

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 29 日現在

機関番号：53301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560215

研究課題名(和文) 産業用繊維を空気流で操作するための空気力学的特性の解析

研究課題名(英文) An analysis of aerodynamic characteristics to operate technical fiber

研究代表者

八田 潔 (HATTA, Kiyoshi)

石川工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：80280379

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、炭素繊維やアラミド繊維など「産業用繊維」を、従来の衣料製織技術と同様に、空気流を利用して飛ばしたり保持したり移動させるなど、繊維を自在に操るための空気力学的特性を明らかにしようとしている。円形断面の材料において、空気摩擦抗力係数は糸半径を代表長さとする半径レイノルズ数で整理できることがわかったが、繊維をテープ状に収束させた材料では、剛体平板と同様に、繊維長を代表長さとする長さレイノルズ数で整理できることがわかった。空気抗力係数の大きさに影響を及ぼす因子としては、拘束条件、糸半径、テープ幅、繊維の柔軟性があげられる。これらは繊維が空気流によって振動する「はためき」に大きく関係している。

研究成果の概要(英文)：This study aims to operate technical fiber of carbon fiber and aramid fiber and others by air flow. That enables to run, hold and move the fiber like conventional weaving technology of clothes. Therefore it is necessary to clarify the aerodynamic characteristic of the technical fiber. The air frictional drag coefficient of materials with the circular cross section can be expressed as a function of the radius Reynolds number which makes the fiber radius characteristic length. But they of materials with the rectangular cross section can be expressed as a function of the length Reynolds number which makes the fiber length characteristic length like flat plate. A condition of hold, the fiber radius, the tape width and the flexibility of the fiber can be named as the factor which has an influence on air drag coefficient. These are quite related to the "flutter" fiber vibrates by air flow.

研究分野：制御工学

キーワード：空気摩擦抗力 産業用繊維 空気流 繊維機械 自動化省力化

1. 研究開始当初の背景

(1) 産業用繊維の登場

これまで繊維と言えば「衣料用繊維」をさすことがほとんどで、国際的な競争によって高付加価値を有する国産品を除き、生産拠点の多くは中国・東南アジアへと移ってきた。このため、繊維産業は国内では斜陽産業の代表にもあげられている。しかし、その一方で近年の技術革新により新素材や複合材料が注目され、繊維は新しく「産業用繊維」としての地位を確立しつつある。

金属材料以上に強度を持ち、軽くて成形も容易な複合材料は、炭素繊維・ガラス繊維・アラミド繊維などを用いて作られている。炭素繊維は日本の企業3社で約7割の世界シェアを持つなど極めて国際競争力の高い材料であり、今後も年十数%の伸びで成長していく重要な素材である。またアラミド繊維は、防火服や防弾チョッキ、タイヤの補強材などに使われ、これも日本の企業グループで4割を超える世界シェアを誇っている。

複合材料の素材として繊維が使用される場合、繊維は製造されたままの長繊維、その長繊維を短く切った短繊維(チョップドファイバ)、あるいは織物(ファブリック)、そして加工を施しテープ状に仕上げた中間素材(プレプリグ)などとして供給される。それぞれ目的や用途に応じて使い分けられるが、織物はこれまでの「衣料用繊維」と同様の方法によって織られている。「産業用繊維」の織物でも、繊維の性質や物性にもよるが、経(たて)糸に緯(よこ)糸を通す方法として、糸を把持する機械的な方法、水を使って糸を飛ばす方法などが使われている。しかし、機械的に繊維を把持すると製織速度が上げられず繊維の損傷にもつながる。また水を利用した場合は製織後に繊維を乾燥させる工程が必要となってくる。従来の衣料用織物で最も有利な方法として行われている空気流を利用した「産業用繊維」の製織ができれば、生産効率ならびに製品の品質保持という点からも非常に良好な結果が期待できる。さらに、生産時のみならず、織機に経(たて)糸を通す作業や切れた緯(よこ)糸を一時的に保持したり自動的に供給する作業など、準備段階での工程や人間が行う作業の自動化などに応用することもできる。

現在、「産業用繊維」に対して空気流を利用した製織や自動化が行われていないのは、これらの繊維がこれまでの「衣料用繊維」に比べ大きく異なった特徴を持っている点と、空気力学的特性がまったく解明されていないことに起因している。織物を製造する企業は比較的小規模の工場が多く、生産現場では織物製造を優先するのが精一杯で、十分な研究や解析が行われていない。

