

# 着衣状態にある物体まわりの流れに関する研究

三嶋大志<sup>1)</sup> ・ 菊地正憲<sup>2)</sup> ・ 平野公孝<sup>2)</sup>

## A Study of the Flow around a Circular Cylinder Wrapped by Textile Fabric

Taishi MISHIMA, Masanori KIKUCHI, Kimitaka HIRANO

### Abstract

This study is aimed for investigation of the aerodynamic influence that a circular cylinder wrapped in a textile fabric gives a flow. We prepared 4 kinds of textile fabrics that materials are different for this study and measured their yarn density, the linear density of yarn by a unit of the tex, the thickness of them and Young's modulus. These fabrics are formed in the shape of the pipe with the adhesive and it is used to wrap a cylinder. A cylinder wrapped by the fabric is installed in a two-dimensional wind tunnel in order to perform mainly two aerodynamic experiments. When there is a bluff body in a flow, Karman vortex occurs in the wake. Two experiments are performed to investigate the change of the Karman vortex. The first experiment set up a Pitot tube in the wake side of the cylinder and measured the velocity distribution of the wake with a digital manometer connected to it. The second experiment measured the frequency of Karman vortex in the wake with a hot-wire airflow meter and FFT (Fast Fourier Transform) analyzer. From the provided results and the properties of the fabrics, we consider the influence that the cylinder wrapped in the fabric gives the flow.

### Key Words:

Textile Fabrics, Circular Cylinder Wrapped with Textile Fabrics, Velocity Distribution, Karman Vortex, Hot-Wire Airflow Meter

### 1. はじめに

18, 19 世紀にかけて起こった産業革命, 19 世紀後半における人造繊維の発明, 実用化から, 被服材料は飛躍的な進歩を遂げ, その進歩は衣生活の多様化を招き, 衣生活の多様化は更なる被服材料の進歩を促してきた. 近年, 経済的豊かさから, 被服は主としてデザイン性を求められる傾向にあるが, 科学技術の進歩が人類の

活動範囲を広げたことにより, 過酷な環境下に対応できる耐環境性, 信頼性が求められ, また, スポーツの分野ではスポーツ人口の増加, アスリートの飽くなき記録への挑戦から, 高性能, 新機能を持つ被服材料の需要を生んでいる.

それに伴い, 流体力学的観点からの被服材料研究も盛んに進められており, 布と流れに関する研究はいくつか散見される. 着衣状態がシミュレーションにより予測できれば, その衣服を実際に試作することなく評価でき, 試作プロセスの省略ができることから, 山崎,

1) 機械システム工学専攻大学院生

2) 機械システム工学科教授

今岡<sup>1)</sup>が布の動的変形予測における風の影響について報告している。しかし、この報告は着衣状態ではないため、実際、着衣が流れに与える影響、流れが着衣に与える影響については分からない。また、その他、着衣状態と流れに関する研究は知見する限りあまり報告されていない。

着衣状態が流れに与える影響の調査、そしてそのメカニズムの解明が出来れば、前述の試作プロセスの省略以外に、スポーツウェア、作業着、レインウェア、防風・防寒具開発への応用、布以外の柔軟体研究への応用等が期待される。また、例年報告される水難事故は、着衣状態で水に溺れるケースがその70~80%を占めており、近年、着衣泳が人体に与える影響、その対処法を探る研究が多数報告されている。着衣が流れに与える影響の調査はこれらの研究にも寄与できると考える。

本実験では着衣状態にある円柱が流れに与える影響を調査する。ブラフボディの後流には、流れのレイノルズ数が大きくなると、カルマン渦が発生することが知られる。着衣状態にある円柱はこのカルマン渦に影響を及ぼすと考え、主としてピトー管による後流の速度分布の測定、熱線流速計によるカルマン渦の放出周波数を測定することで、その特性について考察した。

本実験は材質の異なる4種類の織布を用意し、筒状にした布を円柱に被せ、二次元風洞内に設置した。また、円柱に働く抵抗は背圧に大きく影響されるため、着衣状態の円柱においてもその円柱後縁の表面圧力を測定した。流体力学的特性と布の性質との関連性について調べるため、布の厚さ、糸密度、糸のみかけの太さ、ヤング率についても測定を行った。これらの測定結果から、着衣状態にある円柱が流れに与える影響、流れが着衣に与える影響を調査、考察する。

