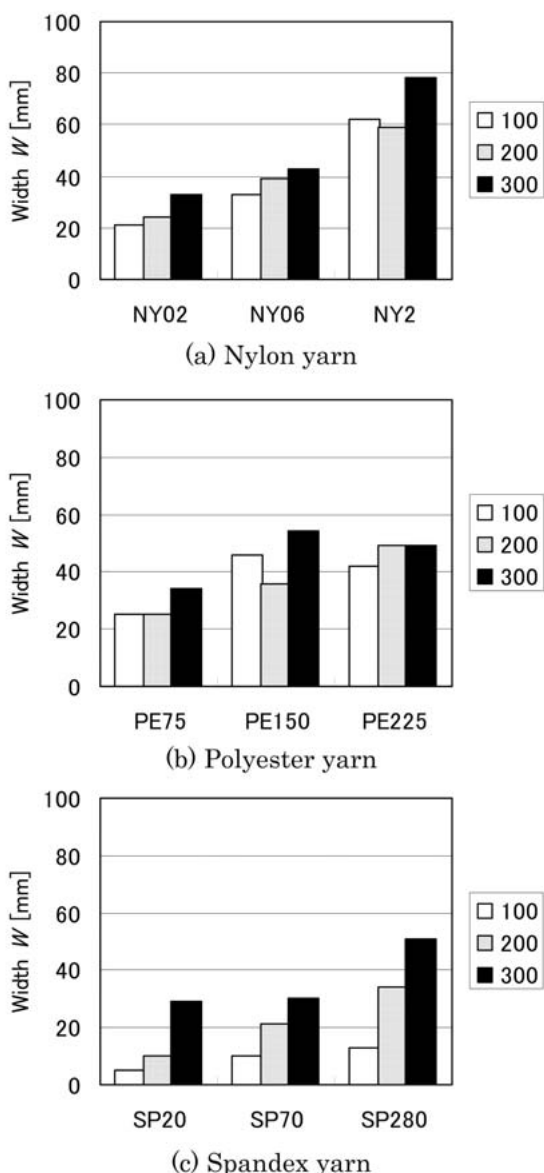


Fig. 18 Width of the vibration for various yarns in annular jet at $P = 0.3 \text{ MPa}$.

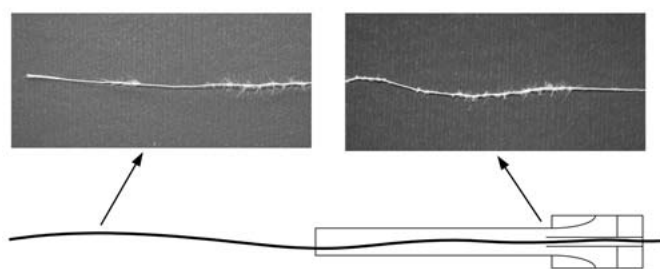


Fig. 19 Example of damage on polyester yarn.

綿糸の空気抗力データはあるが高速におけるデータがないのはこの理由による。また、いくつかの繊維を撚り合わせて作られるポリエステル糸などでは、糸に撚りをかけた後、熱で撚りを固定するヒートセットという処理が行われているが、噴流が直接作用したり管路内外での旋回流（渦流）が起こると、繊維と繊維の間に空気が入り込み糸が大きく広がったよ

うな状態となる「開織」や、ヒートセットされた撚りが戻って繊維同士が平行な状態となる「撚り戻り」などが観察される。Fig. 19は、エアジェットノズルにおいて空気供給圧力が 0.3 MPa を超える付近から観察された糸の損傷の様子（糸の中の短繊維がループ上に何本も飛び出した状態）である。瞬間的な空気流では起こらないが、空気流が持続的に作用するとこのような状態となり、特に管路内の噴流が作用する地点と管路出口付近で多発することが確認された。

さらに、非常に柔軟で伸縮性をもつスパンデックス糸も、ごくまれに繊維分離が起こる。ただ、スパンデックスにおいては、繊維分離よりも、激しい糸の伸縮による「絡み」や「ねじれ」といった現象の方が大きな問題となり、いったん糸が絡みだすと、その影響により空気抗力が増大し、さらに大きな伸縮が発生して、糸の損傷はどんどん激しくなる。