(2) 従来の研究

流体工学の分野では「流れの可視化」の一手法として、糸を物体の表面や流れ場の中に配置して空気の流れやうずの様子を確認す

る方法がある。しかし、それらは糸が空気に沿って動き、糸と空気が一体とみなせることが前提である。空気流を使って糸を操作するには、糸と空気流との関係について着目せざるを得ず、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ているが、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、高速噴流・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の関係で整理し、実機による試行的手法がほとんどである。この場合、仮に空気供給圧力が一定であったとしても、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での再現性は低いと言える。そこで筆者は、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、モノフィラメント糸、マルチフィラメント糸、紡績糸、伸縮性糸などさまざまな糸に対する空気力学的特性を明らかにしてきた。また、これら基礎データをもとに、糸の検出や糸通しなど糸加工における準備作業の自動化も実現してきた。最近では、これまでほとんど報告のなかった100m/s以上の同軸噴流下における糸の空気摩擦抗力についてシミュレーションと実験の両面から検討を行い、空気動力の軽減や糸操作の確実性向上、糸や繊維をさまざまに操作する「空気流デバイス」の設計にも生かしている。

2. 研究の目的

最近脚光を浴びている炭素繊維やアラミド繊維など「産業用繊維」の織物において、従来の衣料製織技術と同様に、空気流を利用して飛ばしたり保持したり移動させるなど、自在に操作するための技術を確立する。現在「産業用繊維」は機械的な方法によって把持したり織ったりしているが、繊維の損傷や生産性において問題をかかえている。このため、新素材の糸構造や特徴を詳細に分析して空気力学的特性を明らかにし、吸い込み流や噴流を使って効率的かつ確実に、さらには品質を維持したままで自動化・省力化・生産性向上を図る方法の提案につなげていく。

これまでの「衣料用繊維」は、単繊維あるいは数十本のフィラメントで構成され、比較的柔軟性に優れた素材が多かったが、「産業用繊維」は非常に硬くて脆い5~10 μ m(ミクロン)のフィラメントを千~数万本束ねた集合体であり、従来の「衣料用繊維」とは非常に性質を異にする素材である。また、織物を作る際には、フィラメントがばらばらにならないよう図1のように予め平らにサイジング剤(収束剤)で固定されているものもある。このような状況から「産業用繊維」の糸構造や特徴を詳細に分析するとともに、空気力学的特

性を明らかにしていく。

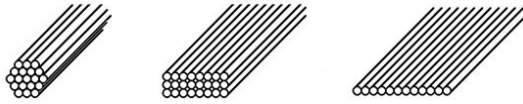


図1 衣料用繊維(左)と産業用繊維

3. 研究の方法

(1) 空気摩擦抗力理論

新しい「産業用繊維」を入手し、その構造や特性を調査し、空気力学的特性に及ぼす特徴を分析する。この後、張力を測定するための吸い込み流実験装置を製作し、この中に繊維を置いて空気抗力を測定する。これをもとに空気摩擦抗力係数を求め、円形断面をもつ糸との比較を行うとともに、構造や太さ・長さ、拘束条件などをもとに整理していく。

図2のような空気中に平行に置かれた円形あるいは矩形断面をもつ繊維の空気摩擦抗力を考えると、

円形断面をもつ繊維の空気摩擦抗力は、

$$D_f = (1/2) C_f \rho V^2 \pi D L \quad \dots(1)$$

矩形断面をもつ繊維の空気摩擦抗力は、

$$D_f = (1/2) C_f \rho V^2 2(B+H) L \quad \dots(2)$$

と表されるので、空気抗力の測定データから空気摩擦抗力係数を計算することができる。

ここで、

D_f : 空気摩擦抗力

C_f : 空気摩擦抗力係数

V : 空気流と繊維の
相対速度

ρ : 空気密度

d : 糸直径(a : 糸半径)