## 2. 主な記号

以下に本実験で用いられた主な記号を示す。

- $U$  : 主流速(m/s)
- $u$  : 後流の時間平均速度(m/s)
- $C_p$  : 円柱表面上の圧力係数
- $\theta$  : 円柱表面上の測定孔の位置(deg)
- $d$  : 円柱の直径(mm)
- $c$  : 布筒の周囲長さ(mm)

$c_0$  : 円柱の円周長さ(mm)

$f$  : カルマン渦の放出周波数(Hz)

## 3. 実験装置

### 3.1 二次元風洞

図1に二次元風洞の測定部概略、図2に座標系を示す。座標原点は風洞に挿入された円柱の軸中心であり、測定部入り口から500mm、測定部上面から325mm、風洞壁面から70mmの位置である。二次元風洞の仕様は以下に示す。

- 1) 測定部 材質 アクリル  
形状 650mm×140mm×1000mm
- 2) ディフューザ 開き度 8° , 長さ 800mm
- 3) 最大風速 40m/s, 乱れ度 0.2%以下
- 4) 電動機 規格 (15kw, 220V, 60Hz)
- 5) 送風機 直径 750mm, 6枚羽

測定部は大小多数の穴が開けられており、そこに円柱やピトー管等を挿入できる。また、測定部表面は水平線、垂直線がけがいてあり、これらけがき線とレーザーライン墨出し器(タジマツール)を目印としてピトー管等の正確な位置、方向を定める。挿入物と測定部の隙間は油粘土、ワセリン、セロハンテープでシールしている。

風洞の主流速度  $U$  は測定機器の測定範囲を考慮した結果、全ての実験において  $U$  = 約 16m/s になるよう設定した。なお、円柱の直径  $d$  に基づくレイノルズ数は  $Re$  = 約  $2.6 \times 10^4$  である。

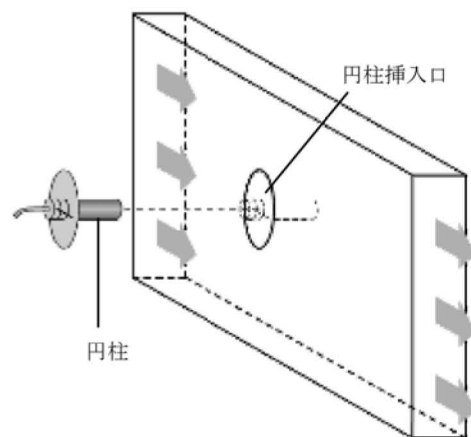


図1 測定部の概略

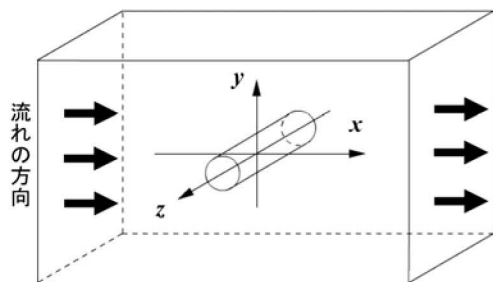


図2 座標系

### 3.2 円柱

図3に円柱の設置図を示す。円柱の材質は真鍮であり、寸法は直径  $d=25.1\text{mm}$ 、アスペクト比 5.54 である。

円柱は風洞側面から挿入し、測定部入り口から 500mm、測定部上面から 325mm、流れに直角、床面に水平となるよう設置できる。また、円柱の端は流れの二次元性を確保するため金属円盤にとりつけてある。金属円盤はオス、測定部壁面はメスとなる凹凸があり、これにより円柱が正確な角度、位置で固定できる。

円柱はスパン中央に微小な測定孔を持ち、測定孔は円柱内部からビニールチューブを通してゲッチングン型マノメータ（理化精機工業）に接続され、円柱表面上の圧力を測定できる。本実験では背圧を求めるために使用する。

測定孔の位置  $\theta$  は前縁を  $\theta=0^\circ$  とする。角度の調整は、調節つまみの回転とつまみに付いたねじにより任意の位置に固定できる。位置は円柱に締結された金属板表面の分度器により表示される。

