

令和 5 年度 博士論文

防塵マスク用エアフィルタのナノ粒子に対する捕集性能の推定

指導教員

座間 淑夫 准教授

群馬大学大学院 理工学府 知能機械創製理工学領域

氏 名

関口 裕亮

目 次

第 1 章 緒言

1-1 大気中の粒子	3
1-2 防塵マスク	5
1-3 労働安全衛生法	7

第 2 章 エアフィルタの粒子捕集理論

2-1 単一繊維の粒子捕集メカニズム	13
2-2 単一繊維の粒子捕集理論の変遷	22
2-3 Fan Model Filter (FMF)	25
2-4 研究目的	29

第 3 章 遮光率による対数透過率予測

3-1 対数透過率の代替パラメータ	30
3-2 テストフィルタ作製	31
3-3 繊維充填率と厚み測定	37
3-4 遮光率測定	42
3-5 対数透過率測定	44
3-6 遮光率と対数透過率の相関関係	64
3-7 予測式の妥当性確認	74

第 4 章 2種の繊維径を考慮した対数透過率の予測

4-1 実用エアフィルタの仕様	77
4-2 テストフィルタ作製	80
4-3 繊維充填率と厚み測定	83
4-4 対数透過率測定	85
4-5 CF 及び FF の繊維径及び配合量からの実験式	101
4-6 FMF 理論に基づいた対数透過率の予測式	111

第 5 章 結言	121
----------	-----

参考文献	123
------	-----

謝辞	130
----	-----

Nomenclature

α	Packing density	[-]
α_{CF}	Packing density for coarse fiber	[-]
α_{FF}	Packing density for fine fiber	[-]
C_c	Cunningham's slip correction factor	[-]
C_{down}	Particle concentration in downstream	[#/cm ³]
C_{up}	Particle concentration in upstream	[#/cm ³]
D_i	Inter-fiber distance	[m]
d_{eq}	The nominal fiber diameter	[m]
d_L	The nominal fiber diameter weighted by length	[m]
d_{CF}	Fiber diameter of CF	[m]
d_{FF}	Fiber diameter of FF	[m]
d_F	Fiber diameter	[m]
d_P	Particle diameter	[m]
D	Diffusion coefficient of particle	[-]
DF	Degree of fluctuation for logarithm of penetration	[-]
δ	inhomogeneity factor	[-]
Δp^f	Measured pressure drop across real filter	[Pa]
Δp^r	calculated pressure drop	[Pa]
F	Dimensionless drag force	[-]
G	gravitational parameter	[-]
g	gravitational acceleration	[m/s ²]
G_{SP}	Gap between surface of particles	[m]
η	Filtering efficiency	[-]
η_D	Filtering efficiency due to diffusion	[-]
η_R	Filtering efficiency due to interception	[-]
η_{DR}	Filtering efficiency due to interaction between diffusion and interception	[-]
η_I	Filtering efficiency due to inertial impaction	[-]
η_G	Filtering efficiency due to gravity settling	[-]
k	hydrodynamic factor	[-]
k_B	Boltzmann constant	[-]
Kn	Knudsen number	[-]

Nomenclature

$-\ln P$	Logarithm of penetration	[-]
$-\ln P_{\text{Meas.}}$	Measurement value of logarithm of penetration	[-]
$-\ln P_{\text{Calc.}}$	Calculated value of logarithm of penetration	[-]
$-\ln P_{\text{CF}}$	Logarithm of penetration for coarse fiber	[-]
$-\ln P_{\text{FF}}$	Logarithm of penetration for fine fiber	[-]
$-\ln P_{\text{CF+FF}}$	Logarithm of penetration for coarse and fine fibers	[-]
l	length of fiber	[m]
L_F	Light intensity through air filter	[-]
L_R	Light intensity of reference light	[-]
LSR	Light shading rate	[-]
MPPS	Most penetrating particle size	[m]
N_F	The number of fibers in thickness direction	[-]
n_{CF}	The number of coarse fibers	[-]
n_{FF}	The number of fine fibers	[-]
μ	Viscosity coefficient of gas	[-]
p	Pressure	[Pa]
Pe	Peclet number	[-]
R	interception parameter	[-]
Re	Reynolds number	[-]
RE	Relative error	[%]
ρ_p	Density of particle	[g/cm ³]
St	Stokes number	[-]
S_{PCF}	Increase in logarithm of penetration for coarse fiber	[-]
S_{PFF}	Increase in logarithm of penetration for fine fiber	[-]
T	Thickness of filter	[m]
t	temperature	[K]
u	filtration velocity	[m/s]
V_{Fiber}	Volume of only fibers in air filter	[m ³]
V_{Filter}	Volume of air filter including fibers and voids	[m ³]
W_F	Weight of fiber	[g]
W_{CF}	Weight of coarse fiber	[g]
W_{FF}	Weight of fine fiber	[g]

第 1 章 緒言

1-1 大気中の粒子

大気中には、様々な粒子径や成分を有する粒子が存在する。自然発生する粒子の 1 種として、砂塵やミスト等は、比較的大きな粒子径(10 μm 以上)を有し、組成的にも有害性は低く、人が吸引しても健康上への悪影響はほとんどない。一方、機能性材料として顔料等に使用されるフラーレン等のナノ粒子は 100 nm 以下の極めて小さな粒子径を有する。なおかつ、未だに不明な点が多いものの、人体に対しては有害である可能性が高いと指摘されている^[1-7]。まず、ナノ粒子はその極めて小さなサイズを有する故に、極めて大きな比表面積を有するため、生体への活性が高い。また、人が吸引した場合、粒子径が小さい程人体の内部のより深部に到達することが知られている^[8-10]。図 1 に示すように、5 μm 以上であれば上気道上で粒子は捕捉される。しかし、5 μm 以下で肺の内部に達し、1 μm 未満では肺胞内部にまで到達する^[10-11]。さらに、500 nm の粒子の場合、肺胞マクロファージが貪食し、肺胞内で炎症が発生する^[12-13]。このようにナノ粒子は身体の深部まで侵入するため、組成的にも有害性の高い銀ナノ粒子等は、生殖幹細胞や脳、肝臓由来の細胞に強力な毒性を示すという報告がある^[14-18]。人体に対し極めて危険なナノ粒子の吸引を防止する必要がある。

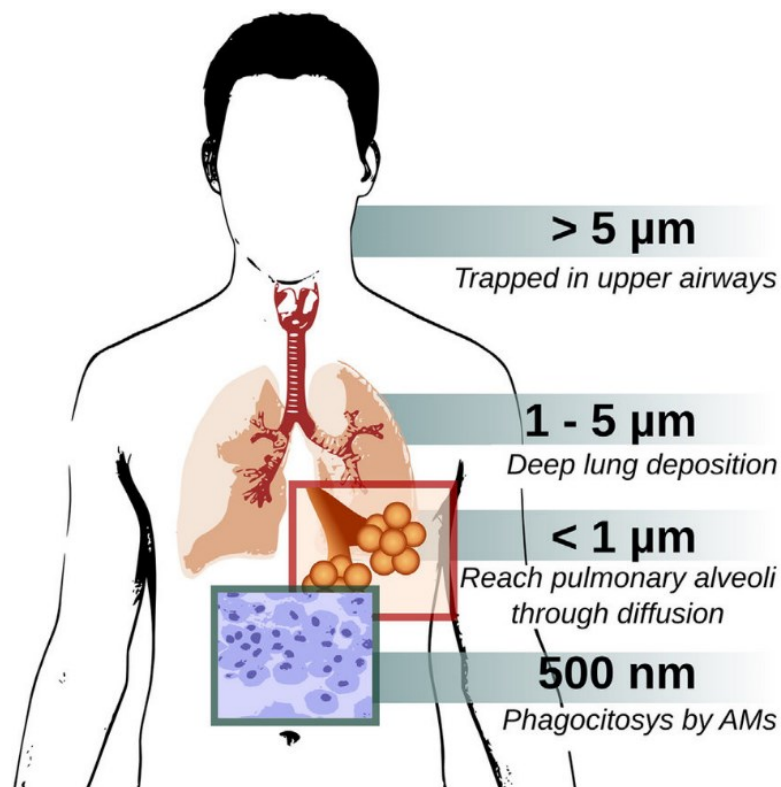


Fig.1 The relationship between particle size and penetration into the lung^[11]

人体に有害な粒子を発生させる作業の例として、導電材料の工場や溶接現場等が挙げられる。先に述べた銀ナノ粒子は酸化しにくく高い電気伝導率を有するため、電子配線等の導電材料や導電性インク等に使用される。これらの製造現場では、粒子径が約 10 nm の銀ナノ粒子が発生する。溶接現場では、溶接トーチが発生させる 1000°C以上の熱により蒸発した金属が空気中で冷却され、100 - 1000 nm の粒子が発生する^[19-20]。このように、人体に有害なナノ粒子が発生する現場では、労働者の健康を守るために、図 2 に示す局所排気装置の設置が望ましい^[21-22]。局所排気装置は吸込口(フード)と管(ダクト)で構成されており、フードを有害な粒子発生原の付近に設置することで、室内に有害な粒子が拡散する前にダクトから有害な粒子を排出することができる。しかしながら、局所排気装置のコストが高いことや設置場所が確保できない等の理由で設置できない場合もある。その場合に有効な対策は図 3 に示す防塵マスクの着用である。防塵マスクは、内蔵されたフィルタで空気中の粒子を除去することができる^[23-25]。

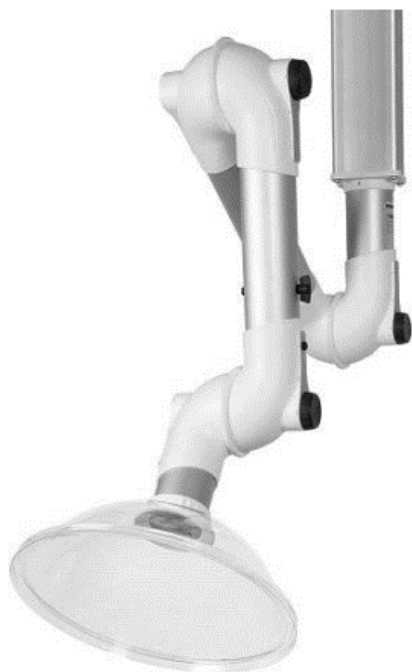


Fig.2 Local exhaust ventilation ^[22]



Fig.3 Dust mask

1-2 防塵マスク

防塵マスクの重要な性能指標として、フィルタの通気抵抗と捕集効率がある。通気抵抗が高い程マスク着用者は息苦しくなるため、できるだけ低いことが望ましい。一方、捕集効率は有害な粒子の除去効率を示すため、高いことが望ましい。ただし、図 4 に示すとおり捕集効率は通気抵抗の上昇に伴って上昇する相関関係を有しトレードオフの関係にあるため、極端に低い通気抵抗と高い捕集効率を有するフィルタを製造することは困難と言える^[26-27]。

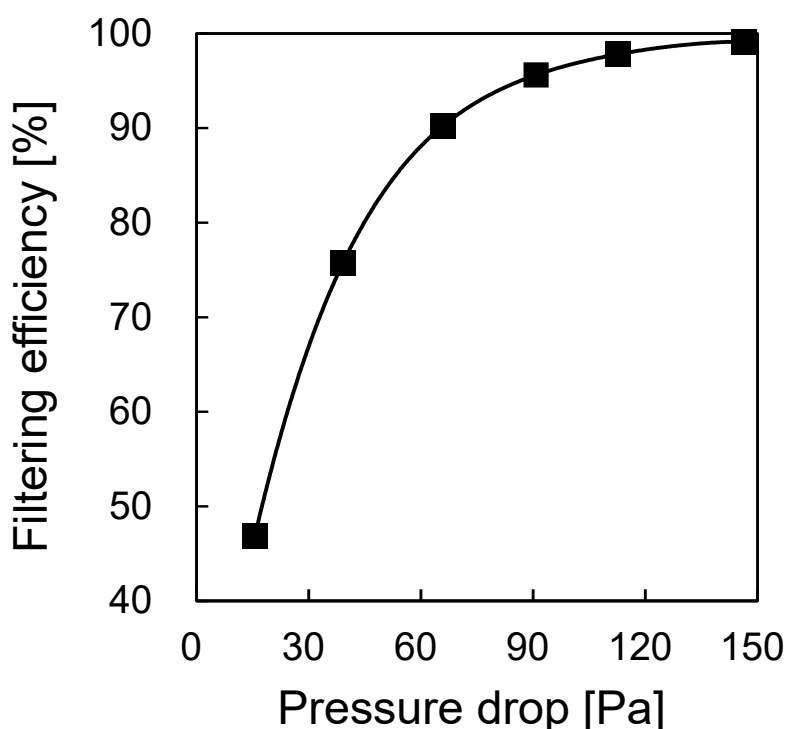




Fig.4 Correlation between pressure drop and filtering efficiency

防塵マスク用フィルタは、メカニカルフィルタとエレクトレットフィルタの 2 種類に分類され、それぞれ表 1 に示す強みと弱みが存在する。メカニカルフィルタは、拡散、遮り、慣性と重力による物理的な捕集メカニズムにより粒子を捕集し、エレクトレットフィルタは、物理的な捕集機構に、静電気による粒子とフィルタの引力が加えられる。メカニカルフィルタの長所は寿命が約 10 年と長く、粒子を堆積しても捕集効率が低下しないことで、短所は静電気力を持たないため、エレクトレットフィルタと比べて捕集効率が低く通気抵抗が高いことである。一方で、エレクトレットフィルタは通気抵抗が低いという長所を持つものの、寿命が 2 年程度と短く、粒子を堆積すると、フィルタ表面の静電気力が低下し、捕集効率が低下する短所を有する^[28-32]。

Table 1 Mechanical filter and electret filter

	Mechanical filter	Electret filter
Types		
Material	Glass fiber	Polypropylene
Mechanism	Mechanical filtration	Mechanical filtration and electrostatic forces
Strage life	Long (10 years)	Short (2 years)
Pressure drop	High	Low

防塵マスクの用途が、着用者の健康を守ることであることから、多くの防塵マスクメーカーが、粒子堆積によって捕集効率が下がらず、寿命も長いメカニカルフィルタを好む。しかしながら、メカニカルフィルタは、通気抵抗が高いという大きな短所を有する。高い通気抵抗を低減するための対策として、プリーツ構造と呼ばれるフィルタを折り畳んだ構造にすることで、ろ過面積を拡大することが一般的である。例として、防塵マスクに内蔵されるろ過材内部のフィルタ(ろ紙)を図5に示す。プリーツ構造のろ紙を切り開いた状態を図6に示す。プリーツ形状のろ紙としてはコンパクトであるものの、切り広げたらろ紙は大きな面積を有しており、通気抵抗の低減に寄与している^[33]。



Fig.5 Pleated filter

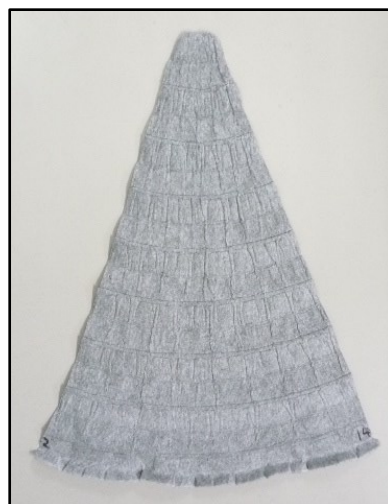


Fig.6 Cut-opened filter

1-3 労働安全衛生法

防塵マスクはその用途に応じた性能区分があり、表 2 に示すとおり労働安全衛生法で仕様と基準値が規定されている^[34]。通気抵抗の測定方法は単純で、一定流量 40 L/min で通気した際の通気抵抗を測定する。一方、捕集効率はフィルタの種類に応じ粒子の種類や径が厳格に設定されている。R は交換可能(Replaceable)、D は使い捨て(Disposal)、S は固体粒子(Solid)に対応可能、L は液体粒子(Liquid)に対応可能ということを示している。また、エレクトレットフィルタは RS, DS に、メカニカルフィルタは RL, DL に該当し、例として、RS (Replaceable Solid) は、交換可能かつ固体粒子対応であることを示す。いずれも Type が 1,2 及び 3 と上昇することは対応粒子の有害性が増加することを示し、捕集効率の基準値も 80, 95, 99.97% と上昇する。捕集効率と相関する通気抵抗も 70, 80, 160 Pa と上昇し、有害性の高い粒子には、息苦しさを妥協し、捕集効率を優先させている。

ここで、粒子径について議論するため、メカニカルフィルタとエレクトレットフィルタの最大透過粒子径(Most penetrating particle size, MPPS)を図 7 に示す。メカニカルフィルタの捕集効率は粒子径が小さい程、拡散が強く働き、粒子径が大きいと、遮り、慣性、重力が強く働く。捕集機構はこれら全ての捕集機構の合算で示されるため、200 nm 付近で極値的に捕集効率が低くなり(透過率が高い)、この粒子径が MPPS である^[35-36]。一方のエレクトレットフィルタには、メカニカルフィルタの捕集機構に、静電気による捕集機構が加算される。粒子径が大きいく程、粒子に帯電する電荷量が大きくなり捕集効率は上昇する。その結果、図 7 のとおり、MPPS は小粒径側にシフトし、エレクトレットフィルタの MPPS は 80 nm 付近となる。

Table 2 Class of filters for Japanese Industrial Safety and Health Act

filter	Type	Usage	Standard		Target		
			Pressure drop (at 40 L/min) [Pa]	Filtering Efficiency (at 85 L/min) [%]		Particle (Example)	Toxicity
				For solid (NaCl)	For Liquid (Diocetyl phthalate)		
Electret filter	RS1	Replaceable	≤ 70	≥80.0	Sand	Low	
	RS2		≤ 80	≥95.0	Weld fume	Middle	
	RS3		≤160	≥99.9	Nanomaterial(CNP)	High	
	DS1	Disposal	≤ 70	≥80.0	Sand	Low	
	DS2		≤ 80	≥95.0	Weld fume	Middle	
	DS3		≤160	≥99.9	Nanomaterial(CNP)	High	
Mechanical filter	RL1	Replaceable	≤ 70	≥80.0	Water mist	Low	
	RL2		≤ 80	≥95.0	Tar mist	Middle	
	RL3		≤160	≥99.9	Indium Compounds	High	
	DL1	Disposal	≤ 70	≥80.0	Water mist	Low	
	DL2		≤ 80	≥95.0	Tar mist	Middle	
	DL3		≤160	≥99.9	Indium Compounds	High	

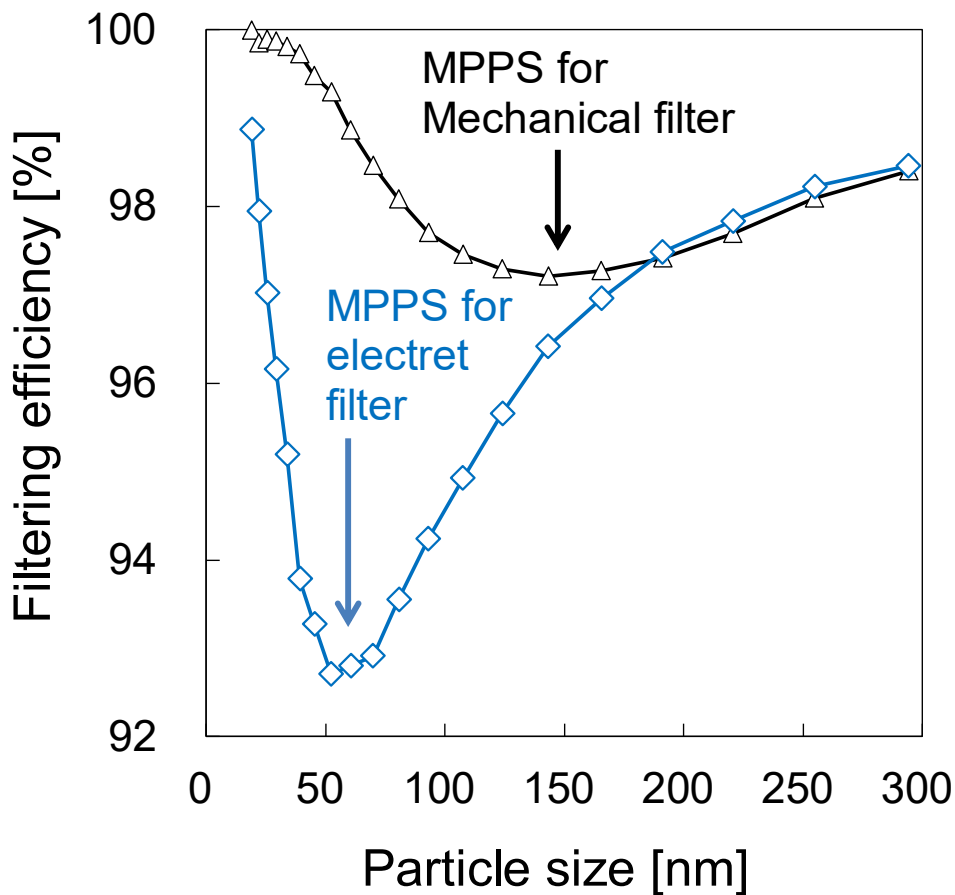


Fig.7 Filtering efficiency for mechanical filter and electret filter

労働安全衛生法に基づいた捕集効率の測定における試験条件を表 3 に示す^[34]. 主たる基準は粒径分布の中央値であり、エレクトレットフィルタは 60-100 nm, メカニカルフィルタは 150-250 nm の範囲内と定められている. この粒子径は各フィルタの MPPS の範囲と同等とする意図があり, 捕集効率を厳しい条件で評価できるようになっている. 捕集効率を評価するための装置は図 8 に示す Automated filter tester (AFT8130A, TSI)等がしばしば用いられる^[37]. AFT8130A の内部構造を図 9 に示す. 主な装置部品として, 粒子発生器, テストフィルタホルダ, フォトメータがある. その原理は, 圧縮空気が粒子発生器に流入しエアロゾル (NaCl 又は DOP) を発生させ, 混合チャンバで清浄空気と混合し適切な濃度に薄められる. テスト用エアロゾルはポンプの吸引により, テストフィルタホルダを通過し, その前後の光散乱強度をフォトメータで測定し, 粒子濃度を算出する.