6. 結論

空気流を利用して糸を様々に操作するための糸と空気流の関係について検討を行った。円形噴流と環状噴流における空気流の状態を把握するためシミュレーションを行い、細い管路内での空気流の密度変化や速度変化の様子を明らかにした。また、圧縮性を考慮した領域に対する糸の空気抗力係数の整理方法を示し、前述のシミュレーションによる結果から糸の空気抗力を算出して、実験値と比較した。さらに、噴流を使って実際に糸を操作し、空気供給圧力や糸種、長さなど各種条件と操作性についての関係を示した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) シミュレーションから、円形噴流では、供給圧力が低い場合にはポテンシャルコアの影響は比較的早く消滅し、その後管路内で空気流の混合が起こるが、圧力が高くなると圧縮空気は管路内で不足膨張を起こし高密度のまま加速されない。一方、環状噴流では、コアの影響は比較的弱く、圧力が高くなっても空気流が管路内で膨張拡散し加速し続ける。
- (2) これまで、糸の空気抗力係数は、圧縮性を考慮しない領域については半径レイノルズ数で整理することができ、速度の増加とともに長さレイノルズ数を使った平板の値に近づくことが確認されていたが、噴流を使った実験から、空気流速が大きくなり圧縮性を考慮すべき流れになると、円形噴流、環状噴流に関係なく、長さレイノルズ数で整理できることがわかった。実験とシミュレーションを比較した結果、供給圧力と糸の空気抗力は傾向、値ともにほぼ一致した。従って、圧縮性を考慮すべき領域における空気抗力係数の考え方、およびシミュレーションの妥当性を示すことができた。
- (3) 円形噴流では、噴流が直接作用すると空気抗力は極端に増大する。また、円形噴流では空気供給圧力を上昇させていくと抗力変動が激しくなるが、環状噴流ではある程度圧力が上昇すると抗力変動の増加はおさまり、糸の張力は安定する。
- (4) 糸飛走速度の測定から、円形噴流と環状噴流いずれの場合もほとんどの糸種において、 0.3 MPa 程度を境に飛走速度の上昇傾向が鈍り、速度増加を期待して圧力を高くしてもそれほど効果が得られない。また、管路を出た後の糸端は、糸

の線密度や長さが大きくなると激しく振動するが、空気供給圧力による変化は少ない。さらに、空気供給圧力が上昇すると、ポリエステル糸では開織や撚り戻り、スパンデックス糸ではねじれや絡みなど、糸のトラブルが発生する。

謝 辞

本研究は平成15年度～17年度の科学研究費補助金基盤研究(C)(2)の交付を受けて実施されたものである。研究を進めるにあたり、CADによるモデル作成や数値シミュレーションの点で協力を頂いた金沢大学大学院（当時）の福島道雄君に感謝の意を表したい。

References

- [1] Hori J, Kinari T, Shintaku S (1997) J Text Mach Soc Japan, **50**, T24–T30
- [2] Shakouchi T (2004) “Jet Flow Engineering”, p141, Morikita Syuppan
- [3] Gould J, Smith FS (1980) J Textile Institute, **71**, 38–49
- [4] Shimizu J, Okui N, Tamai K (1983) Sen-i Gakkaishi, **39**, T398–T407
- [5] Glauert MB, Lighthill MJ (1958) Proc Royal Soc London, **230**, 188–203
- [6] White FM (1972) Trans ASME, **94**, series D, 200–206
- [7] Higuchi K, Kasahara Y (1962) J Text Mach Soc Japan, **15**, 335–339
- [8] Hatta K, Kinari T, Shintaku S, Iwaki N (1997) J Text Mach Soc Japan, **50**, T216–T223
- [9] Hatta K, Kinari T, Shintaku S (2003) J Text Mach Soc Japan, **56**, T109–T114
- [10] JSME (1986) “JSME Mechanical Engineer's Handbook, Fluid Mechanics”, **A5**, p65
- [11] Fukai S (1993) J Text Mach Soc Japan, **46**, T42–T49
- [12] Ishida M, Okajima A (1991) J Text Mach Soc Japan, **44**, T69–T80
- [13] Ishida M, Okajima A (1992) J Text Mach Soc Japan, **45**, T257–T269
- [14] Ishida M, Okajima A (1995) J Text Mach Soc Japan, **48**, T9–T19
- [15] Iwaki N, Kinari T, Yamazaki H (1988) J Text Mach Soc Japan, **41**, T145–T151
- [16] Yoshida S, Kawabata S, Hasegawa J (1987) J Text Mach Soc Japan, **40**, T99–T108
- [17] Shintani R, Okajima A (2002) J Text Mach Soc Japan, **55**, T59–T64
- [18] Shintani R, Okajima A (2002) J Text Mach Soc Japan, **55**, T73–T81