

Study on filtration mechanisms of particulate and vapor components in tobacco smoke by cigarette filters

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/16613

氏名	稲垣道弘
生年月日	
本籍	神奈川県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第604号
学位授与の日付	平成15年9月30日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	シガレットフィルタによるたばこ煙中粒子状/蒸気状成分の濾過現象の解析
論文審査委員(主査)	大谷吉生(工学部・教授)
論文審査委員(副査)	金岡千嘉男(自然科学研究科・教授) 並木 則和(工学部・助教授) 古内 正美(工学部・助教授) 川西 琢也(工学部・助教授)

学位論文要旨

Abstract

There are numerous empirical equations for predicting the filtration efficiencies of tar, nicotine and other smoke components through cigarette filters. However, very little is known on the filtration mechanisms of tobacco smoke because of the complexities in cigarette filter structure and behavior of tobacco smoke. Cigarette filters consist of a bundle of crimped fibers with irregular cross-section, and tobacco smoke is a complicated mixture of multi-component particles and vapors.

In the present work, the filtration mechanisms of particulate and vapor components in mainstream tobacco smoke by cigarette filters are studied both experimentally and theoretically.

First, the influences of fiber cross-sectional shape and fiber crimp angle on the filtration performance are investigated. As a result, it is shown that Y-shaped fibers favor the diffusional deposition of smoke particles by increasing the surface area of filter, and the maximum filter performance index lies at the crimp angle of $\pi/6$ for both circular and Y-shaped fibers. The cigarette filters consisting of Y-shaped fibers studied in the present experimental work have almost the same filter performance index as predicted by the numerical analysis, because they have the crimp angles between $\pi/12$ and $\pi/4$.

Second, the mechanisms of selective filtration of smoke components through cigarette filters are experimentally studied. It is found that the selective filtration occurs because some components in cigarette smoke particles evaporate during the filtration and adsorb onto or absorb into the filter fibers together with the vapors, which are originally in vapor state. Furthermore, it is shown that the selective filtration of smoke components is largely dependent upon the vapor pressure and the water solubility.

1 緒言

近年、喫煙と健康の問題から、シガレットメーカーにおいてたばこ主流煙に含まれる煙成分を制御した製品の開発が重要な課題となっている¹⁾。また、主流煙成分はシガレットの香喫味に寄与する²⁾ことが知られており、

嗜好品としての様々な味わいを提供する観点からも、煙成分制御技術の構築が望まれている。これまでにシガレットフィルタによる粒子や煙成分の濾過に関して多数の研究報告³⁻¹⁵⁾があり、タール、ニコチンおよびいくつかの煙成分に関しては、フィルタ物性値や濾過条件等から実験式により濾過率を予測することが可能となっている。しかし、シガレットフィルタは捲縮がかかった異型断面繊維からなり(Fig.1)、たばこ煙は粒子と蒸気が高濃度で混在し、粒子-蒸気間の成分移動も起こるため¹⁶⁾、理論的な解析はほとんど行われておらず、たばこ煙の濾過現象は十分に明らかにされていない。

そこで本研究では、煙成分の制御技術を確立し、今後のシガレットの製品開発、品質保証に知見を活用することを目的として、たばこ主流煙中に含まれる粒子状・蒸気状成分が濾過される現象を解析した。

2 異型断面繊維のフィルタ濾過性能への影響

シガレットフィルタの粒子濾過性能を予測する基礎研究として、流れに対して繊維が垂直に配列し、粒子が拡散捕集される場合について、繊維断面形状の濾過性能への影響を数値計算と実験の両面から検討した。

2.1 数値計算方法

Fig.2 に示す数値計算モデルを用い、流れを定常、非圧縮性として無次元化した連続の式、Navier-Stokes の運動量方程式、拡散方程式を図に示す境界条件の下で解くことにより、圧力損失、単一繊維捕集効率を評価した。

