

Technical Report

Detection of Yarn Passage by Air Pressure Variation in a Pipe

Kiyoshi Hatta*, Toshiyasu Kinari** and Sukenori Shintaku**

Abstract

The yarn detecting system is developed using the air pressure variation caused by a yarn running through a pipe. The optimum detecting conditions for several kinds of yarns are examined. The processing technique is also investigated to judge a yarn passing through a pipe at higher degree of accuracy. The system is composed of a yarn detecting block, a pressure sensor and a personal computer. It can stably detect even 20 D spandex yarn that was impossible to be detected. Results obtained are as follows:

- (1) Pressure variation increases with the area which a yarn occupies in a pipe. For example, larger pressure variations are observed when a yarn has larger diameter, more filaments separate and a yarn has more fuzz. Spandex yarn which has large flexibility shows much larger pressure variation because it flows into a branch pipe. It also shows larger pressure oscillation caused by its extension and/or compression.
- (2) The supplied pressure to an ejector has little effect on the pressure variation except for a spandex yarn. The pressure variations are also emphasized when a branch pipe is tilted in the yarn entrance direction.
- (3) Pressure variations must be distinguished from the oscillations of the air flow in a pipe, because the pressure variation caused by a yarn passing through a pipe is very small. In the yarn detecting system, low-pass filter circuits and average processing with a personal computer are useful for increasing the accuracy to judge a yarn passing through a pipe.

Key Words : Yarn detecting system, Suction flow, Pressure variation, Automation for textile machinery

(Received Jan. 26, 1999)

(Accepted for Publication Aug. 9, 1999)

圧力変化を利用した糸の管通過検出

八田 潔*, 喜成 年泰**, 新宅 救徳**

1. 緒 言

この10数年、繊維機械は高速・大量生産化のための性能向上が実現され、生産の拠点はより人件費の安い海外へと移っていった。この結果、日本国内では高い技術が要求される製品や付加価値の高い製品の生産が中心となり、従来型製品を生産する中小繊維工場では、苦しい操業をしいられる時期が続いてきた。

紡績機やワインダーなどについて、大手繊維工場ではオートドップ方式と呼ばれる自動化装置がすでに導入され、糸の交換や製品の回収・移動など工場全体規模の自動化システムが稼働している。しか

し、機械本体があまり高価でなく改造もままならない撚糸機などの分野では、部分的な自動化が精一杯の状況にある。ただ、このような機械で生産される製品に需要がないわけではなく、消費者ニーズの多様化に伴い、カバード糸などの複合繊維の需要は増加の傾向にある。特に細いスパンデックス糸を芯糸にナイロン糸などをカバーした糸は、ストッキングなどの良質な材料として重要な位置を占めている。

これまで筆者らは、ガバリングマシンを対象としたカバード糸製造時における各種準備作業の自動化^{1)~7)}を試みてきた。このシステムの自動芯糸通し装置は、実験では100%に近い糸通し成功率を示したが、1台につき数百回にも及ぶ実機への適用を考

* Member, Ishikawa National College of Technology, 会員, 石川工業高等専門学校, Tsubata, Ishikawa, 石川県津幡町

** Member, Faculty of Engineering, Kanazawa University, 会員, 金沢大学工学部, Kodatsuno, Kanazawa, 金沢市小立野

えると、糸通しをより確実に行うとともに、糸通しの成否判定、また失敗時に自動で対処できる機構が必要であると考えられる。その1つとして筆者らは、管内流れに置かれた糸が流れを乱すことを利用した芯糸検出装置⁹⁾の提案と実用性の検証を行った。この結果、管内への糸の挿入とともにその管内圧力の真空度は増すが、糸が通過してしまうと糸が挿入される前より高い圧力になっていくことが確認された。しかし結論としては、この現象は複雑であり、流れ学的な解析までには至らなかった。

本報では、圧力変化を利用して管内の糸通過を検出する装置について、その動作原理を説明するとともに、各種糸検出を行う際の最適条件の検討を行う。また、この装置によって検出可能な糸の種類・太さの限界を調べるとともに、得られた圧力変化の処理方法についても検討を行う。このことは、前述の自動芯糸通し装置のみならず、最近のスパンデックス糸の製織に対応したエアジェットルームで使用されている吸引形ストレッチノズル⁸⁾や、あるいは吸い込み流や管内流を利用した各種繊維機械にも応用できると考えられる。

2. 糸の検出

2.1 よこ糸フィーラ

糸を検出するセンサとしては、ジェットルームのよこ糸検出に使われるよこ糸フィーラ⁹⁾があげられる。よこ糸フィーラは糸検出の方法や処理の仕方によって様々なものが開発されているが、主な形式としては、電気式、光電式、プリズム式、圧電式、機械式などがある。しかし、これらは糸が常に存在する状態で、糸切れを検知して作動するという使い方が一般的であり、糸の道筋も大きく変化しないということが利用の条件となる。

