

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19560270
 研究課題名（和文） 空気流を利用した繊維操作のための挙動解析と最適化
 研究課題名（英文） Optimization and analysis of fiber behavior to operate
 by using airflow
 研究代表者
 八田 潔（HATTA KIYOSHI）
 石川工業高等専門学校・機械工学科・教授
 研究者番号：80280379

研究成果の概要（和文）：管路の組み合わせや空気供給圧力による管路内外の空気流変化を実験とシミュレーションから解析し、そこに糸を挿入した場合の速度測定や姿勢観察を行った。糸を損傷することなく適切に操作するには、空気流が急激な拡散を起こさず、減速しないで糸に抗力を与え続けることが必要である。また、圧力としては圧縮性の影響が出る直前の状態が一番効率的であり、糸の抗力が不足する場合でも、送り出し装置により推進力を与えることで飛走挙動を改善することができる。

研究成果の概要（英文）：The air-flow inside and outside the pipe was analyzed during experiment and simulation, because they change according to air supply pressure and pipe combination. Further, speed was measured and behavior was observed for flying yarn, when the yarn was inserted in the pipe. As a result, to operate appropriately without damaging the yarn, the air-flow shouldn't cause rapid diffusion or deceleration, and the air drag should be kept at a constant on the yarn. The most efficient pressure results from the condition before the compressibility effect occurs. Even when the air drag is insufficient, the flying behavior can be improved, if the yarn is inserted by a feed device.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2008年度	400,000	120,000	520,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：制御工学，繊維工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：繊維機械，流体力学，糸操作，自動化・省力化

1. 研究開始当初の背景

石川県の代表的な地場産業として繊維産業があげられるが、撚糸・カバリングといった糸加工の分野は、経済的な理由から自動化装置の導入や大規模な設備更新は行えない状況にある。加えて、最近では作業者の高齢

化や慢性的な求人難が大きな問題ともなっており、糸加工を行う準備作業の自動化要求が高まってきた。研究者はこれまで、糸加工の各種準備作業に着目し、人間の行う作業を機械が代わりに行う自律式作業システムの開発に取り組んできた。さらに、これらの自

動化装置をすべて搭載し、工場内を移動して作業を繰り返す自律式作業台車も同時に開発し、その走行制御方法についても検討してきた。本研究テーマは、その中心的機能である"空気流による糸操作"の成功率向上・動力軽減などの要求にも応えるためのものである。

繊維工学の分野では古くから糸構造や空気抵抗に関する研究が行われている。糸の空気摩擦抗力については1960年代から80年代にかけて多くの研究が行われたが、ほとんどが吸い込み流を使った最大100m/s程度までの解析で、流れ状態も層流に対するものが多い。1990年代に入るとエアジェットルームの登場に伴い、拘束噴流・自由噴流に対する糸の張力変化などの報告が増えてきたが、いずれも圧縮空気の供給圧力と糸張力の関係で整理したものである。この場合、空気供給圧力が一定でも、出口までの配管の状況や空気の作用形態によって空気流速は一定ではなく、実験あるいは現場における再現性は低いと言える。そこで研究者は、平成15~17年度の科学研究費の補助を受け、流れの状態や糸の空気抗力をそれぞれ空気流速で整理し、管路内における空気流密度や速度の変化と、噴流下における糸の空気摩擦抗力係数の考え方を示してきた。

次の段階としては、空気流によって糸を飛ばしたり、適正な張力を付加したり、あるいは糸端を保持したりするなど「糸の操作」を目指すものである。また、機械的な方法による糸の移動・検出あるいは手による操作が困難な場合に、自動化の手段として空気流を利用することも含まれる。基礎データをもとに、実際の糸操作を行う上での条件や、糸が広い空間中を飛走する時の挙動、吹き出しと吸い込みなど空気流を組み合わせることによって起こる糸張力の変化、糸操作の容易性と確実性などについて調べていくことで、繊維工場における自動化が推進されるとともに、システムの最適化・動力軽減などの省力化も図られるものと考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、「糸と空気流の関係」について広範囲かつ系統的な理論を確立し、糸に空気流が作用する際の抵抗力や、逆に空気流を使ってさまざまに糸を操作するための技術的な基礎資料を提供しようとするものである。そのためには、細い管路内に圧縮空気を噴出させた場合の空気流速や流れの変化を把握することに始まり、これに糸が挿入されたときの挙動や空気抗力の解析が必要となる。具体的には、直径の異なる吹き出し口と管路を様々に組み合わせた時、あるいは吹き出し流の作用形態の違いによる糸抗力の変化、管路長さや糸長さの影響、繊維の本数や糸の構