Table 3 Test condition for Japanese Industrial Safety and Health Act

Filter	Series	Test Particle				Flow rate [L/min]
		Type	Median diameter [nm]	Standard deviation [-]	concentration [mg/m ³]	
Electret filter	RS DS	NaCl	60-100	≤ 1.6	≤ 60	85
Mechanical filter	RL DL	DOP	150-250	≤ 1.6	≤ 100	85



Fig.8 Automated filter tester (AFT8130A, TSI)^[37]

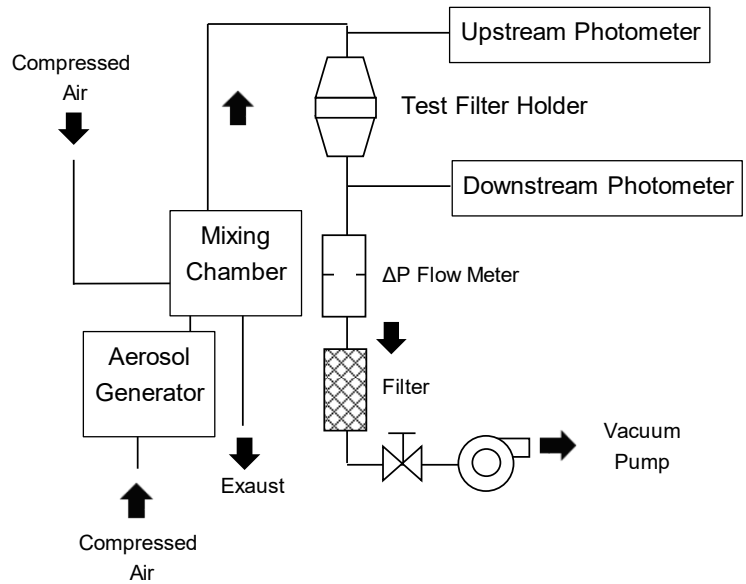


Fig.9 Internal structure of AFT8130A^[37]

粒子発生の詳細な原理を図 10 に示す^[37]. 圧縮空気がアトマイザードローチューブ(ADT) 上部に流れると気流により陰圧となり, ADT が溶液を吸い上げる. ADT 上部から試験粒子が発生し, アウトレットから流出する. その間, インパクターにおいて粗大粒子は除去されるため, サブミクロンサイズの粒子のみが混合チャンバに供給される. テストフィルタホルダの上流側, 下流側では, それぞれの粒子含有空気が図 11 のフォトメータに通気される^[37]. フォトメータ内部のダイオードからレーザーを粒子含有空気に照射し, その散乱光の強度はフォトディテクターで計測され, 上流側及び下流側の散乱光強度の比から捕集効率が算出される.

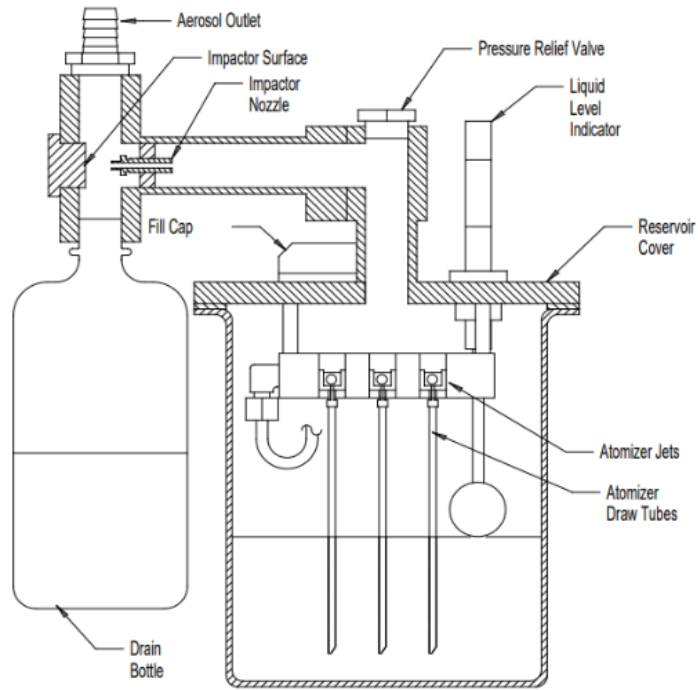


Fig.10 Aerosol generator for AFT8130A^[37]

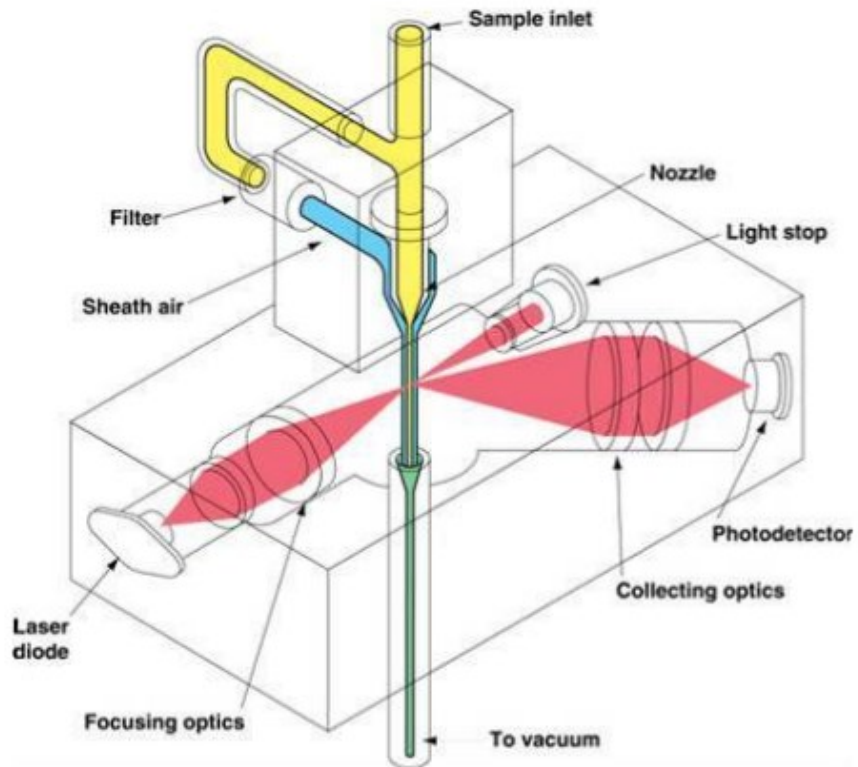


Fig.11 Photometer for AFT8130A^[37]

表3に示す粒子径分布の中央値及び標準偏差は、Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS3034, TSI)で計測することができる。SMPS3034の測定原理を図12に示す。粒子は電荷中和器を通り、フックの平衡帯電分布に基づいた一定の帯電状態に保たれる。帯電粒子は上から下へ流れるシースエアに乗る。プラスに帯電した粒子は装置内部の中央に備わる高電圧ロッドに引き寄せられる。それぞれの粒子は、電気移動度に従って中央に移動する。電気移動度は粒子径に反比例し、粒子径が小さい程電気移動度は大きく、粒径が大きい程電気移動度は小さくなる。電圧ロッドの電圧は連続的に上昇するため、ブタノールで充填されたプールには、単一の粒子径を持つ粒子が小さい順に送気される。径が小さい粒子は散乱光強度が弱くパーティクルカウンターで測定できない。そこで、散乱光を計測しやすいように、粒子を核としてブタノールが凝集し、意図的に粒子径を大きくさせている。

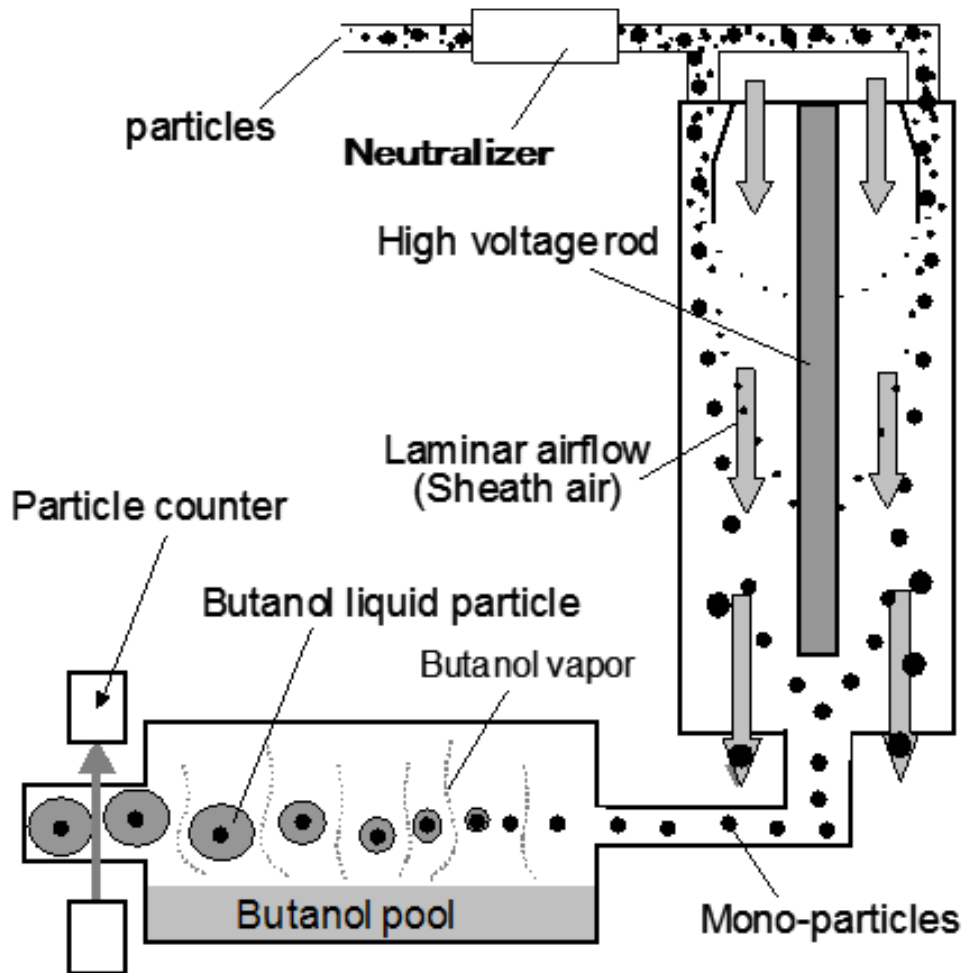


Fig.12 Internal structure of SMPS (Model 3034, TSI)

防塵マスクメーカー所有のAFT8130Aで発生させたNaClとDOPの粒径分布をSMPS3034で測定した例を図13に示す。粒径分布の中央値(NaCl:80.0 nm, DOP:181.1 nm)及び標準偏差(NaCl:1.55 nm, DOP:1.58 nm)のどちらも表3の基準を満足していることがわかる。

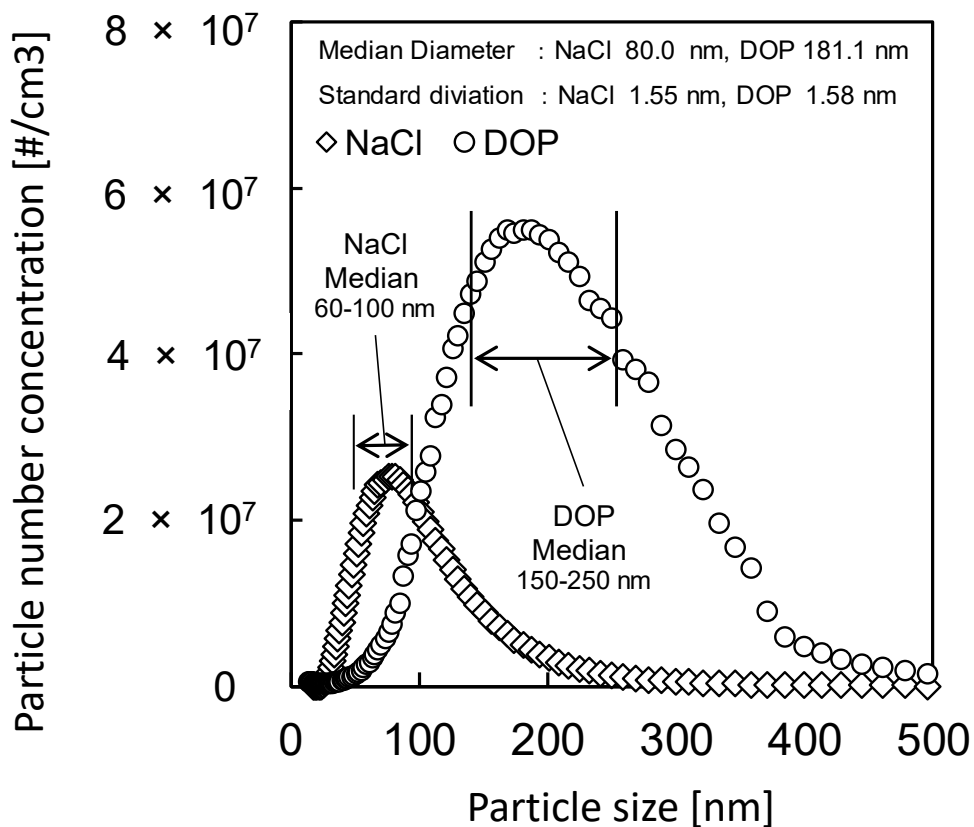


Fig.13 Particle concentration and particle size for NaCl and DOP

防塵マスク用フィルタにおいて、捕集効率の評価は極めて重要かつ避けられない評価である。この捕集効率を推測する上で、フィルタの繊維径等をパラメータとした理論式が提唱されているため、その詳細を2章で述べる。

第2章 エアフィルタの粒子捕集理論

2-1 単一繊維の粒子捕集メカニズム

繊維で構成されるフィルタの捕集効率のメカニズムは極めて複雑であり、最も基本的な次元として、単一繊維の捕集効率に着目し、様々なパラメータの効果の影響を調査することで明らかになる。气流に対して垂直に配置されている1本の繊維を例にすると、図14のとおり、拡散、遮り、慣性、重力の4種類の効果が粒子捕集に働くと考えられており、複数のモデル化した理論が提唱されている。粒子径ごとの捕集効率を示す図15において、拡散は粒子径が小さい程強く働き、それ以外の遮り、慣性及び重力は粒子径が大きい程強く働く。捕集効率はこれら各効果の合算になるため、およそ一定の粒子径(約200 nm)で捕集効率が最も低くなる。またこの粒子径は、最も粒子が透過する径であることから、一般的に最大透過粒子径(Most penetrating particle size, MPPS)と呼ばれている^[35-36]。

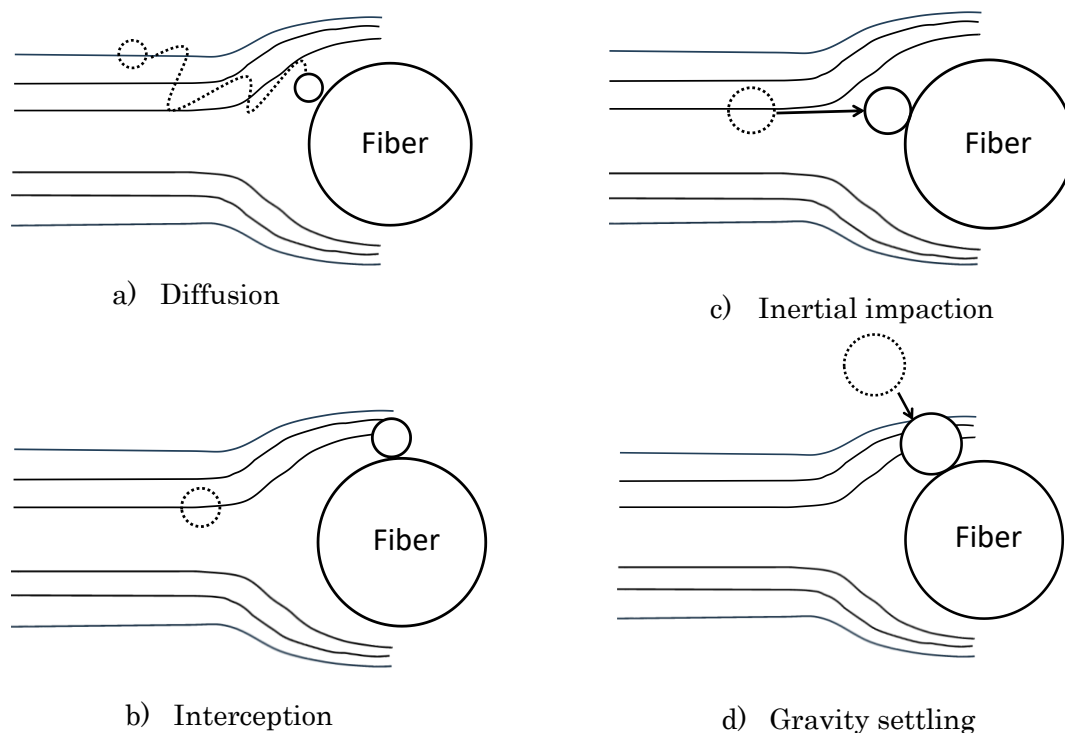


Fig.14 Filtration mechanisms for mechanical filter

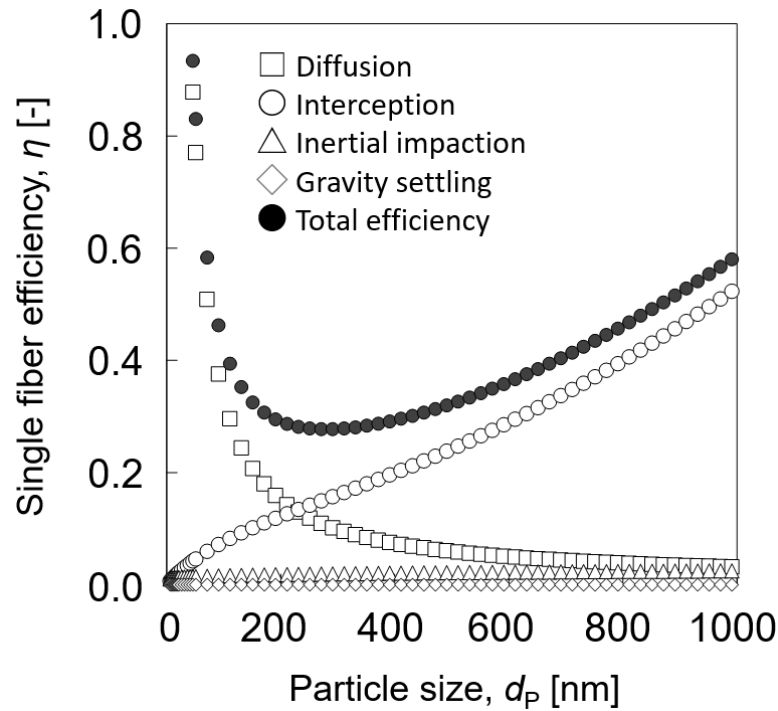


Fig.15 Theory model for filtering efficiency

続いて、拡散、遮り、慣性及び重力の個々の捕集メカニズムについて、拡散による捕集効率 η_D から述べる。大気中に漂う微粒子は、周囲に存在する媒質の熱運動に伴うランダムな力によって不規則に動き、ブラウン運動と呼ばれる。ブラウン運動が強いと、図 14a)のように、粒子が流線から外れて繊維に接触し捕集される。このブラウン運動を支配する無次元パラメータは、移流輸送速度と拡散輸送速度の比を示すペクレ数(Pe)であり、式(1)で求められる。 d_F は繊維径、 u はろ過速度(線速)、 D は式(2)で示される拡散係数である^[38-41]。

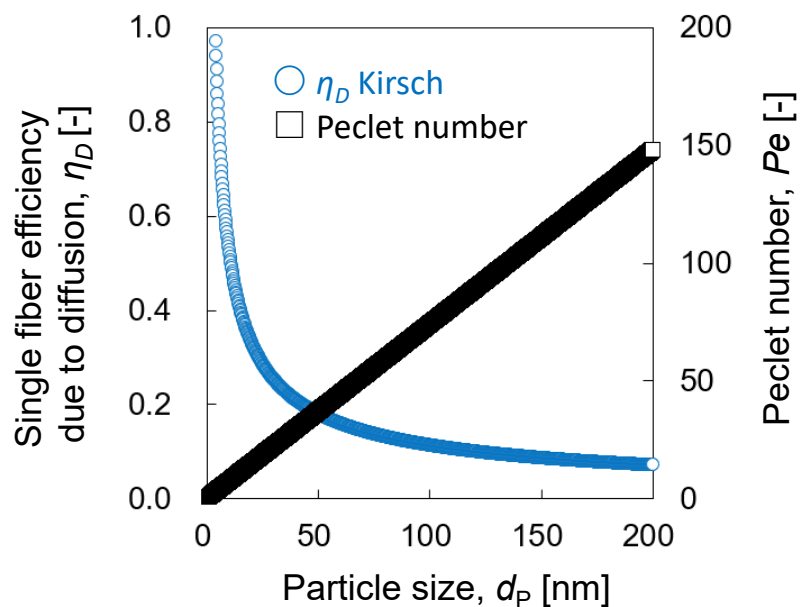
$$Pe = \frac{d_F u}{D} \quad (1)$$

$$D = C_c k_B t / 3\pi\mu d_p \quad (2)$$

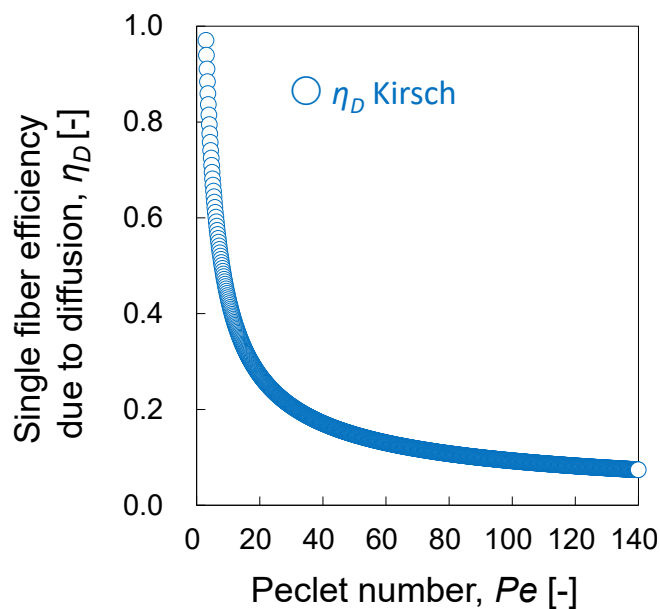
ここで、 C_c はカニンガムの補正係数、 k_B はボルツマン定数、 t は温度、 μ は粘性係数、 d_p は粒子の径を示す。粒子径が小さくなると、拡散係数 D は増加しペクレ数 Pe は小さくなる。ペクレ数 Pe が小さいことは、移流輸送速度より拡散輸送速度が支配的ということを示しており、拡散効果が強くなる。拡散効果による捕集効率の例として、Kirsch^[42]が提案した理論式を式(3)に示す。

$$\eta_D = 2.7 Pe^{-2/3} \quad (3)$$

粒子径 d_p に対する拡散効果による捕集効率 η_D 及びペクレ数 Pe の関係を図 16 に示す。粒子径 d_p が小さくなるとペクレ数が減少し、特に粒子径が 30 nm 以下 (Peclet 数 20 以下) の領域において、拡散効果による捕集効率 η_D が極端に上昇することがわかる。メカニカルフィルタに働く捕集機構において、拡散のみが粒子径が小さい程強くなる。



a) Particle size vs. filtering efficiency and Peclet number



b) Peclet number vs. filtering efficiency

Fig.16 Correlation between Peclet number and filtering efficiency due to diffusion with respect to particle size.

