

Air Drag of Monofilament Yarn in Confined Jet

HATTA Kiyoshi, KINARI Toshiyasu and SHINTAKU Sukenori

*Ishikawa National College of Technology, Kitacyujo, Tsubata, Kahokugun, Ishikawa, 929-0392 Japan

**Faculty of Engineering, Kanazawa University, 2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa, Ishikawa, 920-8667 Japan

Received 1 May 2003; accepted for publication 11 September 2003

Abstract

Air drag force on a nylon monofilament yarn in a confined jet was measured as a basic study for operating yarn by airflow, for example; for weft-insertion, for holding the yarn end, for adjusting yarn tension and for drawing yarn into a hollow spindle. The relative velocity of airflow around a yarn was expanded up to 300 m/s. Previously, this had been investigated up to 100 m/s. Both the supplying air pressure and combinations of nozzles and pipes changed diffusion of the flow in a pipe. Air drag force increased extremely if the primary stream acted on the yarn directly when the jet from the nozzle was directed at very high speed (around sonic velocity). Yarn was often stuck inside the pipe by the airflow when very thin pipes were used. When this occurred, air drag force was reduced to half. The air drag coefficient C_f for monofilament yarn has been arranged using the radius Reynolds number, Re_a , for suction flow with lower than 100 m/s. The formula, $C_f = KRe_a^{-n}$, has been applied for suction flow under 500 in Re_a . C_f could be arranged in the same manner for annular jet or confined jet if airflow acted on a yarn in the pipe uniformly. This formula, then, is also available even for very high velocity over 100 m/s. According to these results, we were able to calculate air drag force on monofilament yarn. We anticipate applying this to the other kinds of yarn, and expect air power savings and improvement in yarn operation.

Key Words: Air drag coefficient, Monofilament yarn, Confined jet, Radius Reynolds number

拘束噴流下におけるモノフィラメント糸の空気抗力

八田 潔* , 喜成 年泰** , 新宅 救徳**

1. 緒言

多くの繊維機械において、糸を移動したり保持するなど自在に操る方法として空気流がよく利用されている。例えば、吸い込み流を使った糸の貯留、糸端の一時的保持、張力調整をはじめ、ジェットノズルによるよこ糸の飛走、噴流による糸の誘導や中空スピンドルへの糸通し[1]など、これらは、いずれも空気流と糸との間に発生する空気抗力をうまく利用している。

実際に利用される吸い込み流および吹き出し流の強さは現場で経験的に設定されることが多いが、糸操作の確実性を期待し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、糸や布自体の品質低下にもつながっている。

本研究では、各種糸や空気流の条件によって変化する

空気抗力を算定・把握し、適正な空気動力によって糸を確実に操作するための基礎資料を得たいと考えている。今後、コンピュータによる流れの解析やさまざまな糸への拡張も計画しているが、本報ではモノフィラメント糸を使い、実際の測定データに基づいて解析を行った結果について報告する。

2. 空気流と糸の摩擦抗力

2.1 理論と従来の研究

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、

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

C_f : 空気摩擦抗力係数

V : 空気流と糸の相対速度

* 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, Fax: 076-288-8099

** 金沢大学工学部 920-8667 金沢市小立野2丁目40-20

ρ : 空気の密度

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[2]、清水ら[3]、GlauertとLighthill[4]、White[5]、樋口と笠原ら[6]が、モノフィラメント糸、フィラメント糸について、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いるが、概ね、糸半径 a を代表長さとする半径レイノルズ数 $Rea=Va/\nu$ 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 $Rex=Vl/\nu$ を使って整理することが有効であるとの方向が示されている。ここで ν は空気の動粘度である。すなわち、糸の半径が小さい場合や流れの速度が低い場合など Rea の小さな範囲においては、糸の円柱(曲率)の効果が現れ、 C_f は、