L : 空気流にふれる
繊維長

W : 繊維の幅

B : 繊維の厚さ

である。

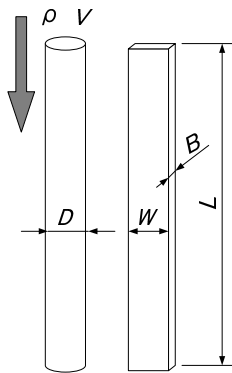


図2 繊維の空気抗力

(2) 実験装置

繊維の空気抗力を測定する実験装置を図3に示す。風量 4.5m³/min のプロワで内径 50mm の管路、90 度エルボを経由し、内径 30mm・長さ 1m の管路に吸い込み流を作用させる。

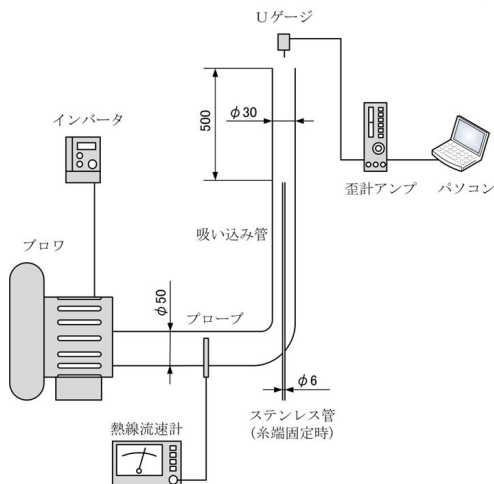


図3 実験装置概略

空気流の速度は、プロワのインバータで調整できるが、50mm 管路に取り付けられた熱線流速計で常時確認することもできる。また、30mm 管路内での流速は、あらかじめ検定用の管路を準備し、ピトー管による検定を行っている。ここでの最大流速は 130m/s である。繊維の空気抗力を測定するため、U ゲージ(微小荷重ロードセル)に繊維を取り付けて管路内に垂らし、そこで検出された張力を、アンプ、データ収集システムを経由し、パソコンへと記録していく。なお、両端固定条件にて実験を行う際は、管路内にステンレスパイプを挿入し繊維の一端を通してその下部におもりを取り付けて拘束する。

(3) 実験方法

糸ならびにテープを用いて、長さ(100~900mm、標準は 500mm)、太さ、幅(0.5~5mm、標準 3mm)、拘束条件(自由端と両端固定)、構造(剛性)などを変化させて、空気抗力をそれぞれ測定していく。本来は、繊維集合体としての産業用繊維を直接使用して実験するのが望ましいが、繊維物性や製造方法、サイジング剤(収束剤)など企業内限定の情報も多く、今回はモデルとしてのテープの実験をもとに、基礎データを収集することにした。糸の空気摩擦抗力は、各流速・各条件について U ゲージから得られる張力をもとに電圧変換された値が 10 秒間記録される。データの信頼性・再現性を確保するため、測定は 5~10 回繰り返され、その平均が抗力値となる。

4. 研究成果

(1) 産業用繊維

代表的な産業用繊維として、今回収集した材料を表1に示す。図4は、繊維とそれらを使って織られた織物や中間素材(FRP の強化材)もいっしょに掲載したものである。

表1 収集した産業用繊維サンプル

炭素繊維	3K,12K,24K
ガラス繊維	75,900,2400dtex
超高強力ポリエチレン繊維	150,440,1320,2640dtex
PBO繊維	1110dtex
アラミド繊維	195,220,440,1670dtex