遮りは、図 14b)のように、繊維によって方向を変えた流線に乗った粒子が、繊維から粒子半径以内の距離を通過しようとする際に粒子が繊維に接触し、捕集されるメカニズムである。遮りによる捕集効率 η_R は粒子径が大きい程強く働き、粒子径 d_p と繊維径 d_f の比であり、式(4)で示される遮りパラメータ R により支配される^[43-45]。また、遮りによる捕集効率の例として、Friedlander^[38]が提案した理論式を式(5)に示す。

$$R = \frac{d_p}{d_f} \quad (4)$$

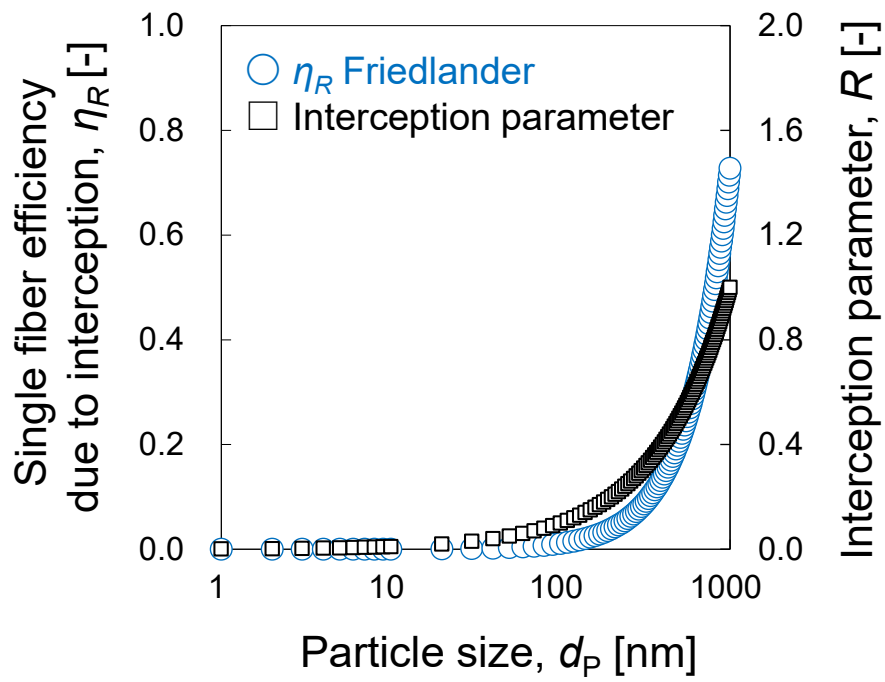
$$\eta_R = 1.25R^{1.82}/2k \quad (5)$$

k は式(6)で示される水力学的因子である^[46-47]。水力学的因子 k は粒子を含有する空気が繊維に近接した際、繊維により気流に歪みが生じる。この歪みにより発生する圧力損失を考慮するために、フィルタの繊維充填率 α を変数とする水力学的因子 k を導入することが提案された。

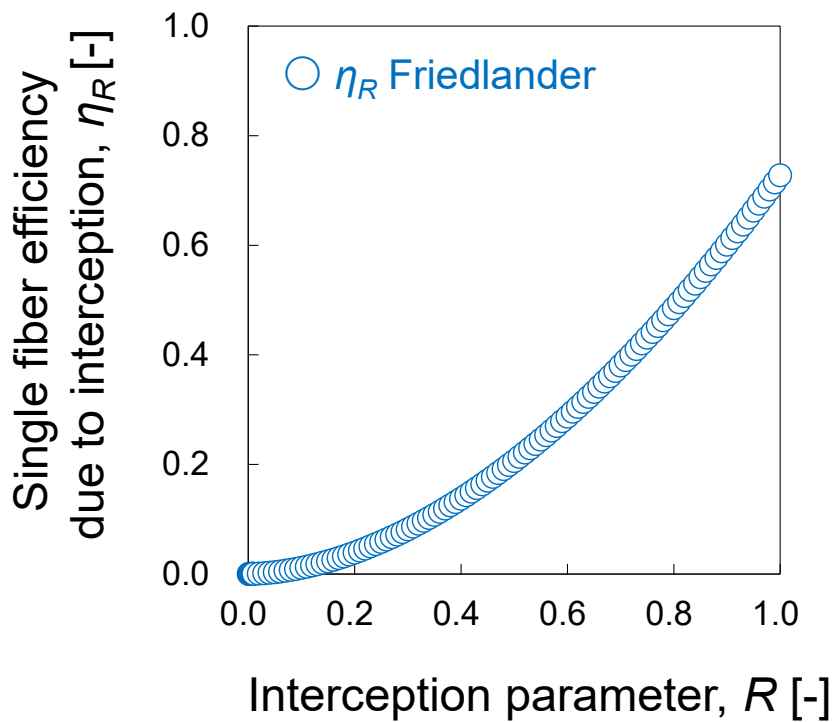
$$k = -0.5 \ln \alpha - 0.75 + \alpha - 0.25 \alpha^2 \quad (6)$$

フィルタに使用される一般的な繊維径 d_f (1000 nm) とろ過速度 u (0.2 cm/s) を用いて算出した粒子径 d_p に対する遮り効果による捕集効率 η_R と遮りパラメータ R の関係を図 17 に示す。粒子径 d_p が大きくなると、遮りパラメータ R 及び遮り効果による捕集効率 η_R は上昇する。

充填率 α に対する遮りによる捕集効率 η_R と水力学的因子の関係を図 18 に示す。充填率 α の上昇とともに水力学的因子 k は低下し、遮り効果による捕集効率 η_R が上昇する。

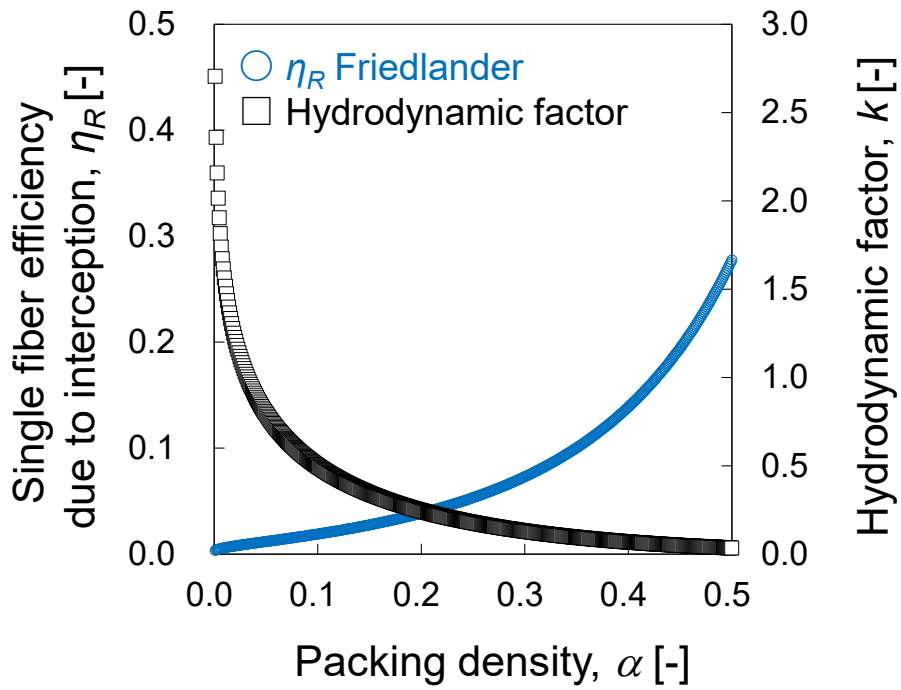


a) Particle size vs. filtering efficiency and interception parameter

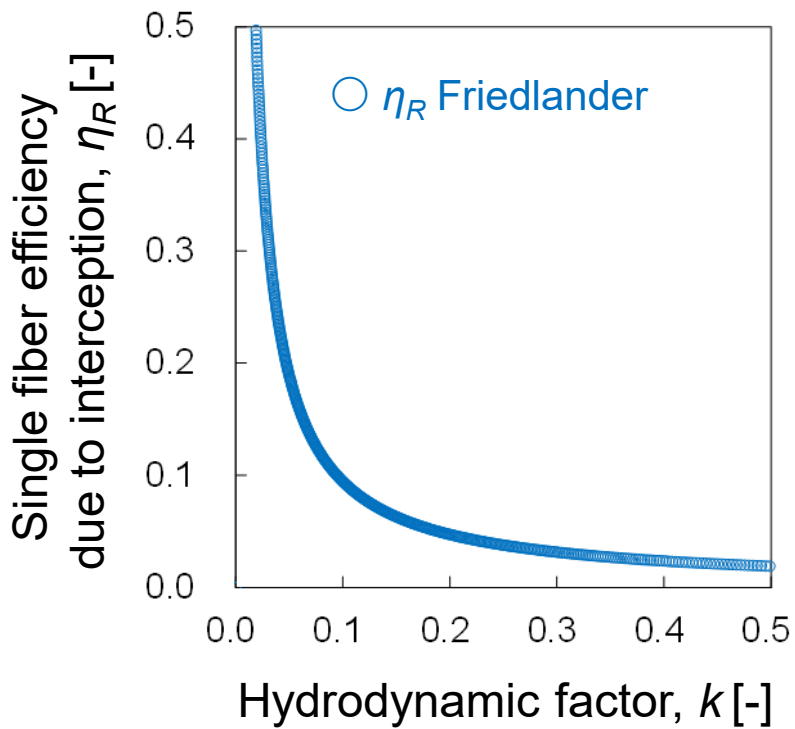


b) Interception vs. filtering efficiency

Fig.17 Correlation between interception parameter and filtering efficiency due to interception with respect to particle size.



a) Packing density vs. filtering efficiency and hydrodynamic factor



b) Hydrodynamic factor vs. filtering efficiency

Fig.18 Correlation between hydrodynamic factor and filtering efficiency due to interception with respect to packing density

慣性は、図 14c)のように、径の大きな粒子が、慣性力が強いために、繊維によって方向を変えた流線に乗ることができず、繊維に衝突することで捕集するメカニズムである。慣性力と粘性力の比を示す無次元数ストークス数(St)が支配的な因子となり、式(7)に示すように、分子が、微粒子密度 ρ_p 、繊維径 d_F の 2 乗、ろ過速度 u 及びカニングム係数 C_c の積であり、分母が流体の粘性係数 μ と繊維径の積で示される^[44, 48, 49]。

$$St = \frac{\rho_p d_p^2 u C_c}{18 \mu d_F} \quad (7)$$

慣性による捕集効率 η_I の例として、Stechkina の理論式を式(8)に示す^[50]。

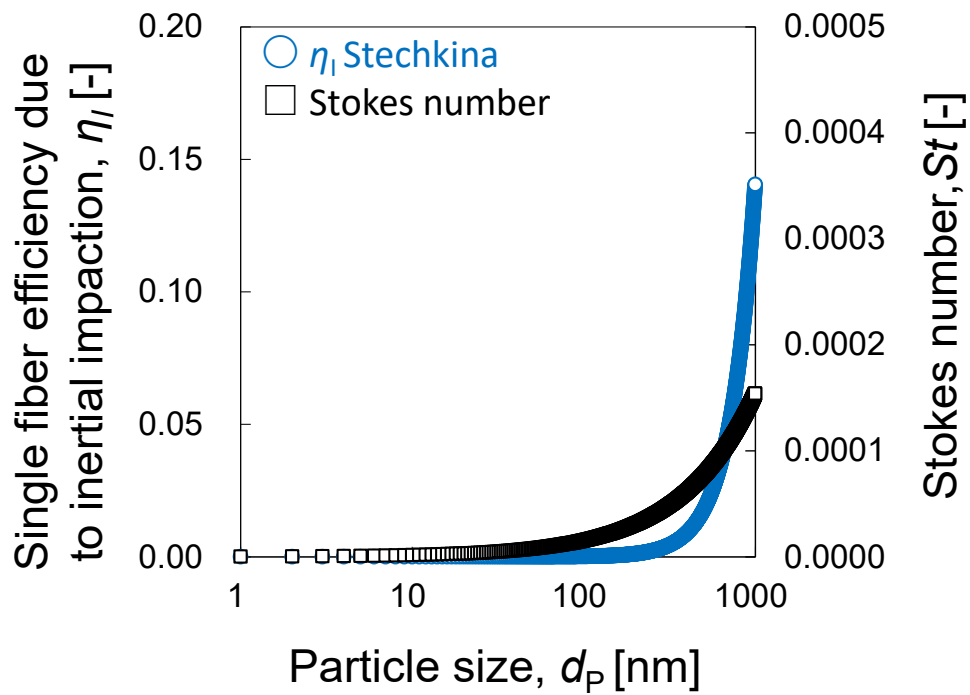
$$\eta_I = \frac{(St)J}{2Kn^2} \quad (8)$$

J は式(9)で示される充填率と遮りパラメータに依存する変数である。 Kn は式(10)で示されるクヌッセン数で、1 つの分子が他の分子と衝突せずに飛行できる距離である平均自由行程 λ に 2 を乗じ、繊維径 d_F で除したパラメータである^[48, 49, 51]。

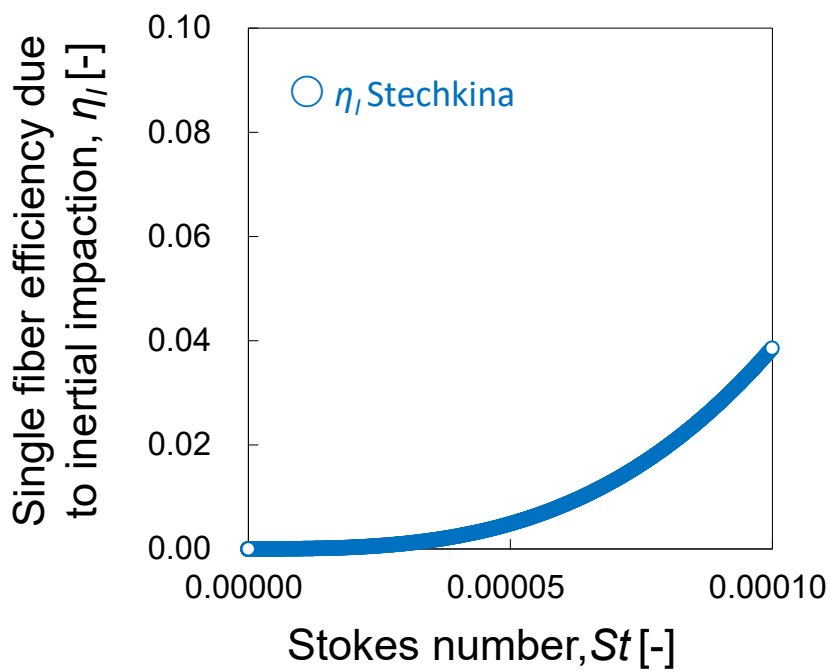
$$J = (29.6 - 28\alpha^{0.62}) R^2 - 27.5R^{2.8} \quad (9)$$

$$Kn = \frac{2\lambda}{d_F} \quad (10)$$

フィルタとして一般的な繊維径(1000 nm)を用いて算出した粒子径 d_p に対する遮り効果による捕集効率及び遮りパラメータの関係を図 19 に示す。粒子径 d_p と遮りパラメータ R に比例して増加する遮りによる単一繊維の捕集効率 η_R と同様に、慣性による捕集効率 η_I は粒子径 d_p とストークス数 St に比例して増加した。しかしながら、粒子径がナノメートルオーダーの領域において、慣性による捕集効率 η_I は遮りによる捕集効率 η_R と比べて低い。粒子径 d_p が 1000 nm における捕集効率で比較すると遮りによる捕集効率 η_R が約 0.8 であるのに対し、慣性 η_I は約 0.14 であった。これは、遮りパラメータ R が繊維径 d_p に比例して増加するのに対し、慣性パラメータ St が粒子径 d_p の 2 乗に比例するため、慣性による捕集が遮りより大きな粒子径領域で働くためと考えられる。



a) Particle size vs. filtering efficiency and Stokes number



b) Stokes number vs. filtering efficiency

Fig.19 Correlation between Stokes number and filtering efficiency due to inertial impact with respect to particle size

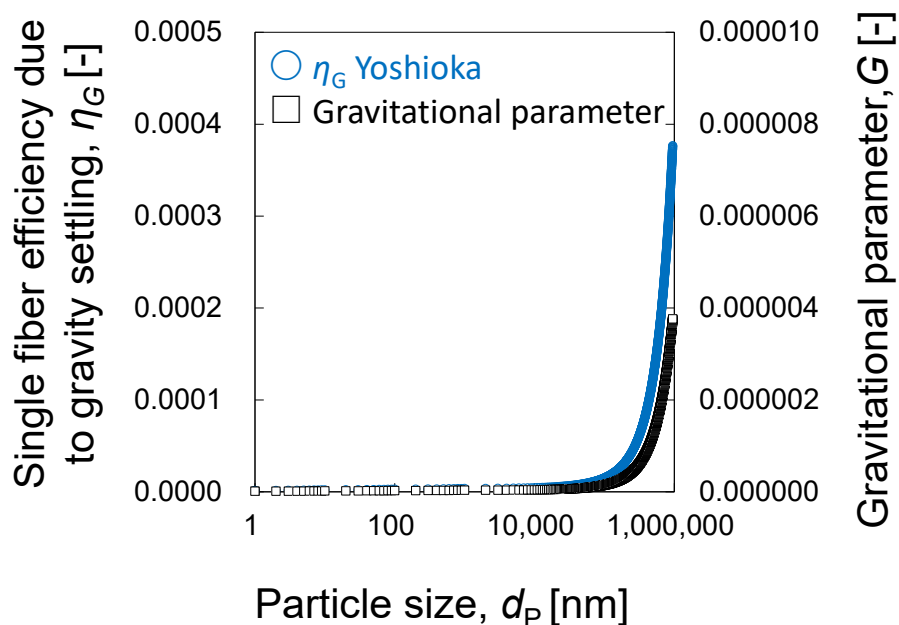
重力は、図 14d)のように、径が大きな粒子が粒子自体の重力によって繊維上に落下し、捕集されるメカニズムである。式(11)に示す重力パラメータ G が支配的な因子として働く^[17]。

$$G = \frac{C_c \rho_p d_p^2 g}{18 \mu u} \quad (11)$$

重力パラメータの構成は、ストークス数 St と類似しているが、ろ過速度 u に反比例するという点異なる。ろ過速度 u が増加すると、慣性により捕集される粒子が増加し、垂直方向に働く重力による捕集可能な粒子数が減少するためである。重力による捕集効率 η_G の理論式として、Yoshioka らが式(12)を提案した^[52]。

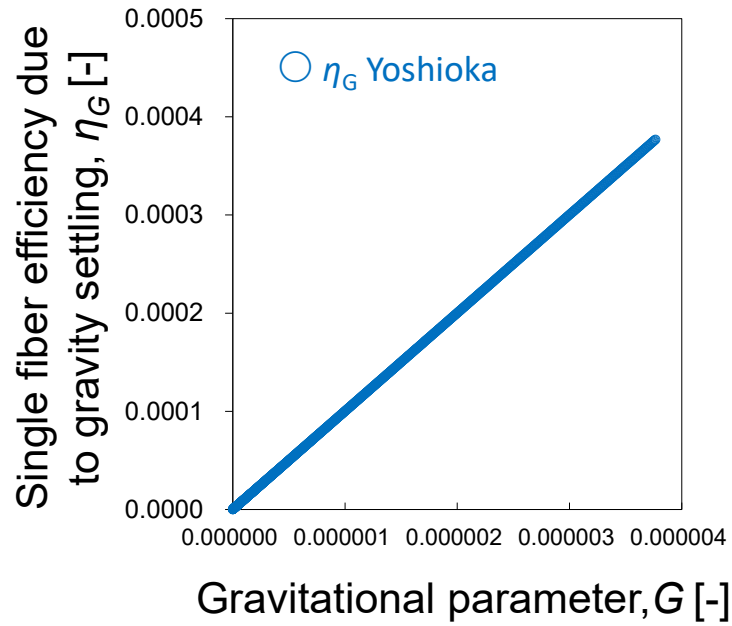
$$\eta_G = G / (1 + G) \quad (12)$$

粒子径 d_p に対する重力による捕集効率 η_G 及び重力パラメータ G の関係を図 20 に示す。粒子径が 100000 nm (100 μm)以上から、重力パラメータ G が急激に上昇し、比例する捕集効率 η_G も同様に上昇した。重力による捕集メカニズムは、100 μm 以上で有効となるため、ナノメートルの領域では重力による捕集機構はほとんど働かないと言える。



a) Particle size vs. filtering efficiency and gravitational parameter

Fig.20 Correlation between gravitational parameter and filtering efficiency due to gravity settling with respect to particle size



b) Gravitational parameter vs. filtering efficiency

Fig.20 Correlation between filtering efficiency and gravitational parameter due to gravity with respect to particle size