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

の形で表されるが、太い糸や速度が高い場合など Rea の大きい範囲においては、 C_f は平板理論の値に近づき、

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

の形で表されることになる。ただし、これらの実験や解析は吸い込み流やレイノルズ数が比較的小さな流れに対するものがほとんどであり、空気流速にすると100m/s前後が限界となっている。また、筆者ら[7]も105m/sまでの吸い込み流を使って同様の実験を行ってきたが、半径レイノルズ数 $Rea < 500$ において(2)式が適用され、両端固定条件で $K=0.22$, $n=-0.58$, 自由端条件では K が両端固定条件の場合のほぼ2倍になるという実験値を得たにとどまっている。

しかし、実際の繊維機械で利用されている空気流速は100m/s以上の噴流であることが多く、これまでのデータだけでは不十分であると考えられる。ジェットルームのメインノズルに対し糸抗力の検討を行った報告[8],[9]などもいくつか見られるが、ほとんどが空気供給圧力の観

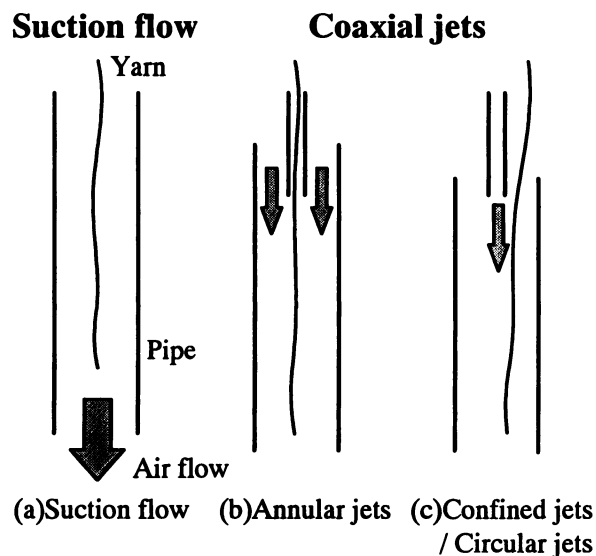


Fig.1 Types of airflow in the pipe

点から整理したものが多く、空気流速との関係を明らかにしたものは少ない。この点からも、さらに音速までの高速な空気流に対する糸の空気抗力について検討し、これまでに報告された空気抗力係数の整理方法について、より高速域への連続性などを確認する必要がある。

2.2 吸い込み流と拘束噴流

図1に示すように、円筒形の管路内に空気流を作用させる形態としては、吸い込み流(a)と同軸噴流(吹き出し流)の2つがあげられる。同軸噴流のうち、噴流が外側から環状に作用する形態のものを環状噴流(b)、噴流が中心から円形に作用するものを拘束噴流あるいは円形噴流(c)という。吸い込み流は噴流に比べ乱れが少ないのが特徴であるが、圧力比の関係から生成できる空気流速には限界がある。これに対し噴流はコンプレッサで加圧すれば高速・高密度の空気流を生成することが可能であるものの、拡散や乱れ、密度変化、ポテンシャルコアの発生など噴流特有の現象も多い。加速管をもつジェットノズルはちょうど(b)に相当し、噴流を使った中空スピンドルへの糸通しなどは(c)に相当するものと考えられる。本研究では、拘束噴流下での糸の空気抗力を中心に解析を行うが、吸い込み流や環状噴流との関係あるいは相違点などについても検討を加える。

