

繊維及びメリヤスの空げき構造と空気透過性

真壁 文子, 高田 君江*, 高久 明

(平成 13 年 10 月 4 日受理)

Porosity and Air Permeability of Woven and Knitted Fabrics

Ayako MAKABE, Kimie TAKADA and Akira TAKAKU

(Received on October 4, 2001)

キーワード: 空気透過性, 空隙率, 曲路率, 繊維, メリヤス

Key words: Air permeability, Porosity, Tortuosity, Woven fabrics, Knitted fabrics

1 緒 言

布の空気透過性(通気性)は, 防風・防雨を目的とする衣料用途, 落下傘, 帆, 空気ろ過などの特定用途において重要な役割をもつ。布の空気透過性は, 風のある環境での保温性にも関係する。

織物の空気透過性と織物構造との関係については, 糸のより数, 織糸密度, 糸クリンプなどとの関連が調べられており, 1950年頃までの研究はKaswellの書物¹⁾に要約されている。織物やメリヤスの構造は多種多様であって, 構造と性質との関係を明らかにするためには, 対象とする性質が主に依存する構造をなるべく単純なパラメータで表すことが望ましい。空気透過性は織物に含まれる空げきと密接に関係する。Pilot²⁾は, 織物の空気透過性とカバーファクタの関係調べ, 空気透過性はカバーファクタが大きくなるにつれて双曲線的に減少することを報告している。しかし, カバーファクタは, 織物を厚さのない平面としてとらえ, 織物平面が糸の射影で覆われる部分の面積比を表したものであって, 織物構造の立体的な構造特性を考慮しない。

多孔質体における流体透過の基本的な概念は, Kozneyの式を発展させたKozney - Carmanの式に要約される。Kozney - Carmanの式は, 多孔質体内部の空げきがつくる流体の流路を動水半径と曲路率で表し, この流路を粘性流体が通過する現象を記述したものであり,

Carmanの著書³⁾に詳しい。Kozney - Carmanの式は, 主として粒子充てん系の流体透過の解析に応用され, 多くの研究が報告されている。粒子充てん系の流体透過現象は, 各種の工業装置において重要である。Kozney - Carmanの式は, 繊維塊の空気透過にも応用されているが, 織物やメリヤスなどの一般的な衣料材料に応用した報告は見当たらないようである。

本報告では, 多種類の織物及びメリヤスの空気透過性にKozney - Carmanの式を応用した結果について述べる。

2 試料及び測定

2.1 試 料

綿, 羊毛, ポリエステルからなる市販の43種の衣料用織物とメリヤスを試料として用いた。これらの試料に加えて最も単純な織構造をもつモデルとして, 平織構造の銅製金網3種について空気透過性を測定した。

織物やメリヤスの厚さは, 厚さ測定を行うときの圧子荷重によって変化する。空気透過性を測定するときに試料面に加わる荷重は非常に小さいので, 厚さ測定における圧子荷重は, 測定の再現性を損なわない範囲で, なるべく小さいことが望ましい。本研究では, 何種かの試料について予備実験として行った圧縮荷重~厚さ関係の測定結果を参考にして, 圧子荷重を2gf/cm²に定めて厚さを測定した。試料の異なる5ヶ所について測定し, 平均値を求めた。

織物やメリヤスのような多孔質体の空げき率 ϵ は, 多孔質体の全体積Vに対する空げき部分の体積

服飾美術学科 被服材料研究室

*平成12年7月まで服飾美術学科

第2被服材料研究室助手

V_p の比,

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V} \quad (1)$$

と定義される。本報告では、布の見かけ密度を ρ_a 、繊維密度を ρ_f として、空けき率 ε を次式によって求めた。

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_f} \quad (2)$$

見かけの密度 ρ_a は、試料の面積と厚さから算出した体積当たりの質量として求めた。繊維密度 ρ_f は、綿については $1.58\text{g}/\text{cm}^3$ 、羊毛については $1.32\text{g}/\text{cm}^3$ 、ポリエステルについては $1.38\text{g}/\text{cm}^3$ とした。また、銅の密度は $8.9\text{g}/\text{cm}^3$ とした。