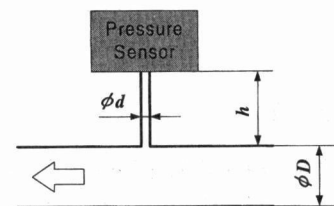
しかし、スパンデックス糸は、非常に細くて見えにくく、断面形状¹⁰⁾が円形ではなく、その形状は長さ方向にも変化している。また、非常にしなやかで、伸縮性が高いなどの特性を持つため扱いにくく、精度の低い光学系、張力を利用する機械系での検出が困難である。さらに、管路内を糸が走行した場合も、スパンデックス糸は他の糸に見られないほど激しく振動・伸縮を繰り返すため、定位置での検出は極めて困難である。

2.2 糸の通過による管内圧力の変化

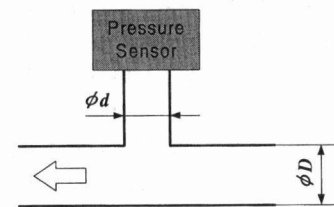
一般に管路内の静圧を測定¹¹⁾するには、管路の壁面に設けた圧力孔によるか、管路内に挿入された静圧管を用いることが多い。しかし、本報で示すシステムのように管路内を糸が通過するなど、静圧管が糸の通過の妨げとなる場合には管を挿入する方法は使えないため、壁面に圧力孔を設け、その圧力変化を計測する方法がとられる。

静圧を測定する際には、図1(a)のように、直径 D の主管路の流れを乱すことのないよう十分に小さい直径 d の圧力孔が設けられなければならない。このとき工作の際のかえりなども乱れの原因となるので十分注意が必要である。また、圧力孔の深さ h による検出圧力の誤差も考慮に入れなければならないが、 $h/d=1.5$ 以上でこの誤差は飽和する¹²⁾ことが報告されている。

一方、このシステムに使用される糸検出ブロックの寸法は、図1(b)における $D=1.5\text{mm}$ 、 $d=1\text{mm}$ が標準である。従って図(a)の場合のように、圧力孔が管路の流れを乱さない、あるいは管路に影響しないとは考えられない。筆者らが $D=10\text{mm}$ のスケールモデルを使って行った $d/D=0.1$ と $d/D=0.6$ の事前の比較実験においても、検出圧力にわずかな差が認められると同時に、図(b)の場合は図(a)に比べ非常に大きな圧力変動(振動)が観測された。このように2つのよく似た直径をもつ管が接続され



(a) Static pressure tap



(b) Dividing junction or combining junction

Fig. 1 Difference between static pressure tap and dividing junction

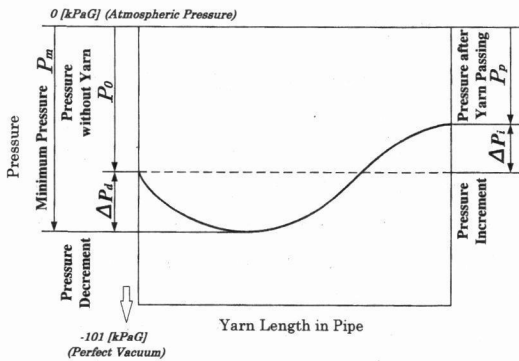


Fig. 2 Pressure variation during insertion of yarn into pipe (Measured in branch pipe in the middle of main pipe)

ている管路を分岐管あるいは合流管¹³⁾という。ただ、一般的な分岐管と様式が多少異なるのは、分岐した管路は閉塞された圧力センサへと接続されているため、空気流の流れ（出入り）が少ないことにある。このような場合、圧力センサによって検出される圧力は主管路の静圧とは異なるが、その差はわずかなのである^{14)~17)}。

筆者らは既報⁴⁾で、中央に分岐管が存在する管路に吸い込み流を作用させたとき、糸の挿入とともに圧力センサの検出圧力は図2のように変化することを確認した。糸が次第に進行したときの検出圧力は、糸が存在しないときの圧力 P_0 より圧力が徐々に小さくなり、分岐管付近に達したところで最小値 P_m を示す。しかし、糸がさらに進行していくと、圧力は元の値に戻っていき、糸端が管路を出る長さでは圧力は逆に糸が挿入される前より大きな値 P_p となる。以降、糸が存在しないときの圧力を基準に、圧力の減少分を ΔP_d 、増加分を ΔP_i と呼ぶことにする。

3. 実験

3.1 実験装置

糸検出部は、従来の研究⁴⁾に従い、図3のように主管直径1.5mm、分岐管直径1mmの亚克力製ブロックとした。また、主管直径の変化による検出圧力の変化を調べるため、他の寸法を変えることなく、主管直径を1mmおよび2mmと変化させたものも製作・使用した。

装置の構成を図4に示す。圧縮空気は、コンプレッサより管路を経由し、圧力調整器 (SMC AR2000

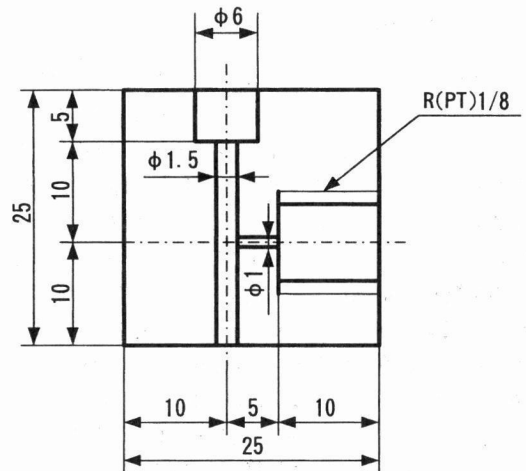


Fig. 3 Yarn detecting block (Standard type)