3. 実験方法

3.1 実験装置

拘束噴流に対する糸の空気抗力を測定するための装置概略を図2に示す。コンプレッサから供給された圧縮空気は、調圧弁・電磁弁を経由して内径2.5mmあるいは4mm

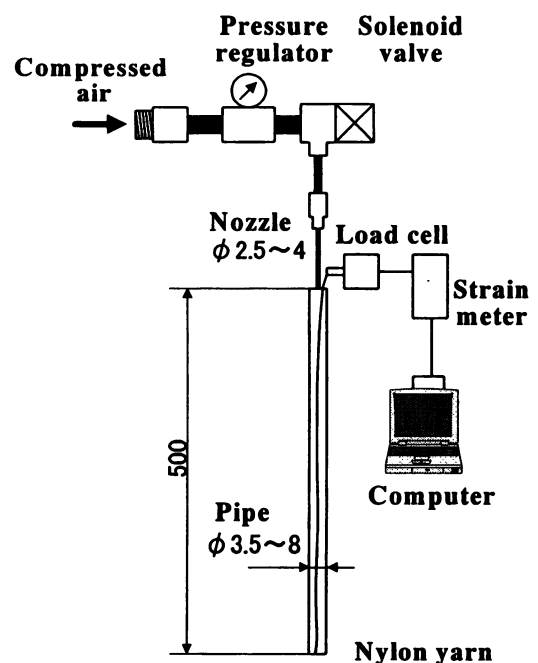


Fig.2 Piping and experimental equipment

の吹き出し用ビニルチューブへと供給される。石英ガラス管製の管路は内径 3.5mm, 6mm, 8mm の 3 種類があり、吹き出し口と管路入口が一致するよう位置合わせを行い、その中に長さ 500mm の糸を挿入する。糸の上端は微小荷重ロードセル (KYOWA LVS-10GA) に結びつけられ、ここで張力がひずみ計 (KYOWA CDV-230)、データ収集カード (KEYENCE NR-110) を経由してパソコン (NEC Nw133) に 2.4 秒間記録される。なお、空気流速の測定には、円錐形ホットフィルムプローブ (KANOMAX MODEL1230) を装着した熱線流速計システム (同 MODEL7102) を使用したが、実験中に管路内へのプローブ挿入ができないことから、長さを変えた管路を使って、その出口中心軸上の速度を事前に測定した。また、糸の様子についてはストロボスコープ (SUGAWARSA TYPE MS-210) による観察も行った。

比較のために行った環状噴流の実験は、内径 3mm、長さ 150mm の加速管をもつジェットルーム用メインノズルを使用して抗力測定を行い、吸い込み流の実験は、内径 30mm、長さ 1000mm のアクリルパイプに市販の掃除機 (松下 吸い込み仕事率 330W) を接続して抗力測定を行った。

3.2 試料

実験に使用したナイロンモノフィラメント糸は、015 号が三菱化成製であるが、あとはすべて東レ製のテグスである。ただし、拘束噴流の実験では細い管路内での糸の剛性が問題となったので 1 号までの糸に限定して実験を行った。各糸の線密度と直径を表 1 に示す。

Table 1 Count and diameter of test samples

Sample	Yarn count [dtex]	Diameter [μ m]
015	41	65
02	55	74
04	111	104
06	170	128
08	215	148
1	267	165
2	556	235
4	1011	330
6	1456	405
8	1989	470
10	2444	520

4. 結果と考察

4.1 空気流の形態

図 3 は、図 1 に示した 3 つの空気流形態に対するナイロンモノフィラメント糸 02 号と 1 号の空気抗力を空気流速で整理したものである。このうち拘束噴流のデータはノズル 4mm と管路 8mm を組み合わせた場合 (40-80 と表示) を掲載してある。また、環状噴流の測定では加速管およ

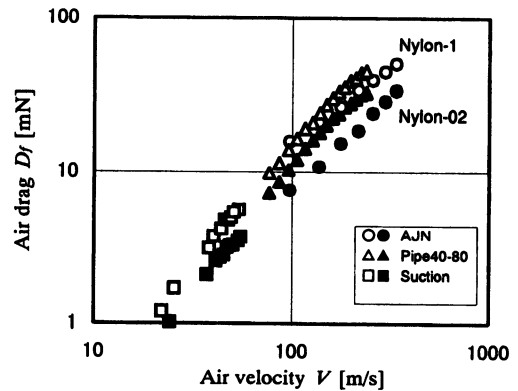


Fig.3 Air drag force on monofilament yarn for several airflow types

び糸長さが 150mm しかないで、他のデータと比較のため、500mm 相当の値に換算してある (本報では AJN と表示)。この実験におけるそれぞれの空気流速の最大値は、吸い込み流で 55m/s、環状噴流で 330m/s、拘束噴流では 250m/s となっている。図より、吸い込み流と環状噴流・拘束噴流における糸の空気抗力の間には連続性が確認できる。拘束噴流における値は環状噴流に比べ若干高い傾向を示しているが、これは吹き出しノズルと管路の組み合わせによって空気抗力が多少変動するためであり、この点については 4.2 節で詳しく述べることにする。