2-2 単一繊維の粒子捕集理論の変遷

最初に単一繊維の捕集理論を提唱した研究者は Langmuir (1942) である^[53]. 拡散による粒子捕集が移流輸送速度と拡散輸送速度の比を示すペクレ数 Pe に逆比例すると仮定し, 実験結果から, 半実験式的に式(13)のとおり提案した. 遮りによる捕集効率 η_R は, 粒子径 d_p と繊維径 d_f の比である遮りパラメータ R を変数としたが, 気流の速度にも依存すると考え, レイノルズ数(Re)をパラメータに加えた式(14)を提唱し, 単一繊維の全体の捕集効率として, 拡散と遮りによる捕集効率を加算した式(15)を提案した.

$$\eta_D = 2.7Pe^{-2/3} \quad (13)$$

$$\eta_R = \frac{1}{2(2 - \ln Re)} \left\{ 2(1 + R) \ln(1 + R) - (1 + R) + \frac{1}{1 + R} \right\} \quad (14)$$

$$\eta = \eta_D + \eta_R \quad (15)$$

Friedlander (1957)は, Langmuir(1942)の式(15)と同様に, 単一繊維の捕集効率が拡散と遮りの加算で示されると主張した上で, より正確な予測が可能となるように, 拡散, 遮りそれぞれについて, 新たな理論式を提案した^[38]. 自身の実験結果を用い半実験式的に, 式(16)による拡散と既出の式(5)に示す遮りのとおりに提案した. k は同じく 2-1 項で既出の式(6)で示される水力学的因子である.

$$\eta_D = \frac{2.9}{k^{1/3}} Pe^{-2/3} \quad (16)$$

Stechkina (1966) は, Langmuir(1942)の拡散と遮りの捕集効率を自身の実験結果から, 式(17)と式(18) に示すとおりに修正した^[54]. さらに, 拡散と遮りそれぞれの交互作用によって発生する捕集機構 η_{DR} を式(19)のとおり提案した. δ は不均一性因子と呼ばれ, 式(20)に示すように, 実際のフィルタの通気抵抗実測値(Δp^f)に対する式(21)から計算した通気抵抗計算値(Δp^c)の比である. 単一繊維の捕集効率は, 式(17), 式(18), 式(19)の合算である式(22)で示されると提案した.

$$\eta_D = 2.9 k^{-1/3} Pe^{-2/3} + 0.624 Pe^{-1} \quad (17)$$

$$\eta_R = \frac{1}{2k} \left\{ 2(1+R)\ln(1+R) + \frac{1}{1+R} - (1+R) \right\} \quad (18)$$

$$\eta_{DR} = 0.624 \delta^{3/2} k^{1/3} \quad (19)$$

$$\delta = \frac{\Delta p^f}{\Delta p^c} \quad (20)$$

$$\Delta p^c = F\mu ul \quad (21)$$

$$\eta = \eta_R + \eta_D + \eta_{DR} \quad (22)$$

さらに, Kirsch と Stechkina(1978)は, 計算値と実測値とのフィッティングを考慮し, 全体の捕集効率としては式(22)をそのまま用い, 各種効果を式(23), 式(24), 式(25)のとおり, Stechkina (1966)の式を修正した^[55].

$$\eta_D = 2.7Pe^{-2/3} \left\{ 1 + 0.39(k)^{-\frac{1}{3}}Pe^{\frac{1}{3}}Kn \right\} + 0.624Pe^{-1} \quad (23)$$

$$\eta_R = \frac{1}{2k} \left\{ 2(1+R) \ln(1+R) - (1+R) + \frac{1}{1+R} + 2.86kn \frac{(2+R)R}{1+R} \right\} \quad (24)$$

$$\eta_{DR} = 1.24k^{-1/2}Pe^{-1/2}R^{2/3} \quad (25)$$

Lee と Liu (1982)は, Stechkina (1966)や Kirsch (1978)とは逆で, η_D は η_R によって捕集した粒子を, η_R もまた η_D によって捕集した粒子をそれぞれ二重計測しており, その分を減算する必要があると考えた. なお, 理論式の適用範囲(繊維径範囲)を拡大するために, 繊維径 d_F が小さい領域($< 2 \mu\text{m}$)ではすべり効果が発生すると考え, 空隙率をクヌッセン数 Kn で除した理論式である式(26)を提唱した^[56].

$$\eta = \eta_D + \eta_R - f(Pe, R) = 1.6 \left(\frac{1-\alpha}{kn} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} + 0.6 \frac{1-\alpha}{kn} \frac{R^2}{(1+R)} \quad (26)$$

Liu と Rubow(1990)は, Lee と Liu(1982)と同様に理論式の適用範囲(繊維径範囲)を拡大するため, すべり効果を考慮できるクヌッセン数 Kn をパラメータとして加え, 新たな式(27)と式(28)を提唱した^[57].

$$\eta_D = 1.6 \left(\frac{1-\alpha}{ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} \left((1 + 0.388kn)^{1/3} \left(\frac{(1-\alpha)Pe}{Kn} \right) \right) \quad (27)$$

$$\eta_R = 0.6 \frac{1-\alpha}{Kn} \frac{R^2}{(1+R)} \left(1 + \frac{1.996Kn}{R} \right) \quad (28)$$

Liu と Rubow(1990)が提唱した式(28)による拡散効果による捕集効率を $\eta_{D,Liu}$ と定義すると, Payet(1991)は, 拡散効果が強く働くペクレ数 Pe が低い領域においては, $\eta_{D,Liu}$ が過大評価されることを指摘した. そこで, $\eta_{D,Liu}$ をクヌッセン数 Kn で修正した式(29)を提唱した^[58].

$$\eta_D = 1.6 \left(\frac{1-\alpha}{Kn} \right) Pe^{-2/3} \left((1 + 0.388Kn) \frac{\left(\frac{(1-\alpha)Pe}{Kn} \right)^{1/3}}{1 + \eta_{D,Liu}} \right) \quad (29)$$

2-3 Fan Model Filter (FMF)

2-1 項及び 2-2 項で、単一繊維の捕集効率について述べたが、単一繊維ではフィルタ全体の捕集効率を知ることができない。Kirsch(1978)は、単一繊維の捕集効率 η に、繊維径 d_F 、充填率 α 、厚み T をパラメータとして、Fan Model Filter (FMF) の原理をベースとしたフィルタ全体の捕集効率の理論式を提案した^[55]。FMF の理論とは、フィルタを構成する繊維の繊維径が均一であり、全ての繊維が流線に対し垂直で、均一に充填されていると仮定した状態での捕集効率である。

γ を微小厚さ dT の単位厚さあたりの捕集効率とすると、単位体積あたりのエアロゾルが厚さ dT を通過する間に捕集される粒子数 n_c は式(30)で示される。

$$n_c = N\gamma dT \quad (30)$$

ここで、 N は微小部分に侵入する粒子個数濃度である。微小部分を通過するエアロゾルの濃度減少分は、微小部分を通過する単位体積のエアロゾル中の捕集される粒子数 n_c に等しいため、式(31)が成り立つ。

$$dN = -n_c = -N\gamma dT \quad (31)$$

式(31)を厚さ全体で積分し、式(32)、式(33)のとおり、式変形すると、透過率 P を求められる式(34)が得られる。

$$\int_{N_{in}}^{N_{out}} \frac{dN}{N} = \int_0^t -\gamma dT \quad (32)$$

$$\ln(N_{out}/N_{in}) = -\gamma T \quad (33)$$

$$P = e^{-\gamma T} \quad (34)$$

ここで、 n_c は、単一繊維あたりの捕集効率 η (繊維の単位長さあたりの無次元効率)を用いると式(35)で示される。

$$n_c = N\eta d_F L dT \quad (35)$$

式(30)は式(35)と等しいため、微小厚さ dT の単位厚さあたりの捕集効率 γ は式(36)で示される。

$$\gamma = \eta d_F L \quad (36)$$

ここで、充填率 α はフィルタ体積に対する繊維体積の比を示すため、繊維長 L は式(37)で示される。

$$L = 4\alpha/\pi d_f^2 \quad (37)$$

式(36)と式(37)から式(38)が求められる。

$$\gamma = 4\alpha\eta/\pi d_f \quad (38)$$

式(34)と式(38)から、粒子透過率を示す P が式(39)のとおりに求められ、捕集効率 E としては式(40)で示される。

$$P = 1 - E = -e^{\gamma T} = \exp(-4\alpha\eta T/\pi d_f) \quad (39)$$

$$E = 1 - \exp\left\{\frac{-4\alpha\eta T}{\pi d_f}\right\} \quad (40)$$

Kirsch (1978)は式(40)を提案したが、実際のフィルタサンプルを使用した捕集効率の実測値と計算値を比較したところ、乖離が大きいことに気づいた。FMF の理論では、全ての繊維が流線に対し垂直で均一に充填されていると仮定しているが、実際のフィルタでは、全ての繊維が仮定のとおり充填されないため、その乖離を補正するために、既出の式(20)に示す不均一性因子 δ を式(40)に加えることを考えた。さらに、実測値とのフィッティングを考慮し、 α を $\alpha(1 - \alpha)(1 + \sigma)$ で、 η を η/δ で置き換えた式(41)を提案した^[55]。

$$E = 1 - \exp\left\{\frac{-4\alpha\eta T}{\pi(1 - \alpha)(1 + \sigma)\delta d_f}\right\} \quad (41)$$

FMF 理論に基づくフィルタの捕集効率は式(41)で算出できることが明らかにされているが、単一繊維の捕集効率 η については、2-2 項に示すように、複数の研究者が理論式を提唱しているため、その精度を比較した。なお、捕集効率 E は環境中の粒子をどの程度除去できるかを百分率で示した指標であり、100%に近づくにつれ収束する。一方で、捕集効率 E と関連する指標として式(42)に示すとおり自然対数を用いた対数透過率($-\ln P$)がある^[59-60]。図 21 のように、繊維配合量に対し直線的に増加するため、評価や数式化が簡便である。そのため、フィルタ研究において、一般的に評価に使用されるパラメータである。本研究においても、捕集性能指標として、対数透過率 $-\ln P$ で評価する。

$$-\ln P = -\ln(1 - E) \quad (42)$$

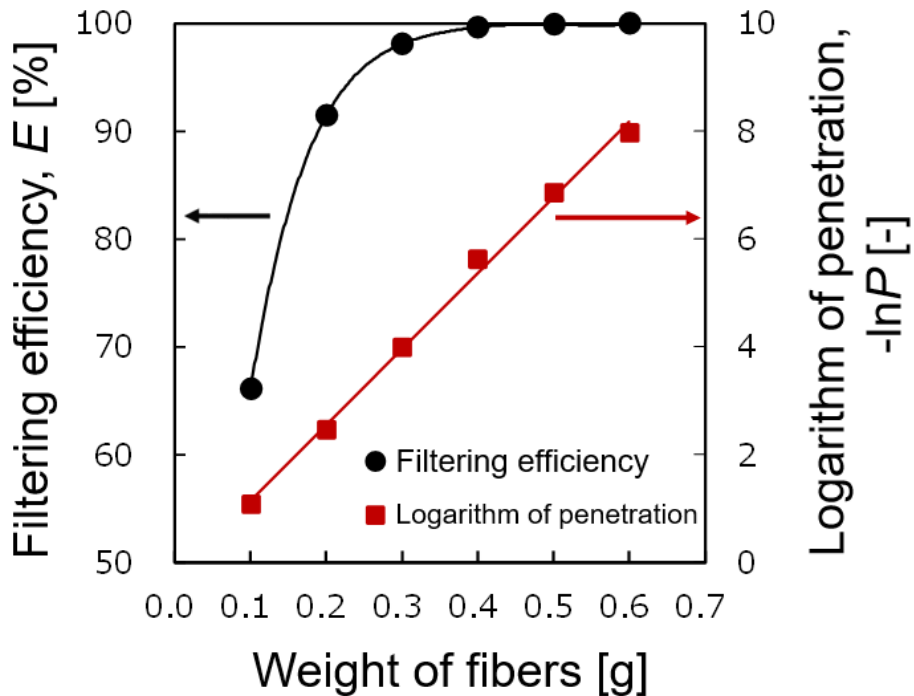


Fig.21 filtering efficiency and logarithm of penetration

捕集効率の理論式の予測精度は、実際のフィルタの捕集効率予測に応用する際に重要な指標である。2-2章で述べたとおり、複数の研究者が、より精度の高い捕集効率予測式を構築するための研究を実施しており、計7種の理論式を述べた。それぞれが提案した単一繊維の捕集効率 η を式(41)に代入し、実際のフィルタの対数透過率実測値($-\ln P_{\text{Meas.}}$)と計算値($-\ln P_{\text{Calc.}}$)の比較結果を図 22 に示す。また、実測値($-\ln P_{\text{Meas.}}$)と計算値($-\ln P_{\text{Calc.}}$)を用い、式 (43) から算出した相対誤差 (Relative error, RE)の平均値を表 4 に示す。

$$RE = \frac{(-\ln P_{\text{Meas.}} - -\ln P_{\text{Calc.}})}{-\ln P_{\text{Meas.}}} \cdot 100 \quad (43)$$

7種の理論式全てにおいて、計算値は実測値を下回っていた。つまり、全ての理論式は計算値を過小評価していることになる。7種の理論式の中で、対数透過率実験値と計算値の相対誤差が最も小さいのは Kirsch (1978)による理論式であった。Bulejuko (2018)が述べているとおり、Kirsch(1978)の理論式は、拡散による捕集効率 η_D と遮りによる捕集効率 η_R だけでなく、 η_D と η_R の相乗効果による捕集効率 η_{DR} を提案し加算したためと考えられる^[6]。ただし、Kirsch の理論式でも相対誤差は 52.4 %と高いため、実際のフィルタの性能予測に適用可能とは言えない。

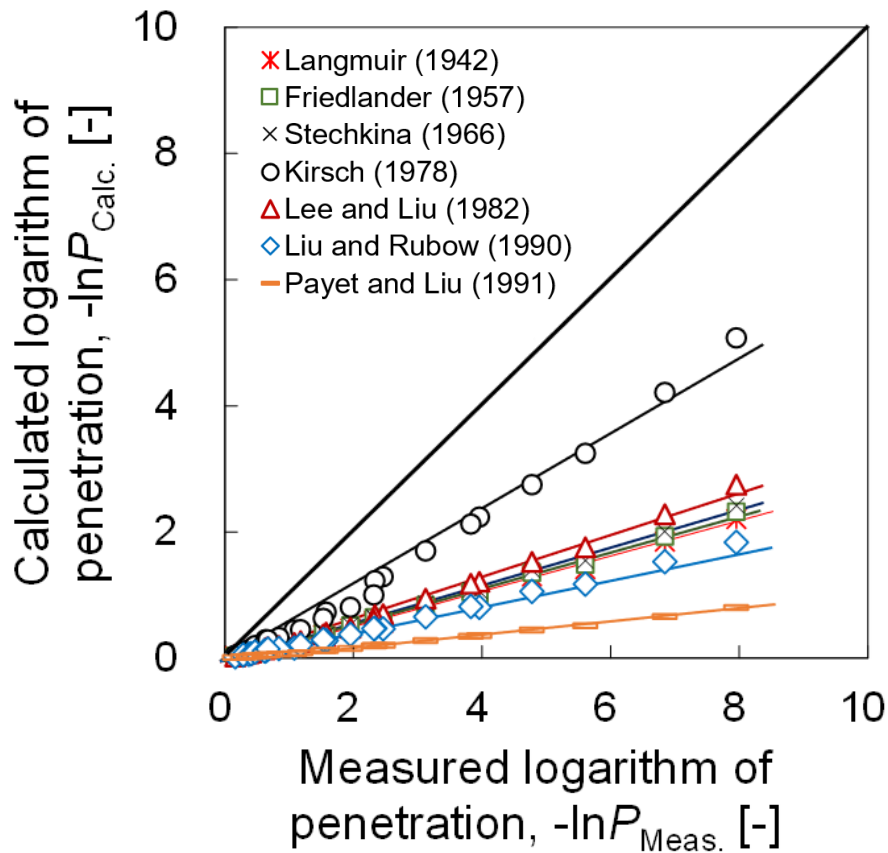


Fig.22 Correlation between Measured logarithm of penetration and calculated value

Table 4 Mean relative error between measured $-\ln P$ and calculated one.

Theory		Mean relative error [%]
Langmuir	(1942)	76.1
Friedlander	(1957)	74.4
Stechkina	(1966)	73.7
Kirsch	(1978)	52.4
Lee and Liu	(1982)	73.8
Liu and Rubow	(1990)	80.8
Payet and Liu	(1991)	92.0

2-4 研究目的

防塵マスクメーカーが、メカニカルフィルタを使用する新製品を開発する際には多大な試行錯誤(複数の試作と対数透過率測定)を要し、多くのコスト(装置)と工数(作業時間)がかかるため、メーカーにとって大きな負担となっている。2-3 項で述べたフィルタの理論式で最も精度の良い Kirsch (1978)の理論式を用いて対数透過率を計算しても、実測値との相対誤差は 52.4%と大きい。従って、現在までに報告されている理論式を用いて実用フィルタの対数透過率を正確に予測することは困難であるといえる。新製品の開発時は、測定装置や測定作業等、多大な金銭的及び人的コストをかけて対数透過率を実測せざるを得ない。そこで、本研究は、繊維製エアフィルタの捕集効率を正確に予測する方法の確立を目的とし、対数透過率と相関の有るパラメータを検討した。

第3章 遮光率による対数透過率予測

3-1 対数透過率の代替パラメータ

防塵マスクの対数透過率を求める実用的な予測式を構築するためには、対数透過率と相関関係を持つと予測されるパラメータを見出す必要がある。そこで、対数透過率の概念を図 23 に示す。粒子捕集は粒子と繊維の接触によって生じるため、フィルタの繊維充填率が高い程、接触確率が上昇し、対数透過率が高くなると考えられる。低コストで測定可能という点で、LED ライトと SLR (Single lens reflex) カメラで測定できる遮光率(Light shading rate, LSR)に着目した。遮光率の概念を図 24 に示す。遮光率 LSR は対数透過率と同様に、フィルタ中に含まれる繊維量に比例して増加する。すなわち、対数透過率 $-\ln P$ と相関関係を有するものと予想される。そこで、性能レベルを意図的に変えたテストフィルタを作製し、対数透過率 $-\ln P$ と遮光率 LSR の相関関係を調査し、実測した遮光率から対数透過率の予測が可能かどうか調査した。

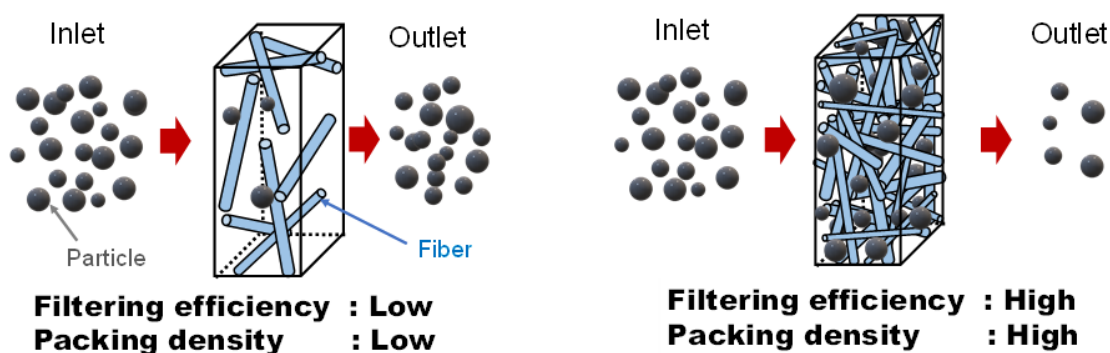


Fig.23 Concept of filtering efficiency for air filter

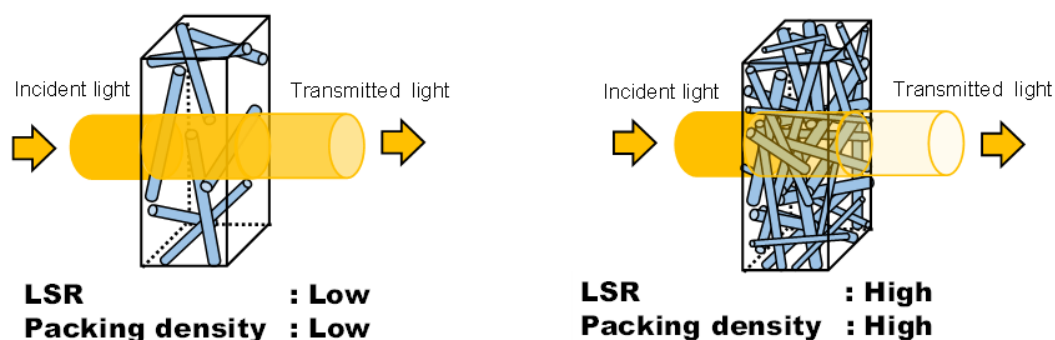




Fig.24 Concept of light shading rate for air filter

3-2 テストフィルタ作製

本研究では、対数透過率を正確に測定することに重点をおいた。発生させる試験粒子個数濃度が高ければ、フィルタを透過する粒子個数濃度に対する比が大きくなるため、測定精度は高くなる。よって、試験粒子濃度を高くする必要がある。防塵マスクは 85 L/min の流量で捕集効率を評価する必要があるが、一般的なエアフィルタの研究における流量(約 10 L/min)と比べて大きく、試験の環境粒子濃度が低下する。そこで、本研究では高い粒子濃度を保持するために、試験流量を 5.5 L/min で実施することとした。本研究では、重松製作所製のろ過面積が 310 cm²であるフィルタをターゲットにしたが、5.5 L/min では条件が異なってしまう。そこで、表 5 に示すように、試料の形状を円形単板とし、ろ過面積を 19.6 cm²に制限することで、実際の防塵マスク用フィルタのろ過速度 (4.6 cm/s)と一致させた。