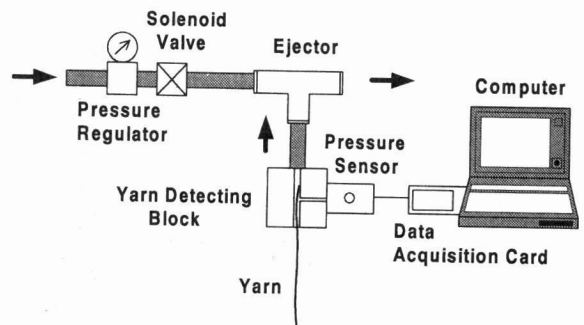


Fig. 4 Yarn detecting system and piping of compressed air

−02) と電磁弁 (SMC VX2120) を通ってエゼクタ (SMC ZH07L) へと供給される。分岐管の先にはダイヤフラム式の圧力センサ (OMRON E8CB-CN0C 2B) が接続され、そこで検出された圧力はセンサ内で1~5Vの電圧信号に変換され、データ収集カード (KEYENCE NR-110) を経由してパソコン (NEC PC-9821Nw133) へと入力される。

3.2 試料

本実験に使用した糸の直径を表1に示す。糸種やその構造による違いを考える上で、針金は剛体、ナイロンモノフィラメント糸は少し柔らかく振動が許されるもの、スパンデックス糸は振動に加えて伸縮するものを想定している。また、ポリエステル糸はマルチフィラメント糸の代表で加燃による糸のしまりの影響を、綿糸は毛羽の存在による影響を調べるために試料に加えた。具体的には、針金を3種類、ナイロン製釣糸の015号～6号を6種類、綿糸を2種類、スパンデックス糸の20D～420Dを6種類使用した。また、ポリエステル糸は50D～200Dの糸を、100t/mあるいは500t/mで加燃・熱固定したものの6種類を使用した。なお、表中の糸の直径は、ナイロン糸がメーカーの表示値、針金がマイクロメータによる計測値、ポリエステル糸と綿糸が万能投影器での計測値である。また、スパンデックス糸は、断面が円形でないことから、マイクロスコープ（KEYENCE VH5900）で断面撮影し、「単繊維の凹凸を無視しできるだけスムーズに外形を包絡した糸周囲長さ」を直径に換算した¹⁰⁾ものである。

3.3 実験方法

エゼクタに供給される空気圧を、圧力調整器により、あらかじめ0.4MPaG（4kgf/cm²G）に固定し、標準の糸検出ブロック（主管直径1.5mm）に糸がない状態での圧力 P_0 を測定する。次に、試料糸をブロックの主管の中へ5mm間隔で20mm（スパンデックス糸については2mm間隔で22mm）まで挿入していき、それぞれの圧力値、最小値 P_m および最終値 P_e の圧力を測定していく。各位置での圧力は、通常サンプリング周波数1kHzで0.48秒間記録され、その間の平均値を検出圧力とした。また、糸の振動状態や検出圧力の細かい変動を見る場合は、サンプリング周波数を10kHzに上げて記録した。実験は、以上の条件を基準に、エゼクタへの供給圧力、糸検出ブロックの主管直径を変えたものなどについても実施した。

4. 結果と考察

4.1 糸の直径

糸検出ブロック内に糸を挿入した際の検出圧力の

Table 1 Diameter of test samples

Yarn type	Detail	Count (tex)	Diameter (mm)
Wire	(No.1)	-	0.17
	(No.2)	-	0.28
	(No.3)	-	0.52
Nylon monofilament	015	3.8	0.065
	04	10.8	0.11
	1	24.4	0.165
	2	49.4	0.235
	4	97.5	0.33
	6	146.9	0.405
Spandex	20D	2.2	0.06
	30D	3.3	0.10
	70D	7.7	0.15
	140D	15.6	0.25
	280D	31.1	0.35
	420D	46.7	0.45
Polyester	50D-100t/m	5.6	0.08
	50D-500t/m	5.6	0.075
	100D-100t/m	11.1	0.12
	100D-500t/m	11.1	0.11
	200D-100t/m	22.2	0.165
	200D-500t/m	22.2	0.16
Cotton	Ne60	9.9	0.15
	Ne30	19.7	0.22