4.2 管路の組み合わせ

拘束噴流において、それぞれ直径の異なる吹き出しノズルと管路を組み合わせると、管路内の空気流速は当然変化するが、空気抗力や糸の様子にも変化が認められた。これを検証するため、ノズルと管路を組み合わせで 5 つの条件を作り、それぞれの空気抗力を測定した。図 4 は、測定された空気抗力をもとに (1) 式より空気抗力係数を求め、半径レイノルズ数で整理したものである。図中、ノズルと管路の組み合わせ条件を 25-35 のように表記している。空気抗力は、各条件で糸の太さと空気流速を変化

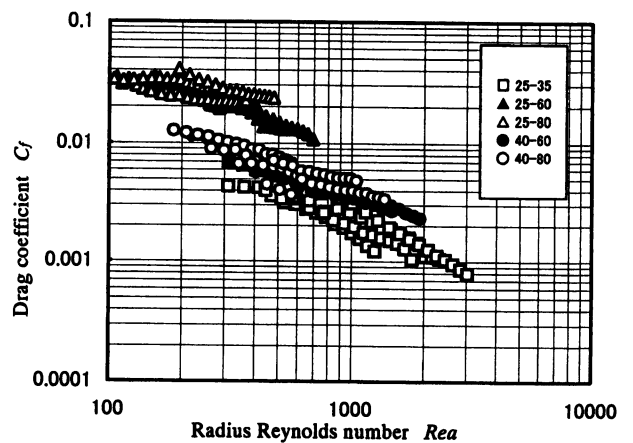


Fig.4 Drag coefficients on monofilament yarn for nozzle and pipe combination

させて測定しているが、空気抗力係数は半径レイノルズ数で整理すると1つの直線上に分布し、管路の組み合わせによりその直線も異なることがわかる。ただし、1つの条件の中でのばらつきは後述する管路と糸の位置関係や噴流の直接的な影響によるものと考えられる。それぞれの場合について見てみると、管路径の最も細い 25-35 では糸が管路内壁に貼り付く現象が観察され、空気抗力は貼り付きが起こらない場合に比べ半減するなど著しい低下が認められた。一方、他の組み合わせでは、25-60 と 25-80、40-60 と 40-80 がよく似た傾向を示しており、糸の空気抗力が管路径よりもノズル径、すなわち噴流の噴出速度に大きく影響を受けていることが予想される。管路長さ 100mm から 500mm までの範囲において空気流速の変化がほとんど認められないので、空気抗力係数の算出ではこの値を空気流速の代表値として使用しているが、ノズル近傍での局所的な挙動については 4.3 節、4.4 節で詳しく検証する。

4.3 糸の管路の位置関係

細いノズルを使用した場合に空気抗力が増加する原因として、噴流の直接的な影響が予想された。そこで 25-80 の組み合わせを使って、ノズルと糸の位置関係を変化させ、空気抗力の変化を調べる実験を行った。図 5 は管路