造・毛羽・伸縮性が空気抗力係数に及ぼす影響などを明らかにし、糸の空気抗力の算定方法を確立していかなければならない。あわせて、空気流を利用して糸をさまざまに操作していくためには、いろいろな条件の下で糸が挿入された場合の糸にかかる張力、糸飛走速度や飛走中の糸姿勢についても検討していく必要がある。

本研究課題では、これまで蓄積してきた基礎データを活用するとともに、現場で実際に使われているような条件を再現して、吹き出し管を出た後の空気流の変化と糸挙動の解析、吹き出し流と吸い込み流を組み合わせた時の糸操作性の関係などについて、空気抗力と糸挙動の観点から、空気流シミュレーションと実験、糸挙動観察で明らかにしていく。

3. 研究の方法

本研究の糸操作に関する検討で、解析・実験の対象となる領域は大きく分けて3つある。図3-1において、管路内に噴流が作用する領域A、管路を出て次の管路へと糸が大気中を飛走する領域B、そして吸い込み流により糸端が次の管路へと吸い込まれて保持される領域Cである。このうち、領域Aに吹き込まれる噴流の作用形態は、図3-2のように噴流が中心から作用する円形噴流と外側から作用する環状噴流とに分けられ、これまでの研究から管路内での空気流密度や速度の変化、その中に糸が挿入された時の糸の空気抗力などの検討がすでに終わっている。本研究課題では、円形噴流と環状噴流のもとで、糸が大気中へ出た後の領域Bにおける空気流の変化(膨張拡散・混合・旋回など)と糸の飛走挙動(飛走速度、振動・姿勢)などについて検討を加えていく。コンピュータによる流れのシミュレーションと実験による空気流速の測定、糸の空気抗力の測定、高速度カメラによる糸の観察などを併せ、領域Bにおける糸と空気流の関係を明らかにしていく。

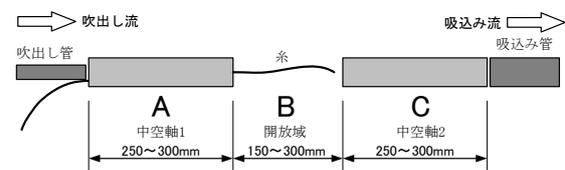


図3-1 糸飛走および糸端保持

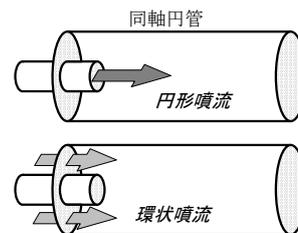


図3-2 吹き出し流の形態

本研究において、計測器を挿入することのできない部分(例えば細い管路内)の解析、あるいは計測器の測定限界を超えている部分(圧縮性を考慮した空気流速や衝撃波の発生)の解析にコンピュータシミュレーションを使用する。実験では、外部の圧力変化や糸の全張力しか測定できないのに対し、概略とはいえ空気流の状態が把握できることは解析の大きな助けとなる。また、実際の糸操作が空気供給圧力や配管の状態、取り扱う糸の種類と太さ・長さ、その他いろいろな条件が重なった状態で行われるため、再現性や他条件への適用が非常に困難であるのに対し、シミュレーションではそれぞれの条件が確定すれば基礎的なデータを組み合わせて、おおよその抗力や挙動が予測できる。このような理由から、コンピュータによる解析を行い、それと実験による測定データを比較検討して、解析の妥当性を検証していく。