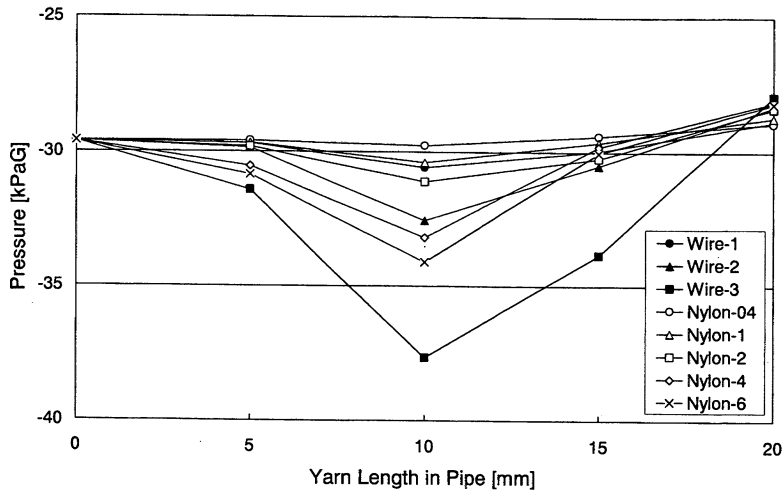


Fig. 5 Pressure variations for nylon monofilament yarn and wire

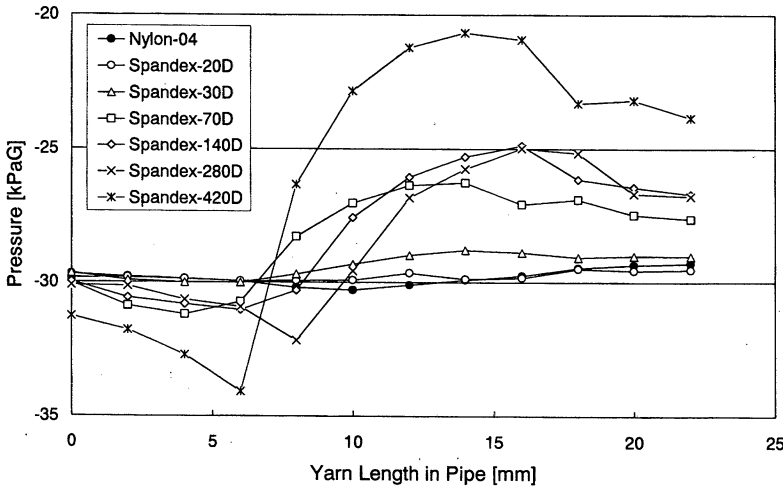


Fig. 6 Pressure variations for spandex yarn and nylon monofilament yarn

変化について、針金とナイロンモノフィラメント糸の場合を図5に示す。また、スパンデックス糸の場合をナイロン04号糸を含め図6に示す。圧力を検出する分岐管は主管入口からちょうど10mmのところにあり、エゼクタへの空気供給圧力はいずれも0.4MPaGである。これより、針金やナイロン糸の圧力減少 ΔP_d は、糸の直径が増すにつれて大きくなることがわかり、最小圧力 P_m は糸が分岐管に達する10mmのところで検出されることがわかる。また、糸が20mmに達した状態の圧力増加 ΔP_i も、 ΔP_d ほど顕著ではないが直径とともに大きくなっていることがわかる。一方、スパンデックス糸においては、伸びにより、最小圧力 P_m の検出される場

所がナイロン糸と異なり糸長10mmより手前になる（実際伸びた長さは10mm前後になる）が、 ΔP_d および ΔP_i の値はナイロン糸と同様、おおむね糸の直径が増すにつれて大きくなっていることがわかる。

これらの結果をもとに、最小圧力 P_m 、および $x=20\text{mm}$ のときの検出圧力 P_p を糸の直径で整理し直したものを図7に示す。これより、糸が通過することによる検出圧力の変化は挿入される糸の直径と明らかに関係があるとともに、その傾向は P_m では針金やナイロン糸が、また P_p ではスパンデックス糸のほうが強いことがわかる。