繊維の直径は、試料からランダムに取り出した20本以上の単繊維について、光学顕微鏡によって測定した結果の平均値を用いた。綿は繊維断面が扁平な形をしているので、それぞれの繊維について幅が大きい部分と小さい部分を測定し、これらを楕円の長軸と短軸と見なして求めた面積と等しい面積をもつ円の直径を繊維の直径とした。

2.2 通気抵抗の測定

流体が試料の面積 A を横切って時間 t の間に体積 Q の流体が流れるとすると、流れの速度(線速度) u は、

$$u = \frac{Q}{At} \quad (3)$$

である。D'Arcyの法則によると、多孔質体を透過する流れの速度は、流れを引き起こす圧力こう配に比例する。多孔質体の流体透過に関する基礎理論は、このD'Arcyの法則に基づいている。粘性流体の流速は流体の粘性係数 η に逆比例するから、 D_p を流体が厚さ h の試料を通過するときの圧力損失として、D'Arcyの法則を

$$u = \frac{B_o}{\eta} \frac{\Delta p}{h} \quad (4)$$

と表すこともできる。式(4)の係数 B_o は、試料の流体透過性を表す比透過係数である。

本報告での空気透過性測定には、通気性試験機

(KES-F8-AP1, カトーテック)を用いた。この装置では、一定速度で運動するピストンが空気の押し出し・吸引の1サイクルを行って、試料に空気を通過させ、そのときの通気抵抗 R が直読される。通気抵抗 R は、次式で表される。

$$R = \frac{\Delta P}{U} \quad (5)$$

比透過係数 B_o と通気抵抗の関係は、式(4)と(5)から

$$B_o = \frac{\eta h}{R} \quad (6)$$

となる。

測定は、試料面積を $2\pi\text{cm}^2$ 、空気の体積流量速度を $4\text{cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ に定めて行った。通気抵抗は、それぞれの試料について3回測定し、平均値を求めた。

3 測定結果と考察

3.1 厚さと空けき率

試料の空けき率と厚さの関係を図1に示す。同図において、厚さが 0.2mm 程度の薄い2点のポリエステル織物が空けき率 $0.51 \sim 0.55$ の低い値を示しているが、その他の織物・メリヤスの空けき率は $0.7 \sim 0.9$ 程度の範囲に分布している。また、衣料用として市販されている織物・メリヤスでは、厚さが厚いものほど、空けき率が大きい傾向にあることが分かる。

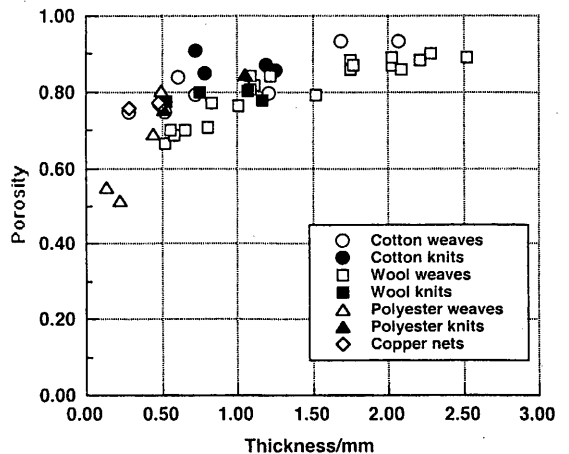


図1 空けき率と厚さの関係

3.2 比透過係数と空げき率

図2に織物、メリヤス及び銅金網について得た比透過係数 B_o と空げき率の関係を示す。比透過係数 B_o は、空気粘性係数 η を $18.1 \mu \cdot s$ として式(6)によって算出した。比透過係数は試料によって大きく変化するので、図2では比透過係数を対数で表している。同図において、比透過係数と空げき率の関係には、試料を構成する素材によって異なるようであり、特に単純な織構造体である銅金網の比透過係数が他の布とかけ離れた位置にあることに注目される。