2.2 実験装置および方法

単糸織度を全て 3.0denier で揃えた異形断面繊維を用いて手すきによりシートを作製し、圧力損失および粒子濾過率を Fig.3 に示す装置を用いて測定した。

2.3 数値計算結果と実験結果の比較

1) 圧力損失

数値計算により得られた無次元圧力損失より Eq.(1)を用いて無次元抗力の計算値 F_{num} を算出した。

$$F_{num} = 4\mu \cdot Re \quad (1)$$

また、各異型断面繊維からなるシートの物性

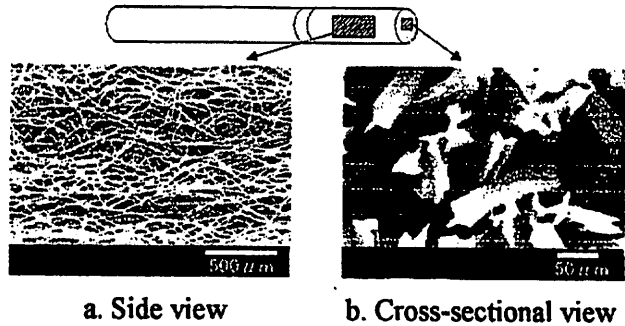


Fig.1 SEM graphs of a conventional cigarette filter

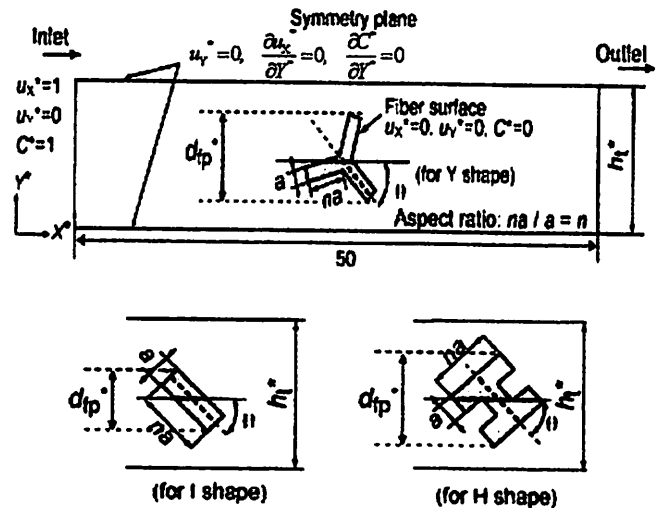


Fig.2 Calculation domain and boundary condition

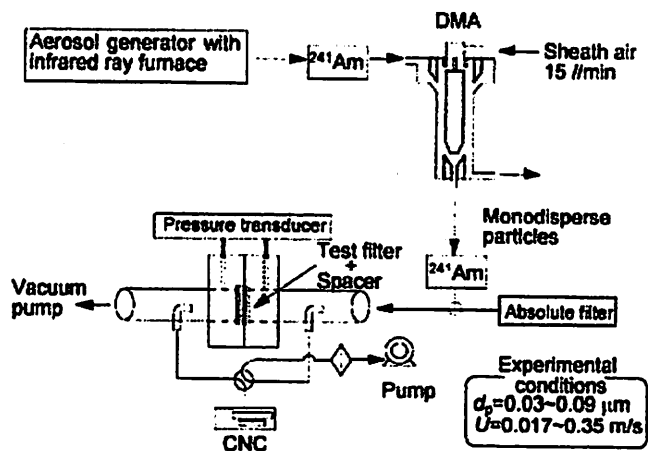


Fig.3 Experimental setup for filter performance test

値と圧力損失測定値より、Eq.(2)を用いて無次元抗力の実測値 F_{exp} を算出した。

$$F_{exp} = -\frac{\pi(1-\alpha)d_b^2 \Delta p}{4\mu UH} \quad (2)$$

得られた無次元抗力の計算値と実測値を比較して Fig.4 に示す。図より、繊維投影幅の大きな断面ほど圧力損失が高くなる傾向が得られた。また、圧力損失はいずれの断面形状においても実測値よりも低く予測されたが、試作フィルタでは、繊維は三次元的に配列されることにより繊維に沿う流れが存在し、繊維間隔にも分布があることにより隣接する繊維の間隔が極めて接近した場合に独立した繊維群として扱えなくなるためと考えられる。

2) 単一繊維捕集効率

異型断面繊維での単一繊維捕集効率を Eq.(3)のように定義して、数値計算により得られた濃度分布より計算値 η_{num} を算出した。

$$\eta_{num} = \frac{\text{繊維表面への粒子沈着量}}{\text{繊維代表径}(d_b)\text{の幅に流入する粒子量}} \quad (3)$$

また、各異型断面繊維からなるシートの物性値と透過率の実測値より、Eq.(4)を用いて単一繊維捕集効率の実測値 η_{exp} を算出した。

$$\eta_{exp} = -\frac{\delta(1-\alpha)}{d_f L} \ln P \quad (4)$$

得られた単一繊維捕集効率の計算値と実測値を Fig.5 に示す。単一繊維捕集効率の実測値は全体的に円断面繊維で小さくなる傾向が認められるものの、断面形状の違いによる有意な差は認められない。これは数値計算による円、Y 断面での違いがわずかであることから、実測値は断面形状の影響よりも、むしろ測定誤差が大きくなったと考えられる。以上より、拡散域における繊維断面形状の単一繊維捕集効率への影響はわずかであることが数値計算と実験により確認された。

3) 濾過性能

異形断面からなるフィルタの濾過性能を比較するため、Fig.6 に濾過速度 0.35m/s における各繊維断面形状のフィルタの圧力損失に対して、粒径 0.09 μ m の粒子の透過率を対数プロットした図を示す。シガレットでは吸い応えを考慮すると圧力損失を大幅に変更できないため、同じ圧力損失で透過率を変更できれば香味調整の自由度が広がり設計上有効な