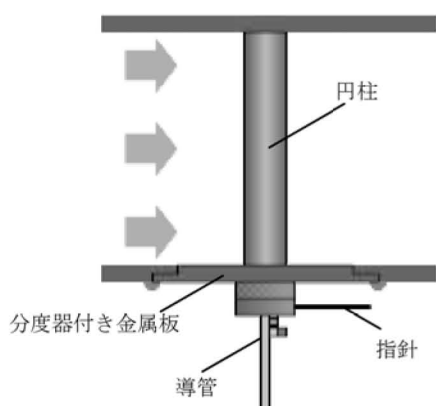


図3 円柱の設置図

## 4. 供試布

### 4.1 布筒

本実験は円柱に被せられるよう筒状にした布を布筒と呼称する。図4にその寸法を示す。布筒の大きさは、布筒の周囲長さ  $c$  と円柱の円周長さ  $c_0 \cong 80\text{mm}$  との比  $c/c_0$  で表し、本実験は  $c/c_0=1.2, 1.5, 2$  の3種類を用いた。また、全ての測定において、布筒は各種3つずつ作成し、それぞれの測定値の平均を求めた。

布は A, B, C, D の4種類の織布を用いる。材質は B のみポリエステルと綿の混紡であり、その他は綿である。その諸元はそれぞれ測定器を用いて実際に計測を行った。

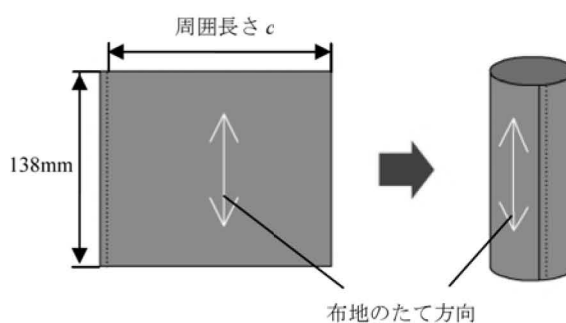


図4 布筒

### 4.2 布筒の方向

織布はたて（経）とよこ（緯）の方向があり、方向によってその性質は異なる。本実験では方向による違いを調査するため、使用する布筒の方向を図5に示すとおり定義する。

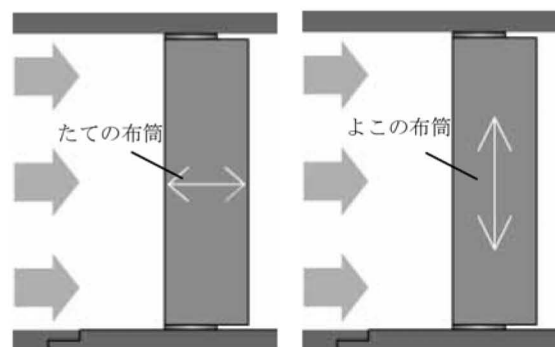


図5 布筒の方向の定義

### 4.3 糸密度

1cmあたりの糸の本数で定義される。織物分解鏡（島津理科製）を用いて測定した。測定結果を表1に示す。

表1 供試布の糸密度

布		A	B	C	D
糸密度 (本/cm)	たて	42.0	24.5	53.5	34.6
	よこ	30.4	17.8	28.8	24.6

4.4 厚さ

織物の厚さ (mm) は厚さ測定器 (尾崎製作所) を用いて一定時間, 一定圧力の下で測定される. 測定結果を表2に示す.

表2 供試布の厚さ

布	A	B	C	D
厚さ(mm)	0.25	0.78	0.22	0.41

4.5 織度

糸のみかけの太さである. 糸は細い繊維の集合であるため, その太さは簡単に求められない. 故に, 本実験では, 基準となる長さの何倍になるかで織度を表す手法 (テックス法) を用いた. 測定には電子天秤 (島津製作所) を使用し, 測定結果を表3に示す.

テックス法は(1)式で定義されており, 標準長  $L_0=1000m$ , 単位重量  $W_0=1000g$  である.

$$T(tex) = \frac{L_0 w}{W_0 l} \quad \text{ここで} \begin{cases} L_0 & : \text{標準長さ}(m) \\ W_0 & : \text{単位重量}(g) \\ l & : \text{測定長さ}(m) \\ w & : \text{測定重量}(g) \end{cases} \quad (1)$$

(1)式は長さ  $l$  の糸を  $n$  本採取し, その重量  $W$  を求める方法から次式となる.

$$T(tex) = \frac{L_0 w}{W_0 l} = \frac{L_0 W}{W_0 n l} \quad (2)$$

測定方法は, 各供試布のたて糸, よこ糸をそれぞれ長さ  $l=30cm$ ,  $n=20$  本採取し, その重量  $W$  を電子天秤 (島津製作所) で測定し, (2)式から算出した.

