(昭和 54 年 5 月 30 日受理)

繊維層フィルターチップの通気抵抗*

日本専売公社中央研究所 前田和生・安斎由和子

PRESSURE DROP ACROSS THE FIBROUS FILTER TIP

By Kazuo Maeda and Yuriko Anzai

(The Central Research Institute, Japan Tobacco & Salt Public Corporation,
6-2 Umegaoka, Midori-ku, Yokohama)

The pressure drop of randomly packed fibrous filter tips for cigarette smoke was studied to establish the relation with the filter properties; kinds of fiber, fiber denier per filament, cross section of fiber, volume fraction of fiber, weight fraction of fibers and filter making method.

On the basis of linear relations found between modified permeability coefficient calculated with equations (2)–(4) and a porosity function, the pressure drop across the fibrous filter tip is given as

$$\Delta P = k \frac{\eta L v}{d_{fm}^2 g \rho} (1 - \varepsilon_t)^n$$

where the resistance coefficient $k = 70$ and exponent $n = 1.92$ for the model filter. The k value depends on the structural arrangement of the fiber in the filter tip.

(Received May 30, 1979)

1. 緒 言

たばこ煙用フィルターとして多数の濾材が検討されてきたが、市販のフィルターは、大部分がアセテート繊維を濾材とし、一部に紙、パルプ、羊毛が用いられている。その他、活性炭、イオン交換樹脂、無機吸着剤などが複合フィルター用添加物として使用されているに過ぎない。これらの濾材のフィルター成形法についても多数の考案がなされてきたが、アセテート繊維の場合は捲縮のかけられた繊維束を開織し可塑性を添加後、巻取紙で巻上げるトゥ方式¹⁾により、紙、パルプ、羊毛の場合は、それぞれクレープ紙の巻上²⁾、パルプ不織布のS字成形後の巻上³⁾、羊毛の帯状成形後の巻上⁴⁾によっている。その他、不織布⁵⁾、スライバー及び短繊維⁶⁾の巻上成形法なども開発されている。

一方、たばこ煙用フィルターの性能は、たばこの香喫味に与える影響のほか、エアロゾル用フィルターの場合と同様に、フィルターの通気抵抗と煙成分の濾過効率によって評価されている。新フィルターの開発あるいは設

計上の立場からいえば、いずれの濾材、成形法を用いる場合でも、濾材の段階で成形品の性能が推定できることが望ましいことから、筆者らは、繊維層フィルターチップの通気抵抗及び濾過効率と繊維の種類、繊維径、断面形状、充填量、繊維配列、成形方法、チップの長さなどのフィルター構成要因との間の関係について検討してきた。

本報では、繊維層フィルターチップの通気抵抗に及ぼす繊維の種類、単糸繊度、断面形状、充填量、成形方法などの影響について、簡単に手づくりできるフィルターチップを用いて実験的な検討を加え、二、三の知見を得たので報告する。

2. 実 験

2.1 試 料

レーヨン繊維及びポリプロピレン繊維は市販品を使用した。ビニロン繊維はクラレ(株)の提供品を使用した。アセテート繊維はダイセル(株)及び三菱アセテート(株)で製造された捲縮済の繊維束を使用したほか三菱アセテート(株)で試製された断面形状の異なる4デニールの未捲縮品を用いた。表1に供試繊維の単糸繊度、繊維径などの諸特性値をまとめて示す。

* この報文を「たばこ煙用フィルターに関する研究(第13報)、Studies on the Filter for Cigarette Smoke (Part 13)」とする。

Table 1 Properties of test fibers

Kinds of fiber	Denier per filament	ρ_f [g/cm ³]	d_f^{*1} [μm]	Cross-section of fiber
Rayon	0.8	1.54	8.6	Regular
	1.5	"	11.8	"
	3.0	"	16.6	"
	7.0	"	25.4	"
Vinylon	1.5	1.26	13.0	Regular
	3.0	"	18.4	"
Polypropylene	3.0	0.90	21.7	Regular
Acetate ^{*2}	1.7	1.32	13.5	Y
	1.9	"	14.3	"
	2.2	"	15.4	"
	2.5	"	16.4	"
	3.3	"	18.8	"
	4.0	"	20.7	"
	8.0	"	29.3	"
Acetate	4.0	1.32	20.7	Regular
	4.0	"	"	Y
	4.0	"	"	λ
	4.0	"	"	I
	4.0	"	"	H