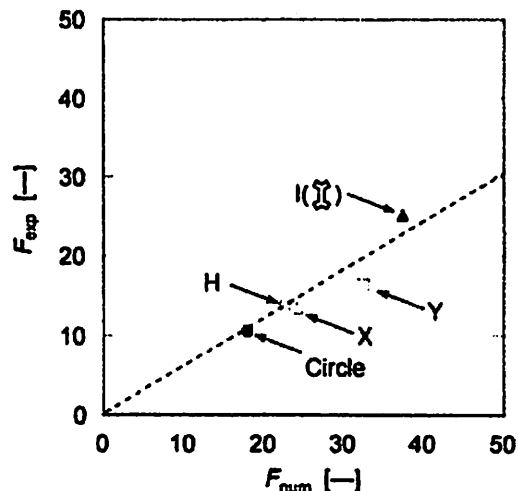


Fig. 4 Comparison of experimental F with numerical ones

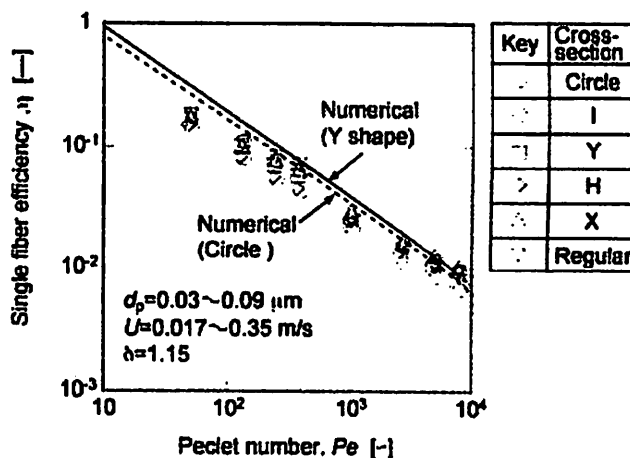


Fig.5 Comparison of experimental single fiber collection efficiencies with theoretical ones

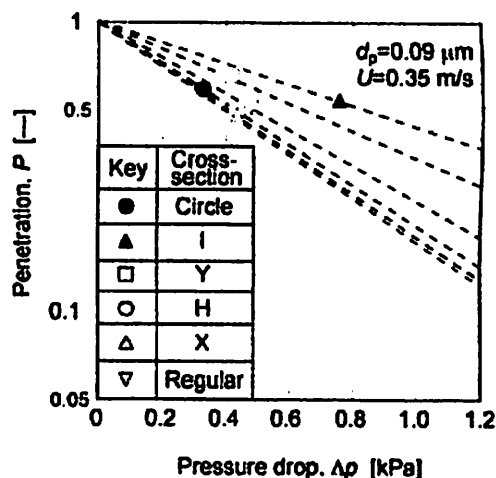


Fig.6 Relationships between penetration and pressure drop for filters with various cross-sections

手段となる。図より、断面形状の違いにより、圧力損失を 1.2kPa に固定したまま粒子の透過率を 0.13 から 0.4 程度まで変更できることから、異形断面繊維の利用はたばこの製品設計上有効であることが示唆された。

3 捲縮および繊維断面形状のフィルタ濾過性能への影響

シガレットフィルタ特有の繊維の断面形状と捲縮が粒子濾過性能におよぼす影響を明らかにするため、円断面とY断面をもつ繊維に対して気流と繊維の配向角を変化させて数値計算を行った。また、シガレットフィルタを用いて圧力損失と粒子濾過率を測定し、計算値と比較した。

3.1 数値計算方法

Fig.7 に示す数値計算モデルを用い、流れを定常、非圧縮性として無次元化した連続の式、Navier-Stokes の運動量方程式、拡散方程式を図に示す境界条件の下で解くことにより、圧力損失、粒子濾過率を計算した。

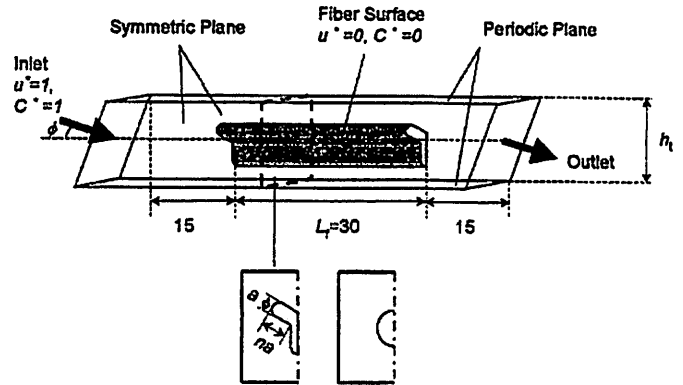


Fig. 7 Model for numerical analysis of flow field and particle concentration around a crimped fiber in cigarette filter

3.2 実験装置および方法

5 種類の繊維径の異なるアセテート繊維を用い、充填率(捲縮率)を3水準に変更したフィルタを用いて圧力損失および粒子濾過率を測定した。

3.3 数値計算結果と実験結果の比較

1) 圧力損失

円断面とY断面の繊維に対して、流れに対する繊維配向角 ϕ の圧力損失への影響を Fig.8 に示す。なお、圧力損失の計算結果は Eq.(5)より、単位長さあたりの圧力損失 Λ_p に変換して示す。

$$\Lambda_p = \frac{4p}{L_f \cdot \cos \phi} \quad (5)$$

図中の○は円断面で配向角が 0 の場合の Happel¹⁷⁾による流れに平行な円柱群での理論解 (Eqs.(6), (7))、△は配向角が $\pi/2$ の場合の桑原¹⁸⁾による流れに垂直な円柱群での理論解 (Eqs.(6), (8))をそれぞれ示す。

$$\Lambda_p = C_d \frac{2\alpha\rho u^2 H}{\pi(1-\alpha)d_f} \quad (6)$$

$$C_d = \frac{8\pi}{Re} \frac{1}{-\ln\alpha + 2\alpha - \alpha^2/2 - 3/2} \quad (7)$$

$$C_d = \frac{16\pi}{Re} \frac{1}{-\ln\alpha + 2\alpha - \alpha^2/2 - 3/2} \quad (8)$$