表3 供試布の織度

布		A	B	C	D
織度(tex)	たて	14.7	57.1	13.4	29.7
	よこ	15.1	84.7	13.0	29.2

4.6 ヤング率

引張試験機 (島津製作所) を用いて測定した. 図6に試験片を示す. 試験片は JIS L 1096 に基づいて, 生

地から約  $30 \times 200mm$  の大きさに切り出し, 幅の両側から糸を取り去り,  $25mm$  幅になるよう作成する.

各供試布のたて, よこ方向それぞれ3枚ずつ作成し, その合計24枚を試験した. つかみの寸法は  $30 \times 20mm$ , つかみ間隔は  $100mm$ , 引張速度は  $100mm/min$  である. 布のつかみに対する滑りを防ぐため, つかみと布の間に紙やすりを挟んだ. 測定結果を表4に示す.

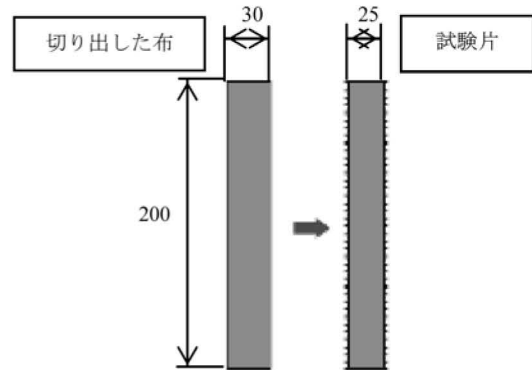


図6 試験片

表4 供試布のヤング率

布		A	B	C	D
ヤング率(GPa)	たて	2.77	0.70	3.70	1.38
	よこ	3.04	1.24	2.44	3.28

4.7 供試布の緒元

供試布の緒元を表5にまとめる.

表5 供試布の緒元

布	A	B	C	D	
材質	綿 100%	綿 100%	PET65% 綿 35%	綿 100%	
組織	平織	斜文織	平織	平織	
糸密度 (本/cm)	たて	42	24.5	53.5	34.6
	よこ	30.4	17.8	28.8	24.6
厚さ (mm)	0.25	0.78	0.22	0.41	
織度(tex)	たて	14.7	57.1	13.4	29.7
	よこ	15.1	84.7	13	29.2
ヤング率 (GPa)	たて	2.77	0.70	3.70	1.38
	よこ	3.04	1.24	2.44	3.28

5. 実験方法

### 5.1 後流の速度分布測定

ピトー管（ツクバリカセイキ）を用いて、着衣状態にある円柱後流の時間平均速度  $u$  を測定し、その速度分布を調べる。実験装置の構成を図 7 に示す。円柱後流側のピトー管（管径 9mm）は、先端が  $x$ =約 200mm、流路幅中央に位置し、トラバーサにより  $y$ =-110~110mm の範囲で可動する。上流側のピトー管（管径 6mm）と後流側のピトー管は導管を通じてデジタルマノメータ（コスモ計器）に接続されており、三方コックを切り換えることで任意の時間平均圧力を測定できる。上流側のピトー管は風洞の主流速度  $U$  を約 16m/s ( $Re$ =約  $2.6 \times 10^4$ ) に設定するため用いた。

測定は、織布による違いを比較するため、大きさの等しい A, B, C, D の布筒 ( $c/c_0=1.5$ , たて, よこ方向) をそれぞれ円柱に被せた場合と、布筒の大きさによる違いを比較するため、布筒（布 A, B, よこ方向のみ）の大きさをそれぞれ  $c/c_0=1.2, 1.5, 2$  に設定した場合を行った。

また、円柱表面の測定孔はゲッチング型マノメータ（理化精機工業）と接続されており、これにより  $\theta = 180^\circ$  の円柱表面圧力から圧力係数  $C_p$  を求める。円柱表面の圧力は大気圧  $p_0$  との差圧をゲッチング型マノメータのアルコール柱の高さ  $h_p$  で測定する。圧力係数  $C_p(\theta)$  は次式で定義される。

$$C_p(\theta) = \frac{p(\theta) - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^2} = \frac{(p(\theta) - p_0) + (p_0 - p_\infty)}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (3)$$