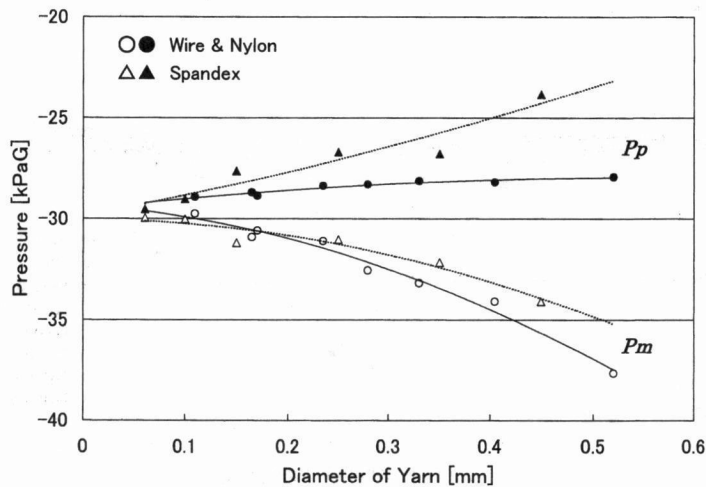


Fig. 7 Effect of yarn diameter on pressures P_m and P_p

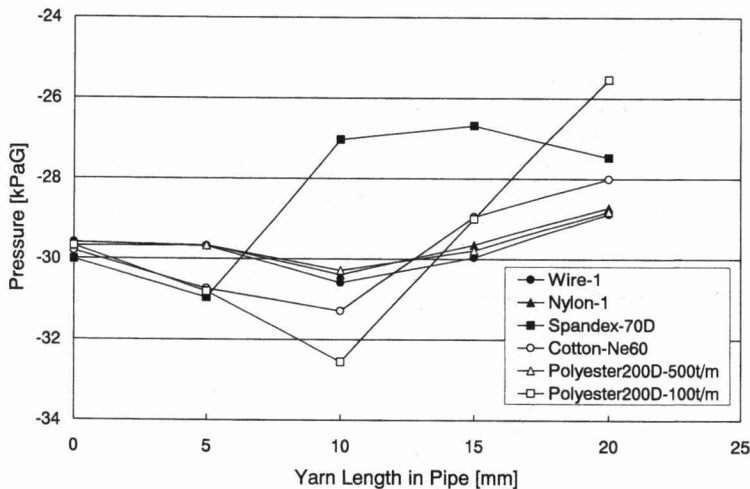


Fig. 8 Effect of yarn type on pressure variation

4.2 糸の種類・構造

糸の種類による検出圧力の変化について述べる。糸種や構造による違いを見るために、直径のほぼ等しい(0.15~0.17mm)各種糸について実験したものを図8に示す。これより、針金、ナイロン糸、ポリエステル糸の500t/mは、ほぼ同様の値と傾向を示しており、これらの糸については糸種による差異はあまりないことがわかる。しかし、スパンデックス糸は前節でも述べたとおり、圧力の増減反転が伸びのため他の糸に比べ短い糸長さで起こるとともに、糸通過後の圧力増加もやや大きい。また、綿糸とポリエステル糸の100t/mは圧力の増減が多少強

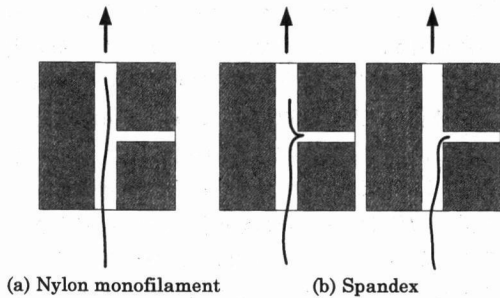


Fig. 9 Characteristic behavior of spandex yarn in pipe

く出ることが認められるが、これは、綿糸では毛羽の存在、ポリエステル糸の100t/mでは撚りが不十

分であるための繊維分離が原因と考えられる。ストロボスコープを使用した観察によると、スパンデックス糸は他の糸に比べ大きく伸縮・振動するとともに、図9のように、糸の先端や中間が分岐管へ潜り込むなど特異な現象が認められた。以上より、糸の挿入による検出圧力変化の主因は、糸の横振動より、主管路に対する糸の占有面積の大きさ、すなわち（見かけ上のものも含む）直径であり、次いで分岐管への直接的な作用であることがわかった。

4.3 糸の挿入距離

ナイロン糸を中心とする伸びない糸においては、糸の挿入とともに検出圧力は次第に小さくなり、分岐管のある糸挿入長さ $x=10\text{mm}$ で最小値を示し、その後 $x=15\text{mm}$ あたりで糸挿入前の圧力まで戻り、以後は糸挿入前の圧力 P_0 より大きい圧力 P_p が検出される（図5）。ところが、スパンデックス糸では図6で示したように、同様の変化が伸びのため短い長さで完了し、圧力は $x=15\text{mm}$ 付近で最大値を示したあと $x=20\text{mm}$ ではこれよりやや小さい値で落ち着いた状態となる。このことをさらに詳細に調べるため、スパンデックス糸420Dを使って糸が分岐管付近に存在するときの圧力変動を記録した。ストロボスコープを使って糸端が分岐管の直前1mm、直上、直後1mm程度になるように調節し、また、糸端が主管入口に存在する場合、糸端が主管の出口を通過してエゼクタに達する場合を加えた5つの

場合について、圧力変動を10kHzでサンプリングしたものを図10に示す。これより、検出圧力の大きな振動は、分岐管直前あたりから発生し、糸の通過とともに激しさを増している。しかし、糸が完全に糸検出ブロックを通過し、エゼクタの空気流によって糸に十分な張力が作用し始めると、検出圧力の平均値は変わらないまま、圧力変動だけがおさまる現象が見られる。この時糸は、糸端方向から張力をかけられるので、糸自体の振動・伸縮はほとんどなく、図9で見たような分岐管への糸の潜り込み現象も観察されなくなる。

4.4 エゼクタへの供給圧力

エゼクタへの供給圧力を0.1MPaG~0.6MPaGに変化させて、各糸を挿入していったときの検出圧力の変化を調べた。ここに図では示していないが、エゼクタへの供給圧力を変化させることは、糸なし時の圧力 P_0 や糸通過時の最小検出圧力 P_m に大きな影響を与えることは明らかである。また、この実験により、糸の通過による圧力減少 ΔP_d も若干増すが、糸通過後の圧力増加 ΔP_i には、スパンデックス糸以外の糸では、それほど大きな影響がないことがわかった。後の節で述べるが、糸の通過検出装置においては、糸の通過によって起こる一瞬の変化 ΔP_d ではなく、糸が完全に通過した後の圧力変化 ΔP_i を利用するため、スパンデックス糸を除き、エゼクタ圧力を変化させることは糸の検出に対してあ