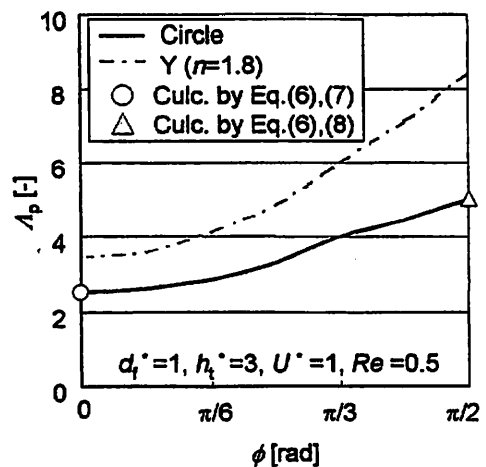


Fig.8 Influence of fiber crimp angle on pressure drop per unit filter depth

配向角の増加に伴い円断面、Y断面ともに圧力損失の増加が見られるが、Y断面のほうが配向角の影響が大きくあらわれる。配向角が 0 のときは繊維を横切る流れがないので繊維表面での剪断抵抗 (Shear drag) が支配的になるが、配向角が 0 以外では剪断抵抗に形状抵抗 (Form drag) が加わり、流れ方向への繊維の投

影長さが圧力損失に影響する。繊維断面形状によって表面積と投影長さの比が異なるため、図に示すような配向角の圧力損失への影響に差が現れたものと考えられる。

各フィルタの物性値を用いて Eqs.(6), (7)より平行配列、円断面でのフィルタ単位長さあたりの圧力損失を計算し、Fig.8 の数値計算結果より各フィルタの捲縮と異型断面形状の影響を考慮してシガレットフィルタの圧力損失を推定した。Fig.9 に実測値と推定値の比較を示す。図より、実測値と推定値に相関が見られるものの、圧力損失が大きくなるほど実測値よりも高く推定されていることがわかる。これは実際のフィルタでは繊維の捲縮や充填の不均一性がある¹⁹⁾ことによると考えられる。

2) 粒子濾過率

Fig.10にフィルタ係数の計算結果と配向角の関係を示す。なお、計算結果はEq.(9)より単位長さあたりの濾過率(フィルタ係数)に変換して示す。

$$\Lambda_E = -\frac{\ln(1-E)}{L_f \cos \phi} \quad (9)$$

図中の○は円断面で配向角が $\pi/2$ の場合のStechina²⁰⁾の半理論解(Eqs.(10), (11))による推定値を示す。

$$\Lambda_E = \frac{4\alpha}{\pi(1-\alpha)d_f} \eta \quad (10)$$

$$\eta = 2.90h_x^{-1/3} Pe^{-2/3} + 0.624Pe^{-1} \quad (11)$$

図より、フィルタ係数は配向角に伴い増加し、異型断面によるフィルタ係数の差は配向角が変化してもほぼ一定となる傾向が得られた。

各フィルタの物性値を用いてEqs.(10), (11)より垂直配列、円断面でのフィルタ係数を計算し、Fig.10の数値計算結果より捲縮角と異型断面形状の影響を考慮してシガレットフィルタの圧力損失を推定した。Fig.11に実測値と推定値の比較を示す。図より粒子濾過は実測値をよく推定できていることがわかる。

以上より、本解析法は、圧力損失は高めに推定するが、粒子濾過率は十分な精度で予測できることから、シガレットフィルタの条件では、捲縮や充填の不均一性は圧力損失に大きく影響するが、粒子濾過率にはあまり影響しないと考えられる。

3) 濾過性能

数値計算により求めた単位繊維層厚さあたりの圧力損失とフィルタ係数(Figs.8, 10)の比として性能指標を求め、配向角に対してプロットした図をFig.12に示す。図よ