*1 $d_f = 11.91\sqrt{d/\rho_f}$, *2 Crimped

2.2 試料の調製

モデルフィルター(ランダム充填方式)は、供試繊維を3mm前後に切断し、果実ジュース用ミキサーで解繊し均一な綿状とした後、一定量を内径0.77cm、長さ1.7cmのアクリル製円管内に充填し、両端をナイロンネットで覆い、セロハンテープで固定して作成した。

アセテートフィルター(トウ方式)は、繊維束を圧縮空気及びロールで開繊し、トリアセチンを7%添加後、円周247cmに紙巻して製造されたフィルタープラグを所定長さに切断して用いた。

不織布フィルター(シート方式)は、1~2インチの供試繊維をフィダー及びカードマシンで混合し、ウェブを形成し、このウェブにポリビニルアルコール及びポリメタクリル酸ブチル系結合剤を浸漬法で添加し、圧搾後乾燥し、厚さ0.5mm、坪量45~50g/m²の不織布を得た。この不織布を16cm幅で帯状に裁断し、次にリボン状に5等分した後、円周247cmに紙巻してフィルターとした。

レーヨンフィルター(スライバー方式)は、レーヨン繊維を集束し、浸漬法でポリ酢酸ビニル系結合剤を添加し乾燥後、そのまま円周247cmに紙巻し、所定長さに切断してフィルターとした。

2.3 測定方法

測定は、温度20±1℃、相対湿度60±2%の調和室内で行なった。

フィルターチップの通気抵抗 ΔP は、試作の自動通気

抵抗測定器⁷⁾を使用し、チップに17.5ml/secの空気を通したとき、入口と出口で生じる圧力差を測定し水柱の高さで表示した。

充填率 $(1-\varepsilon_f)$ は、(1)式で算出し、繊維の密度 ρ_f は、文献値及びBeckman空気比較式比重計で測定した値を用いた。

$$(1-\varepsilon_f) = W/\rho_f V \quad (1)$$

繊維径 d_f は、繊維断面を円形と仮定し、単糸繊度 d から(2)式で算出した。

$$d_f = 11.91\sqrt{d/\rho_f} \quad (2)$$

繊維断面の形状係数 Φ_f は、繊維の周辺長 l を円周とする円の面積と繊維断面積 s とから(3)式で算出した。

$$\Phi_f = l^2/4\pi s \quad (3)$$

l 及び s は、繊維をワックスで固定後、マイクロームで切断し、繊維断面の顕微鏡写真を撮影し、これから無作為に10本の繊維を選び、キルビメーター

及びプランメーターで求めた。

繊維の修正繊維径 d_{fm} は、 d_f 及び Φ_f から(4)式で算出した。

$$d_{fm} = d_f/\sqrt{\Phi_f} \quad (4)$$

3. 実験結果

3.1 繊維の種類

レーヨン、ビニロン及びポリプロピレンの3種類の繊維について、充填率を変えてモデルフィルターチップの通気抵抗を測定した。結果を両対数グラフ上にプロットし、図1に示す。

フィルターチップの通気抵抗は繊維充填率の1.5~2.3乗に比例していることが認められた。また同じ単糸繊度の繊維でも種類によって通気抵抗が異なり、レーヨン繊維では高く、ポリプロピレン繊維では低いことが認められた。

3.2 単糸繊度

単糸繊度の異なるY断面アセテート繊維の繊維充填率とチップ通気抵抗の関係を図2に示す。

アセテート繊維の単糸繊度が小さいほど同一充填率におけるチップの通気抵抗は高く、また単糸繊度が小さいほど勾配が緩やかであることが認められた。

3.3 断面形状

単糸繊度を4デニールとし、断面形状をY, λ, I, H及びRegular断面としたアセテート繊維の充填率とチップ通気抵抗の関係を図3に示す。

Fig. 1 Influence of the kinds of fiber on the pressure drop

Fig. 3 Effect of the cross-sections of acetate fiber on the pressure drop

Fig. 2 Effect of the filament per denier of acetate fiber on the pressure drop

チップの通気抵抗は、繊維の断面形状によって異なり、Y形が最も高く、I, λ, Hの3種類の形がほぼ同じで、Regular形が低かった。

次に繊維断面の形状係数の測定結果を表2及び図4に示す。

表2及び図3から明らかなようにフィルターチップの通気抵抗は繊維断面の形状係数が大きくなると高くなる

Table 2 Shape factors of tested fibers

Kinds of fiber	Filament per denier	Shape factor [-]
Rayon	3	1.89
Polypropylene	3	1.30
Vinylon	3	2.40
Acetate Y Section	4	3.46
" λ "	"	3.23
" I "	"	3.01
" H "	"	3.23
" Regular	"	2.21