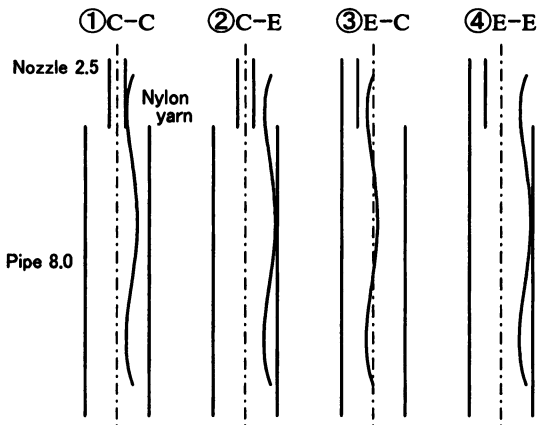


Fig.5 Position of nozzle and yarn for pipe

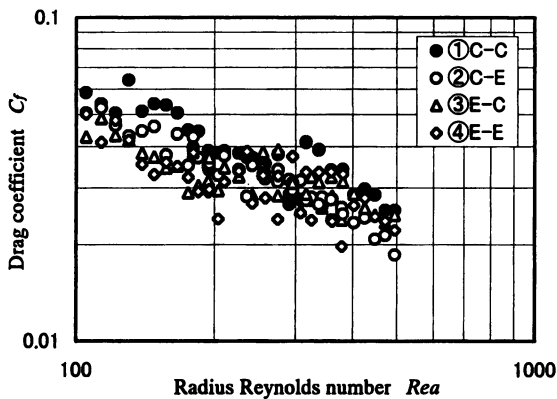


Fig. 6 Effect of nozzle and yarn position on drag coefficient

に対するノズルの位置と糸の位置関係を示したものである。ノズルと糸がともに管路中心に存在する場合を①C-C、中心と端に存在する場合を②C-E、③E-C、ともに管路端に存在する場合を④E-E とした。なお、この実験における空気の供給圧力 P (本報ではすべてゲージ圧) は 0.2~0.5MPa で、ノズルからの噴出速度は 300m/s 以上、拡散後の管路内流速は 40~90m/s に相当している。このときの、空気抗力係数を半径レイノルズ数で整理したものが図 6 である。糸とノズルの位置が極めて近い①の場合は、他の②、③の場合に比べて空気抗力係数が 2~3 割程度増加しているのがわかるとともに、糸とノズルが一番離れている④の場合は若干低くなる傾向が確認されている。すなわち、同じノズルと管路の組み合わせにおいても、噴流が直接的に作用する部分は、糸の空気抗力全体に対しても大きな割合を示すことが確認された。

4.4 噴流の直接的影響

拘束噴流において、空気の供給圧力が高くなると、ノズルから噴出される空気流は徐々に速度を増していき、ある時点で空気流速は音速に達し、それ以上速度は増加しなくなる。さらに空気供給圧力を増加させると、ノズルからの空気流は密度の高い状態で噴出されるようになる。図 7 は拘束噴流における一次流と二次流の混合の様子を示したものである。ノズルから噴出した高速空気流の速度分布は最初一様であるが、周囲の空気との混合によって速度が一樣な部分は減少しある距離のところで消滅してしまう。この部分はくさび状になっていてポテンシャルコアと呼ばれており、長さはノズル直径の 5~8 倍 [10]程度とされている。しかし、ノズルからの噴流が管路

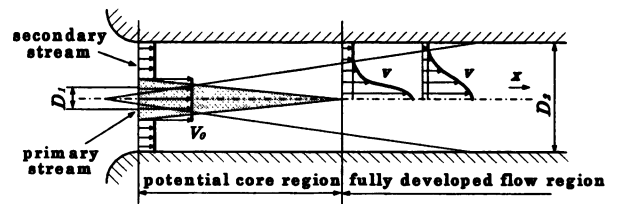


Fig.7 Confined jet (axisymmetric flow)