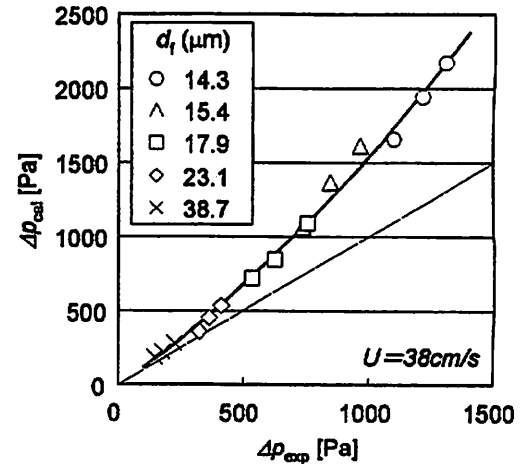


Fig.9 Comparison of experimental pressure drops and calculated ones

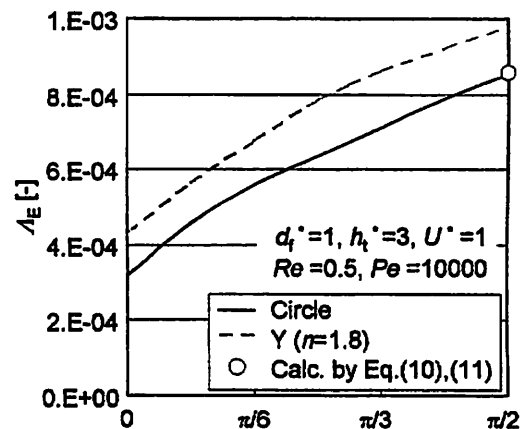


Fig.10 Influence of fiber crimp angle on filter coefficient

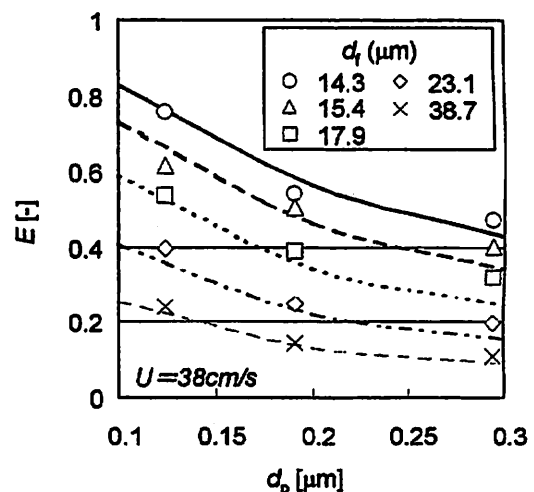


Fig.11 Comparison of experimental particle collection efficiency and calculated ones

り、繊維断面形状がいずれの場合も配向角が $\pi/6$ の時にフィルタ性能指標が最大となっていることがわかる。このことから、繊維配向には最適値が存在し、最もフィルタが高性能(高効率で低圧損)となる配向角は $\pi/6$ であることが言える。

Fig.13に実験により得られたシガレットフィルタの圧力損失と粒子透過率の関係を示す。図において、フィルタ性能を比較した濾過速度は、標準的なたばこ燃焼試験の条件としてISO3308 に規定されている流量(35mL/2

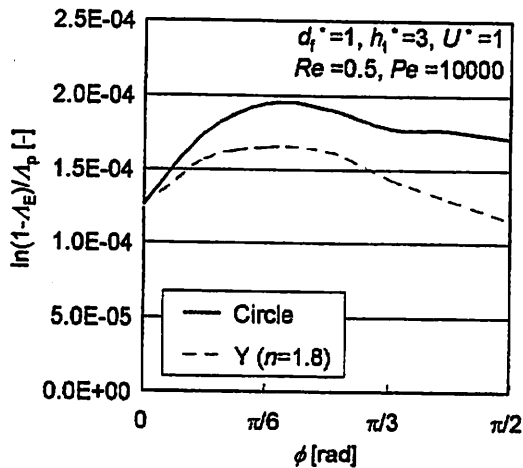


Fig.12 Filter performance index as a function of fiber crimp angle

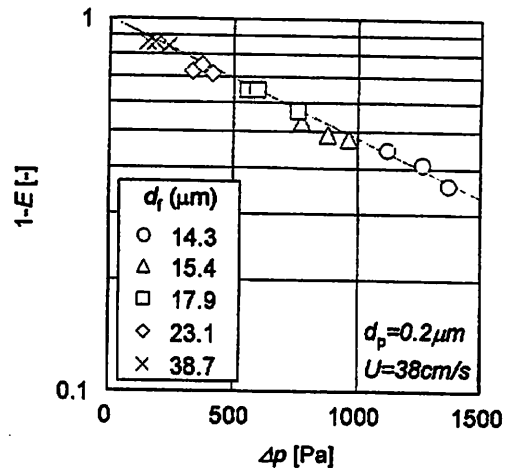


Fig.13 Experimental particle penetrations as a function of pressure drop of filter

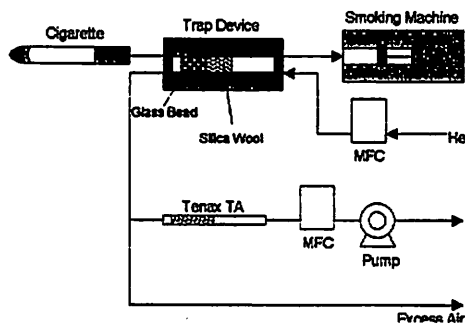


Fig.14 Flowchart of experimental setup for the measurement of penetration of cigarette smoke components.

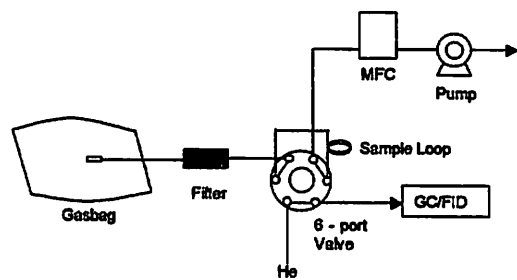


Fig.15 Flowchart of experimental setup for the measurement of penetration of single vapor component

s)に対応する値(38cm/s)で、粒径はたばこ煙平均粒子径²¹⁾とほぼ同じ0.2 μ mである。図より、実験データは、フィルタ繊維径や充填率が変化しても、ほぼ1本の直線上に載っており、フィルタ性能の指標にほとんど差がないことがわかる。今回使用したシガレットフィルタの配向角は $\pi/12 \sim \pi/4$ 程度であり、この配向角の範囲ではFig.12に示した数値計算結果においてもフィルタ性能指標がほぼ一定であることと一致している。

4 たばこ主流煙中セミボラチル成分の濾過現象解析

アセテートフィルタ(CA)に可塑剤としてトリアセチン(GTA)を添加した場合を対象に、たばこ煙および単成分蒸気を用いて、煙成分の選択濾過現象を実験的に解析した。

4.1 実験方法

シガレットフィルタによるたばこ主流煙成分の濾過率を Fig.14 に示す実験装置により、単成分蒸気の吸収率を Fig.15 に示す実験装置によりそれぞれ測定した。また、粒子からの成分の蒸発を評価するため、デニューダチューブを用いて Fig.14 に示す実験装置によりたばこ煙成分の透過率を測定した。