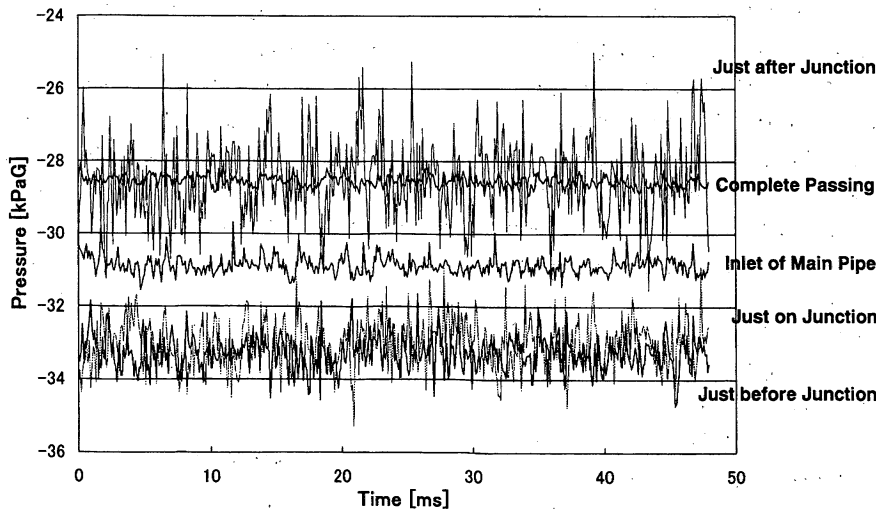


Fig. 10 Pressure fluctuations when yarn end is located at several positions in main pipe (Spandex 420 D)

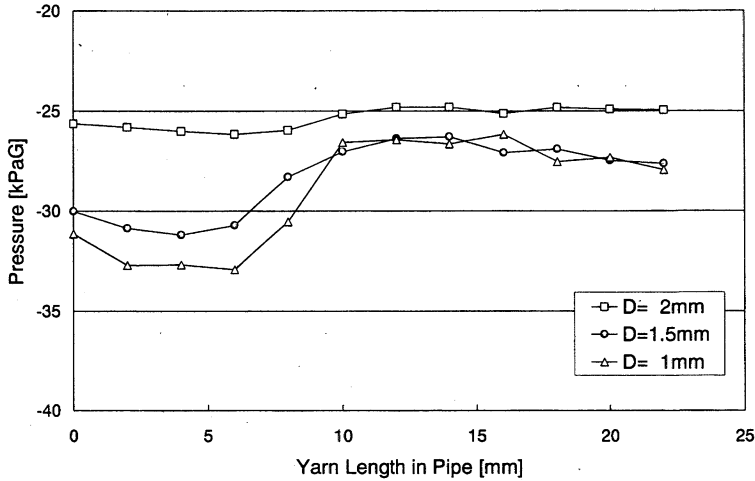


Fig.11 Pressure variation for several diameters D of main pipe (Spandex 70D, Supplied Pressure $S=0.4\text{MPa}$)

まり効果がないと言える。

4.5 主管路の直径

これまでの実験では、主管路の直径が1.5mm、分岐管の直径が1mmのブロックを用いてきた。ここでは、主管路の直径を1mm、2mmと変化させたときの検出圧力の変化について検討する。スパンデックス糸70Dを使って実験した結果を図11に示す。エゼクタへの供給圧力 S が同じであれば、圧力変化 ΔP_i は主管路の直径 D が小さいほうが大きく現れている。主管路の直径が大きくなると、糸なし時の圧力 P_0 は大きくなり糸通過前後の圧力変化は小さくなることがわかる。一方、10kHzでの波形測定とストロボスコープによる糸の観察から、主管直径が大きくなると図9で示したようなスパンデックス糸の特異な現象も少なくなることが確認された。同時に、分岐管の直径が一定で、主管直径が大きくなることは、検出ブロックの構造が分岐管から圧力検出孔に近づくことを示しており、検出圧力の変動も小さくなることがわかった。

以上より、大きな圧力変化を得るには、主管直径の小さな検出ブロックを使用すればよいことがわかるが、主管路の穴開け加工の困難さ、検出ブロック以前での糸の吸い込み力への影響などを考えると、主管直径1mmはやや不适当であると考えられる。主管直径2mmのやや大きめのものが使いやすいと思われるが、通過する糸の直径が0.1mm以下の細い糸の場合は、主管直径1.5mmの標準ブロックが