Table 5 The shape of test filter and test condition

Item		Commercial filter	Test filter
			
Air flow rate	Q [L/min]	85.0	5.5
Filtration area	A [cm ²]	310.0	19.6
Linear velocity	U [cm/s]	4.6	4.7
$U = Q \cdot 1000 / (A \cdot 60)$			

使用する繊維は、強度の高さ、安価なコスト、繊維径の幅広さ等の理由で、実際にフィルタメーカーによく使用されるガラス繊維とした。表 6 に示すように繊維径が 0.8-2.7 μm の 4 種を選択した。これらはフィルタ材料として普遍的な繊維径である。ただし、上記の繊維径はフィルタメーカーが Brunauer Emmett Teller (BET) 法によって求めた比表面積からの公称値でしかない。そこで、実際に試験に使用する繊維は走査型電子顕微鏡 SEM (Model Phenom ProX, Thermo Fisher SCIENTIFIC)を使用し、図 25 のとおり繊維径を実測し、各種 1000 値の平均値を代表繊維径として扱った。

Table 6 Fiber diameter of glass wools for test filter

Glass fiber		1	2	3	4
BET (Manufacturer data)	Mean diameter	0.80	1.00	1.80	2.70
SEM	Mean diameter	0.78	0.95	2.01	2.99

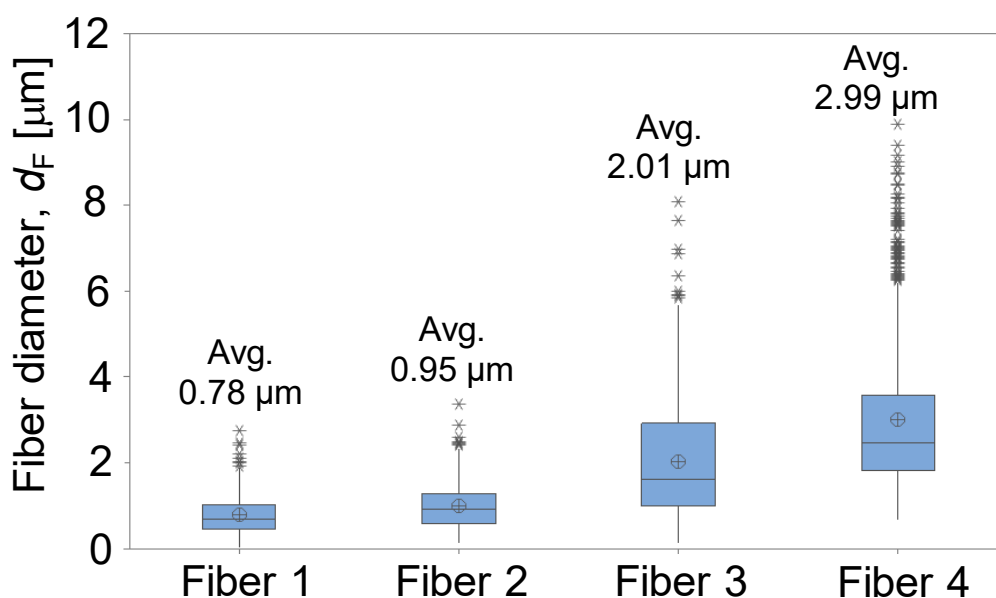


Fig.25 Fiber diameter measured with SEM

図 26 にテストフィルタ作製の概略を示す。ガラス繊維を水中に分散させ、抄紙器に流し込む。抄紙器の中央には図 27 に示す直径 105 mm のワイヤーメッシュが張られた抄紙網があり、抄紙器の上部から圧縮空気を押し込むことで水だけが排出され、メッシュ上に繊維堆積物が形成される。ワイヤーゲージ上の繊維堆積物に含まれる水分を吹き飛ばすために約 40 秒間圧縮空気が継続的に通気させる。抄紙器から取り出した繊維堆積物を加熱式乾燥機(VTR-115,ISUZU)で、加熱乾燥 (温度 140°C, 時間 30 分)することでテストフィルタを完成させた。

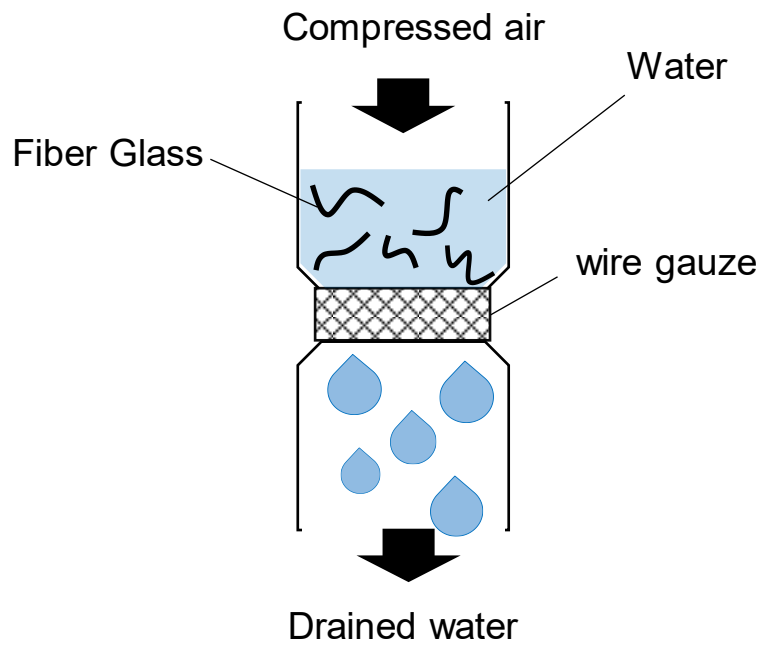


Fig.26 Paper machine for fabrication of test filter

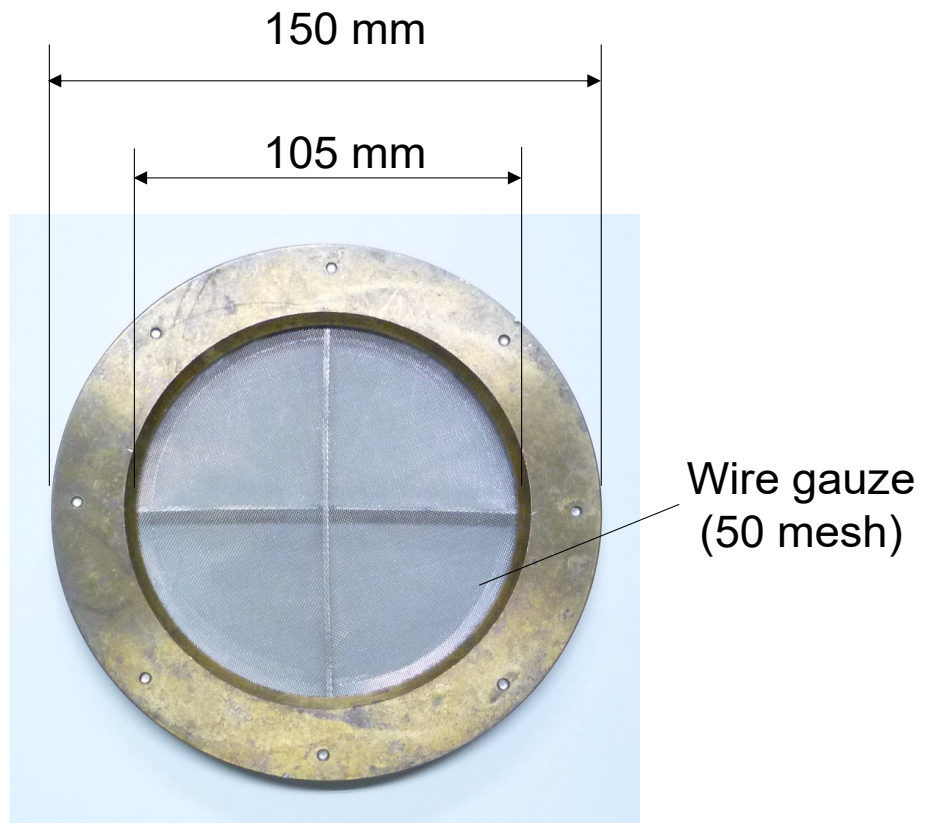


Fig.27 Paper mold with wire mesh

テストフィルタを作製する際は、図 27 のとおり、抄紙器の上部から圧縮空気を通気する。圧縮空気を送り込む際の抄紙圧力は 0.0-0.3 MPa の範囲で調整可能であり、高圧であれば短時間で排水できるため、作製効率が向上するメリットがある。しかしながら、抄紙圧力は繊維の堆積速度に影響するため、エアフィルタの対数透過率に影響を与える可能性がある。そこで、抄紙圧力の影響を調査するために、今回検討した配合の中で、平均的な性能となる Fiber 1 の配合(繊維径 0.78 μm , 0.3 g)を使用し、表 7 に示す 5 条件の抄紙圧力で 1 条件につき 25 個ずつフィルタを作製した。抄紙圧力と対数透過率と標準偏差(Standard deviation, SD)の関係を図 29 に示す。0.20 MPa を超えると対数透過率が低下する上に、標準偏差も上昇し、0.3 を超えた。一方、0.10 MPa 以下の条件では、その標準偏差は 0.2 以下で安定していた。抄紙圧が高いとワイヤーメッシュ上への繊維堆積が短時間で形成されるため、個体間での対数透過率のばらつきが大きくなり、対数透過率が低下したものと考えられる。対数透過率の標準偏差 SD が小さい良好な作製条件 (0.01, 0.05, 0.10 MPa)の中で最も短時間で成形できる 0.10 MPa を最適条件とした。

Table 7 Test condition for fabrication of test filter

No.	Pressure during the papering process [MPa]
1	0.01
2	0.05
3	0.10
4	0.20
5	0.30

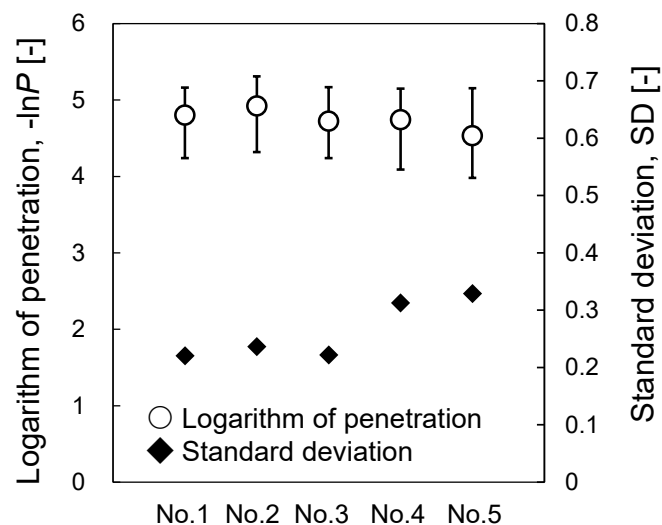


Fig.28 Logarithm of penetration and standard deviation for test filter

テストフィルタは、表 8 に示す 4 種類を作製した。全てのテストフィルタには、ガラス繊維を接着するためのバインダーが配合されている。配合量は 0.1 g から 0.6 g まで 0.1 g ずつ増加させた。

Table 8 Fiber diameter and weight of fibers for test filters A-D

Test filter	Weight of fibers [g]				
	Fiber 1 (0.78 μm)	Fiber 2 (0.95 μm)	Fiber 3 (2.01 μm)	Fiber 4 (2.99 μm)	Binder (13.0 μm)
A	0.1 - 0.6	-	-	-	
B	-	0.1 - 0.6	-	-	0.25
C	-	-	0.1 - 0.6	-	
D	-	-	-	0.1 - 0.6	

図 29 は、SEM によって得られたテストフィルタ A-D の外観を示している。すべての画像に見られる直径が 10 μm を超える繊維はバインダーである。また、バインダーが直径数マイクロメートル程のガラス繊維を巻き込んで接着させている様子がみられる。ほとんどの繊維が流線に垂直な方向に配置されており、一部の繊維は重なっているものの、ほとんどの繊維はフィルタメディア内に分散していることがわかる。よって、これらのテストフィルタは、繊維の配置に関する FMF 理論に適用可能な仕様であると考えられる。

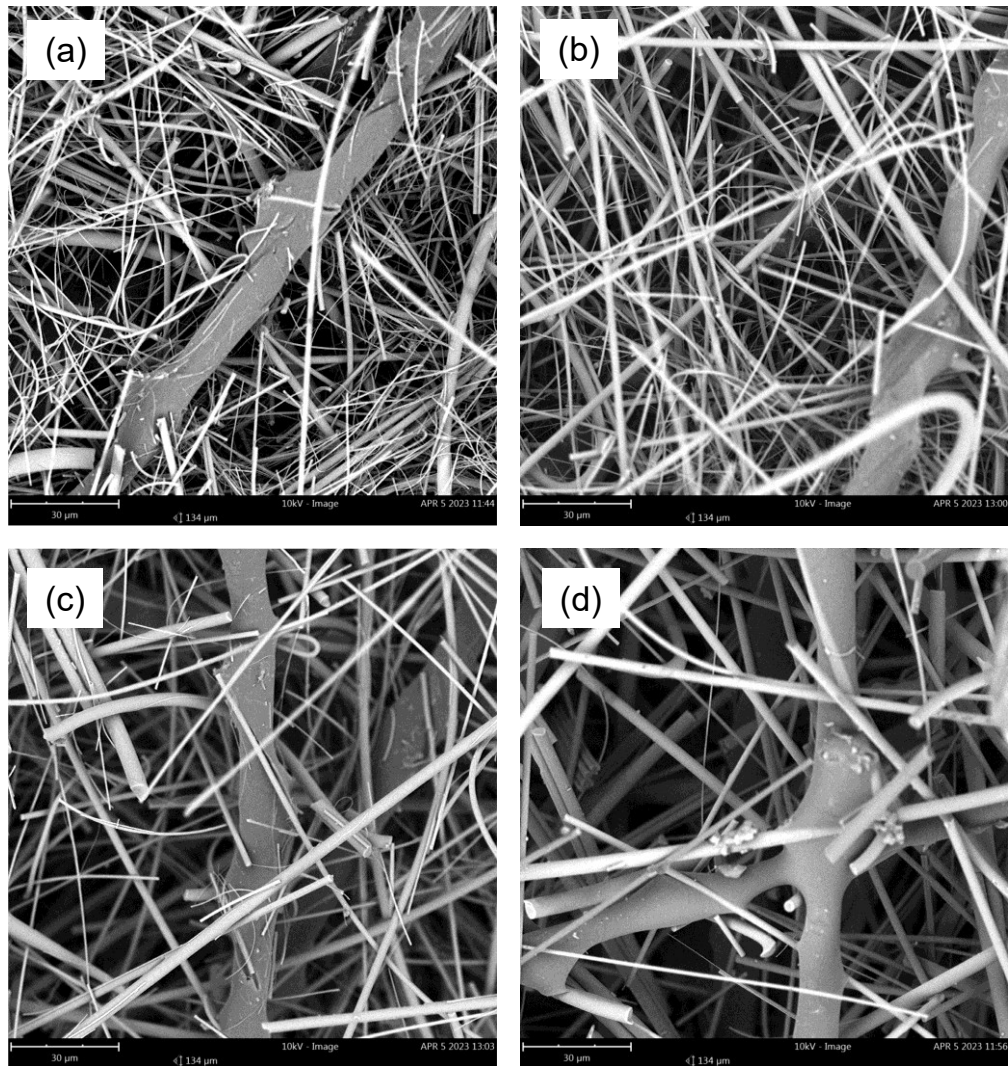


Fig.29 Scanning electron microscope (SEM) image of (a)-(d) the test filters A-D,
(Weight of fibers : 0.6 g)

3-3 繊維充填率と厚み測定

テストフィルタの遮光率と対数透過率を測定する前に、基本性能としてテストフィルタ A-D の繊維の充填率 α と厚み T を実測することとした。フィルタの厚み T は図 30 に示すシックネスゲージ(Model H, PEACOCK)を用い、1 サンプルにつき、円形のテストフィルタの中心を通る垂直並びに水平方向の軸上において等間隔となる 20 点を測定した。フィルタの面積は 62.2 cm^2 と既知であるため、フィルタ面積と厚み平均値の乗算により、空隙を含むフィルタの体積は算出できる。続いて、充填率 α を計算するために、純粋な繊維のみの体積を図 31 に示すピクノメータ(AccuPyc1345, SHIMADZU)で測定した。ピクノメータの測定原理を図 32 に示す。サンプルチャンバに一定質量のサンプルを入れて封じ、窒素ガスを一定圧力 P_1 となるまで充填する。その後、バルブを開き拡張チャンバにつなげ、平行圧力 P_2 を求め、 P_1 と P_2 の比から、サンプルの体積が測定される。純粋な繊維のみの体積を V_{Fiber} 、空隙を含むフィルタの体積を V_{Filter} とすると、フィルタの充填率 α は $V_{\text{Fiber}} / V_{\text{Filter}}$ で示される。



Fig.30 Thickness gauge, (Model H, SHIMADZU)



Fig.31 Pycnometer (AccuPyc 1345, SHIMADZU)

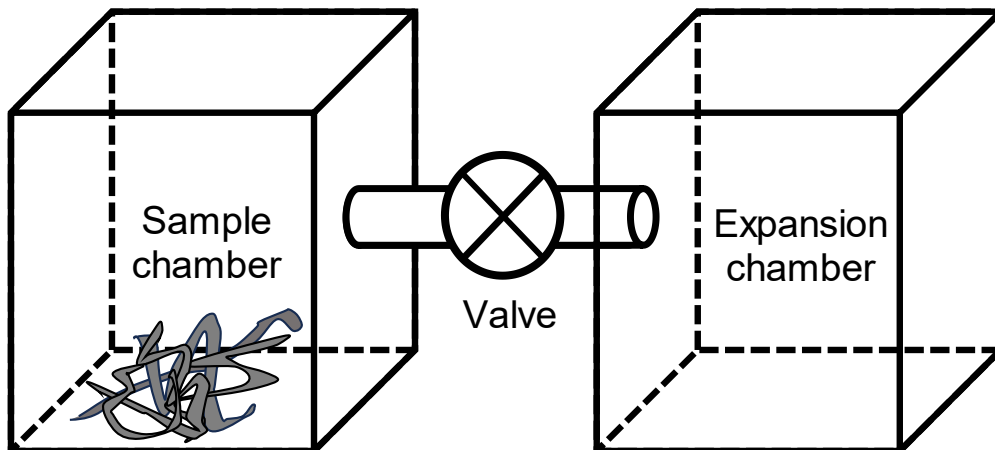
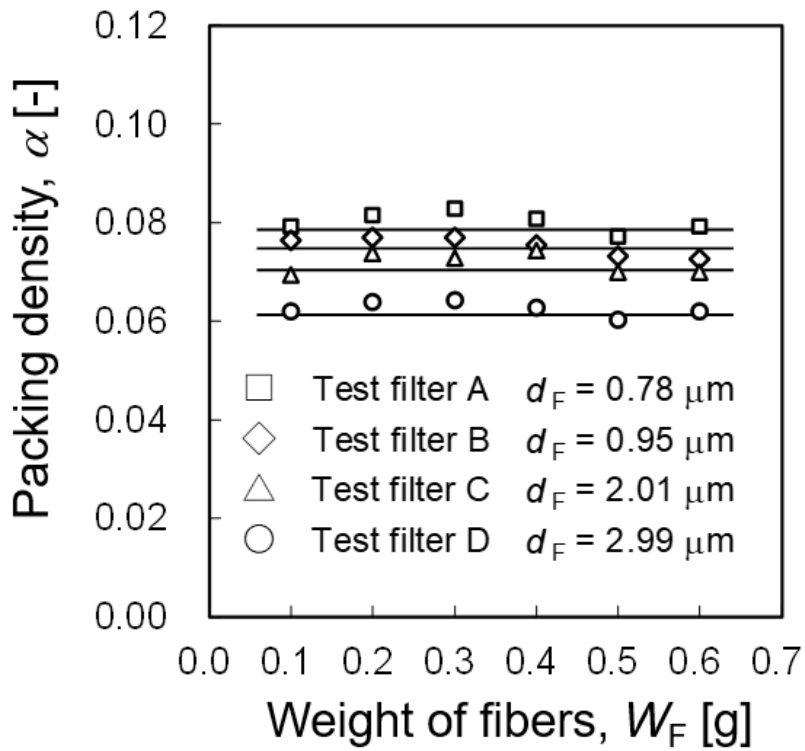


Fig.32 Principle of measurement of fiber volume with Pycnometer

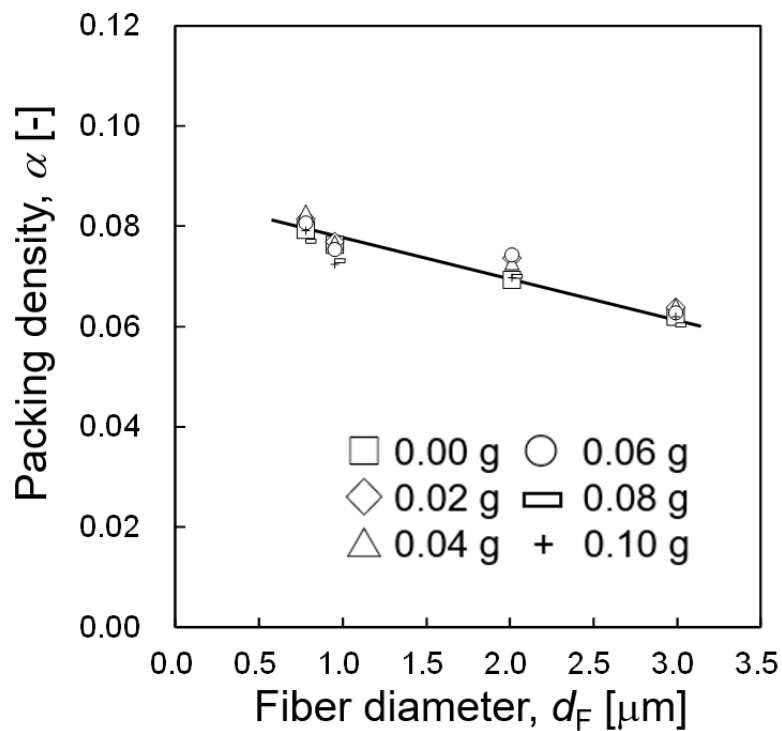
繊維径 d_F 及び配合量 W_F に対するテストフィルタ A-D の充填率 α を図 33 に示す。繊維径 d_F が細くなると充填率 α が増加することが分かる。これは、繊維径が細いとフィルタメディア内で、繊維同士がより緻密に充填するためと考えられる。その一方で、充填率 α は繊維の配合量 W_F に依存せず一定の値を示した。この理由については、繊維配合量 W_F を 0.1 g から 0.6 g まで増加させても、同一繊維径の繊維が増えて厚みが増すだけで、フィルタの内部構造自体が変わらないためと考えられる。