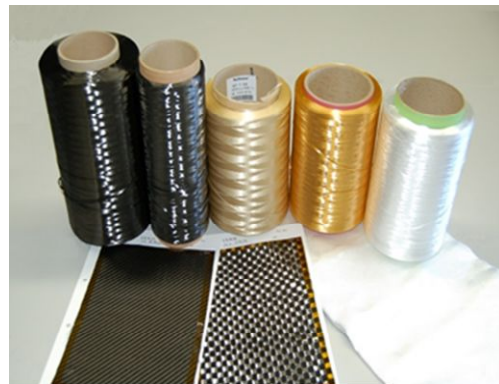


図4 各種産業用繊維

炭素繊維[1]は、比重が 1.8 前後と鉄の 7.8 に比べて約 1/4 であり、引張強度を比重で割った比強度が鉄の約 10 倍、引張弾性率を比

重で割った比弾性率が鉄の約7倍と非常に軽く強い材料である。これに、疲労しない、錆びない、化学的・熱的に安定といった炭素特有の性質を併せ持つ繊維である。PAN系とピッチ系があるが、市販の約9割以上がPAN系である。軽量化、高性能化を必要とする航空宇宙業界・スポーツ業界や、導電性、剛性、軽量化の利点を生かし電子機器の筐体などにも用いられている。ガラス繊維[2]は、硬いガラスを糸状にすることでガラス特有の性質と繊維の性質を併せ持たせている。グラスウールと呼ばれる短繊維は、断熱材・吸音材として建築物に用いられ、長繊維はFRP(繊維強化プラスチック)をはじめとする複合材料の強化素材として様々な場面で用いられる。アラミド繊維[3]は、一般的に高強度・耐熱性・寸法安定性・耐薬品性などの特性を持つ高機能繊維の1つで、構造の違いからパラ系とメタ系の2種類に大別される。パラ系は強度・防弾・防刃性に優れ、防弾チョッキ、自動車のブレーキパッドなどの摩擦材やタイヤの補強材、光ファイバーの補強材などに使われている。メタ系は、優れた長期耐熱性から各種フィルターに、難燃性から消防用の防火服や各種プラントのユニフォームに使用される。超高強度ポリエチレン繊維[3]は、低温から高温までの幅広い温度領域でも低下しない耐衝撃性や耐摩耗性に優れ、自己潤滑性を持ち比重が軽いなど、様々な特性を持っている。また、非常に高い耐衝撃性・エネルギー吸収性を持つため、超高強度ポリエチレン繊維を使ったFRPは衝撃を吸収し壊れにくくなる。PBO繊維[3]は、ポリベンズアゾール系ポリマーで、液晶紡糸法によって製造され、アラミド繊維の2倍の強度を持ち、有機系最高レベルの引張強度・弾性率と耐熱性・難燃性を併せ持つスーパー繊維である。防弾チョッキや卓球のラケットなど幅広く使用されている。

今回収集した産業用繊維のうち、炭素繊維は直径が7~8 μm の繊維を3000本(3K)から24000本(24K)束ねたものである。ガラス繊維は直径5~20 μm の繊維を束ねたもので、その線密度は75~2400dtex(1texは1000mあたりの重さg数)、超高強度ポリエチレン繊維は直径14~23 μm の繊維を束ねたもので、その線密度は150~2640dtexである。また、PBO繊維は直径13~15 μm の繊維を束ねたもので、その線密度は1110dtexで、アラミド繊維は直径13~20 μm の繊維を65~1000本束ねたもので、その線密度は195~1670texである。

一方、産業用繊維の空気力学的特性と比較するため、表2のように、円形断面を有する糸として、ナイロン・モノフィラメント系6種類とポリエステル・マルチフィラメント系を1mあたり1000回加燃して熱固定したものの3種類を準備した。また、矩形断面を有する産業用繊維のモデルとしてポリプロピレンとポリエステルのテープ2種類を準備した。(表中、1denは9000mあたりの重さg数)

表2 実験に使用した糸およびテープ

ナイロン・モノフィラメント系	01,02,06,1,2,4号
ポリエステル・マルチフィラメント系(加燃)	75,150,225den (1000t/m)
PPテープ	t=13 μm
PEテープ	t=13 μm

(2)円形断面糸の空気摩擦抗力

ナイロン系とポリエステル系の抗力測定から空気摩擦抗力係数を計算し求めた。図5のように、空気摩擦抗力係数は半径レイノルズ数 $Rea = Va/v$ でよく整理されることがわかる。特に両端固定条件(以下 fix)では、

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

なる実験式で近似することが可能で、本実験では、 $K=0.27$, $n=0.58$ なる値が得られた。これは、円形断面を有する糸の空気摩擦抗力係数が糸の半径に依存し、細い糸ほどその値は大きくなることを示している。言い換えるなら、細い糸ほど糸の曲率の効果が大きく表れるとも言える。一方、自由端条件(以下 free)では、 Rea が100以下の領域では両端固定状態とあまり変わらないが、レイノルズ数が大きくなるにつれて、その差は大きくなり、 $Rea=1000$ 付近では両端固定状態の1.5~2倍の空気抗力係数となることわかる。