望ましい。

4.6 分岐管の傾き

前節では、糸検出ブロックの主管路の直径について検討したが、ここでは分岐管の傾きが検出圧力に及ぼす影響について検討する。図12は分岐管の中心軸を主管路に対して直角な方向から30°傾斜させた糸検出ブロックを使い、糸がない時と糸端が完全に通過してしまった時の検出圧力 P_0 、 P_p をそれぞれについて各10回ずつ測定したものである。各ブロックについて、●印は P_0 、○△□印は P_p を表している。なお、図中の矢印は吸い込みによって起こる空気流の方向を示したものである。

これより、主管路に対して分岐管が60°の傾きをもつ場合は、90°の場合より、糸なし時の圧力 P_0 そのものも小さくなり、糸通過前後の圧力変化 ΔP_i も大きく現れることがわかる。これに対し、分岐管が120°の傾きをもつ場合は、 P_0 が大きくなり、 ΔP_i は小さくなる。特にスパンデックス糸20Dを使った場合、分岐管120°のものでは糸通過による圧力増減の反転すら起こらない状態にあり、 P_0 と P_p がほとんど等しいことから、糸の通過検出が不可能であることがわかる。

4.7 糸通過検出装置

糸の通過によって管内の圧力は、図13 (b) に示す振動的な波形のように推移する。これまで見てきたように、管内へ糸が挿入されると圧力は徐々に減少

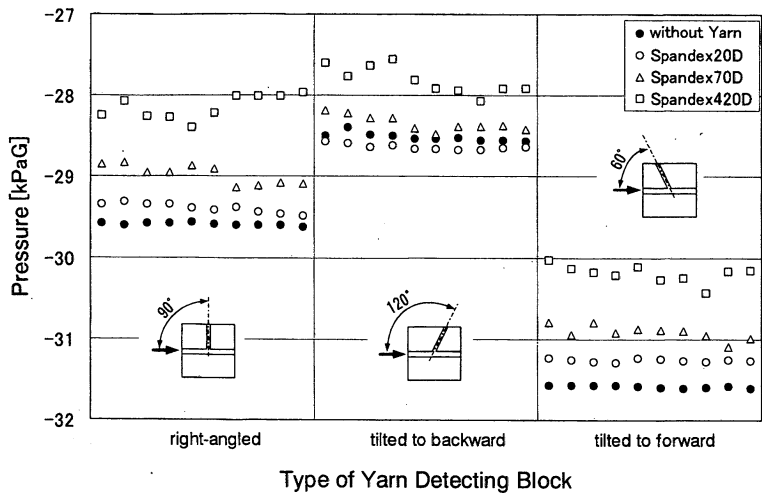


Fig.12 Pressure detected with some modified detecting blocks

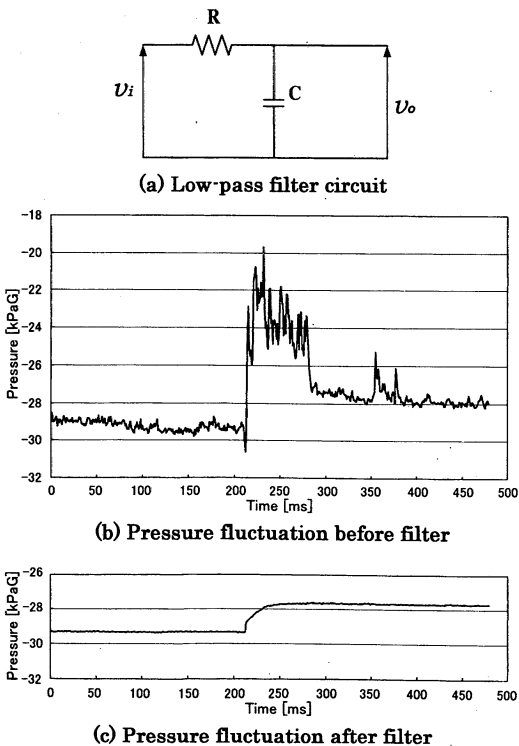


Fig.13 Smoothing for pressure fluctuation (Spandex 420 D, Supplied Pressure S=0.4MPa)

し、分岐管を通過すると増加傾向に転ずる。しかし、糸を固定することなく、空気流によって自然に吸い込ませると、この変化は瞬間的に起こるため、糸を吸い込む前の圧力 P_0 と完全に通過した後の圧力 P_1 だけが記録される。スパンデックス糸420Dのよう

に太い糸の場合は、この状態でも糸の通過検出を簡単に行うことはできるが、20Dのように極めて細い糸を通過させた場合には、検出圧力の変動（振動）と糸通過による圧力変化が非常に近いため、これによって糸の通過を検出することは極めて困難になると考えられる。これを防止するには、計測されたデータの一時的な振動を抑制し、糸の有無による圧力変化を強調させる必要がある。具体的には、Low-Pass フィルタ利用による圧力変動乱れのカットと、コンピュータによる平均値を利用することにした。図13 (a) は、波形の振動を抑え周波数の低い形だけを通過させる Low-Pass フィルタの回路である。圧力センサからの電圧 v_i を回路に入力すると、高い周波数のカットされた電圧 v_o が検出される。図 (a) において、実際には $R=2.2\text{k}\Omega$ の抵抗と $C=47\mu\text{F}$ のコンデンサを接続し、時定数 $T=0.1\text{s}$ 、シャ断周波数 $f=1.6\text{Hz}$ ($\omega=10\text{rad/s}$) のフィルタを製作した。これによって、図 (b) に示す検出圧力の振動はカットされ、図 (c) のように糸の有無による圧力変化のみを取り出すことができた。