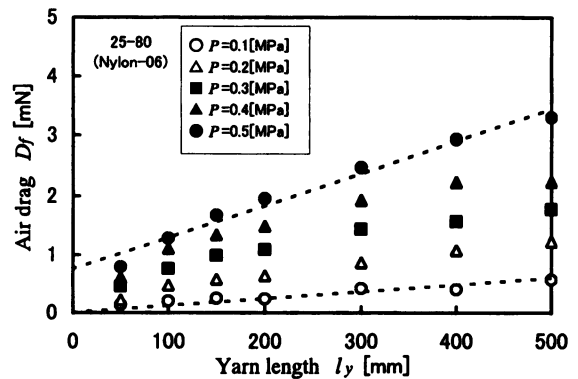


Fig. 8 Air drag force for length of monofilament yarn with changing the pressure

内で十分に拡散・混合されるにはさらに長い距離が必要であると考えられる。実際にこの領域がどの程度空気抗力に影響を及ぼしているのかを把握するため、管路に挿入する糸の長さを変えて空気抗力を測定した。図8は、25-80の条件下において、ナイロン糸06号を長さ $l_p=50\sim 500\text{mm}$ まで変化させたときの空気抗力を示したものである。ノズルからの噴出速度がまだ音速に達していない供給圧力0.1MPaの場合、空気抗力は糸の長さにはほぼ比例していると言える。しかし、供給圧力の高い0.3~0.5MPaの場合、糸長さが100~500mmの間において線形の関係が認められるが、これをそのまま延長しても空気抗力の切片は0にならない。すなわち、長い糸を考えたとき、流れの下流における糸の空気抗力は均等であるが、糸の根元での抗力は局部的に大きくなっているということが予想される。

これまでの検討から、ノズルと管路の組み合わせにより糸の空気抗力が変化すること、その原因として、管路内の速度に比べ大きな速度をもつ一次流およびポテンシャルコアの作用があげられることが確認された。また、空気供給圧力が増加し噴流が音速に達した時点では、噴流の空気密度も大きく影響する。しかし、2.5mmに限らず、4mmのノズルを使用した場合にも噴流の影響は必ずあるはずである。しかし、図4でも見たように、一方では顕著に表れ、他方ではあまり認められない。拘束噴流における空気抗力係数の変化は、実際に糸の空気抗力係数が変化しているのではなく、管路の上流で糸が密度あるいは速度の大きい噴流に接するため局部的に空気抗力が増加し、全体として空気抗力係数が増加したように見えることは明らかである。しかし、管路内の空気流速を細かく測定できない以上、どこかの値を空気流速の代表値として扱わざるを得ない。図9は、25-80と40-80の条件下における管路中心流速の変化を示したものである。空気流速の測定に限界があるため、ノズル噴出速度はそれぞれ0.1MPaの場合しかプロットされていないが、0.2MPa以上では、いずれの場合も300m/sを超えており、

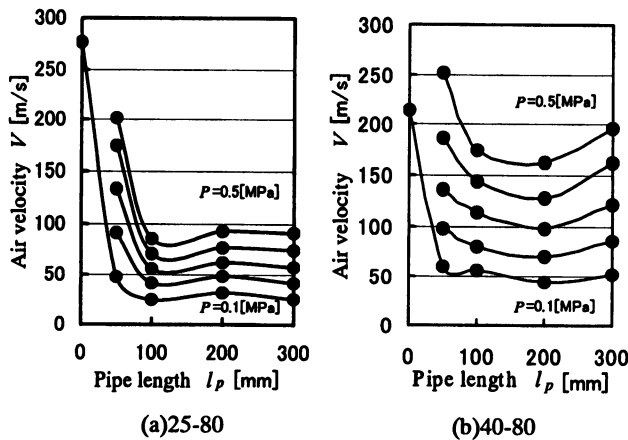


Fig.9 Air velocity during slowdown from jet in the pipe

噴出直後の空気流速が管路後方での速度に比べはるかに大きいことがわかる。これを見ると、どちらの組み合わせでも、ノズルからの噴流は $l_p=50\sim 100\text{mm}$ 程度までの間に周囲の空気と混合されるため急速に拡散・減速し、100mm以降では、管路の長さに関係なくほとんど流速変化が見られないことがわかる。25-80では、ノズル噴出速度と混合後の管路内流速に大きな差があるものの、40-80ではその差は25-80の場合ほど大きくない。つまり、空気抗力係数の算定において、代表となる空気流速(ここでは100mm以後の管路内流速)と噴流の速度の間に大きな差がある場合に、噴流部分の影響が大きく表れるものと考えられる。逆に、ノズルと管路の直径が近く、供給圧力も極めて低い場合には、管内流は管路全長にわたり一定速度の流れとみなすことができ、図8の $P=0.1\text{MPa}$ のように空気抗力は糸長さと線形の関係となる。例えば、4.4節の議論に従い、ポテンシャルコア領域をノズル径2.5mmの8倍(20mm)、管路および糸長さを500mmとして、ポテンシャルコアでの噴流速度を混合後の5倍と仮定すれば、空気抗力係数が一定であっても、(1)式より単純に、コア領域の糸に作用する空気抗力は、残りの部分に作用する空気抗力に匹敵する。つまり噴流の直接的な作用は、空気抗力を倍以上にも高める効果を持っていることがわかる。