その後、実際に糸を操作する際の空気抗力や糸の根元に作用する全張力などの測定を行っていく。糸が飛走する理想的な姿は、糸端が糸の根元を引っ張るように一直線に進むものであるが、管路から大気中へ開放された空気流の減速・乱れ・旋回などの影響により、そのような形にはならない。糸を管路内にそのまま挿入しても、糸は踊るように振動・旋回・湾曲をしながら進んでいく。あるいは無制限に糸が供給されれば、糸端は吸い込み管路入口を通過し、はるか前方へと進んでしまう。次の管路の入口へ糸端が確実に到達するためには、送られる糸長さの抑制と糸根元への適度な張力が必要となる。この点を考慮し、実験では空気流の条件と糸送り条件(速度・長さ)を変化させた場合の糸の速度や挙動を観察していく。

解析および実験に使用する管路の組み合わせとしては、円形噴流として、直径 2.5mm の吹き出し口と 3.5mm の管路(以後 25-35 と表記)、直径 4mm の吹き出し口と 6mm の管路(以後 40-60)、ともに長さは 300mm と、環状噴流として、直径 2.5mm の導糸管と 4mm で長さ 150mm の加速管をもつエアジェットノズル(以後 AJ)の 3 種類を使用した。

4. 研究成果

(1)シミュレーション

管路内外における空気流は、圧縮性を考慮する必要があり、速度変化とともに密度変化も考慮しなければならない。当然、実験による測定でも、両者を分離して計測することは困難であり、計測器の挿入や測定限界という点においても問題は多い。そこで、流れの大きな変化を把握するためにも、シミュレーションは極めて有効な手段となる。空気流解析には、PHOENICS(CHAM 社)というシミュレーションソフトを使用した。これは有限体積法

により、質量・運動量・エネルギーなどの保存式を 1~3 次空間において定常または非定常計算で解いていく汎用熱流体解析ソフトである。

円形噴流の解析を行なうため、実際と同様のシミュレーションモデルを作成した。具体的には、吹き出し口と管路に相当する物理的なオブジェクトを配置し、管路外の開放領域として軸方向・半径方向に十分広い空間を取った。そして、円筒座標系を使用し、周方向に 1、半径方向に 34、軸方向に 246 のメッシュを切った。境界条件としては、圧縮空気が流入する部分に inlet(0.1~0.45MPa の圧力)を、開放領域の末端に outlet(大気圧)の条件をそれぞれ与えた。また、空気は理想気体とし、解析モデルには乱流 k-ε モデルを使用した。計算終了は十分に収束することが条件となるが、事前の試行結果から計算回数を目安を 20000 回とした。

環状噴流において、エアジェットノズルの形状は非常に複雑であるため、モデルの作成は困難である。しかし、事前の解析により、モデルを簡略化しても同等の結果が得られることが分かったため、環状噴流では実験に対して簡略化したモデルを使用した。設定は円形噴流の場合と同一とした。

シミュレーション結果の一例として、40-60 で空気供給圧力を変化させた時の変化を図 4-1 に、また管路出口での空気流速がほぼ等しくなる 40-60(0.4MPa)と AJ(0.2MPa)の空気流の比較を図 4-2 に示す。

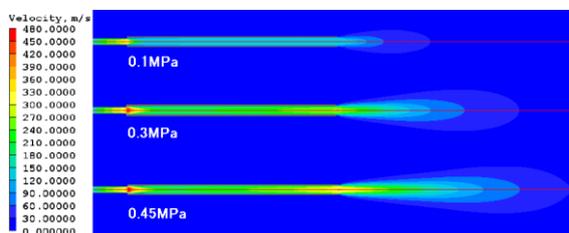


図 4-1 40-60 シミュレーション解析

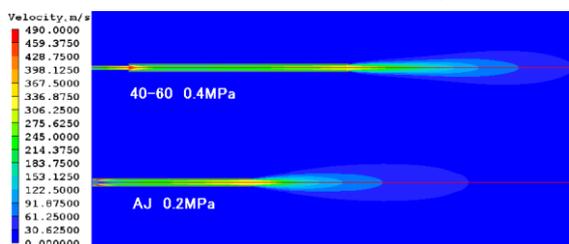


図 4-2 管路形態の違いによる比較

図 4-1 より、管路内の吹き出し口には高速度高密度のポテンシャルコアが存在し、空気流は管路を出たあと楕円に近い形で拡散をしていくことがわかる。同様の解析から、40-60 においては 0.3MPa、25-35 や AJ においては 0.2MPa 辺りから管路内の空気は圧縮性を伴うようになり、管路出口付近において急激な