ここで、 $p_\infty$  は一様流柱の静圧、 $\rho$  は空気密度である。

$$p(\theta) - p_0 = \rho_{al} g h_p \quad (4)$$

$\rho_{al}$  はアルコール密度であり、比重計を用いて測定される。(3), (4)式より、圧力係数  $C_p$  は算出される。

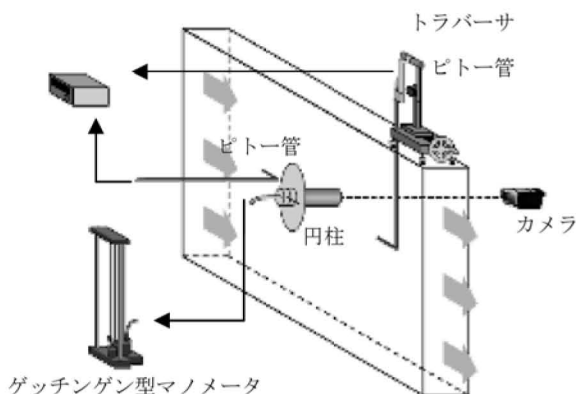


図 7 実験装置の構成

### 5.2 カルマン渦の放出周波数測定

熱線流速計（日本カノマックス）を用いて、着衣状態の円柱に生じるカルマン渦の放出周波数  $f$  を測定する。実験装置の構成を図 8 に示す。

プローブ ( $5 \mu \phi$  タングステン) は、トラバーサにより先端が  $x$ =約 90mm,  $y$ =約 60mm, 流路幅中央に位置し、熱線流速計と接続されている。

熱線による電圧の変化は FFT アナライザ（小野測器）に入力され、解析される。今回の測定では、パワースペクトル図に加算平均を行い、カルマン渦の放出周波数  $f$  を測定した（全てサンプル点数 1024, 周波数レンジ 400Hz, 加算平均約 1000 回）。

測定は、後流の速度分布と同じく、素材による違いを比較するため、大きさの等しい布 A, B, C, D の布筒 ( $c/c_0=1.5$ , たて, よこ方向) をそれぞれ円柱に被せた場合と、布筒の大きさによる違いを比較するため、布筒（布 A, B, よこ方向のみ）の大きさをそれぞれ  $c/c_0=1.2, 1.5, 2$  に設定した場合を行った。

測定方法は、まず上流側のピトー管を用いて主流速度  $U$ =約 16m/s ( $Re$ =約  $2.6 \times 10^4$ ) に設定する。その後、ピトー管を抜き、熱線流速計、FFT アナライザを用いてカルマン渦の放出周波数  $f$  を測定した。

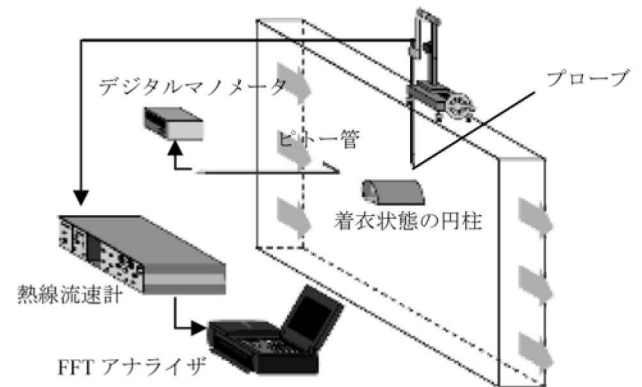


図 8 実験装置の構成

## 6. 実験結果および考察

### 6.1 後流の速度分布

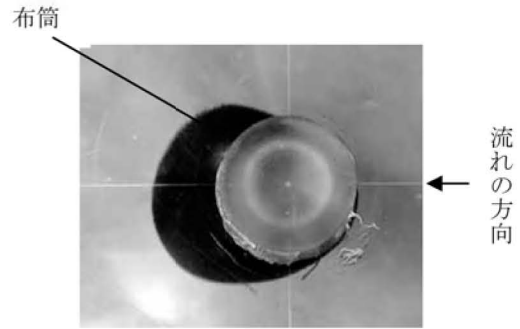
6.1.1 方向による比較 図 9, 10 は布筒の各方向における後流の速度分布を比較したものである。布 A, B, C は方向による違いを示さなかった。一方、布 D はたて方向において速度欠損が小さく、よこ方向はたてに比べて大きい。また、布 A, C は近い値を示した。