4.5 空気摩擦抗力係数

拘束噴流における糸の空気抗力は、管路の組み合わせや糸との位置関係、噴流の直接的な作用、空気供給圧力やノズル噴出速度、噴流速度と管路下流での速度との差など、さまざまな条件によって左右される。しかし、これらの影響をそれぞれ分析・整理し、空気流速による抗力の変化だけを特徴づけて取り出していくと、40-60や40-80における供給圧力0.2MPa以上の条件のとき、糸に空気流が均等に作用し、データの有効性が高いという結論に達した。そこで、40-80の組み合わせを拘束噴流実験の代表とし、あわせて吸い込み流、環状噴流におけるナイロ

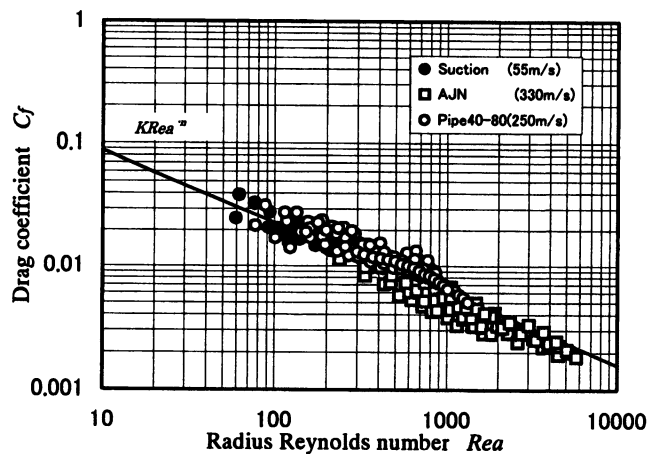


Fig.10 Drag coefficient on monofilament yarn (free end)

ンモノフィラメント系の空気抗力を測定した。このデータをもとに空気抗力係数を算出し、半径レイノルズ数で整理したのが図 10 である。これまでの研究で、105m/s 以下の空気流に対して、糸の空気抗力係数は半径レイノルズ数で整理することができ、 $Rea < 500$ の範囲において、 $C_f = KRea^{-n}$ なる式で表されることがわかってきたが、環状噴流および拘束噴流による 300m/s 前後までの空気流に対しても半径レイノルズ数での整理は有効であることがわかった。しかし、噴流を使った実験で適用される半径レイノルズ数は、吸い込み流のときの 500 にとどまらず、10 倍以上のより高い領域に対しても適用可能であることがわかった。また、吸い込み流の実験では両端固定条件で $K=0.22$, $n=-0.58$, 自由端条件で K がほぼ 2 倍になるという実験値を得ていたが、吸い込み流・環状噴流・拘束噴流すべての空気流形態を網羅し、本実験では自由端条件でおおよそ $K=0.33$ という値を得た。いずれにせよ、モノフィラメント系の空気抗力係数は半径レイノルズ数で整理することができ、速度 100m/s を超えて 300m/s 程度まででも、その理論がそのまま延長できることが明らかとなった。これまでの実験に比べ速度が大きいにもかかわらずこのような整理法が適用できるのは、半径レイノルズ数がすでに十分に大きく、この時点で糸の空気抗力係数は平板に近い状態に達しているということが考えられる。図 10 の結果をもとに、横軸に糸の細長さ all を考慮した半径レイノルズ数、縦軸にその速度における平板の空気抗力係数 C_{fp} との比をとってみると図 11 のようになる。これより、吸い込み流の実験で見られた糸の曲率の効果は $Va^2/\nu l=0.5$ 程度で失われ、高速の空気流下で糸の抗力係数は平板に近い傾向を示すことが確認された。