拡散・膨張の起きることが明らかとなった。一方、図 4-2 では噴流形態が異なるにもかかわらず空気流拡散は酷似している。これに加え 25-35 と 40-60 との比較により、管路外の空気流拡散は、噴流形態より管径による影響のほうが大きく、同様の圧力であれば管径が太くなるにつれて、半径方向への広がりが増すとともに、軸方向の速度減少が緩やかになる。

(2) 空気流速測定実験

管路形態および各圧力における開放領域での空気流変化を計測し、シミュレーションの解析結果と比較した。計測は、ホットフィルムプローブを装着した熱線流速計(カノマックス社)を使用し、管路出口中心を基準に軸方向へ 300mm、半径方向へ 60mm 移動させて行った。測定から、管路を出た後の空気流速は、圧力が高く、管路が細いときのほうが大きくなり、その速度は管路出口をピークに、下流にいくに従って急激に減少することがわかった。また、円形噴流と環状噴流を比較すると、空気流の拡散や減速の様子は酷似しているが、空気流速は環状噴流の方が大きくなることもわかった。さらに、管径が太くなると、空気流が広がるだけでなく、絶対的な流量も多くなるので、下流まで空気流の影響が及ぶようになることが確認できた。図 4-3 に 40-60、0.3MPa の時のシミュレーションと実測値を比較した結果を示す。これより、両者は流速および空気の広がりなども非常に酷似しており、シミュレーションの妥当性が確認できたと言える。

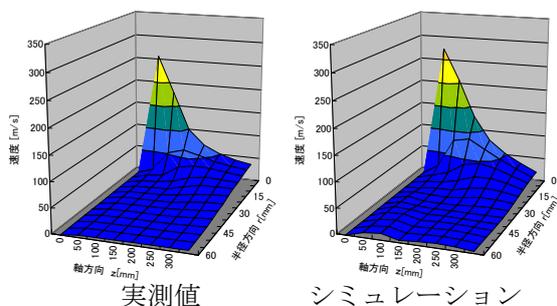


図 4-3 実験とシミュレーションによる空気流速の比較(40-60、0.3MPa)

(3) 試料糸

次に、それぞれの管路と圧力条件の下で、実際に糸を通して飛走させる実験を行う。使用した糸の直径および線密度を表 4-1 に示す。モノフィラメント糸とは、1本の繊維からなる糸をさし、ここではナイロン糸を使用する。マルチフィラメント糸とは数本~数十本の繊維を撚り合わせて1本の糸としたものであり、ここではポリエステル糸を 1000t/m 加撚し熱固定したものを使用した。外径が同じでもモノフィラメント糸のほうが、綿密度が大

きいため重くて剛性も高く、反対にマルチフィラメント糸は柔軟性を有している。

表 4-1 実験試料糸

形式	糸種	呼び	線密度 (dtex)	外径 (mm)
モノフィラメント糸	ナイロン	02	55	0.074
		06	170	0.128
		1	267	0.165
マルチフィラメント糸	ポリエステル (1000t/m)	75D	83	0.098
		150D	167	0.147
		225D	250	0.179