次に、繊維径 d_F 及び配合量 W_F に対するテストフィルタ A-D の厚み T を図 34 に示す。繊維径は厚みに直接的な影響を及ぼし、繊維径が太い程厚みが増加した。なお、厚みは繊維配合量に比例して厚くなり、全ての繊維径において、配合量に対し直線的に増加することが示された。図 34(a)において、CF の配合量が 0 g における厚み、すなわち切片は 0 mm になるはずであるが、0.30-0.35 mm 程度の厚みがあることが分かる。これは、全てのテストフィルタにガラス繊維を接着するためのバインダーが一定量 0.25 g で配合されているためと考えられる。バインダーの繊維径は 13 μm であり、グラスウールの繊維径(0.78-2.99 μm)に対し、有意に太く、厚みの増加に少なくない影響をもたらすと考えられる。

Kirsch らが提案した FMF の理論式の式(41)から、粒子捕集効率は充填率と厚みに比例することが知られている。対数透過率($-\ln P$)も捕集効率と同様に、充填率及び厚みに相関して増加するものと考えられることから、3-5 章に示す対数透過率について考察する際の情報に使用する。

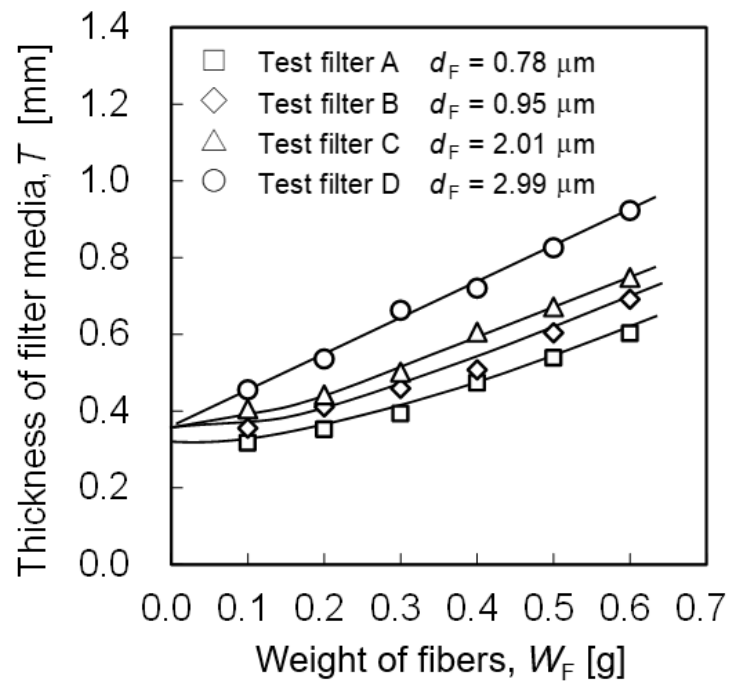


(a) Correlation between the weight of fibers and the packing density

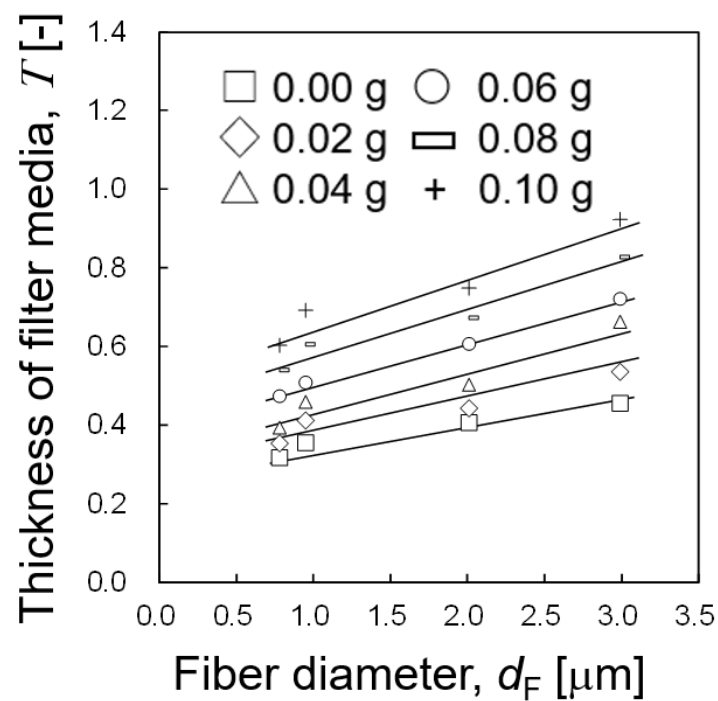


(b) Correlation between the fiber diameter and the packing density

Fig.33 Correlation between parameters of test filter A-D and packing density



(a) Correlation between the weight of fibers and the thickness of filter



(b) Correlation between the fiber diameter and the thickness of filter

Fig.34 Correlation between parameters of test filter A-D and thickness

3-4 遮光率測定

遮光率測定方法を図 35 に示す. 光源には LED ライト(Model LM-6M, Hataya limited)を使用した. LED ライトの光源をそのまま使用するとライトの中心部と外周部で光強度の偏りが大きく, 光強度が場所により異なってしまう. トレーシングペーパー2 枚を光源の上に置くと, 光が拡散し, 場所による光強度の偏りを低減することができた. そこで, テストフィルタを使用せず, 2枚のトレーシングペーパーを透過した光強度を LED ライトの真上に垂直設置した SLR カメラ(Model D850, Nikon)で撮影し, その強度を入射光強度 Reference light luminance (L_R)とした. 次に, トレーシングペーパーの上にテストフィルタを置き, 同じ要領で撮影した画像をフィルタの透過光強度 Luminance through filter (L_F)とした.

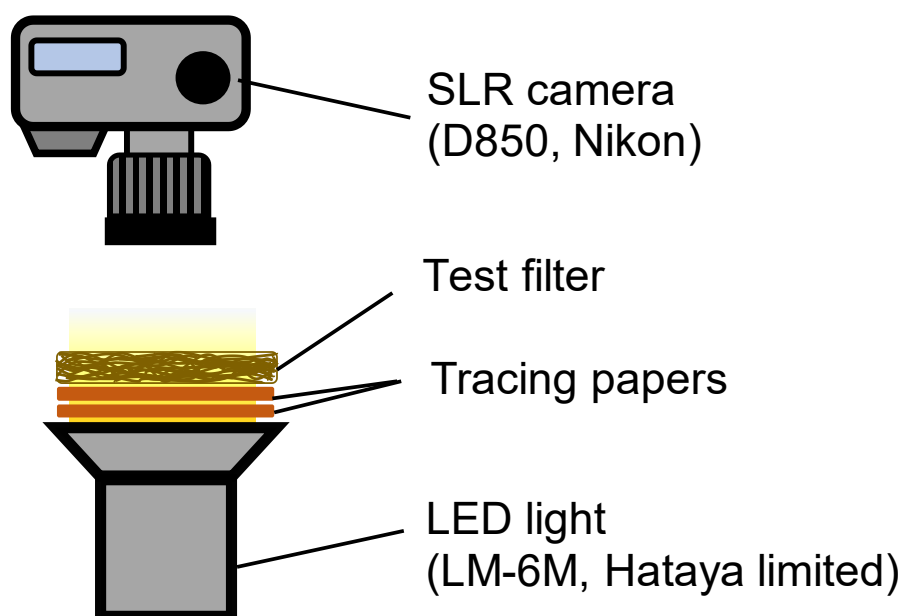


Fig.35 Set-up for measurement of light shading rate

図 36 に入射光強度 L_R とフィルタの透過光強度 L_F の撮影画像例を示す. L_F は例としてテストフィルタ A (繊維径 d_F : 0.78 μm , 繊維配合量 W_F : 0.1 g)を示す. 光の強度は MATLAB2020b を使用し, 図 36 の中央部に示す 40 mm \times 40 mm の 6400 Pixel の平均値から算出した. 遮光率 LSR は, 対数透過率 $-\ln P$ と同様に, 入射光強度 L_R に対するフィルタの透過光強度 L_F の比に対し自然対数を取る式(44)から算出した.

$$\text{LSR} = -\ln (L_F/L_R) \quad (44)$$

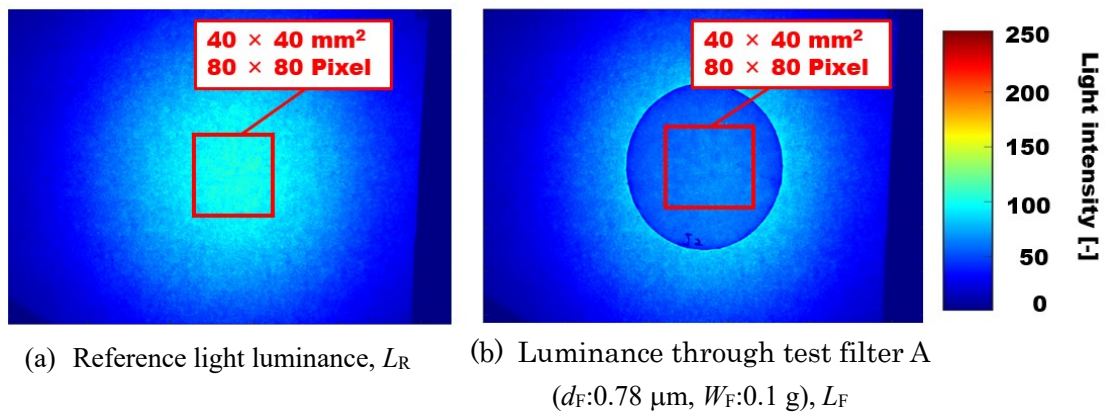


Fig.36 Examples for measured L_R and L_F

繊維径と繊維配合量ごとに撮影した透過光強度 L_F の様子を図 37 に示す。繊維径が細く、繊維配合量が多い程、透過光強度が弱いことが読み取れる。

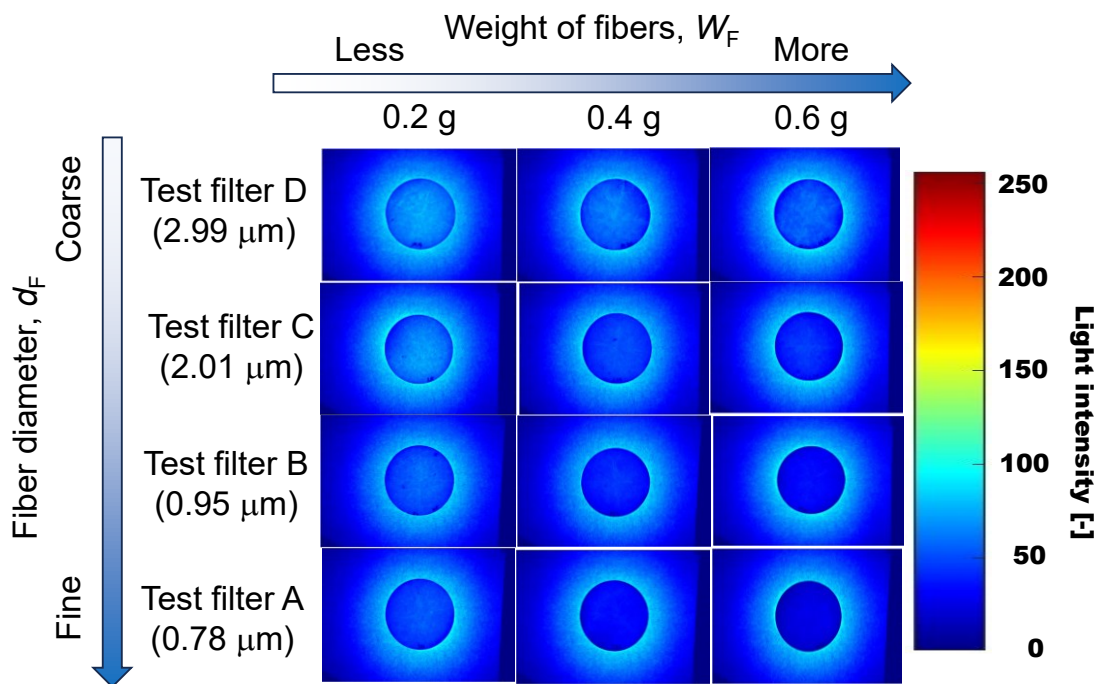


Fig.37 Examples for measured luminance through test filter, L_F

ここで、繊維配合量 W_F と遮光率 LSR の関係を図 38 に示す。遮光率 LSR は繊維配合量 W_F に対し、直線的に増加した。配合量 W_F が増加すると、図 34(a)に示すようにフィルタの厚み T が増加するため、フィルタ内を透過する光で遮光される割合が増加したためと考えられる。また、図 38 から、繊維径 d_F が細いと遮光率が高くなることが分かる。これは、織

繊維径が細いと繊維同士が密に隣合い、図 33(b)のように充填率が増加するためと考えられる。充填率 α が増加すれば、空隙が減少し光が遮られるため、遮光率 LSR は増加する。また繊維配合量 0 g における遮光率は 0 にならず、0.2-0.3 程度の値を示した。これは配合に 0.25 g の一定量で含まれるバインダーの影響と考えられる。バインダーは直径 13 μm の繊維タイプであり、ガラス繊維(0.78-2.99 μm)より有意に太いため、遮光効果を有していると考えられる。

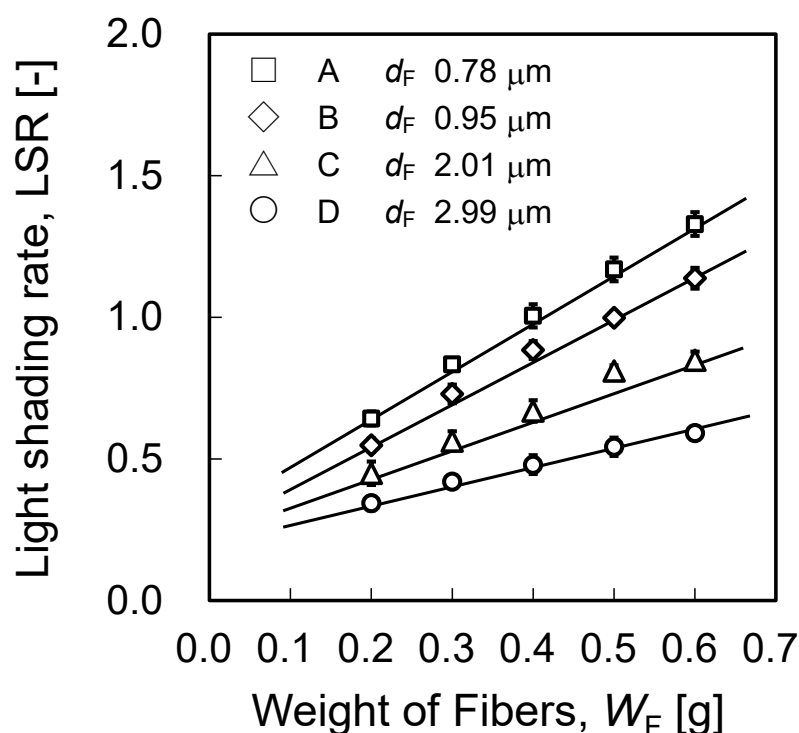


Fig.38 Correlation between weight of fibers and LSR

3-5 対数透過率測定

3-5-1 測定方法

図 39 は、試験装置の概略を示す。圧縮空気は粒子発生器 (3076, TSI) に通気されることで、2 wt% の塩化ナトリウム (NaCl) 溶液が粒子化し、シリカゲルが充填された乾燥機を通過することで不要な水分が除去される。試験粒子は電荷中和器 (CD-3000, PALAS) を通過する。電源制御ユニットの ON/OFF の切り替えにより試験流路の流れを変えずに電荷中和の有無を設定することができる。フィルタホルダにテストフィルタをセットした状態で、Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS, TSI) により測定した粒子個数濃度が透過濃度 (Concentration in downstream, C_{Down}) を示す。フィルタホルダ内が空隙の状態での測定した粒子個数濃度が透過濃度 (Concentration in upstream, C_{up}) である。

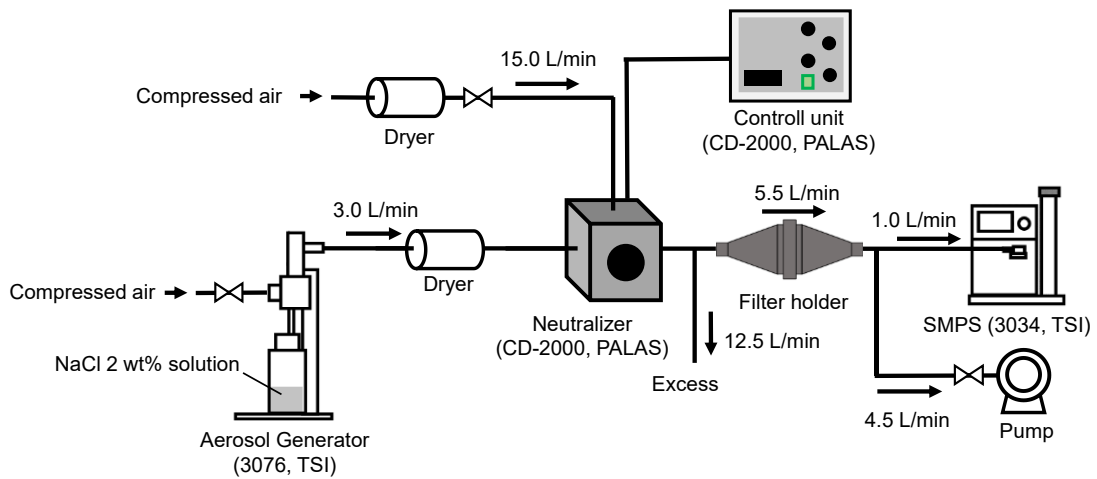


Fig.39 Experimental set-up for measurement of $-\ln P$ with the neutralizer

図 40 に粒子発生器(3076, TSI)を撮影した写真を示す. また, 粒子発生原理を図 41 に示す. 加圧された空気がオリフィスを通ることで発生する負圧により容器内の NaCl 水溶液が吸い上げられ, 壁面に衝突した後に, 微小な液滴が上方に放出され, 大きな液滴は容器内に戻ることによりナノ粒子が発生する.

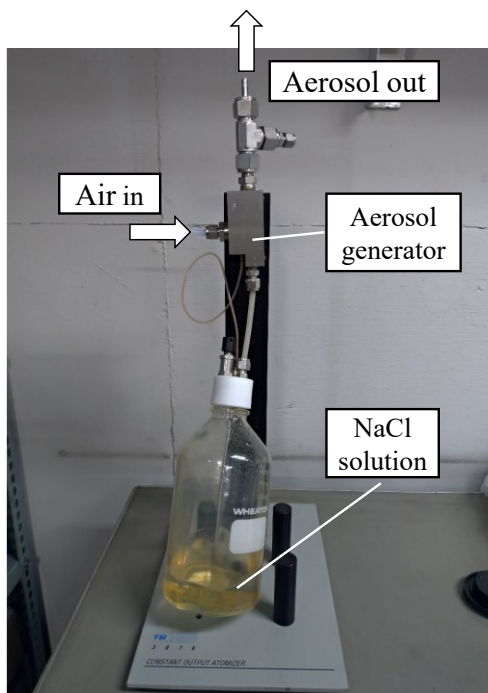


Fig.40 Particle generator (3076, TSI)

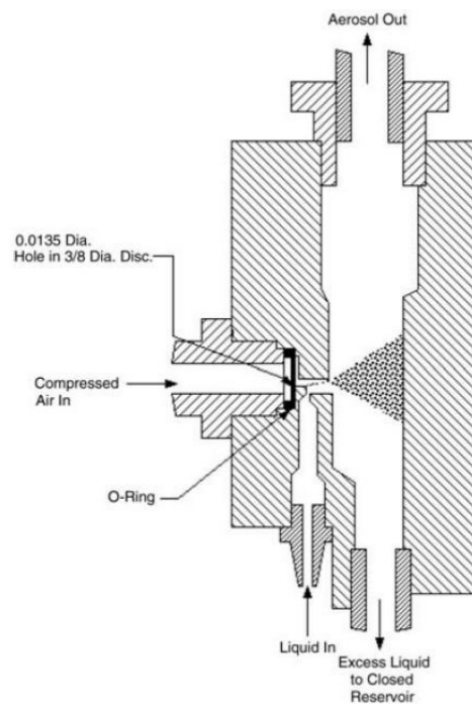


Fig.41 Principle for aerosol generation

シリカゲルを内部に含有した乾燥管は図 42 のとおりである。多孔質であるシリカゲルはその細孔内に簡単に水分子を取り込むことができる。



Fig.42 Dryer tube contained within silica

図 43 に電荷中和器を示す。また、その原理を図 44 に示す。コロナ放電式電荷中和器 CD2000 は、陽イオンと陰イオンの両極性方式である。中和器内部の針型の電極に高電圧を印加することで、針付近の空気をイオン化する。発生した陽イオン及び陰イオンは電荷を帯びた粒子と接触し、粒子の電荷は中和する。



Fig.43 neutralizer (CD-2000, PALAS)

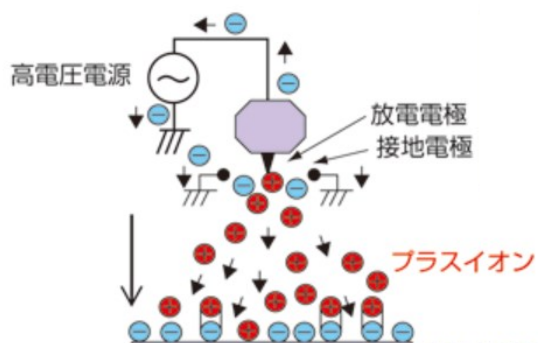


Fig.44 Principle for neutralization

図 45 にフィルタホルダにフィルタホルダの内部構造を示す。フィルタホルダ内部ではエアフィルタをはさむ金属製リングと気密性を保つためのリング状ラバーでフィルタを固定している。

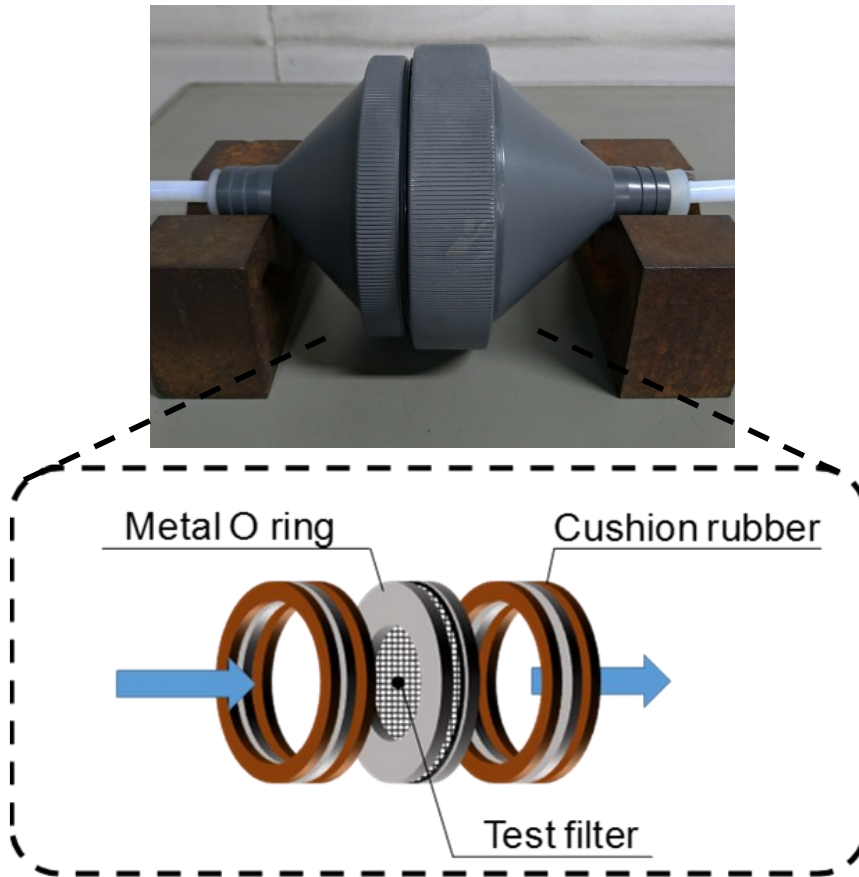


Fig.45 Internal structure of filter holder

上流側の粒子個数濃度 C_{up} は、図 46 に示すように単分散粒子となった。生成された粒子の粒径分布中央値(ピーク粒子径)は $0.08 \mu\text{m}$ であり、ピーク粒子径での粒子個数濃度は $1.0 \times 10^6 \text{ \#/cm}^3$ であった。テストフィルタ A (weight of fibers 0.1 g) の C_{down} は、約 $0.09 \mu\text{m}$ をピーク粒子径とした典型的な単分散の粒径分布(図 47)を示した。テストフィルタの対数透過率($-\ln P$)は、 C_{up} に対する C_{down} の対数を使用して式(45)で算出される。

$$-\ln P = -\ln(C_{down}/C_{up}) \quad (45)$$

対数透過率においても、典型的な MPPS である約 $0.15 \mu\text{m}$ で最低値を示し、粒子径が MPPS から低下する方向と増加する方向のいずれでも上昇する典型的な対数透過率曲線を示した(図 48)。一方で、テストフィルタ A (weight of fibers 0.6 g) の下流側の粒子個数濃度 C_{down} は図 47 に示すように歪な粒径分布を示し、粒子径 $0.05 \mu\text{m}$ 未満および $0.3 \mu\text{m}$ 以上の領域では粒子個数濃度が 0 \#/cm^3 とノイズレベルであった。その結果、図 48 に示す対数透過率 $-\ln P$ も典型的な対数透過率曲線を示さなかったため、測定結果が正確ではないことが示唆される。試験粒子による汚染を防ぐために、清浄空気を電荷中和器内に常時 15 L/min の流量で通気する必要があったことが原因で、粒子個数濃度が減少したためと考えられる。

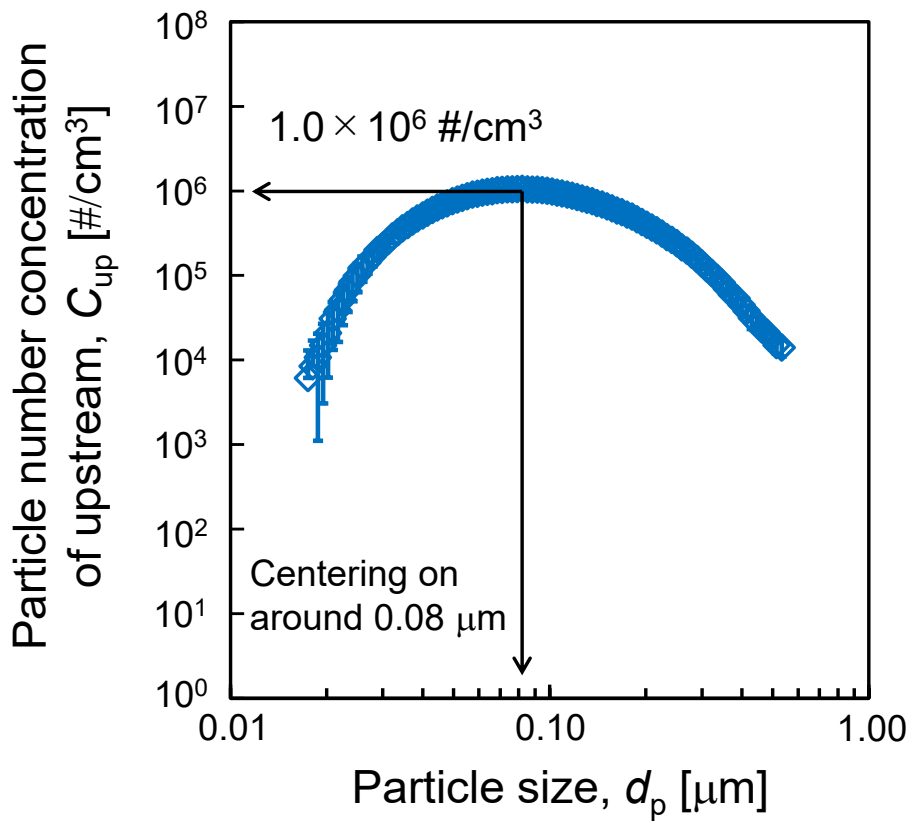


Fig.46 Particle number concentration of upstream, C_{up}

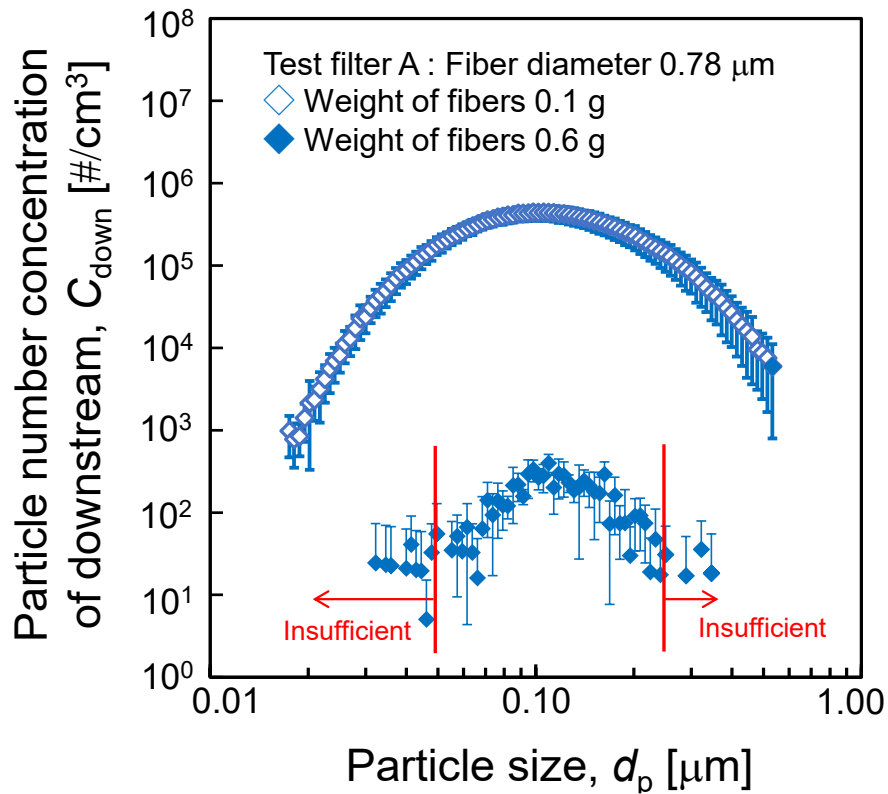


Fig.47 Particle number concentration of downstream, C_{down}

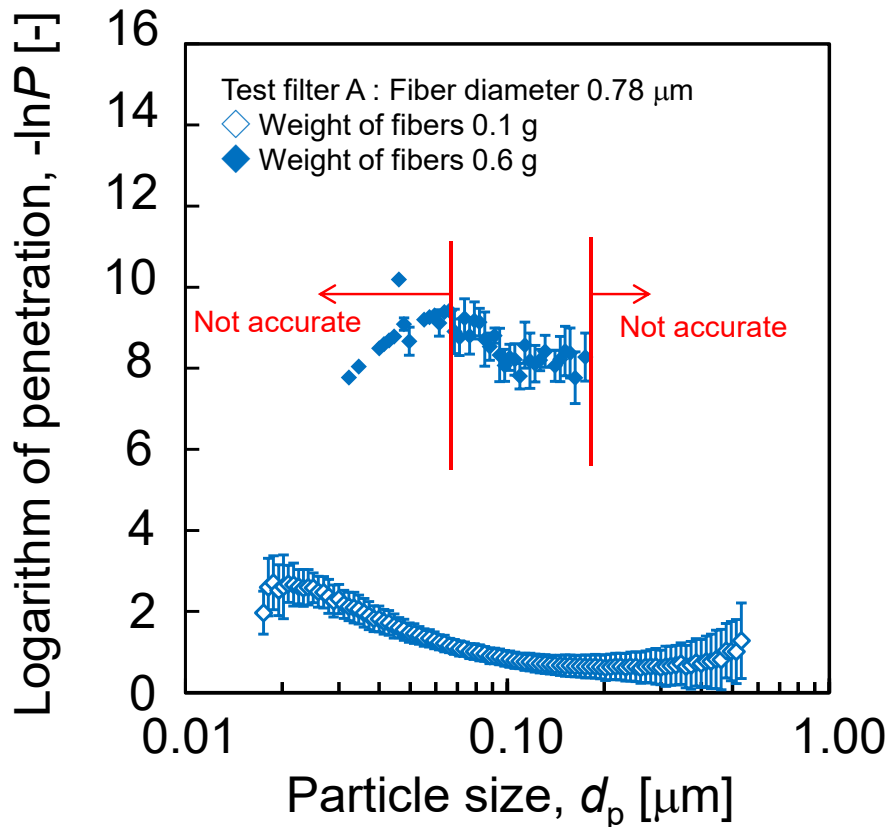


Fig.48 Logarithm of penetration for test filter A, $-\ln P$

そこで、上流側の粒子個数濃度 C_{up} を増加させるために、電荷中和器(CD-2000, PALAS)を使用せず、流量を低減することにした。テストフィルタはメカニカルフィルタであり、電荷の有無が捕集能力に影響しないと考えたためである。電荷中和器を使用せずに正確な試験を実施するために、テストフィルタの表面電位を表面電位計(KSD-3000, カスガ電機株式会社)で測定した。テストフィルタの表面電位は < 0.01 kV と無視できる程に低かった。なお、エレクトレットフィルタの表面電位は 1000-2000 kV である。よって、試験粒子が帯電していても、帯電した粒子を引き寄せて捕集する能力はほとんどなく、実際に試験粒子に帯電した電荷はテストフィルタの捕集効率にほとんど影響しないと考えられる。

さらに、中和器の有無が対数透過率に影響しないことを保証するために、電荷中和器の ON/OFF を切替えることで、上流側の粒子個数濃度 C_{up} (図 49)、フィルタの透過側の粒子個数濃度 C_{down} (図 50)、対数透過率 $-\ln P$ (図 51) について、電荷中和の有無による差を比較した。上流側の粒子個数濃度 C_{up} 、下流側の粒子個数濃度 C_{down} と対数透過率 $-\ln P$ は、電荷中和の有無に関わらず、全て同等の値を示した。よって、本研究においては、電荷中和器を使用しなくても正確な試験を実施できることが示された。

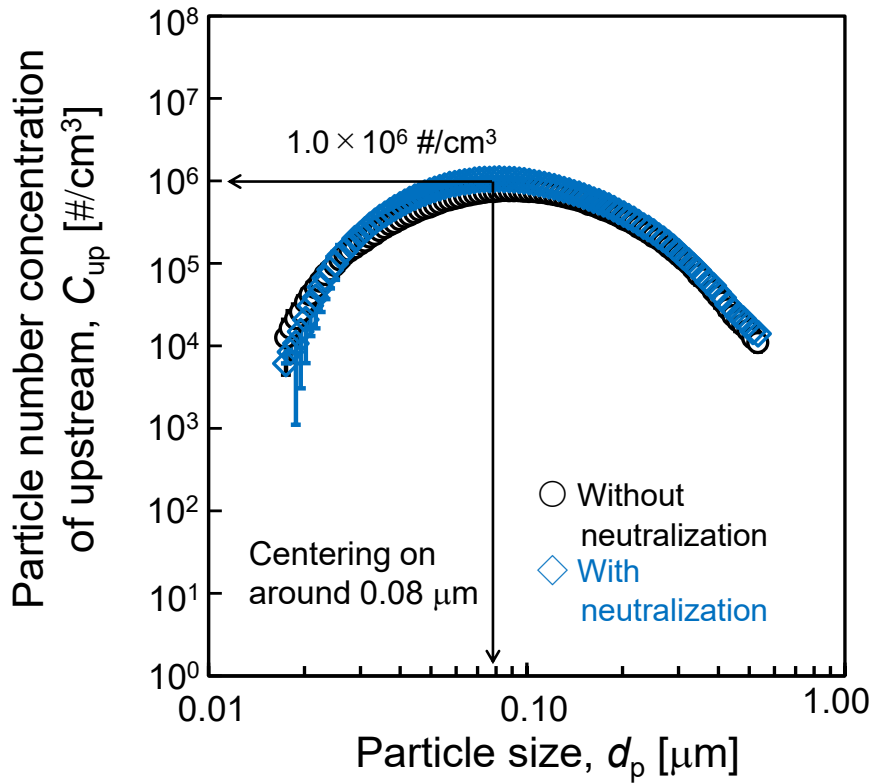


Fig.49 Particle number concentration of upstream, C_{up} with/without neutralization

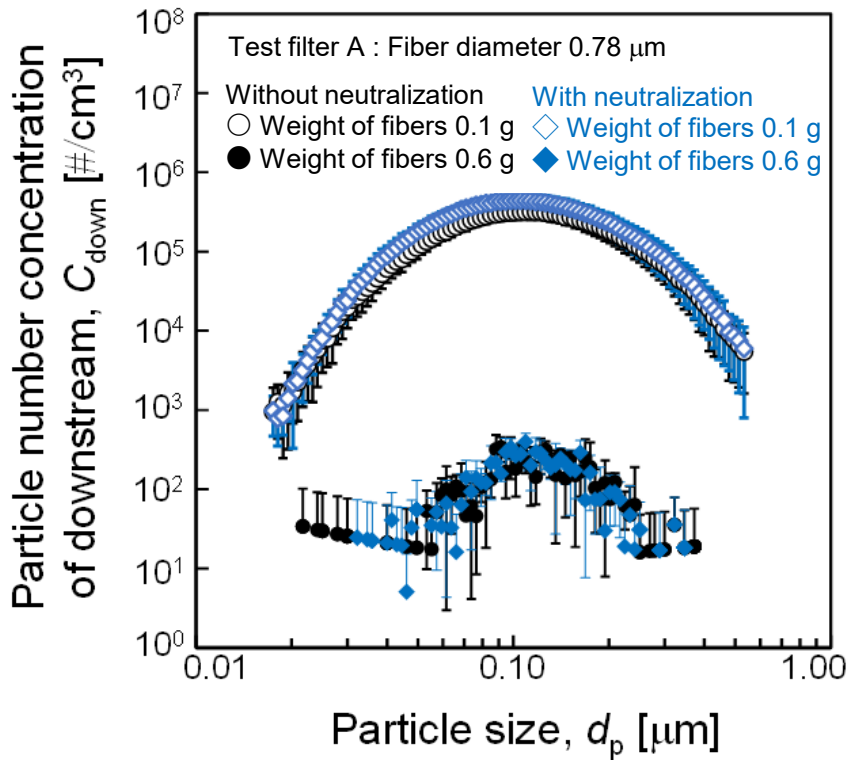


Fig.50 Particle number concentration of downstream, C_{down} with/without neutralization

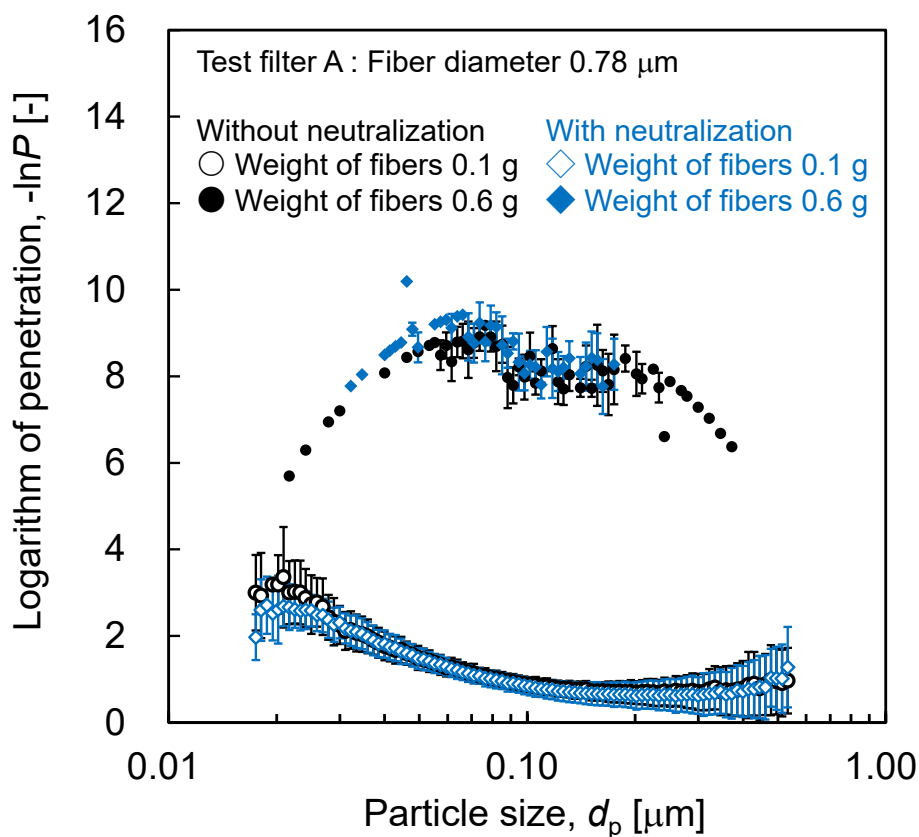


Fig.51 Logarithm of penetration for test filter A, $-\ln P$

図 39 の試験系から、電荷中和器 CD-2000 を除いた試験系を図 52 に示す。環境中の粒子個数濃度 C_{up} を図 53 に示す。0.04 μm をピーク粒子径とした単分散粒径分布が得られた。この粒子径は電荷中和器を使用した試験系における環境粒子のピーク粒子径 0.08 μm の 0.5 倍である。これは電荷中和器とそれを接続する配管が不要となったため、粒子が配管を通過する距離及び時間が減少し、粒子同士が凝集しにくくなったためと考えられる。一方、粒子濃度は $1.0 \times 10^6 \text{ \#/cm}^3$ から $3.0 \times 10^6 \text{ \#/cm}^3$ へ約 3 倍増加した。電荷中和器を省略したことで、電荷中和器に通気する必要があった正常空気 15 L/min を通気する必要がなくなったためと考えられる。試験粒子の粒子個数濃度 C_{up} を高めることができた図 52 の試験系は、フィルタの下流側の粒子個数濃度 C_{down} に対する上流側の粒子個数濃度 C_{up} の比が大きくなるため、より正確な対数透過率測定が可能になると考えられる。