4.2 実験結果および考察

1) 主流煙中成分の濾過率

Fig.16にCAとGTAを6wt%(9mg/25mm)添加した場合の各煙成分の濾過率を示す。CAのみの場合、Acetic acid、Furfural、Phenolは粒子以上の濾過率を示すことから選択濾過されていることがわかる。また、CAにGTAを添加した場合、粒子濾過率に変化は見られないが、Acetic acid以外の煙成分はCAのみの場合よりも濾過率の上昇が見られた。特にPyridine、Styrene、Furfural、Phenolに関しては顕著な濾過率の増加が認められることから、GTAはこれらの成分の選択濾過性に優れていると言える。

2) 単成分蒸気の吸収率

Styrene蒸気を用いて吸収率の経時変化を測定した結果を Fig.17に示す。図より、CAのみでは吸収率が低いが、GTAの添加により吸収率が顕著に増加していることがわかる。この結果はたばこ煙での濾過率変化 (Fig.16)と相関があり、蒸気吸収が選択濾過の因子となっていることがわかる。

3) 粒子からの蒸発

デニューダチューブによる各煙成分の透過率をEq.(12)からの推算値と比較してFig.18に示す。

$$P_{pv} = f_p + f_v P_v \quad (12)$$

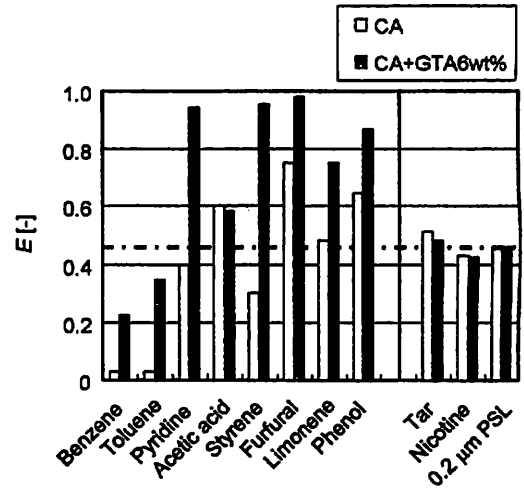


Fig.16 Filtration efficiency of smoke components by CA with and without GTA

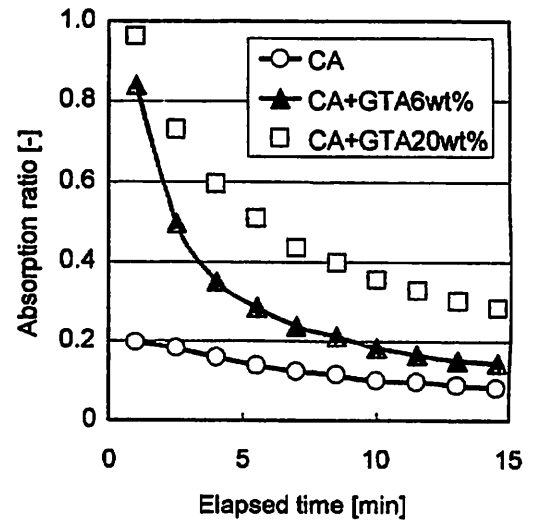


Fig.17 Absorption ratio of styrene by CA with and without GTA

ここで、各煙成分の粒子と蒸気の分配率 f_p , f_g はガラス繊維フィルタの透過率より評価し、蒸気透過率 P_g はGormley and Kennedyの式²²⁾より、蒸気の拡散係数の関数として計算した。各成分の蒸気拡散係数はニコチンに関しては文献値²³⁾を引用し、その他の成分はChapman-Enskog式²⁴⁾を用いて各成分の物性値から計算した。図より、たばこ煙中で粒子と蒸気に分配するPyridine, Acetic acid, Styrene, Limonene, Furfuralのようなセミボラタイル成分は、デニューダチューブによる透過率の推定値が実測値よりも高く見積もられている。Eq.(12)では蒸発に伴う粒子相から蒸気相への成分移動を考慮していないが、実際にはこれらのセミボラタイル成分はデニューダチューブ内で粒子からの蒸発がおこり、蒸発した成分がさらに吸収されて透過率が低くなったと考えられる。この現象はたばこ煙中でほぼ全量が粒子相中に存在するPhenolやNicotineに関しても見られた。

4) 煙成分の蒸気圧と選択濾過性の関係

CAおよびGTAを添加したフィルタによる各煙成分の濾過率を室温での蒸気圧で整理してFig.19に示す。CAのみの場合、主に蒸気圧が1~4,000Paの煙成分で選択濾過現象が見られ、GTAを添加した場合はこの範囲の選択濾過性がエンハンスされていることがわかる。この蒸気圧範囲では、蒸気が粒子濾過率以上に吸収され、それに伴い粒子からの蒸発がおこって選択濾過が発現していると考えられる。蒸気圧が4,000Pa以上の煙成分は、蒸気圧の上昇に伴い濾過率の減少が見られた。この蒸気圧範囲では煙成分が安定的に蒸気相中に存在するため、蒸気圧の上昇に伴い永久ガスの特性に近づき、蒸気吸収が困難になったと考えられる。一方、蒸気圧が1Pa以下の範囲では、煙成分の濾過率が粒子濾過率とほぼ等しくなった。この蒸気圧範囲ではほぼ全量が粒子中に存在し、室温では粒子からの蒸発がほとんどおこらないためと考えられる。