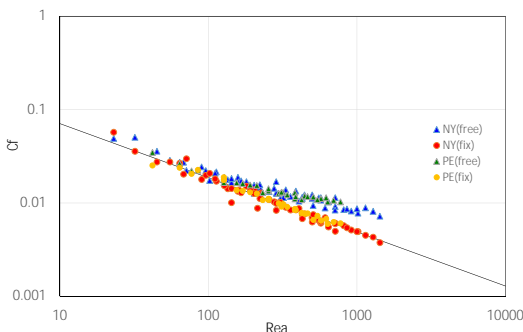


図5 円形断面をもつ糸の空気摩擦抗力係数

この現象をさらに詳しく調べるため、 Rea に糸の細長さ a/x をかけた Va^2/vx というパラメータを横軸に取り直し、縦軸には糸の空気摩擦係数 C_f を完全乱流における剛体平板の空気摩擦抗力係数

$$C_{fp} = 0.074 Rex^{-0.2} \quad \dots(4)$$

で除した値を取った。図6において、 $C_f/C_{fp}=1$ が剛体平板の抗力係数に等しいと言えるが、図では自由端条件におけるデータを抽出しているため、 $C_f/C_{fp}=2$ の線を参考に加えてある。 Va^2/vx が小さい領域では、最初非常に高い値を示しているが、 Va^2/vx の増加とともに値は減少し、0.02を超えたあたりからほぼ横ばいとなっている。この結果から、細長い糸あるいは空気流の遅い低レイノルズ数の領域では、糸の曲率の効果が表れ空気摩擦抗力係数は増大するが、太い糸あるいは空気流速が増してくると、その効果は徐々に薄れ、完全乱流における剛体平板の理論に近づいていくことがわかる。

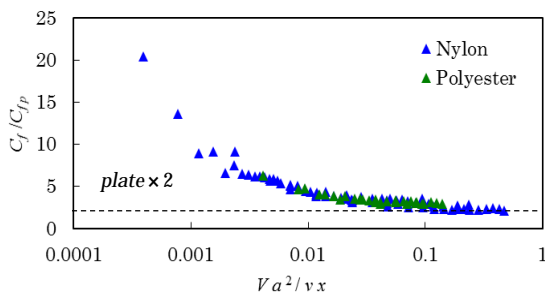


図6 円形断面系における曲率の効果

(3) テープの空気摩擦抗力

産業用繊維はサイジング材と呼ばれる収束材にてテープ状に成形されていることが多い。しかし、機械的な把持や摩擦、極端な曲げ、激しい空気流などにさらされると、繊維分離やフィブリル化、毛羽立ちが起こるため、ここではモデルとしてポリプロピレン(PP)およびポリエチレン(PE)製のテープを使用して基礎データの収集を行った。

テープ長さを100~900mmまで100mm間隔で変化させ、両端固定条件では空気流速を60m/s、自由端条件では空気流速を33m/sまで変化させてそれぞれ空気抗力を測定した。その値をもとに、空気摩擦抗力係数を算出した結果を図7に示す。両端固定状態において Rex が 5×10^5 以上の領域では、データが直線的に位置しているため、空気摩擦抗力係数は、

$$C_f = K Rex^{-n} \quad \dots(5)$$

のように長さレイノルズ数で整理できることが期待できる。この部分の近似直線を求めてみると、 $K=0.014, n=0.1$ となり、乱流域における剛体平板の $K=0.074, n=0.2$ と比較すると直線の傾き n はやや異なるものの、空気摩擦抗力係数の値としては非常に近いものとなる。ただし、 5×10^5 以下の領域においてはデータにばらつきが発生し、長さレイノルズ数での整理や剛体平板に置き換えての解析は非常に困難と言える。これに対し自由端条件では、データのばらつきは少なく、その値は両端固定条件の3~4倍程度となっていることがわかる。