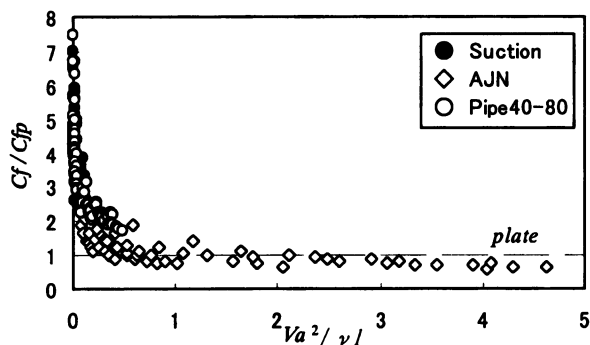


Fig.11 Comparison with drag coefficient on flat plate in various flow

5. 結論

拘束噴流下におけるナイロンモノフィラメント糸の空気抗力について測定を行った。実験を行った空気流は従

来の研究で行われていた 100m/s を超え 300m/s 程度まで拡張された。空気抗力について検討した結果、以下のよう結論が得られた。

(1)ノズル径と管路径の変化が小さく供給圧力が低い場合には、管路全長にわたって速度をほぼ一定とみなすことができるが、ノズルから管路へ断面積が急拡大する場合や供給圧力が高くなってくると、ポテンシャルコアの発生で一次流と混合流の間に大きな速度差を生じるため、混合流の速度のみで空気抗力を論ずることはできない。特に、細いノズルから高速の空気流が噴出する場合、一次流が糸に直接作用するような位置関係にあると空気抗力は増加する。また、非常に細い管路では空気流により糸が貼り付き空気抗力が半減するなど拘束噴流特有の現象もいくつか確認され、ノズルと管路の組み合わせ、供給圧力の変化により、管路内の空気流速や拡散の様子がいろいろと異なることがわかった。

(2)より高速の空気流に対しても、空気流が糸に均等に作用すれば、空気抗力係数は同一の実験式を使い半径レイノルズ数で整理することが可能で、 $C_f = KRea^{-n}$ なる式で表される。ただし、環状噴流および拘束噴流で適用される半径レイノルズ数の範囲は吸い込み流の時に適用される $Rea < 500$ より、はるかに大きな範囲に対しても適用可能である。

これらの結果をもとに、空気流によって糸をさまざまに操作するための空気抗力を容易に概算することが可能になるとともに、結果的に、空気動力の軽減および糸操作のための成功率向上などが期待される。

References

- [1] Hori, J., Kinari, T., Shintaku, S.; J. Text. Mach. Soc. Japan, **50**, T24(1997)
- [2] J. Gould, F. S. Smith; J. Textile Institute, **71**, 38(1980)
- [3] Shimizu, J., Okui, N., Tamai, K.; Sen'i Gakkaishi, **39**, T398(1983)
- [4] M. B. Glauert, M. J. Lighthill; Proc. Royal Soc. London, **230**, 188(1958)
- [5] F. M. White; Trans. ASME, **94**, series D, 200(1972)
- [6] Higuchi, K., Kasahara, Y.; J. Text. Mach. Soc. Japan, **15**, 335(1962)
- [7] Hatta, K., Kinari, T., Shintaku, S., Iwaki, N.; J. Text. Mach. Soc. Japan, **50**, T216(1997)
- [8] Ishida, M., Okajima, A.; J. Text. Mach. Soc. Japan, **44**, T69(1991)
- [9] Ishida, M., Okajima, A.; J. Text. Mach. Soc. Japan, **45**, T257(1992)
- [10] JSME; JSME Mechanical Engineer's Handbook, Fluid Mechanics, **A5**, P65(1986)