Fig. 4 Change in the shape factor with the filament per denier of Y section acetate fiber

Table 3 Pressure drop of two-component filter tip

Filter composition	Weight fraction (—)	Volume fraction (—)	Pressure drop [cm H ₂ O]	
			Calcd.	Exptd.
Vynlon 1.5 d	0.5	0.0405	0.081	8.5
Vynlon 3 d	0.5	0.0405		
Vynlon 1.5 d	0.5	0.0405	0.079	7.1
Acetate 4 d	0.5	0.0386		
Vynlon 1.5 d	0.5	0.0405	0.074	11.9
Rayon 0.8 d	0.5	0.0331		
Vynlon 3 d	0.5	0.0405	0.079	5.5
Acetate 4 d	0.5	0.0386		

傾向が認められた。また図4に示すようにY断面のアセテート繊維の形状係数は単糸繊維が小さくなるとともに小さくなる傾向が認められた。

3.4 繊維の混合

単糸繊維の異なるビニロンとアセテートあるいはレーヨンの各繊維を混合して充填したフィルターチップの通気抵抗を表3に示す。なお、計算による推定は(5)式で行なった⁸⁾。

$$\Delta P = x_1 \cdot \Delta P_1 + x_2 \cdot \Delta P_2 + \cdots = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \Delta P_i \quad (5)$$

混合割合 x_i 、ただし $x_1 + x_2 + \cdots = 1$ 、からなるフィルターチップの通気抵抗は、各繊維単独のときの通気抵抗 ΔP_i が既知であれば(5)式から推定できることがわかった。

3.5 成形方法

単糸繊維 3 デニールのレーヨン繊維を使用し、スライ

Fig. 5 Influence of filter making methods on the pressure drop

バー方式及びランダム充填方式で作成したフィルターチップの通気抵抗と、単糸繊維度 4 デニール、Y断面のアセテート繊維を使用し、トウ方式、シート方式及びランダム充填方式で作成したフィルターチップの通気抵抗を図5に示す。フィルターチップの通気抵抗は同じ繊維を一定の充填率で成形した場合でも成形方法によって大きく異なることが認められた。

4. 考 察

繊維層フィルターの圧力損失に関する理論的取扱いは、従来の次元解析、抗力理論によるものと構造的な研究によるものがある。

たばこ煙用フィルターの場合は、繊維の充填率が 0.1 前後、フィルター断面積が約 0.5 cm²、チップの長さが 0.7 ~ 3 cm、通過流量が 17.5 ml/sec、したがって通過流速が 40 cm/sec 前後、繊維は異形断面、繊維配列は流れに水平側に近い構造などの特徴をもつが、その通気抵抗は $\Delta P \propto v$ で $\Delta P/L =$ 一定であることから、粘性流に関する Darcy の式が成立する¹⁰⁾。

$$\Delta P = k L \mu v \quad (6)$$

そこで、図1、2で得られた結果を用いて、フィルターチップの充填率に対する通気抵抗を(7)式に示す Davies の透過係数 $K^{10)}$ を用いて整理したが、繊維径の異なるレーヨン繊維の場合にはほぼ一本の直線上にプロットされたが各繊維間で比較するとまとまりがよいとはいえなかった¹⁰⁾。ここで問題となるのは d_f の決め方である。従来の研究で用いられた繊維は主として円形断面のガラス繊維であって、算術平均径あるいは体面積平均径で解析がなされている。Davies⁹⁾ は算術平均径を用いて(7)式を導いた。

$$K = \frac{\Delta P d_f^2}{\eta L v} = 64 (1 - \epsilon_f)^{1.5} [1 + 56 (1 - \epsilon_f)^3] \quad (7)$$

Clarenburg らは(8)式を実験的に得た¹¹⁾が、ガラス繊維の配置を Monte Carlo 法で行ない、それによってできる網目構造の細孔の相当直径を求め、電子顕微鏡写真から求めた場合と同様に対数正規分布をなすことを確認した¹²⁾。

$$K = 180 C^{-2.5} \cdot (1 - \epsilon_f)^{1.5} \quad (8)$$

Kozeny-Charman¹³⁾ は、炉材の比表面積 S^2 が ΔP に比例するとして水力相当直径の考え方から空隙率関数を求めた。

$$K = k (1 - \epsilon_f)^2 / \epsilon_f^3 \quad (9)$$

(9)式は空隙率の大きいとき誤差の大きいことから、織

維充填層に適用することは適切とはいえない¹⁴⁾。

Langmuir¹⁶⁾は流れに平行に充填した繊維模型の六角形セルに相当する円管を考へて(10)式を導いた。

$$K = \frac{1.4 \times 4 (1 - \varepsilon_f)}{-\ln(1 - \varepsilon_f) + 2(1 - \varepsilon_f) - (1 - \varepsilon_f)^2 / 2 - 3/2} \quad (10)$$