フィルタを通過して検出された出力は、A/D 変換ボード（アドテック AB98-57B）を介してパソコン（NEC PC-9801FA）へと入力され、演算によって電圧から圧力へと変換される。本装置において、A/D 変換は12bit で 0~5V の電圧を変換しているので、分解能は0.001V、圧力にして0.03kPaの精度で測定できる。図14は、糸検出を行うプログラムのフローチャートである。設定されたエゼクタ圧力で吸い込みを開始し、200回（約0.8s）のサンプリングを

効であることがわかった。ただし、主管直径を小さくすると検出圧力の変化は大きくなるが、同時に圧力の変動も激しくなるため、必ずしも糸の検出は容易にはならない。

5. 結 言

糸検出ブロックと圧力センサおよび簡単な機器を組み合わせた装置によって、管内圧力の変化を利用した糸の通過検出を行うことができた。特に、これまで不可能と考えられていたスパンデックス糸20Dについても安定して検出することができた。得られた結果は以下のとおりである。

(1) 糸を挿入することによって現れる圧力変化は、糸により主管が閉塞される面積が大きいほどより大きくなる。したがって、糸の直径が大きい場合、繊維分離が起こる場合、糸が毛羽をもつ場合は、より大きな圧力変化を示す。また、スパンデックス糸のように非常に柔軟で振動・伸縮が激しい糸では、分岐管へ潜り込む現象により圧力変化とともにその変動も激しくなる。

(2) 糸の有無を検出する上で、エゼクタへの供給圧力を変化させることはスパンデックス糸の場合を除き、それほど有効ではない。また、同じ糸であれば、主管直径の小さい検出ブロックを使用したほうが圧力差は大きく表れる。さらに、主管直径が同じであれば、分岐管は直角より、糸吸込口方向に傾いているほうが糸の通過による圧力変化が強調される。

(3) 糸通過によって起こる管内圧力の変化は極めて小さいものであり、空気流自体が持つ圧力変動(振動)と区別するため、各状態での平均的な圧力を求める必要がある。これには、振動をカットするためのフィルタの利用や演算による平均値での糸検出判断は必要不可欠なものといえる。

今後は、実際の繊維機械に装備してその実用性を検証するほか、パソコンをシーケンサに置き換えるなど装置のユニット化・コンパクト化を図る必要がある。また、この原理を利用して、カバリングマシンの糸通し装置だけでなく、管路・空気流を利用した各種繊維機械への糸検出応用も考えられる。

参考文献

- 1) J. Hori, T. Kinari, S. Shintaku; J. Text. Mach. Soc. Japan (Japanese Ed), 50, T24 (1997)
- 2) K. Hatta, J. Hori, T. Kinari, S. Shintaku; J. Text. Mach. Soc. Japan (Japanese Ed), 50, T341 (1997)
- 3) J. Hori, K. Hatta, T. Kinari, S. Shintaku; J. Text. Mach. Soc. Japan (Japanese Ed), 51, T42 (1998)
- 4) J. Hori, K. Hatta, T. Kinari, S. Shintaku; J. Text. Mach. Soc. Japan (Japanese Ed), 51, T59 (1998)
- 5) K. Hatta, J. Hori, T. Kinari, S. Shintaku; J. Text. Mach. Soc. Japan (Japanese Ed), 51, T80 (1998)
- 6) K. Hatta, J. Hori, T. Kinari, S. Shintaku; J. Text. Mach. Soc. Japan (Japanese Ed), 51, T99 (1998)
- 7) K. Hatta, J. Hori, T. Kinari, S. Shintaku; J. Text. Mach. Soc. Japan (Japanese Ed), 52, T72 (1999)
- 8) Tsudakoma Co., Ltd.; Pamphlet of '98 Hokuriku Textile Machinery Exhibition (1998)
- 9) Text. Mach. Soc. Japan, Weaving Machinery Studying Group; "Jet Loom Weaving", p. 44, Text. Mach. Soc. Japan (1989)
- 10) K. Hatta, T. Kinari, S. Shintaku, N. Iwaki; J. Text. Mach. Soc. Japan (Japanese Ed), 50, T216 (1997)
- 11) JSME; "JSME Data Book: Flow Measurements", p. 40, JSME (1994)
- 12) Shaw, R.; J. Fluid Mech., 7, 550 (1960)
- 13) JSME; "JSME Mechanical Engineers' Handbook", A5-81, JSME (1986)
- 14) Vogel, G.; Mitt. Hydr. Inst. T. H. München, 1, 75 (1926)
- 15) Vogel, G.; Mitt. Hydr. Inst. T. H. München, 2, 61 (1928)
- 16) Petermann, F.; Mitt. Hydr. Inst. T. H. München, 3, 98 (1929)
- 17) Kinne, E.; Mitt. Hydr. Inst. T. H. München, 4, 70 (1931)