5 結言

シガレットフィルタ特有の捲縮と繊維断面形状がフィルタの濾過性能(粒子濾過率と圧力損失)に及ぼす影響を実験と数値計算の両面から解析した。その結果、同じ断面積で周囲長の大きい異型断面繊維を用いると、粒子濾過率の増加よりも圧力損失の増加の方が大きくなるため、フィルタ性能指標が低下することが示された。また、捲縮角の増加に伴い粒子濾過率、圧力損失ともに増加するが、増加傾向が異なるため、捲縮角が $\pi/6$ でフィルタ性能指標が最大値となることがわかった。現行のシガレットフィルタはY型断面で捲縮角は $\pi/12 \sim \pi/4$ の範囲であるが、この範囲ではフィルタ性能指標がほぼ一定となる。現行繊維から断面形状、捲縮角を変更することで、フィルタ性能指標を変更でき、製品設計の自由度が広がる可能性が示唆された。

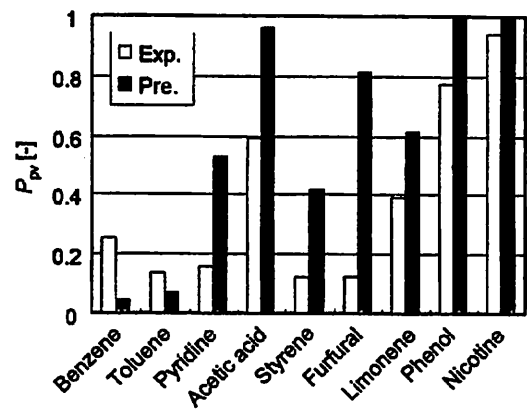


Fig.18 Comparison of the experimental penetration of smoke components through the denuder with those predicted by Eq.(10)

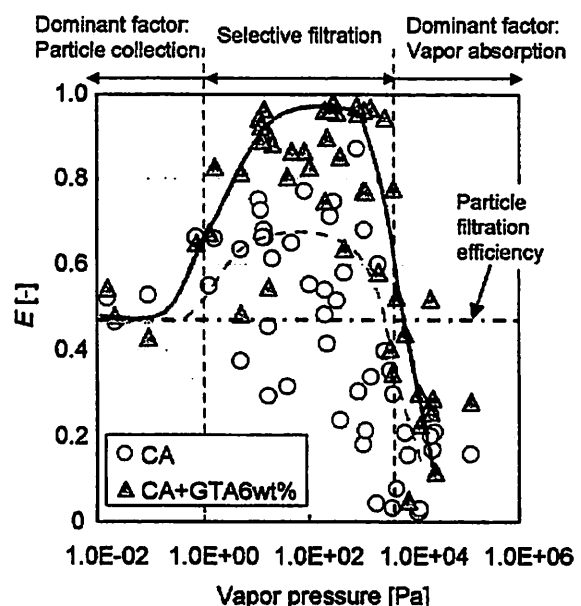


Fig.19 The relationship between filtration efficiency and vapor pressure

たばこ主流煙中のセミボラタイル成分がシガレットフィルタにより濾過される現象を実験的に解析した。その結果、煙成分の選択濾過性はたばこ煙中にもともと存在する蒸気や、濾過に伴い粒子から蒸発する蒸気が、粒子の濾過率以上にフィルタ繊維や添加剤に吸収されることにより発現することがわかった。また、添加剤の塗布により蒸気の吸収率が顕著に上昇し、それに伴い選択濾過性がエンハンスされることがわかった。また、選択濾過性は煙成分の蒸気圧によってほぼ決定され、蒸気圧が1~4,000Paの成分では選択濾過性が顕著にみられる。一方、蒸気圧が4,000Pa以上の成分は蒸気の吸収・吸着量が小さくなるため濾過率が低くなり、蒸気圧が1Pa以下の成分は、粒子からの蒸発がほとんど起こらないため、粒子濾過率とほぼ等しくなることがわかった。

Nomenclature

C	= particle concentration	[m ⁻³]
C_d	=drag coefficient	[-]
D	=Brownian diffusion coefficient of particles	[m ² ·s ⁻¹]
d_f, d_{fs}	=cross-sectional area equivalent diameter of fiber	[m]
d_{fp}	=width of fiber projected in flow direction	[m]
d_p	=particle diameter	[m]
F	=dimensionless drag force	[-]
f_p	=fraction of particle	[-]
f_v	=fraction of vapor	[-]
h_t	=inter-fiber distance	[m]
h_K	=hydrodynamic factor	[-]
H	=filter thickness	[m]
L	=total fiber length per unit area of filter	[m ⁻¹]
L_f	=fiber length	[m]
n	=aspect ratio of fiber cross-section	[-]
P	=particle penetration	[-]
P_v	=penetration of vapor	[-]
P_p	=penetration of particle	[-]
P_{pv}	=penetration of particle and vapor	[-]
Pe	=Peclet number (= $d_{fs}U/D$)	[-]
Re	=Reynolds number(= $\rho U d_{fs}/\mu$)	[-]
s	=cross-sectional area of fiber	[m ²]
U	=face airflow velocity	[m·s ⁻¹]
u	=airflow velocity	[m·s ⁻¹]
X, Y	=rectangular coordinates	[m]