Chen¹⁶⁾はフィルターを構成する繊維の配置構造に依存するとして(11)式を提案した。

$$K = k (1 - \varepsilon_f) / \varepsilon_f \quad (11)$$

ここで、 k は繊維の相互作用を考慮した抵抗係数であり、 d_f としては体積平均径を用いた。

木村ら¹⁷⁾は、非円形断面繊維、すなわちカネカロン、ビニロン、綿などの繊維について繊維断面形状係数 ϕ_f を導入し、繊維干渉の影響は、円形繊維における場合⁸⁾と同様に、 $\Delta P \propto (1 - \varepsilon_f)^n$ の関係で表わすことができ指数 n は d_f のほか ϕ_f の関数となることを示した。

$$\phi_f = 4s / \pi l_0^2 \quad (12)$$

$$n = 1.60 d_f^{-0.06} \phi_f^{-0.16} \quad (13)$$

しかし繊維が流れに垂直とみなす抗力理論による理論式あるいは実験式を、繊維をランダムに充填したフィルターチップに適用することには問題がある。また木村らの ϕ_f を用いることは、I断面繊維などで長短比が大きいたとき誤差が大きくなることから適切とはいえない。

以上のことから、繊維径あるいは繊維断面形状によりフィルターチップの通気抵抗が異なる原因として濾材の表面積の影響¹⁸⁾を考慮しなければならない。そこで供試繊維の断面写真を撮り、断面積 s と断面の周辺長 l とを測定した。実測した繊維の s と l のバラツキはかなり大きかったので面積補正をした繊維断面の形状係数 ϕ_f を(3)式から求めた。なおこの ϕ_f はShape factor l^2/s を用いると、真円の場合のShape factor $4\pi = 12.57$ との比較値となる¹⁸⁾。次に(4)式から求めた繊維の修正繊維径 d_{fm} を無次元化した(7)式に導入した。レーヨン及びビニロン繊維の ϕ_f は、Y断面のアセート繊維で認められた単糸繊維の影響が小さいものと考え、表2に示した3デニールの値を用いて求めた。

$$K_m = \frac{\Delta P d_{fm}^2 g \rho}{n L v} = k (1 - \varepsilon_f)^n \quad (14)$$

図1~3で明らかなように、繊維層フィルターチップの通気抵抗は繊維充填率の n 乗に比例して変化することから、得られた全てのデータを用いて、繊維充填率に対して修正透過係数 K_m をプロットした。その結果は図6に示すように単糸繊維、断面形状などの異なる全ての繊維がほぼ1本の直線上にまとめられ、(14)式の成立することが確かめられた。ランダム充填方式のモデルフィルターでは $k=70$ 、 $n=1.92$ が求められた。ここで、 k は繊

Fig. 6 Relationship between the modified permeability coefficient and the packing density of filter tips

維の配列、配向などのフィルターの構造にもとづく係数であって、図5から明らかなようにフィルターチップの成形方法によって異なる。濾材の使用量という観点からは k の大きな成形方法が望ましいと考えられ、シート方式、トウ方式及びスライパー方式による成形方法は、ランダム充填方式に比べて改良の余地があるといえる。次に指数 n は1.92という値が得られたが、この値は流れに垂直に配列したガラス繊維で得られた約1.5^{9, 11, 17)}に比べてやや大きく、粒子状物に水力相当直径の考え方を適用した(9)式¹³⁾よりやや小さい値となったが、実験値としてはほぼ妥当な値と考えられる。

したがって、モデルフィルターチップの通気抵抗を求める実験式は(15)式で示された。

$$\Delta P = 70 \cdot \frac{\eta L v}{d_{fm}^2 g \rho} \cdot (1 - \varepsilon_f)^{1.92} \quad (15)$$

成形方法がモデルフィルターと異なる場合は、あらかじめモデルフィルターとの比較係数を求めておき、この値を乗ずることによって、繊維の種類、織度、断面形状などの異なる繊維層フィルターチップの通気抵抗の推定が可能である。さらに推定精度を上げるためには、繊維の配置構造及び有効繊維表面積と空隙率関数との間の関係をより明確にする必要があると考えられる。