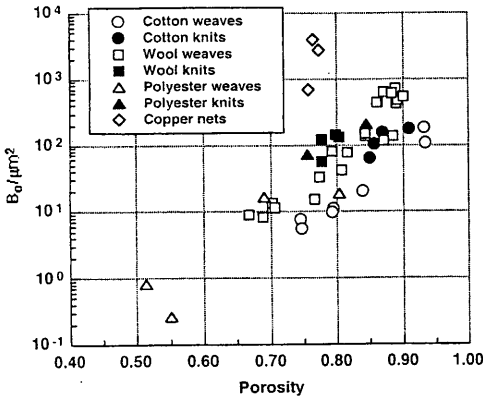


図2 比透過係数 B_o と空げき率の関係

3.3 Kozney - Carman の式による解析

多孔質体に形成されている流路は、複雑な形状をもち、流路の長さは多孔質体の厚さと必ずしも一致しない。このような流路を流れる流体の流速 u は、式(4)から演繹されたKozney - Carmanの式によって、

$$u = \frac{1}{\eta} \frac{1}{k} \varepsilon m^2 \frac{\Delta p}{h} \tag{7}$$

と表すことができる。ここで、

m : 動水半径

k ; Kozney 係数

である。動水半径は、多孔質体のなかで母体が流体で覆われている面積に対する多孔質体内の流体体積の比であり、 S_o を多孔質体を構成している単位体積の母体の表面積(比表面積)とすると、

$$m = \frac{\varepsilon}{S_o(1-\varepsilon)} \tag{8}$$

と表される。

Kozney 係数 k は、 k_o を流路の断面の形に関する係数、 (h_e/h) を多孔質体の厚さに対する流路長の比、すなわち曲路率として、

$$k = k_o \left(\frac{h_e}{h} \right)^2 \tag{9}$$

と表される。流路が半径 r の円管状であるとき、式(7)はHagen - Poiseuilleの式に帰着し、流路断面の形状パラメータ k_o の値は2となる。

繊維集合体が直径 D_f の繊維からなるとすると、単位体積の繊維集合体を含む流路の比表面積 S_o は

$$S_o = \frac{\pi D_f}{\pi \left(\frac{D_f}{2} \right)^2} = \frac{4}{D_f} \tag{10}$$

となる。上式で表した動水半径 m は、式(10)を式(8)に代入して

$$m = \frac{D_f \varepsilon}{4(1-\varepsilon)} \tag{11}$$

となる。したがって、式(11)を用いて式(7)を書き直すと

$$u = \frac{1}{\eta} \frac{1}{k} \frac{D_f^2}{16} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \frac{\Delta p}{h} \tag{12}$$

となる。式(12)と(4)を比較すると、比透過係数 B_o は

$$B_o = \frac{1}{k} \frac{D_f^2}{16} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \tag{13}$$

と表される。便宜のため、 Z を

$$Z = \frac{D_f^2}{16} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \tag{14}$$

と定める。係数 Z は、多孔質体の流路の面積に関する係数であり、これを流路面積係数と呼ぶことにする。このように定義した流路面積係数で式(13)の比透過係数を書き直すと