布筒の挙動は、布 A, C が絶えずばたつきを示したのに対して、布 B は微かに振動するのみで、楕円柱の形状を維持した。布 D はたて方向において楕円柱の形状を維持したが (図 11), よこ方向において時折ばたつきを示す不安定性が確認された (図 12)。

ヤング率を糸密度と織度で割った値を表 6 に示す。布 A, B, C は布の方向による差が小さい一方、布 D は差が大きい。これより、ヤング率と後流の速度分布には関連性があると考えられる。

後流速度分布が布 A, C で近い値を示したことについては表 5, 6 より糸密度, 厚さ, 織度, ヤング率において近い値を示したことに関連性があると考えられる。この関連性から、布筒の形状的要素が及ぼす影響は大きいと考えられる。

布 D のたて方向において速度欠損が小さい原因は、図 11 より布筒が抵抗の少ない形状を維持していることも一因していると考えられる。



(布 D,  $c/c_0=1.5$ ,  $Re=約 2.6 \times 10^4$ , たて方向)

図 11 楕円柱の形状を維持する布筒



(布 D,  $c/c_0=1.5$ ,  $Re=約 2.6 \times 10^4$ , よこ方向)

図 12 ばたつきを示す布筒

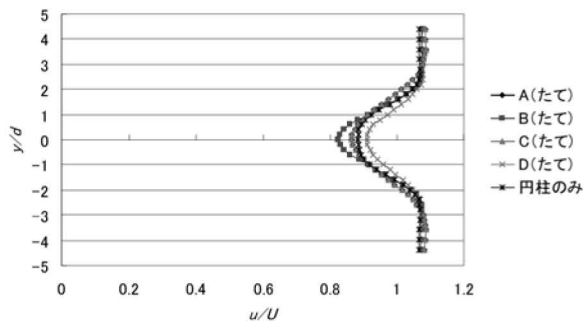


図 9 たての布筒における後流速度分布の比較

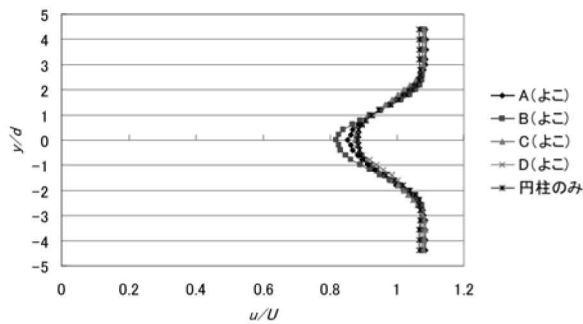


図 10 よこの布筒における後流速度分布の比較

表 6 糸 1 本の単位織度あたりのヤング率

布		A	B	C	D
織度あたりのヤング率 ( $\times 10^6 \text{Pa/本} \cdot \text{tex}$ )	たて	4.48	0.51	5.21	1.32
	よこ	6.71	0.81	6.46	4.50

6.1.2 大きさによる比較 図 11, 12 は布 A, B (よこ方向) の各大きさによる後流の速度分布を比較したものである。布 A は大きさによる変化をほとんど示さない一方、布 B はそれぞれ異なる値を示した。布筒の挙動は A, B ともに  $c/c_0=1.2$  で楕円柱形状を維持し、 $c/c_0=2$  でばたつきを示す。 $c/c_0=1.5$  は布 A で楕円柱形状を維持し、布 B でばたついた。