5. 結 論

たばこ煙用繊維層フィルターチップの通気抵抗と繊維の種類、単糸繊度、断面形状、充填率、繊維混合割合、成形方法などのフィルター構成要因との間の関係について明らかにするため実験的な検討を行なった。

繊維が流れ方向に対しランダムに配置したモデルフィルターチップについて、(2)~(4)式を導入した修正透過係数と空隙率関数との間に直線関係が認められたことから、繊維層フィルターチップの通気抵抗は次のような実験式で示された。

$$\Delta P = k \cdot \frac{\eta L v}{d_{tm}^2 g \rho} \cdot (1 - \epsilon_f)^n$$

モデルフィルターでは、抵抗係数 $k=70$ 、指数 $n=1.92$ が求められ、 k は成形方法の相違、すなわちフィルターチップ中繊維の配置構造によって変化した。

List of Symbols

C	=Cunningham slip correction factor	(—)
d	=fiber denier per filament	[g/9×10 ⁶ cm]
d_f	=diameter of fiber in Eq. (2)	[cm]
d_{tm}	=modified diameter of fiber in Eq. (4)	[cm]
g	=acceleration due to gravity taken as 980	[cm/sec ²]
K	=permeability coefficient	(—)
K_m	=modified permeability coefficient	(—)
k	=resistance coefficient	(—)
L	=length of filter tip	[cm]
l	=circumference of cross section	[cm]
l_0	=the longest distance of cross section of fiber in Eq. (12)	[cm]
n	=exponent	(—)
ΔP	=pressure drop across filter tip, cm of water column	[cm]
S	=specific surface area	[cm ²]
s	=cross sectional area of fiber	[cm ²]
V	=volume of filter tip	[cm ³]
v	=superficial velocity—i. e., velocity across empty filter area	[cm/sec]
W	=weight of filter sample	[g]
x	=weight fraction in Eq. (5)	(—)

ϵ_f	=filter porosity	(—)
$(1 - \epsilon_f)$	=packing density of filter	
	=volume fraction of fiber in filter	(—)
η	=viscosity of air taken as 181×10 ⁻⁴	[g/cm·sec]
ρ	=density of water taken as 1	[g/cm ³]
ρ_f	=density of fiber	[g/cm ³]
Φ_f	=shape factor in Eq. (3)	(—)
ϕ_f	=shape factor in Eq. (12)	(—)

文 献

- 1) U.S. Patent 2,794,239, 日特公, 昭 34-5,749, 日特公, 昭 34-5,750
- 2) U.S. Patent 2,931,364, 日特公, 昭 34-5,206, 日特公, 昭 35-2,052
- 3) U.S. Patent 3,418,890, 日特公, 昭 44-18,796
- 4) D. J. Evans, M. Lipson, R. J. Mayfield, *J. Tex. Inst.*, **66**, 325 (1975)
- 5) 前田和生ほか, 専売中研報, No.116, 49 (1974)
- 6) U.S. Patent 3,552,400
- 7) 玉置昭道, 上原 実, 専売中研報, No.115, 45 (1973)
- 8) 木村典夫, 伊井谷鋼一, 化学工学, **23**, 792 (1959)
- 9) C. N. Davies, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, **1B** (5), 185 (1952)
- 10) 前田和生, 大西昭男, 小林 肇, 上原 実, 昭和 46 年繊維学会秋季研究発表会, 講演要旨集, p.126
- 11) R. M. Werner, L. A. Clarenburg, *I & EC. Process Design Develop.*, **4**, 288 (1965)
- 12) H. W. Piekaar, L. A. Clarenburg, *Chem. Eng. Sci.*, **22**, 1,399 (1967)
- 13) J. Kozeny, *Ber. Wien. Akad.* **136a**, 271 (1927) P. C. Carman, *Trans. Inst. Chem. Engs.*, **15**, 150 (1937)
- 14) 吉岡直哉, 江見 準, 田森行男, 粉体工学, 674 (1966)
- 15) I. Langmuir, "Report on Smokes and Filters" Section I, U.S. Office of Scientific Research and Development, No. 865, Part IV (1942)
- 16) C. Y. Chen, *Chem. Revs.*, **55**, 595 (1955)
- 17) 木村典夫, 伊井谷鋼一, 化学工学, **33**, 1,008 (1969)
- 18) 標葉二郎, 高分子, **17**, 869 (1968)
- 19) W. B. Fordyce, I. W. Hughes, M. G. Ivinson, *Tob. Sci.*, **5**, 70 (1961)