自由端条件において、テープは円形断面を有する系以上に激しく振動してはためき、摩擦抗力のみならず圧力抗力も受けて、抗力値全体が増大しているものと考えられる。

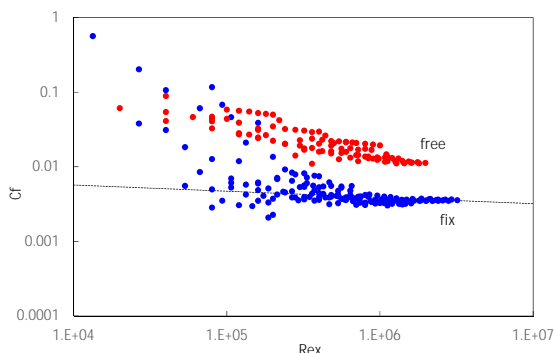


図7 テープの空気摩擦抗力係数

(4) 拘束条件の影響

両端固定条件における拘束荷重の影響を調べるため、テープの下端にぶら下げのおもりを変化させた。図8は重さを1~10gまで変えた時の空気抗力の値を示している。3~10gの場合は、空気流速に関係なくほぼ同じ値をとっているが、1gの場合は、極端に抗力値が増大していることがわかる。これより、1gではテープを十分に拘束することができず、自由なはためきを許容していることが予想される。この結果から、本研究での両端固定条件におけるおもりの重さは10gを基本としている。

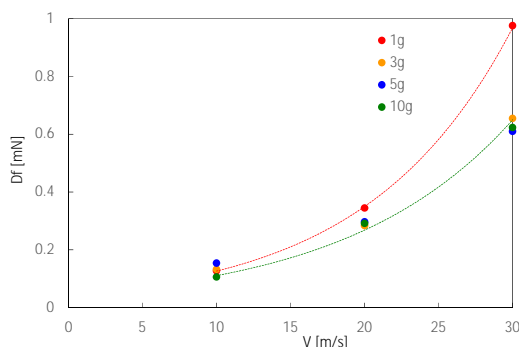


図8 拘束荷重と空気抗力の関係

(5) テープ長さの影響

円形断面を有する系の場合、空気抗力係数 C_f は半径レイノルズ数 Rea で整理され長さ L に依存しないため、空気抗力は(1)式より、長さに比例することになる。しかし、テープの場合は、空気抗力係数 C_f が長さレイノルズ数 Rex (長さ L の関数)で整理されるので、空気抗力は(2)式より、長さの指数関数となる。

両端固定条件において、空気流速とテープ長さを変化させて空気抗力を測定してみると、図9のような結果が得られた。それぞれのデータについて近似式を求めてみると、空気抗力は長さ L の0.8~0.9乗の関数となっていることがわかる。これは、空気摩擦抗力係数 C_f が長さレイノルズ数 Rex (言い換えれば長さ L)の-0.1~-0.2乗の関数となっていることを物語っている。従って、テープの空気抗力は、長さには比例せず、剛体平板に近い傾向を示しているとも言え、同様に自由端条件においても、テープの空気抗力は長さに比例しないと結論づけることができる。

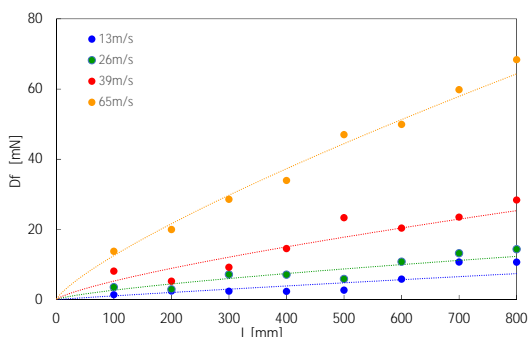


図9 両端固定におけるテープの空気抗力

(6) テープ幅の影響

長さ 500mm、テープ幅 3mm を基準に、幅を 0.5~5mm まで変化させた時の自由端条件の空気抗力係数を図 10 に示す。縦軸は空気抗力係数を剛体平板の抗力係数(4)式で除したもので、黒いプロットは比較のため両端固定条件におけるそれを表している。自由端条件において、3mm を超えると空気抗力係数は一定の値(およそ 3 倍)に収束しているが、幅が狭くなるにつれて抗力係数が平板の傾向から離れ増大していくことがわかる。テープ幅が狭くなると、形状的にも空気力学的にも平板としての特徴を失っていくことが確認できる。