(4) 空気抗力測定

それぞれの管路と圧力条件の下で糸を通し、糸根元における張力(抗力の総和)を微小荷重ロードセル(共和工業社)で測定した。糸の長さは 5cm 間隔で、30cm までが管路内、最長 60cm までとした。測定結果のうち、25-35、ナイロン 1 号の例を図 4-4 に示す。これより、低圧時には流量が少なく空気の圧縮性も影響しないため、糸の空気抗力は糸長さの増加とともに緩やかに上昇していくが、高圧になると、管路出口で急拡散・減速が起こるので、糸長さが増加しても空気抗力の上昇は認められないことが確認できる。また、管路外の空気流が糸の空気抗力に影響を及ぼすのは、高圧時にポテンシャルコアの影響する管路出口から 5cm 程度($l=35\text{cm}$)と非常に短い区間であり、それより下流に存在する糸は全体の張力に影響しないことがわかった。

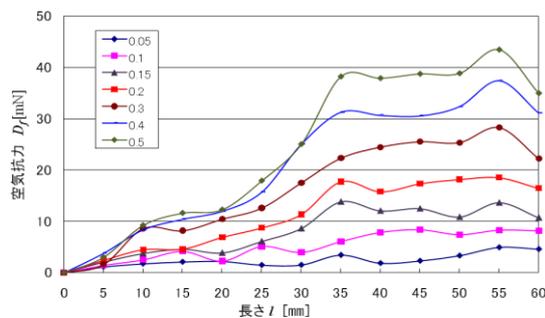


図 4-4 糸長さに伴う空気抗力の変化 (25-35, Nylon 1 号)

(5) 飛走速度と挙動観察

ここでは、管路形態、圧力条件を変化させ、いろいろな糸を飛走させた場合の糸の飛走速度とその挙動について検討を加えた。図 4-5 はその実験装置の概略である。実験は縦方向と横方向について行ったが、長さ 300mm の間隔でレーザーエアセンサ(キーエンス社)を設置し、糸がこの区間を通過する時間をシーケンサ(同社)で測定して、糸速度を算出した。同時に、高速度カメラ(Photron 社)を使って 2000fps のスピードで糸の飛走挙動を撮影した。

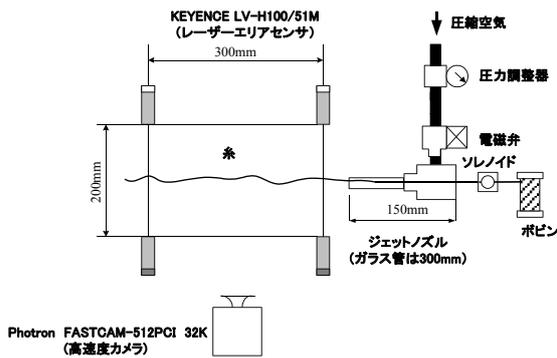
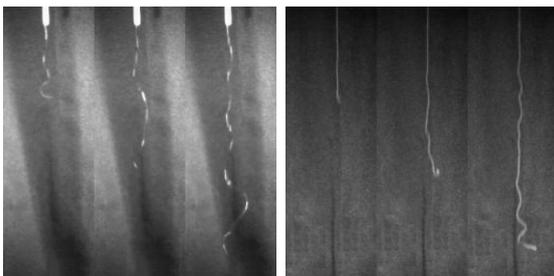


図 4-5 糸の飛走速度測定および挙動撮影装置（水平方向）

糸の飛走している様子を図 4-6 に示す。これは、糸を垂直に飛走させたものであるが、ポリエステル糸のほうが、ナイロン糸よりまっすぐに飛んでいることがわかる。特にナイロン糸の太いものでは、糸が旋回したり踊るような挙動が観察された。また、本実験の対象ではないが、伸縮性をもつスパンデックス糸を同様に飛ばしてみると、横方向への振動は少ないが、軸方向への伸縮が激しく、糸の挙動としては安定しないと言える。

糸の飛走挙動をいくつかに分けてみると、図 4-7 のように分類される。糸の剛性が低く糸が空気流にうまく乗ると比較的まっすぐな形となるが、剛性が高い糸では、糸端が旋回したり踊るような挙動が見られる。また、剛性の低い糸でも空気供給圧力が高くなり、空気流の上流と下流で速度差が激しくなると、糸は後ろから押し出されるような形となって振動を起こすことが多い。