この結果から、布筒の大きさが流れに及ぼす影響は一意的でなく、そのメカニズムは種々のファクターが絡んだ複雑さを持つと思われる。

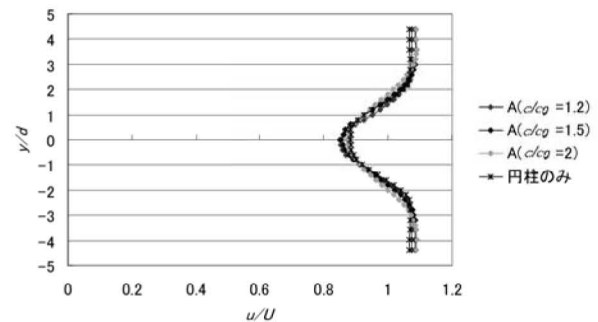


図 11 布筒 A の大きさが後流の速度分布に及ぼす影響

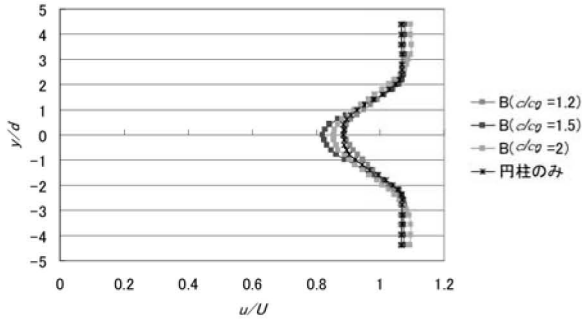


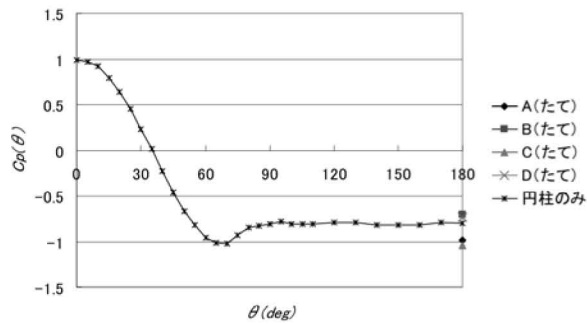
図 12 布筒 B の大きさが後流の速度分布に及ぼす影響

6.2 円柱表面の圧力係数

6.2.1 方向による比較 図 13, 14 は布筒の各方向における円柱表面後縁の圧力係数  $C_p$  を比較したものである。円柱のみ,  $\theta=0^\circ$  から測定した。

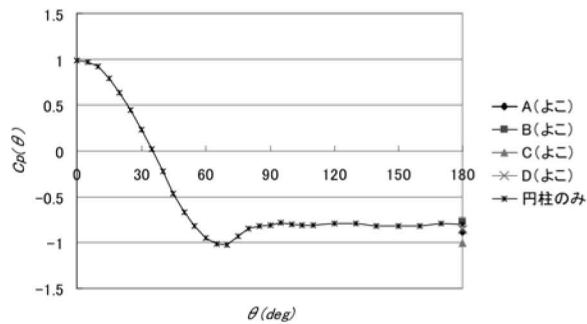
後流の速度分布は布筒 D を除いて、たて、よこ方向でほとんど違いが見られなかった。

円柱のみの場合、背圧を求めることによりその抵抗の大きさがわかるが、着衣状態の場合、その他測定結果との関連性、規則性が認められなかった。



( $c/c_0=1.5$ , たて方向,  $Re \approx 2.6 \times 10^4$ )

図 13 たての布筒における圧力係数の比較



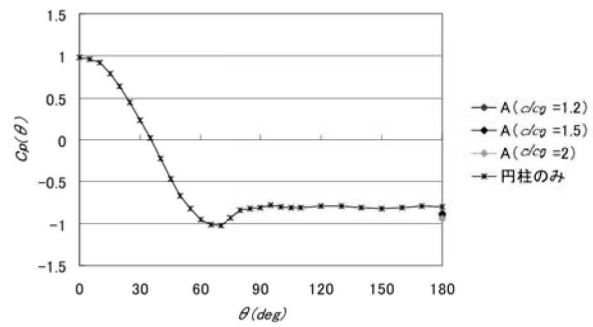
( $c/c_0=1.5$ , よこ方向,  $Re \approx 2.6 \times 10^4$ )

図 14 よこの布筒における圧力係数の比較

6.2.2 大きさによる比較 布筒 A の大きさ別比較を図 15, 布筒 B の大きさ別比較を図 16 に示す。

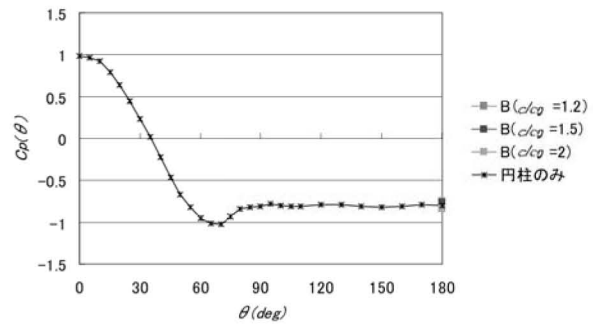
布筒 A は後流の速度分布と同じく、大きさによってほぼ変化は無かった。一方、布筒 B は  $c/c_0=1.2, 1.5, 2$  の順で圧力係数が大きい。