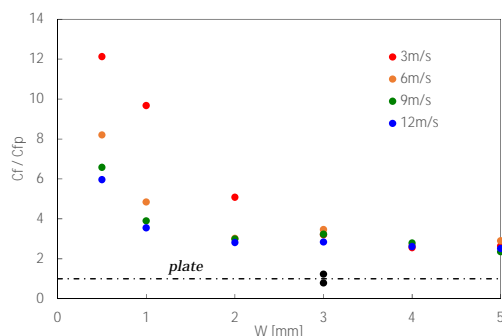


図 10 テープ幅の違いによる影響

(7) 柔軟性の影響

長さ 500mm、テープ幅 3mm を基準に、材料の柔軟性による影響を確認するため、曲げ剛性の異なる仮定のテープを作成して比較検討した。図 11 において、それぞれのプロットは、剥離紙テープの重ね合わせ(Hard)、ビニールテープの重ね合わせ(Medium)、PPテープ(Soft)の自由端条件の値である。比較用として、最も剛性の高いテープ(Hard)をさらに両端固定条件で実験したのも示した。これより、しっかりと固定された状態や柔軟性の低い材料では、空気抗力係数は平板の値に近いことがわかるが、柔軟性が増すにつれてテープが自由に振動できるようになり、テープの抗力係数は増大していくことがわかる。テープの柔軟性が、空気抗力に大きく影響を及ぼすことが確認できる。糸や織物の柔軟性(この場合は曲げ剛性)を定量的に評価する方法は存在しているが、テープのそれを評価する絶対的な方法は確立されていないので、この点の検討も必要とされる。

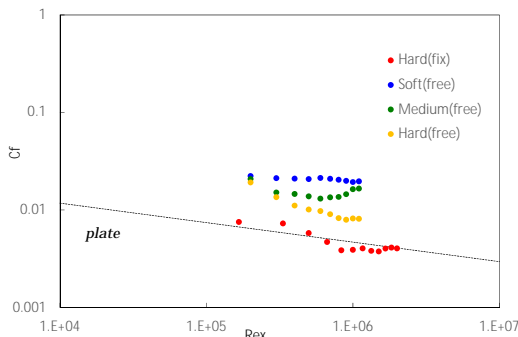


図 11 テープの柔軟性の違いによる影響

(8) 断面形状の影響

ここまでモデルとしてテープを使用し実験を行ってきたが、産業用繊維は極めて細い繊維を束ねた繊維集合体である。図 1 のように、丸い形状から矩形断面までさまざまに成形することができる。図 12 は、同じフィラメント数(1440 本)をもつポリエステル繊維(167tex)を円形(直径 0.43mm)と矩形(幅 1.2mm, 厚さ 0.19mm)に成形して糊付けし、両端固定条件にて空気抗力係数を比較したものである。図では、長さレイノルズ数で整理しているが、両端固定条件では矩形より円形のほうが空気摩擦抗力係数は大きくなるのがわかる。ただし、これが自由端条件になると、はためきによる影響が大きく現れ、矩形は円形より変化が激しくなるので、空気抗力係数の形状による傾向は逆転することになる。

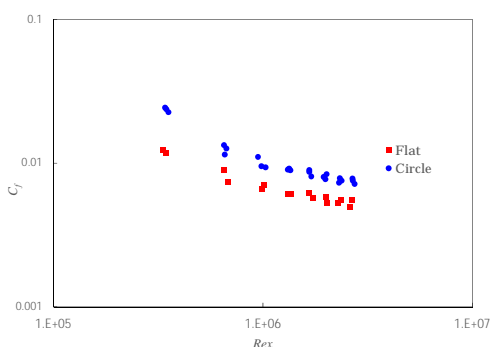


図 12 断面形状による抗力係数の違い

謝辞

本研究の実施にあたり、各種産業用繊維のサンプル提供ならびに協力をいただきました。東洋紡(株)、帝人(株)、平松産業(株)、一村産業(株)、創和テキスタイル(株)、津田駒工業(株)の各社に感謝申し上げます。

参考情報

- [1]炭素繊維協会, ホームページ
<http://www.carbonfiber.gr.jp/>
- [2]硝子繊維協会, ホームページ
<http://www.glass-fiber.net/>
- [3]日本化学繊維学会, ホームページ
<http://www.jcfa.gr.jp/>

5. 主な発表論文等

- 〔雑誌論文〕(計 0 件)
- 〔学会発表〕(計 0 件)
- 〔図 書〕(計 0 件)

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・その他部局等・教授
研究者番号: 80280379