(a) ナイロン糸 (b) ポリエステル糸
図 4-6 糸飛走の様子

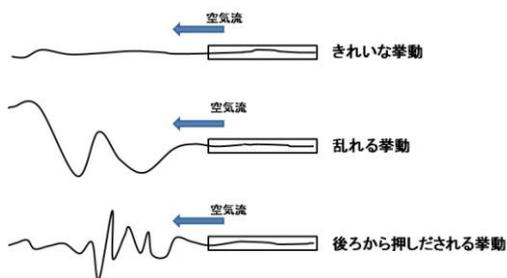
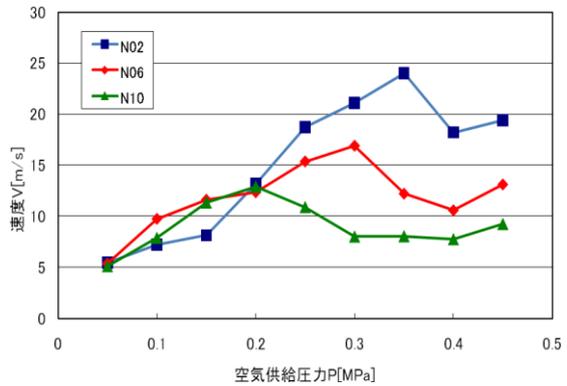


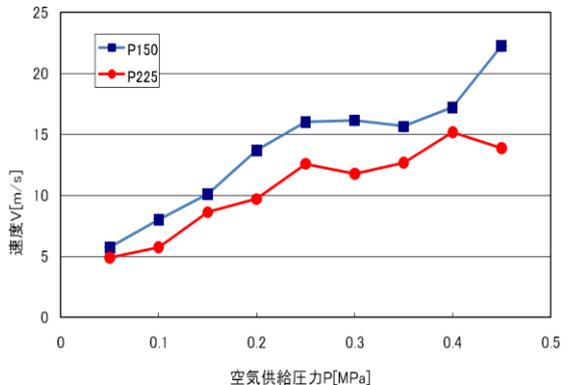
図 4-7 糸の飛走挙動の例

一方、糸を水平方向に飛ばすと、太い糸の場合は糸の重みで先端が沈むような現象が見られ、管壁に糸が接触するなどの問題も発生する。水平の場合は垂直の時に比べ、糸の挙動は安定しにくくなるので、飛走方向も重要なパラメータとなることが確認された。

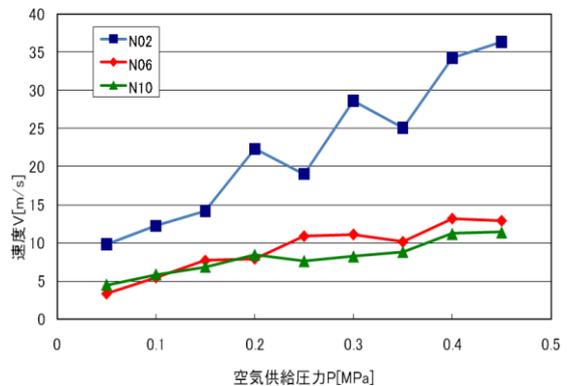
25-35 と AJ における各種糸の飛走速度を図 4-8 に示す。25-35 のナイロン糸では、細くて軽い 02 号は比較的空気流に乗りやすいが、太い糸も含め、ある圧力をピークに糸速度は上昇しなくなる。これは、圧力の上昇とともに空気流の拡散や乱れが強くなるとともに、剛性の高い太いナイロン糸では、糸が激しく振動し踊るような挙動となることが原因とわかった。



(a) 25-35 ナイロン糸



(b) 25-35 ポリエステル糸



(c) AJ ナイロン糸

図 4-8 300mm 区間を通過する糸の飛走速度

これに対し、ポリエステル糸では、圧力の上昇とともに糸速度も増し、その柔軟性から空気流に乗りやすいことが確認された。しかし、圧力を上昇させれば、糸の飛走速度上昇と引き替えに、糸振動の増加、管壁への糸の張り付き、ポリエステル糸では開織などのトラブルも発生しやすくなる。さらに、糸速度に頭打ちの傾向が見られたナイロン糸でも、管路を環状噴流(吹き出し流が外周から作用する)のAJに変えると、比較的糸速度が上昇し続けることから、円形噴流よりも環状噴流のほうが空気流、糸挙動ともに安定することがわかった。管路太さによる違いを比較すると、太い管路の場合、管路出口での糸の初期速度は細い時より遅いが、空気流量が多く下流まで確実に空気流が作用するので、糸の飛走速度は持続し、結果的として糸の到達時間は細いときより速くなる。