しかし、6.2.1 項同様、その他測定結果との関連性、規則性が認められなかった。着衣状態であるため、円柱表面の測定孔は外部の流れと遮断される。そのため、着衣状態の円柱表面後縁の圧力は抵抗との関連性が無くなると考えられる。



(布 A, よこ方向,  $Re \approx 2.6 \times 10^4$ )

図 15 布筒 A の大きさ別比較



(布 B, よこ方向,  $Re \approx 2.6 \times 10^4$ )

図 16 布筒 B の大きさ別比較

6.3 カルマン渦の放出周波数

6.3.1 方向による比較 表 7 は布筒の方向別における渦放出周波数  $f$ ,  $f$  に基づくストローハル数  $S_f$  の比較である。周波数は布 A, B, C, D の各場合において円柱のみの場合を下回った。

周波数が小さくなるということは周期が大きくなることであり、円柱のカルマン渦は着衣状態になると放出される間隔が大きくなるのがわかる。

表7 布筒の方向が渦放出周波数に及ぼす影響

布		$f(\text{Hz})$	$S_f$
A	たて	62.3	0.098
	よこ	59	0.093
B	たて	81	0.127
	よこ	82.3	0.129
C	たて	60.3	0.095
	よこ	54.3	0.085
D	たて	94.3	0.148
	よこ	95	0.149
円柱のみ		110.3	0.173

( $c/c_0=1.5$ ,  $Re=約 2.6 \times 10^4$ )

6.3.2 大きさによる比較 表8は布筒の大きさ別における渦放出周波数 $f$ , ストローハル数 $S_f$ の比較である。布A, Bの周波数は共に $c/c_0$ が大きくなるにつれて小さい値を示した。

この結果は多くのファクターが考えられ, 本実験結果のみでは同定しかねるが, 表面粗さ, 曲げ特性等, 布地の形状的特性等の複合的な結果だと考えられる。

表8 布筒の大きさが渦放出周波数に及ぼす影響

布 (よこ)		$f(\text{Hz})$	$S_f$
A	$c/c_0=1.2$	101.7	0.159
	$c/c_0=1.5$	59	0.093
	$c/c_0=2$	45.7	0.072
B	$c/c_0=1.2$	97	0.152
	$c/c_0=1.5$	82.3	0.129
	$c/c_0=2$	27.3	0.043
円柱のみ		110.3	0.173

(よこ方向,  $Re=約 2.6 \times 10^4$ )

## 7. 結論

本実験では, 着衣状態にある円柱が後流に与える影

響を調査するため, 後流の速度分布, 円柱後縁表面の圧力係数, カルマン渦の放出周波数を測定した。その結果, 次のことが明らかになった。

- (1) 着衣状態にある円柱は, 円柱のみの場合に比べカルマン渦の放出周波数が小さくなる。
- (2) 布のヤング率, 後流の速度分布, カルマン渦の放出周波数の間に局所的な関連性, 規則性が確認される。
- (3) 糸1本の単繊維あたりのヤング率は後流の速度分布と関連性, 規則性が確認される。
- (4) 着衣状態の円柱後縁表面の圧力係数はその他測定結果との関連性, 規則性が認められない。
- (5) 布筒A, Cは後流の速度分布, 円柱後縁表面の圧力係数, カルマン渦の放出周波数が近い値を示す。
- (6)  $c/c_0=1.5$ の布筒Bは最も速度欠損が大きい。
- (7) 布筒Dはたて方向において速度欠損が小さい。
- (8) 布筒Dはよこ方向において微かな振動, ばたつきという異なる挙動を交互に示し, その後, どちらか一方に安定する。

終わりに本研究を遂行するにあたり, 被服学の観点から貴重なアドバイスを頂いた本学教育文化学部の岡村好美教授に感謝の意を表します。

## 参考文献

- (1) 山崎華恵, 今岡春樹, 布の動的変形予測における風の影響, 繊維学会誌, Vol.52, No.6, pp.284-292(1996).
- (2) 大橋秀夫, 山口信行, 渦—自然の渦と工学における渦, (1988), 朝倉書店
- (3) 中島利誠, 被服材料学実験書, (1991), 光生館
- (4) 成瀬信子, 基礎被服材料学, (1988), 文化出版局
- (5) 山口正隆, 仲三郎, 佐貫治夫, 細田一夫, 山石健次, 被服材料学, (1989), 健帛社
- (6) 熨斗秀夫, 小川信一, 池永彰作, 平松峻, 前川輝彦, 現代被服材料学, (1982), 朝倉書店