$$B_o = \frac{Z}{k} \tag{15}$$

となる。

Kozney係数kは、式(15)のBoを式(6)で置き換えて

$$k = \frac{RZ}{h\eta} \quad (16)$$

と求められる。

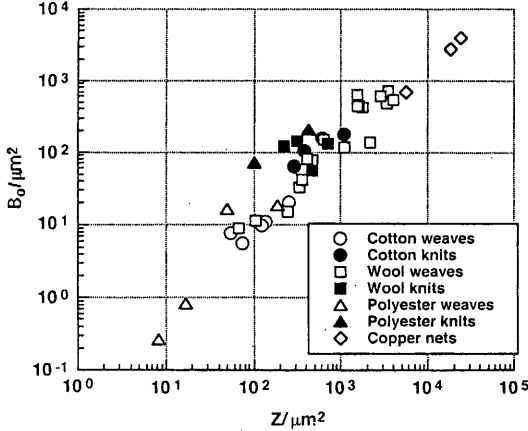


図3 比透過係数Boと流路面積係数Zの関係

図3に比透過係数Boと流路面積係数Zの関係を示す。流路面積係数Zは式(14)によって算出した。比透過係数と流路面積係数は、試料によって広い範囲で変化するので、図3ではそれぞれの値を対数で表した。式(15)に基づくと、種々の試料について比透過係数Boを流路面積係数Zに対して両対数軸上に描いたグラフは、試料によってKozney係数の値が大きく変わらない場合には、こう配が1の直線となることが分かる。織物やメリヤスは、空気透過性が同じであっても流路の面積や長さは分布をもつと推定される。しかし、図3において、各試料の両対数軸上における比透過係数と流路面積係数の関係は、5ケタの範囲にわたって、こう配がほぼ1の直線に沿って分布している。特に、単純な織構造体である銅金網の空気透過と流路面積係数の関係が、一般衣料用織物の場合と同じであることに注目される。これらを考慮すると、図3の結果は、織物やメリヤスなどの複雑な空けき構造をもつ多孔質体の空気透過にも、Kozney-Carmanの式を応用できることを意味しているといえる。

3. 4 Kozney 係数

図4に、式(16)によって算出したKozney係数kを空けき率に対して表した結果を示す。

Carman³⁾は、空気透過に関する多くの研究報告を調べ、粒子充てん系では、Kozney係数が5程度の値をとると述べている。

繊維充填系では、繊維の配向によってKozney係数は様々の値を示す。SullivanとHertel⁴⁾がガラス繊維について行った実験によると、Kozney係数は繊維が3次元的にランダムに配向している場合には4.5程度の値を示す。また、相互に平行に配列した繊維が空気の流れに垂直な方向に配向している場合には3程度、平行に配列した繊維が空気の流れに平行な方向に配向している場合には3程度の値を示す。Lord⁵⁾は、繊維配向がランダムな綿、レーヨン、キュプラ、羊毛、絹の繊維塊について空気透過を測定している。その結果によると、Kozney係数は空けき率がおよそ0.8程度の繊維塊では5程度の値を示す。しかし、Kozney係数は、空けき率が0.8程度よりも大きくなるにつれて増大し、空けき率が1に近くなると、20程度ないしはそれ以上に大きな値となることを得ている。

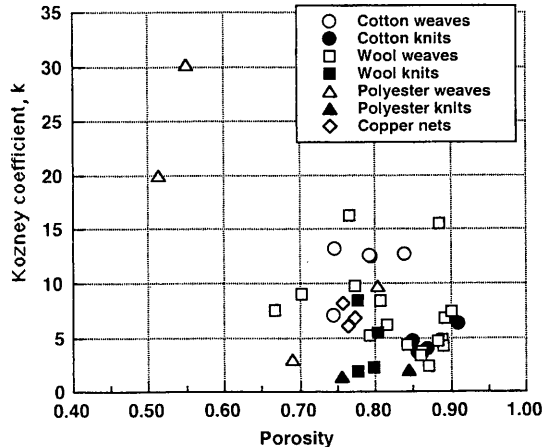


図4 Kozney係数kと空けき率の関係

図4に示すように、織物やメリヤスのKozney係数は、空けき率が約0.6~0.9の範囲では2~15程度の範囲に分布し、空けき率に依存した変化は見いだされない。図4においてKozney係数が20以上の大きな値を示している2点の試料はいずれもポリエステル織物であるが、これらの試料の空けき率は0.5程度の小さい値であり、Lordがランダム配向繊維塊に観測した傾向と大きく異なっている。

3.5 流路の曲路率

Kozney係数は、式(9)に示すように、更に流路の曲路率(he/h)と形状パラメータkoに分けて表される。形状パラメータkoは、流路の断面が円形の場合に2となる。Carman²⁾は、種々の断面をもつ流路モデルについて形状パラメータを算出して、断面形状による形状パラメータの変化が小さいことを示し、一般の多孔質体の形状パラメータは2.0~2.5の範囲にあると推定している。一例をあげると、楕円断面をもつ流路モデルでは、楕円の軸比が10のとき、形状パラメータとして2.45を得ている。これらの方を参考にして、本研究で用いた織物・メリヤス・金網の形状パラメータを2と見なして、曲路率(he/h)を次式

$$\frac{h_e}{h} = \left(\frac{k}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

によって算出した。得られた曲路率を空けき率に対して示したのが図5である。殆どの試料の曲路率は、1から3の間に分布している。

図5の曲路率と空けき率の関係を詳細にみると、メリヤスの曲路率は1~2の範囲に偏っている。このことは、図3の比透過係数と流路面積係数の関係において、メリヤスの比透過係数が織物よりも高い値に偏っていることによる。

4 結 言

種々の繊維からなる織物、メリヤス及び銅の金網につ

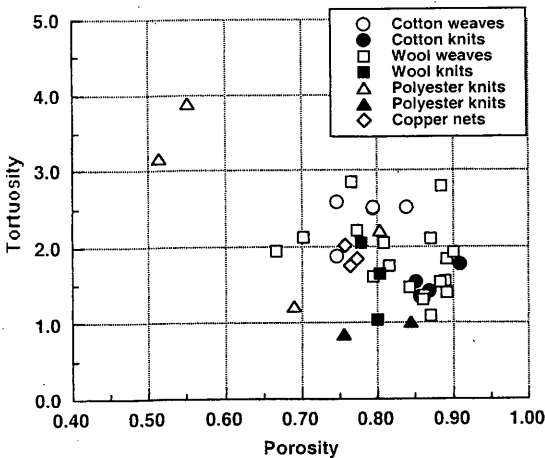


図5 曲路率と空けき率の関係

いて試料面に垂直方向の空気透過性を測定し、その結果を多孔質体に関するKozney-Carmanの式に基づいて解析した。測定結果から算出した比透過係数と流路面積係数の両対数軸上における関係は、それぞれ5ケタの範囲にわたって、こう配がほぼ1の直線に沿って分布することを見いだした。このことから、織物やメリヤスなど複雑な空けき構造をもつ衣料材料の空気透過についても、Kozney-Carmanの式が応用できることを明らかにした。空気流路の断面が円形であると見なしてKozney係数から算出した曲路率は、殆どの試料が1~3の間の値を示した。

文 献

- 1) E.R.Kaswell ; "Textile Fibers and Yarns, and Fabrics", pp.216-235, Reinhold Publishing Corporation (1953)
- 2) J. Polit ; *J. Text. Inst.*, **40**, P11 (1949)
- 3) P.C.Carman ; "*Flow of Gases through Porous Media*", pp.1-13, Butterworths Scientific Publications (1956)
- 4) R.R.Sullivan and K.L.Hertel ; *J. Appl. Phys.*, **11**, 761 (1940)
- 5) E.Lord ; *J. Text. Inst.* ; **46**, T191 (1955)

Abstract

The air permeability of woven and knitted fabrics was studied in relation to porosity. Copper-wire nets of plain weave structure were also investigated as typical materials of simple woven structure. The experimental results were analyzed according to the Kozney-Carman theory for fluid permeability of porous media. The specific permeability B_0 can be written in the form, $B_0=Z/k$, where k is the Kozney coefficient and Z is a pore area coefficient calculated from the hydrodynamic radius and porosity of material. The equation indicates that the specific permeability plotted against the pore area coefficient on the log-log axes shows a straight line of unit slope. The basic features of experimental results supported this prediction over five decades of specific permeability and pore area coefficient. The tortuosity of most materials, calculated from the Kozney coefficient by assuming the cross section of air flow channels in materials being circular, showed values in a range 1 to 3.