Greek

α	=packing fraction of filter	[-]
Δp	=pressure drop	[Pa]
δ	=inhomogeneity factor of fiber packing	[-]
ϕ	=crimp angle	[rad]
η	=single fiber collection efficiency	[-]
A_E	=filter coefficient	[-]
A_p	=pressure drop of filter per unit filter depth	[Pa·m ⁻¹]
μ	=viscosity of air	[Pa·s]
ρ	=air density	[kg·m ⁻³]
θ	=fiber rotation angle	[rad]

Subscripts

num	=numerical
cal	=calculated
exp	=experimental

Superscript

*	=dimensionless
---	----------------

References

- 1) Fisher, B.; *Tob. Rptr.* 9 24-29 (2000)
- 2) Ishiguro, S., Sugawara, S.: *The koryo*, 130 31-39 (1981)
- 3) Maeda, K. and Anzai, Y.; *Sen-I Gakkaishi*, 36, 121-126 (1980)
- 4) Dwyer, R. W. and Abel, S. G.; *Beitr. Tabakforsch. Int.* 13, 243-253 (1986)
- 5) Duke, M. G.; *Filtration & Separation*, 23, 6 358-362 (1986)
- 6) Kao, J.; *Beitr. Tabakforsch. Int.* 14, 6 341-352 (1990)
- 7) Tokida, A. and Shinozaki, M.; *CORESTA 75 ST1* (1992)
- 8) Morie, G. P.: *Proc. Am. Chem. Soc. Symp. on Recent Advances in the Chemical Composition of Tobacco and Tobacco Smoke*, 553-583 (1977)
- 9) Graham, J. F.; *Beitr. Tabakforsch. Int.* 5, 224-228 (1970)
- 10) Baggett, M. S. and Morie, G. P.; *Beitr. Tabakforsch. Int.* 8, 150-152 (1975)

- 11) Morie, G P., Sloan, C. H. and Baggett, M. S.; *Beitr. Tabakforsch. Int.* **8**, 145-149 (1975)
- 12) Morie, G P. and Baggett, M. S.; *CORESTA* 124, ST02 (1976)
- 13) Formella, K., Braumann, Th. And Elmenhorst, H.; *Beitr. Tabakforsch. Int.* **15**, 3 123-128 (1992)
- 14) Shepherd, R. J. K.; *Tob. Chem. Res. Conf.* **47** 36 (1993)
- 15) Taylor, M. J. and McCormack, A. D.; *CORESTA* ST39 (2001)
- 16) Eaker, D. W.; *Recent Advances in Tobacco Science*, **16**, 103-187 (1990)
- 17) Happel, J.; *AIChE J.*, **5**, 174-177 (1959)
- 18) Kuwabara, S.; *J. Phys. Soc. Jpn.*, **14**, 527-532 (1959)
- 19) Dwyer, R. W.; *Beitr. Tabakforsch. Int.* **13**, 4 157-168 (1986)
- 20) Stechkina, I. B.; *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, **167**, 1327-1330 (1966)
- 21) Ingebretsen, B.J.; *Recent Advances in Tobacco Science*, **12**, 54-142 (1986)
- 22) Gormley, P. G. and Kennedy, M.; *Proc. Roy. Irish Acad.* **52A**:163-169 (1949)
- 23) Lewis, D. A. Colbeck, I. and Mariner, D.C.; *Anal. Chem.* **66**, 3525-3527 (1994)
- 24) Chapman, S. and Cowling, T.G.; *Mathematical Theory of Non-Uniform Gases*, Second ed., Cambridge University Press, Chapters 10 and 14 (1951)

学位論文審査結果の要旨

平成 15 年 7 月 29 日に第 1 回学位論文審査会を開催して本論文の内容を検討し、8 月 4 日の口頭発表、同日開催の第 2 回審査会における最終審査により、下記の通り判定した。

本論文は、シガレットフィルタによるたばこ煙ろ過現象の解析を目的として、1) シガレットフィルタ特有の非円形繊維断面形状や捲縮（縮れ）のフィルタの粒子捕集性能への影響、2) たばこ煙に含まれるセミボラタイル成分の選択ろ過機構（粒子状 / 蒸気状で存在する特定成分が粒子の捕集効率以上に捕集される現象）、について検討した。1) について、フィルタ内部構造とフィルタの捕集効率と圧力損失の関係を明らかにし、2) については、粒子から蒸発したセミボラタイル成分がフィルタに吸着するため選択ろ過が起こり、選択ろ過の程度は成分の蒸気圧で整理できることを明らかにした。これらの研究結果は、たばこ煙だけでなく一般の粒子状物質に対して、繊維断面形状・繊維配向の影響を考慮したフィルタ捕集効率の予測を可能にするとともに、蒸気・粒子両相で存在する成分のフィルタによる同時ろ過 / 吸着分離に関する重要な知見を与えている。

以上のように、本論文は、フィルタ構造と粒子捕集性能の関係、ならびに粒子状と蒸気状の両相で存在する成分のフィルタ内での挙動を明らかにしており、工学的な価値は極めて高く、博士（工学）の学位に値すると判断する。