(6)糸送出制御

これまでの実験では、一定量の糸をあらかじめスプールしておき、空気流の力で一気に解放する「自由飛走」を行ってきたが、空気流圧力が低くて推進力が足りない場合や、糸が飛び過ぎて後ろから押すような形となる場合には、糸の送り出し制御を行うことで、糸挙動の改善が行える可能性がある。そこで、糸をウレタン製のローラーではさみ、スピードコントロールモータ(オリエンタルモータ社)を使用して速度制御した。本装置の糸の送出速度は最大 8m/s なので、自由飛走時の糸速度から見れば、かなり遅いものである。

高い圧力の時に見られた、糸が後ろから押し出されるような現象に対しては、糸の送出を抑制し、わずかに張力を与え続けることで、自由飛走させた場合より糸挙動の乱れは大きく改善された。現時点では、糸の送出速度に限界があるため非常に速いものには対応できないが、より高い糸速に追従できるようになれば、どの条件下でも改善が見込まれる。

一方、太くて重い糸を使用した場合や、糸根元の張力が強すぎる場合には、糸を補助的に送り出すことで、糸先端が踊るような現象は改善された。空気圧力が高くて、糸速が遅い場合はこの補助的な送出は挙動改善につながるが、糸速が送出速度を大きく上回るようになると、結局糸を拘束した状態となり挙動は乱れてしまう。このため、糸の飛走を補助する場合には、その条件に応じた回転数に設定する必要がある。

(7)結論

管路の組み合わせや空気供給圧力による管路内外の空気流変化を実験とシミュレーションから解析し、そこに糸を挿入した場合の抗力や速度を測定するとともに挙動観察を行って最適条件を検討した。糸を素早く飛

ばそうと空気供給圧力を高くすれば、糸に作用する抗力とともに糸の飛走速度はある程度上昇するが、糸が振動したり湾曲するなどの影響により、糸の操作性そのものは向上せず、結果的に糸の損傷へとつながっていく。圧力の高い流れでは、管路から出た後の空気流が糸に影響を及ぼすのは、ポテンシャルコアが作用しているわずかな領域のみであり、大気開放された下流の糸は糸全体の抗力にほとんど寄与していない。従って、空気流が安定し急激な拡散や減速が起こらないこと、空気流量が多く下流の糸にまで十分に抗力を与え続けられることなどが糸操作に適した空気流の条件としてあげられる。また、供給圧力としては、圧縮性の影響が出る直前の状態が一番効率的であり、低い圧力で糸の推進力が不足する場合でも、送り出し装置などで糸に補助的な力を与えることで飛走挙動を改善することができる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

①森田豊,堀純也,八田潔: 空気流を組み合わせた糸の操作に関する研究~大気開放領域の空気流解析~, 石川高専研究紀要, 査読有, 第41号, p1-6, (2009)

〔学会発表〕(計3件)

①北川陽介,八田潔: 噴流下における糸の飛走挙動解析と操作性の向上, 日本繊維機械学会北陸支部発表会(H21.12.11 富山)

②八田潔, 空気流を利用した糸の搬送技術, 日本繊維機械学会北陸支部講演会(H21.4.18 金沢)

③森田豊,北川陽介,八田潔: 同軸噴流を利用した糸飛走の挙動~大気開放領域の空気流解析~, 日本繊維機械学会北陸支部発表会(H20.12.12 金沢)

6. 研究組織

(1)研究代表者

八田 潔 (HATTA Kiyoshi)

石川工業高等専門学校・機械工学科・教授
研究者番号: 80280379

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし