

織物の通気性

第1報 低 Reynolds 数領域における測定の問題— 従来の方法の再検討*

呉 祐 吉**・篠原 昭**・松橋 房 江**

Yukichi Go, Akira SHINOHARA and Fusae MATUHASHI: The Air Permeability of Textile Fabrics

I. Discussions on The Air Permeability at Low Reynolds Numbers.

(1956年10月1日受理)

1 緒 言

最近通気性撥水処理を施した織物類が市場に出回り、市民のこれに対する関心も大きくなって来ているが、従来の通気性実験の方法や、その通気度、多孔度等の表示法に対し再検討せねばならぬ段階に立ち至っている。織物の通気性に関する研究は、かなり古くから色々な目的で行われているが、流体力学的にこれを取扱つたものは非常に少なく、落下傘の研究分野¹⁾において多少行われているに過ぎない。他方織物には似而非なるものではあるが、高分子フィルムや紙類の透湿現象²⁾³⁾⁴⁾の研究が盛になるに従い、かかる一連の類似現象を土壌物理学や化学工学におけると同様、一般多孔体中の流体力学として取り扱うようになってきている。

織物の通気においても一般流体力学の場合と同様 Re 数依存性があり、低 Re 数領域においては Darcy の法則あるいは Hagen-Poiseuille の法則のような流量または流速が圧力差に比例し、厚さに反比例する傾向をとる即ち Re 数の 1 乗に比例し、Re 数が大きくなると次第に Re 数の高次に比例するようになることが実験的に知られている。

しかしながら織物のような比較的多孔性のものでは、低 Re 数領域で実験することは技術的にむずかしいものであるが、雨衣やズック靴のような cover factor の大きな、多孔度の小さなものにおいて実際に問題になるのは Re 数の低い範囲なので、本報では主としてこの点について考察した結果を述べることにする。

2 測定装置の検討

織物の通気度は温湿度依存性が大きいので、普通は恒温恒湿槽を用いている。それ故槽中に試料をとりつけた

装置の先端を入れて実験するため、ポンプで空気を送ったり、ひいたりする比較的大型の装置を用いることが出来ない。従つて熱抵抗線型式⁵⁾や絞り流量計型式の Frazier⁶⁾のごときものは、この目的には使えない。専ら Falling cylinder type あるいは Schopper 式のごとき古くからの器械が使われている。

Falling cylinder type は G. Barr⁷⁾ によつて系統的に研究されたもので、現在市販されている Gurley⁸⁾式はこのカテゴリーに入るものである。原理は周知のごとく非常に簡単で、片底の cylinder の底孔に試片をつけ、倒立して水或は油のような液体中に入れ、その沈降速度または一定容積の空気が、その孔を通して流出するまでの時間或はその他適当な尺度から通気度を測定するものである（しかし実際のものはこの原理に従つて種々 modify したものが多し）。この欠点は cylinder の上下降に際し浮力の影響が介入して来ることで、このため圧力差を調節することが困難である。今時刻 t で cylinder の水中にある部分の高さを x 、底面積を A 、単位高さ当りの cylinder の実体積を v 、液の比重を ρ 、全重量を W 、試料の大きさを S 、厚さを L とし液の粘性を無視できるとして近似的にダルシーの法則を用いて

$$\frac{dx}{dt} = \frac{Sk}{AL} \left(\frac{W - \rho vx}{A} \right)$$
$$\int \frac{dx}{W - \rho vx} = \frac{Sk}{A^2 L} \int dt + \text{const.}$$
$$\log(W - \rho vx) = \frac{-Sk}{A^2 L} t + \text{const.}$$

あるいは α, β, τ を常数として

$$x = \alpha - \beta e^{-\tau t}$$

以上から沈降速度が x に逆比例することがわかる。単なる商品検査としての比較の場合にはこの方法も便利であるが、ダルシー常数のごときものを求めるには補正が困難で、次に述べる Schopper 式より誤差が多いことが判つた。

* 本報の一部は繊維学会1956年春期大会で講演

**信州大学繊維学部 繊維物理学教室

Schopper 式はこの種測定機中最も古くから用いられているが、水頭変化により流量が変化する欠点がある。すなわち下口瓶を用いた場合

$$v = \frac{C_n}{\sqrt{1 - C_n^2 \left(2 + \left(\frac{F}{F_0} \right)^2 \right) + 2C_n}} \sqrt{2g \left(h + \frac{4p}{\nu} \right)}$$

$$\frac{dv}{dh} = \text{const.} \cdot \frac{g}{\sqrt{2g \left(h + \frac{4p}{\nu} \right)}}$$

また液面の下降時間は一定間隔を dh とすると

$$t = \int_{h_1}^{h_1 + \Delta h} \frac{\text{const.} \cdot dh}{\sqrt{2g \left(h + \frac{4p}{\nu} \right)}} = \frac{B}{A} \left[\frac{1}{g} \cdot \sqrt{2g \left(h + \frac{4p}{\nu} \right)} \right]_{h_1}^{h_1 + \Delta h}$$

従つて h が高い程、水頭の変化による流量変化が小さいことになり、なるべく容積が大きく、かつ直径の大きな瓶を用い、水頭の上部で実験を行えば差し支えないわけで、また制御装置も容易に工夫できるし、指頭制御も可能である。因みに市販の Schopper 式の水槽の直径が小さいのは欠点である。

以上のような欠点を補うため種々の考案がなされている。最も普通なものとして、例えば水渡・荒川氏の粉体径測定装置⁹⁾、窯業界で古くから用いられている Washburn-Bunting の Porosimeter¹⁰⁾ のごときものである。しかしわれわれの行うのは圧力差が水柱 1 cm 以下の場合であるので、この方式は特殊な布以外には応用できない。それは硝子管から出る空気の泡が液の表面張力との関係から一定圧力差 $4p$ になる迄は界面と平衡を保っているからである¹⁰⁾。

それ故実験室で実験を行うような場合には圧力ブリッジなんかを用いるのが理想的であるが、Schopper 式でも充分間に合う。われわれが使っているものは下口瓶を用いたもので高水位で測定を行い、下口のコックで圧力制御をするようにしている。マンメーターは二液マンメーターを用いる。小圧力であるが圧力の算出には液溜径も考慮しなければならない (Appendix 1 参照)。

3 通気度の検討

従来定義されている通気度 permeability は非常に種類が多く、その多くは単なる商品検査的な尺度としての便宜上から定められたものが多い。一般にこの種実験は前述のごとく圧力差と通気量との関係を調べるものが多い。Hoener¹¹⁾ は Re 数の広範囲に亘つての実験を行った結果、Re 数の小さな場合は、圧力差と流量あるいは速度とが比例し、Hagen-Poiseuille の法則に従い、Re 数

が大きくなるとこの比例関係から背離し、圧力差と速度とは二次関係になり、現象的には急拡大による圧力損即ち Borda-Carnot の法則に従うといっている。この臨界点附近の流れについては Penner & Robertson¹²⁾ が金網モデルを用いてアルミニウム粉末の実験を行つている。これは Clayton¹³⁾ や内田氏⁶⁾ からも実験的に検討し、次数を各種織物について決めている。また高 Re 数についても色々研究されているが一般に次の関係がある。

$$\frac{dp}{dx} = av + bv^n$$

または特殊な場合として (Appendix 2 参照)

$$\frac{dp}{dx} = av + bv^2$$

Goglia¹⁾ は第 2 の式を落下傘布の通気度測定に応用しているが、これは鋳物のような多孔性金属についても当て嵌るとされている¹⁴⁾。

この様に Re 数依存性を考慮しての実験は多く、Clayton¹³⁾ もこの比例性からの背異を肯定し乍らも Darcy 常数に類似の通気度を定義しているが、これはこの意味からすれば浅生氏の指摘するような間違はない(浅生・紡織試験)。また Barr⁷⁾ は Re 数の概念を導入し $Q-4p$ 曲線の原点の近傍における接線の勾配から通気度を求めている。われわれは Re 数の非常に小さい領域での測定を考へるのであるから、多孔体中の流動として一般的に考察してみた¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾。

多孔体中の流れに関する連続の式は f を多孔度、 τ を密度とすると

$$\text{div}(\tau \bar{v}) = -f \frac{\partial r}{\partial t} \dots \dots \dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} v_x &= -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} - F_x \right) \\ v_y &= -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} - F_y \right) \\ v_z &= -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} - F_z \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

重量力 \bar{F} が Potential \mathbf{V} を有するとすると、ポテンシャルを ϕ とおいて

$$\phi = \frac{k}{\mu} (p + \mathbf{V}) \dots \dots \dots (3)$$

$$v_x = -\frac{\partial \phi}{\partial x}, v_y = \frac{\partial \phi}{\partial y}, v_z = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \dots \dots \dots (4)$$

$$\bar{v} = -\text{grad } \phi \dots \dots \dots (5)$$

(5) を (1) に代入して

$$\begin{aligned} \text{div}(\tau \text{grad } \phi) &= \text{grad} \cdot \left[\tau \text{grad} \frac{k}{\mu} (p + \mathbf{V}) \right] \\ &= f \frac{\partial r}{\partial t} \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

porosity distribution が homogeneous な場合には k は
 常数とみなせるから

$$\text{grad} \cdot \left[r \text{ grad} (p + V) \right] = \frac{f\mu}{k} \cdot \frac{\partial r}{\partial t} \dots\dots\dots(7)$$

気体についてであるから $r = r_0 p^m$ の関係¹⁰⁾を利用すると

$$d_T^m = \frac{1+m}{\mu} \frac{\partial^2 r^m}{\partial x^2} + \frac{1+m}{\mu} \frac{\partial^2 r^m}{\partial y^2} + \frac{1+m}{\mu} \frac{\partial^2 r^m}{\partial z^2} = \frac{(1+m)f\mu r_0^m}{k} \cdot \frac{\partial r}{\partial t} \dots\dots\dots(8)$$

定常状態では (8) の右辺は 0 となるから、簡単に解けて

$$d_T^m = d p = 0 \dots\dots\dots(9)$$

$$p = (p_1 - p_2) \frac{x}{L} + p_2 \dots\dots\dots(9)$$

p_1, p_2 は $x = 0, L$ における圧力である、気体に対する Darcy の法則

$$Q = -\frac{k_T}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{k r_0}{(1+m)\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \dots\dots\dots(10)$$

に (9) 式を代入して測定に便利な形に直すと

$$Q_m = \frac{A k r_0}{\mu(1+m)L} \cdot (p_2 - p_1) \dots\dots\dots(11)$$

$$k = \frac{\mu L(1+m)Q_m}{r_0 A (p_2^{1+m} - p_1^{1+m})} \dots\dots\dots(12)$$

速度の遅い場合は空気でも $m = 1$ とみてよいから

$$k = \frac{2\mu Q_m L}{r_0 A (p_1^2 - p_2^2)} \dots\dots\dots(12')$$

平均流量 Q をとると、次のようになる

$$k = \frac{\mu Q L}{A(p_1 - p_2)} = \frac{\mu L}{A} \tan \theta \dots\dots\dots(13)$$

$\tan \theta$ は $Q-dp$ 直線の勾配を表わす、これは Q/p の
 平均値を意味することになり、厳密には最小自乗法を用
 いて求めればよい。(13) 式は非圧縮性の場合と同様の次
 元を持つダルシー常数である。水蒸気を含むような場合
 には密度、粘性を考慮できるので都合がよい。

4 実 験

上の式を検定する目的で先ず織物について $Q-dp$ 関
 係を調べた。試料布を測定条件下で一昼夜以上 condition
 ing し、圧力差水柱 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm 及
 び 10 mm で 5 秒間に通る空気量を流下する水量で測定し
 た。測定温湿度はなるべく実際に近い値をえらんだが、装
 置能力に限界があるので、温度を 35°C に保ち、関係湿
 度を 45% ~ 90% にとつた。湿り空気の粘性係数の適当
 な Table が見当たらないので J. H. Perrey の Hand-
 Book²⁰⁾の表を各関係湿度について算術平均的に求めた。
 しかし 35°C, 45~90% の範囲では粘性係数は 0.017~

0.018 centi poise の order で、湿度による変化はほとん
 どないともて差し支えないが、実際には不飽和水蒸気²¹⁾
 の影響もあり Re 数を計算する時は密度を用いるので、こ
 の効果は比較的大きくなる。

試料布 1, 2, はいづれも cover factor がほぼ 25 の木
 綿の 2/2 の綾である。1 と 2 は同一であるが 1 はペラン
 で撥水処理したものである。尚厚さの効果については布
 では実験しにくいし、また無意味であるので、脱脂綿を
 平行に引揃えて硝子管に入れて行つた。

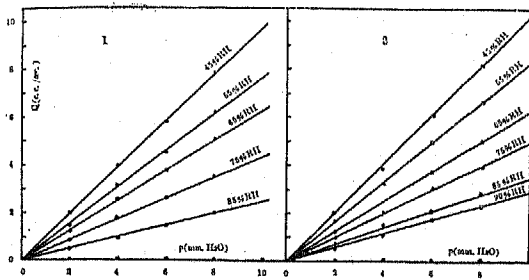
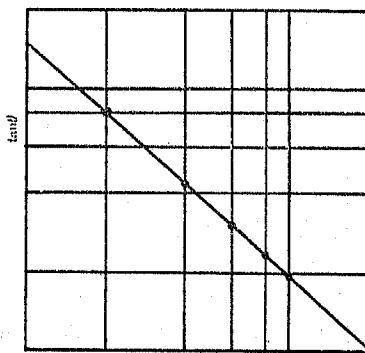


Fig. 1-a Fig. 1-b



Thickness L
 Fig. 2

Fig. 1 に 1, 2 についての $Q-dp$ 直線を Fig. 2 に
 $\tan \theta - R. H.$ 曲線を示した。通気度は湿度と共にほぼ
 直線的に減少し、90% R.H. の近傍から急激におちる。こ
 れは Clayton¹³⁾の結果と一致するものであるが、同一布
 でも撥水処理したものと然らざるものとは勾配に多少
 相違がみられるが、これは水分の吸収能に差異があるた
 めとおもわれる、これについては精確な実験を行つてみ
 ないとはつきりした事はいえない。

Fig. 3 は綿塊についての $\tan \theta$ と厚さを調べたもので
 あるが逆比例することを示している。尚 k の絶対値につ
 いては紙数の都合上書けなかつたが Fig. 2 の右端にそ
 のスケール丈を示した。これは k を C. G. S. で表わした

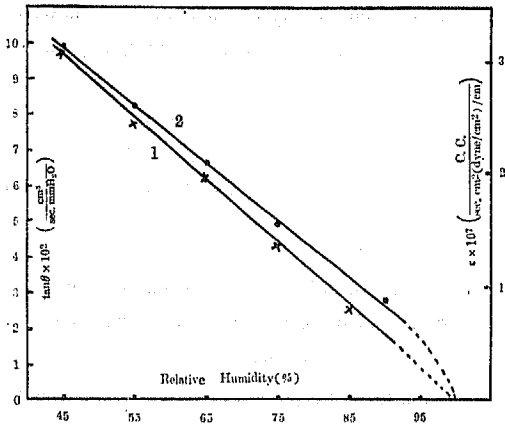


Fig. 3

もので $\left[\frac{\text{Sec. cm}^2 (\text{dyne/cm}^2)}{\text{cm}} \right]$ の次元を有する。これは小に過ぎるので、これの 9.8697×10^7 倍したものを 1 Darcy としている場合もある、この時は圧力は気圧を用いばよい。

5 総括

以上から次のことが結論出来る。

- a. Falling cylinder type より Schopper 式の方が補正しやすく、簡単な実験には充分間に合う。
- b. 布の場合にも Darcy 常数を用いて便利であるが、厚さの次元を落せば経験量と一致する。
- c. 各種布について検定したところりで定めた通気の式が妥当であることがわかった。

なお次にのこされている問題は Re 数を求めるにはどうしたらよいか、更に pore size の決定、逆に構成糸の太さ cover factor の算出といったことであるが、順次報告する予定である。

[Appendix 1] 二液マノメーターの読み²¹⁾

圧力を p 、二液の比重を σ_1, σ_2 、管の断面積を a 、液溜の断面積を A_1, A_2 、meniscus の移動距離を h とすると次の関係がある。

$$p + h\sigma_1 \left(1 - \frac{a}{A_1} \right) = h\sigma_2 \left(1 + \frac{a}{A_2} \right)$$

或は
$$p = h \left[(\sigma_2 - \sigma_1) + \frac{a(A_1\sigma_2 + A_2\sigma_1)}{A_1A_2} \right]$$

[Appendix 2]

Fancher²²⁾ らは摩擦抵抗の概念を導入して多孔体中の流体流れを説明した。即ち $\xi = d\Delta p / 2Lrv^2$ を摩擦項にとりこれと Re 数 dvr/μ との関係が実験的に

$$\log \xi = a - \log Re$$

であることを見出した、これは Hoener¹¹⁾ の考えとも共通しているが、上の対数式はダルシーの公式と同格で低 Re 数領域にのみ成り立つものである。更に Lindquist²³⁾ ²⁴⁾ ²⁵⁾ らはこれを高 Re 数領域に迄発展させ次式を導いた

$$R\xi = a + bR$$

これは次の二次式と等価である。

$$\frac{d\Delta p}{ds} = a'v + b'v^2$$

この場合の臨界 Re 数は 4 くらいとされている。しかし織物や繊維塊のごときものに対して Re 数をきめることは困難である。

文 献

- 1) M. J. GOHLIA · H. W. S. LAVIER & C. D. BRAWN : Text. Res. J. 25 296 (1955)
- 2) 竹田政民・鶴田榮一：高分子 2 No. 1 (1952)
- 3) 武田文七：ibid 3 251, 306 (1954)
- 4) M. GZUHA : Rubber World 13) 207 (1954)
- 5) 斎藤俊吉・内田豊作：織工誌 6 99 (1940)
- 6) J. H. SKINKLE : Textile Testing p.93, Chem. Pub. Co. (1949)
- 7) G. BARR : J. Text. Inst. 23 p.206 (1932)
- 8) 水渡英二・荒川正文・馬場靖夫：工化 59 303 (1956)
- 9) E. W. WASHBURN & E. N. BUNTING : J. Am. Ceram. Soc. 5 48, 112 (1922)
- 10) N. K. ADAMS : Physics and Chemistry of Surfaces Oxf. (1954)
- 11) S. F. HOENER : Text. Res. J. 22 274 (1952)
- 12) S. E. PENNER & A. F. ROBERTSON : Text. Res. J. 21 775 (1951)
- 13) F. H. CLAYTON : J. Text. Inst. 26 T171 (1935)
- 14) L. GREEN & P. DUWEEZ : J. Appl. Mech. 13 1. 39 (1951)
- 15) M. MUSKAT : The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media. Edwards Bro. Inc. (1946)
- 16) P. G. CARMAN : Flow of Gases through Powders and Porous Media. Academic Pr. (1956)
- 17) O. EMERSLEBEN : Phys. Zeit. 26 601 (1925)
- 18) A. E. SCHEIDEGGER : J. Appl. phys. 25 994 (1954)
- 19) M. MUSKAT : Physics 5 71 (1934)
- 20) J. H. PERRY : Chemical Engineering Handbook P. 674, McGraw-Hill (1934)
- 21) E. OWER : The Measurement of Air Flow pp226-

- 227, CHAPMAN & HALL (1949)
- 22) G. H. FANCHER, J. A. LEWIS & K. B. BARNES :
Min. Ind. Exp. Sta., Penn. State. College.,
12 (1933)
- 23) E. LINDQUIST : Premier Congres des Grands Ba-
rrages, Communication Stockholm. (1933)
- 24) P. NEMENYI : Wasserkraft und Wasserwirtschaft
29, 157 (1934)
- 25) F. SCHAFFERNAK & R. DAHLER : Die Wasserw-
irtschaft 1, 145 (1934)

これでは臨界 Re 数は 3 ~ 6 となつている。

Summary

We discussed the two permeability testers, "falling cylinder type" and "Schopper type", which are popularly used for the lower Reynolds numbers.

We have found that the latter is more reliable than

the former, when we use it in high water level, and also the hand control of water discharge through an orifice is possible.

Assuming that the air flow through the fabric-like structure can be described by Darcy's law or Hagen-Poiseuille's law, we can derive the following formula

$$k = \frac{\mu L}{A} \tan \theta$$

where, k : permeability, μ : coefficient of viscosity, L : thickness of porous layer, A : testing area, $\tan \theta$: gradient at $Q-\Delta p$ diagram.

And examining the proportionality of $Q-\Delta p$ and $Q-1/T$ relations by using cotton twills ($3/2$, cover factor 25) and cotton assembles, we conclude that the flow across the fabric-like structure is described satisfactorily according to this formula.