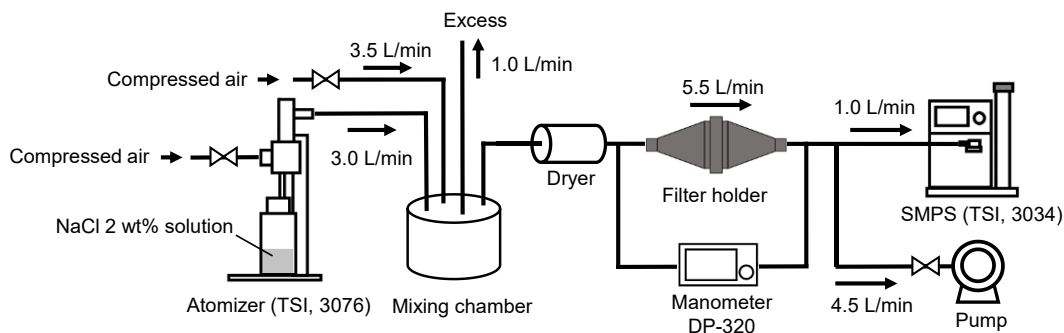


Fig.52 Experimental set-up for measurement of $-\ln P$ without the neutralizer

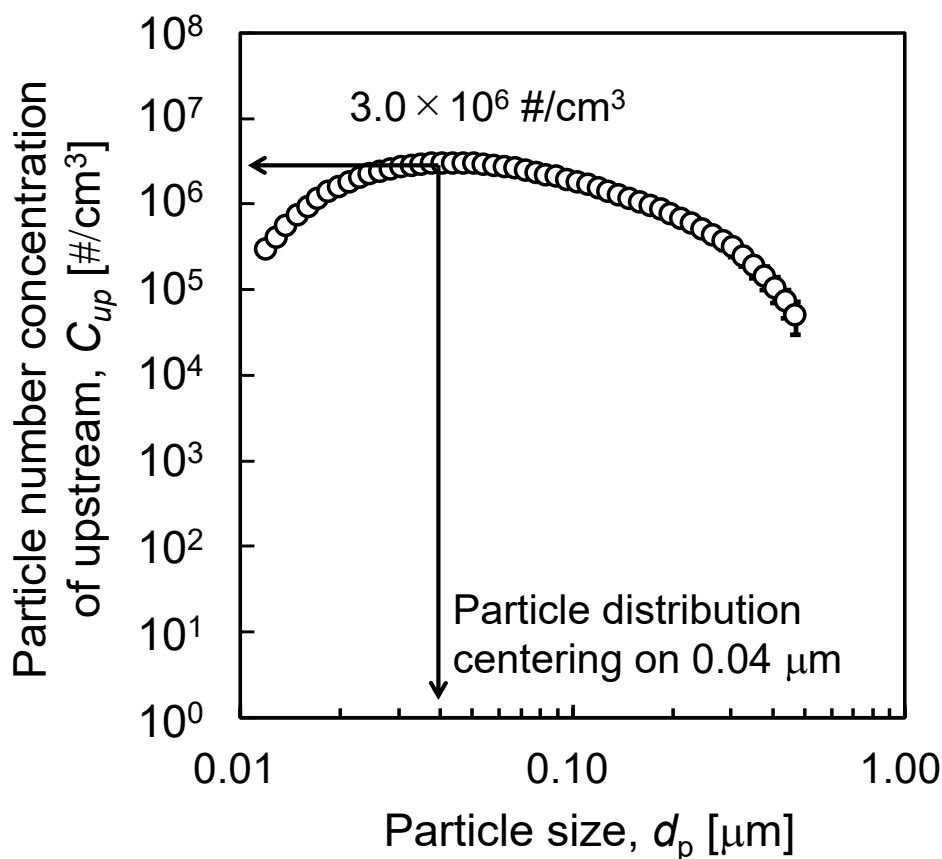
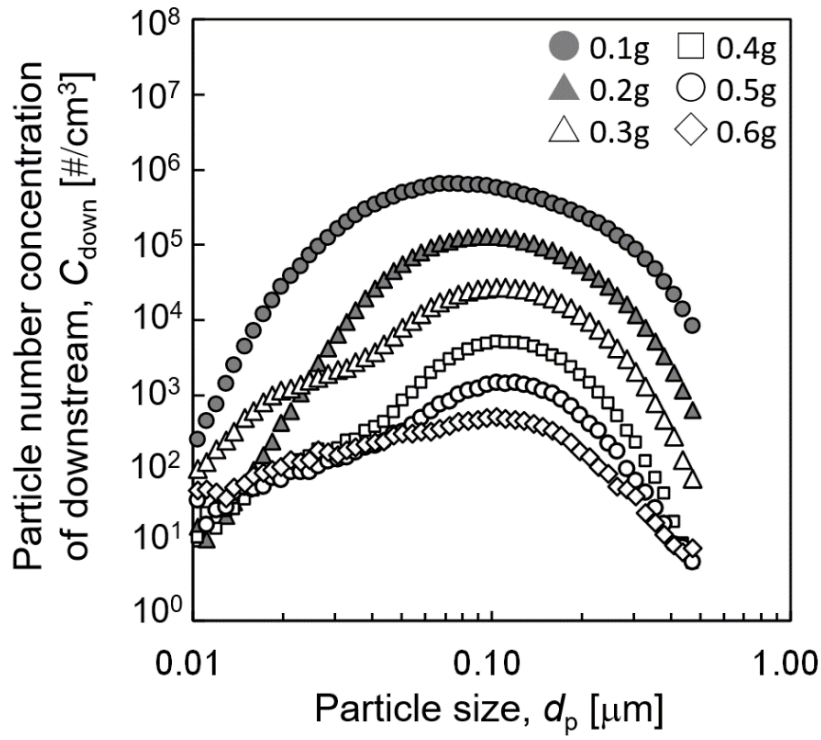
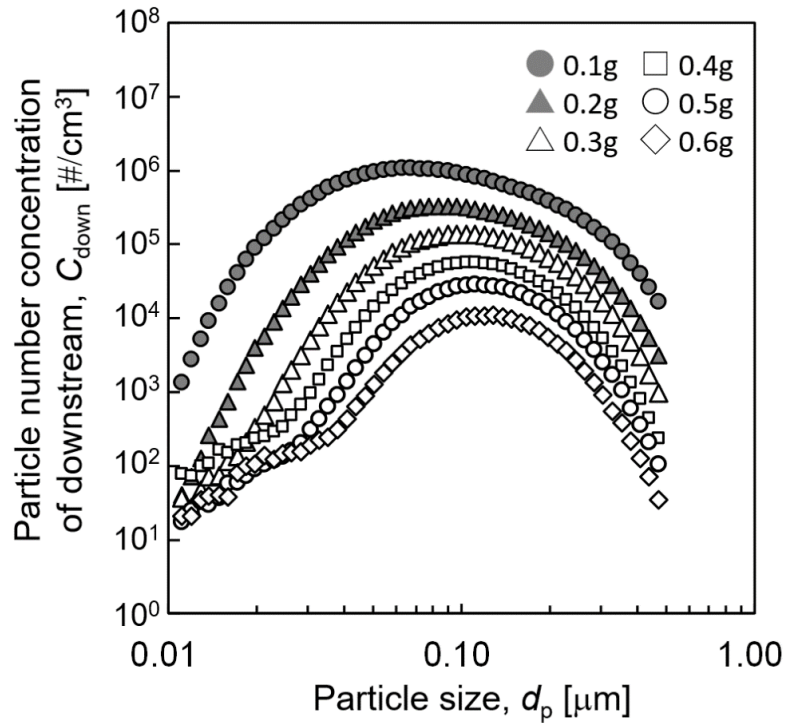


Fig.53 Particle number concentration of upstream, C_{up}

テストフィルタ A-D の透過粒子濃度(C_{down})を図 54 に示す. 繊維配合量が大きくなると C_{down} は低下し, 粒子の透過量が低下したことを示す. これは繊維量増加によりフィルタメディアの厚み T が増加したためと考えられる. また, 繊維径 d_F が太くなると C_{down} は増加した. これは, 繊維径が太くなる程に繊維充填率が低下するため, 粒子と繊維の接触確率が低下し, 粒子捕集性能が低下したためと考えられる.

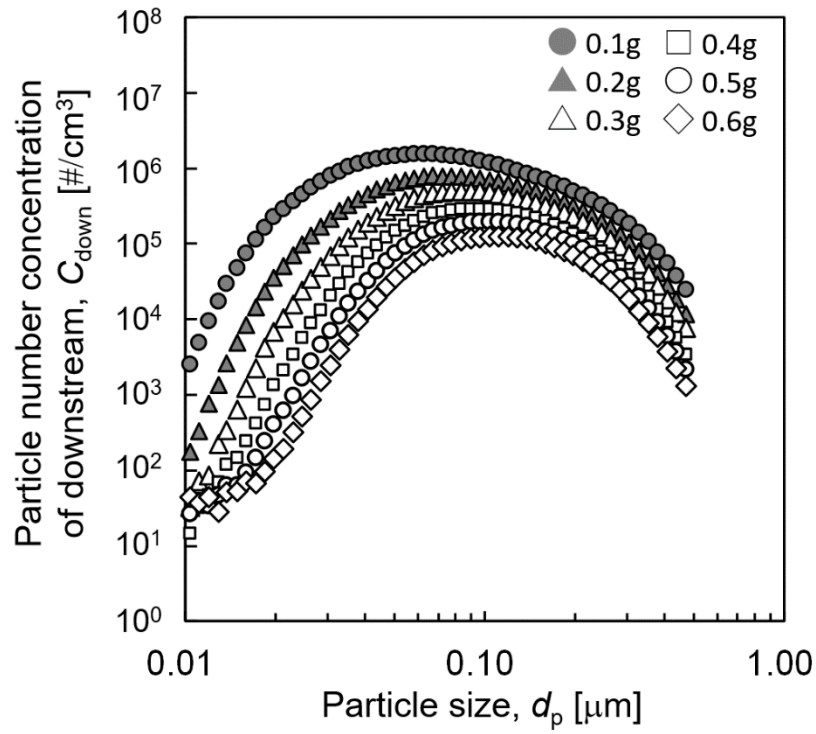


(a) Test filter A ($d_F : 0.78 \mu\text{m}$)

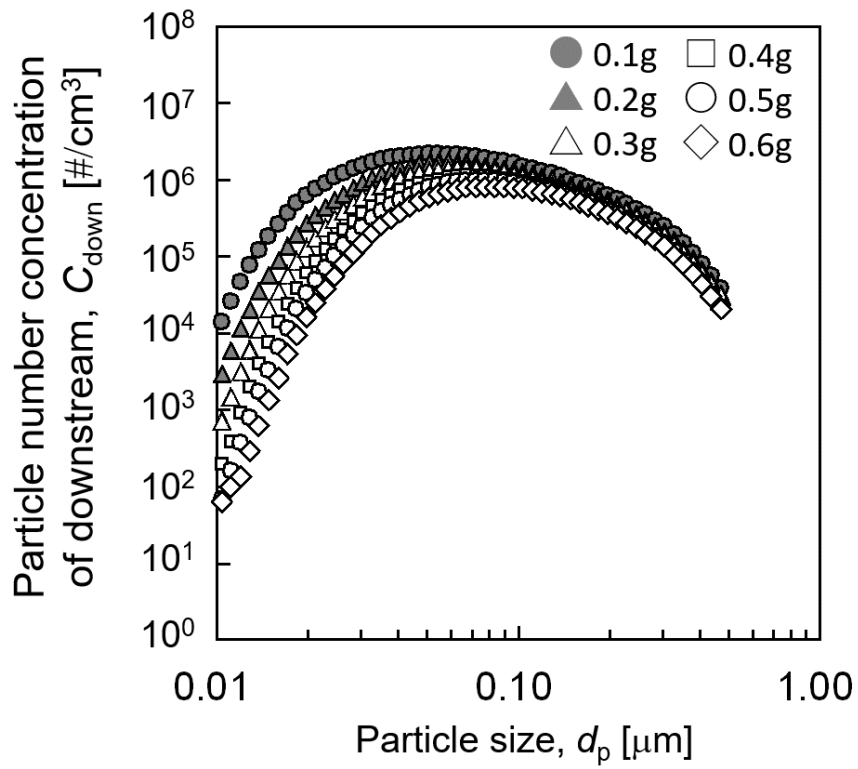


(b) Test filter B ($d_F : 0.95 \mu\text{m}$)

Fig.54 Particle number concentration of downstream for test filter A-D, C_{down}



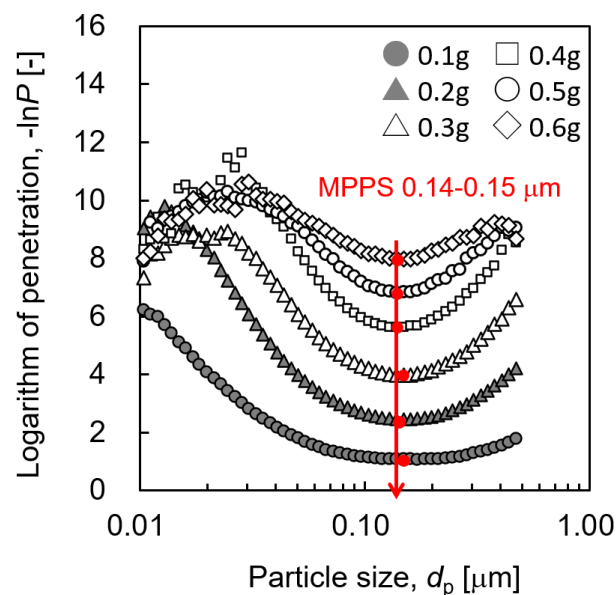
(c) Test filter C ($d_F : 2.01 \mu\text{m}$)



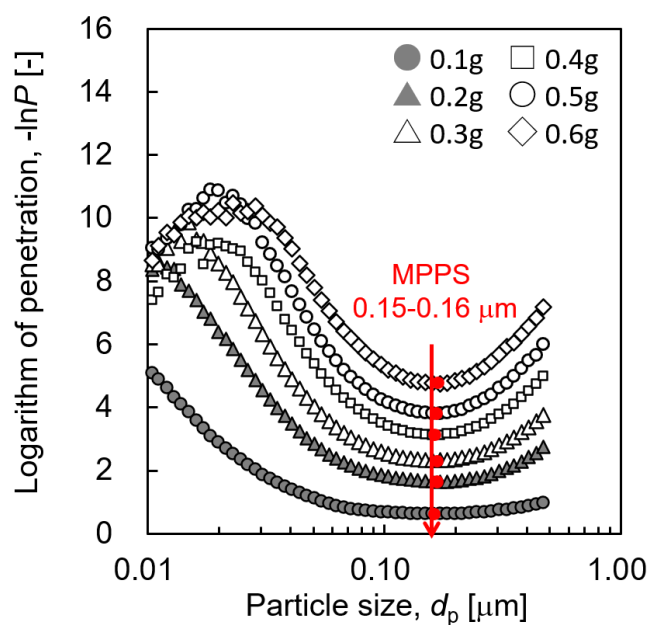
(d) Test filter D ($d_F : 2.99 \mu\text{m}$)

Fig.54 Particle number concentration of downstream for test filter A-D, C_{down}

式(45)を用い、測定したテストフィルタ A-D の透過粒子濃度 C_{down} と環境粒子濃度 C_{up} から算出した対数透過率 $-\ln P$ を図 55 に示す。全体的な傾向として、繊維径 d_F が最も細いテストフィルタ A ($d_F: 0.78 \mu\text{m}$) の対数透過率が最も高く、径が大きくなるにつれ対数透過率は低下し、最も太いテストフィルタ D ($d_F: 2.99 \mu\text{m}$) の対数透過率が最も低い。テストフィルタ A-D の全てにおいて、繊維配合量 W_F を増やすと対数透過率は上昇した。また、最大透過粒子径 MPPS は対数透過率が低くなるにつれ増加する傾向が見られた。

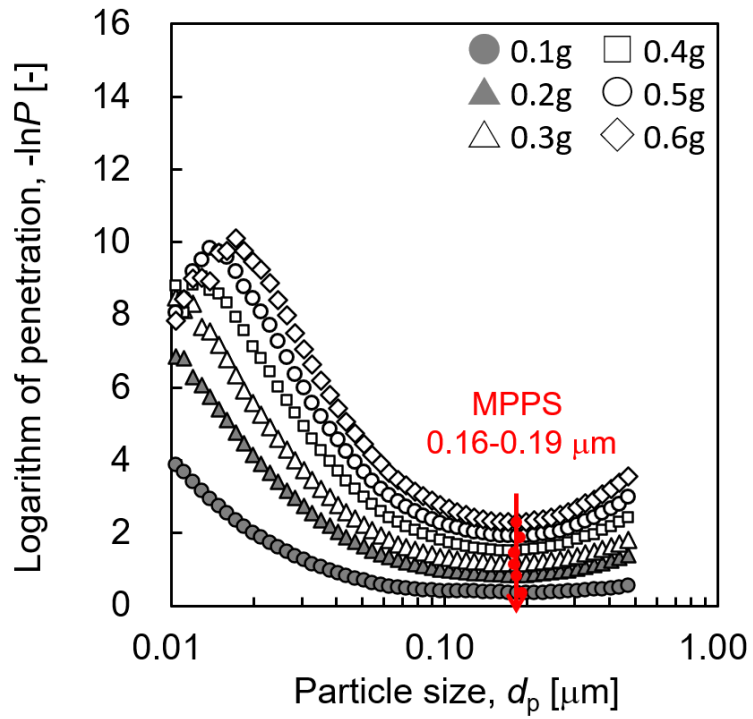


(a) Test filter A ($d_F: 0.78 \mu\text{m}$)

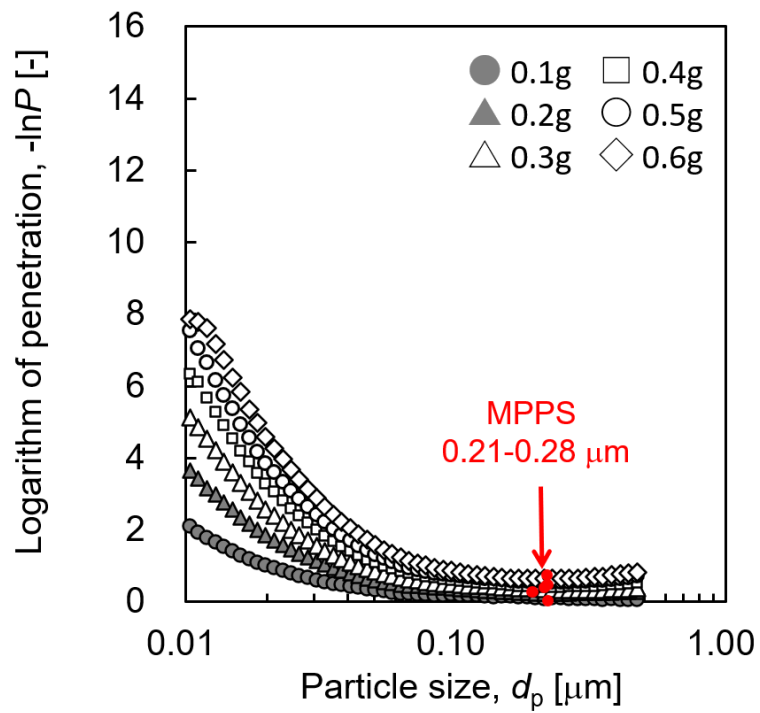


(b) Test filter B ($d_F: 0.95 \mu\text{m}$)

Fig.55 Logarithm of penetration for test filter A-D, $-\ln P$



(c) Test filter C (d_F : 2.01 μm)



(d) Test filter D (d_F : 2.99 μm)

Fig.55 Logarithm of penetration for test filter A-D, $-\ln P$

ここで、図 55 におけるテストフィルタ A-D の対数透過率 $-\ln P$ について、配合量 0.6 g に着目すると、拡散効果による捕集機構が支配的な粒子径 d_p が $0.02 \mu\text{m}$ の領域における対数透過率 $-\ln P$ は、テストフィルタ A (繊維径 d_F : $0.78 \mu\text{m}$) で約 10, B (d_F : $0.95 \mu\text{m}$) で約 10, C (d_F : $2.01 \mu\text{m}$) で約 10, D (d_F : $2.99 \mu\text{m}$) で約 8 となった。テストフィルタ D のみやや低いが、概ね 8-10 と同等の対数透過率となることを示した。一方で、遮り効果による捕集機構が支配的な粒子径 d_p が $0.4 \mu\text{m}$ の領域における対数透過率は、テストフィルタ A (繊維径 d_F : $0.78 \mu\text{m}$) で約 10, B (d_F : $0.95 \mu\text{m}$) で約 6, C (d_F : $2.01 \mu\text{m}$) で約 4, D (d_F : $2.99 \mu\text{m}$) で約 1 となった。繊維径 d_F による対数透過率の差は極めて大きく、テストフィルタ A の対数透過率は D の 10 倍であった。そこで、粒子径 d_p による対数透過率 $-\ln P$ の差を考察するために、テストフィルタの対数透過率を既存の理論式から考察する。

拡散効果による単一繊維の捕集効率 η_D は、最も精度の高い Kirsch (1978) の例を挙げると式(23)で示され、支配的なパラメータは式(1)に示すペクレ数 Pe である。テストフィルタ A-D の粒子径 d_p ごとのペクレ数 Pe と η_D の計算値を図 56, 図 57 に示す。図 56 において、ペクレ数 Pe は粒子径 d_p に比例して上昇した。これは、式(1)に示すペクレ数 Pe が粒子の拡散速度を示す拡散係数 D に反比例するが、拡散係数 D は、式(2)に示すように粒子径 d_p に反比例するためである。また、ペクレ数 Pe は式(1)に示すとおり、繊維径 d_F に比例するため、テストフィルタの繊維径 d_F の増加につれて上昇することがわかる。図 57 において、拡散効果による単一繊維の捕集効率 η_D は、粒子径 d_p とテストフィルタの繊維径 d_F の低下に伴い徐々に増加した。これは、粒子径 d_p と繊維径 d_F の減少によるペクレ数低下によるものと考えられる。拡散が強く影響する粒子径 d_p $0.02 \mu\text{m}$ においてテストフィルタの拡散効果による単一繊維の捕集効率 η_D を比較すると、テストフィルタ A (繊維径 d_F : $0.78 \mu\text{m}$) で 0.144, B (d_F : $0.95 \mu\text{m}$) で 0.124, C (d_F : $2.01 \mu\text{m}$) で 0.099, D (d_F : $2.99 \mu\text{m}$) で 0.081 となった。後述の遮りと比べると、繊維径 d_F が $0.78 \mu\text{m} \rightarrow 2.99 \mu\text{m}$ に増加した際の捕集効率低下率は小さく、0.56 倍 ($0.081 / 0.144$) であった。

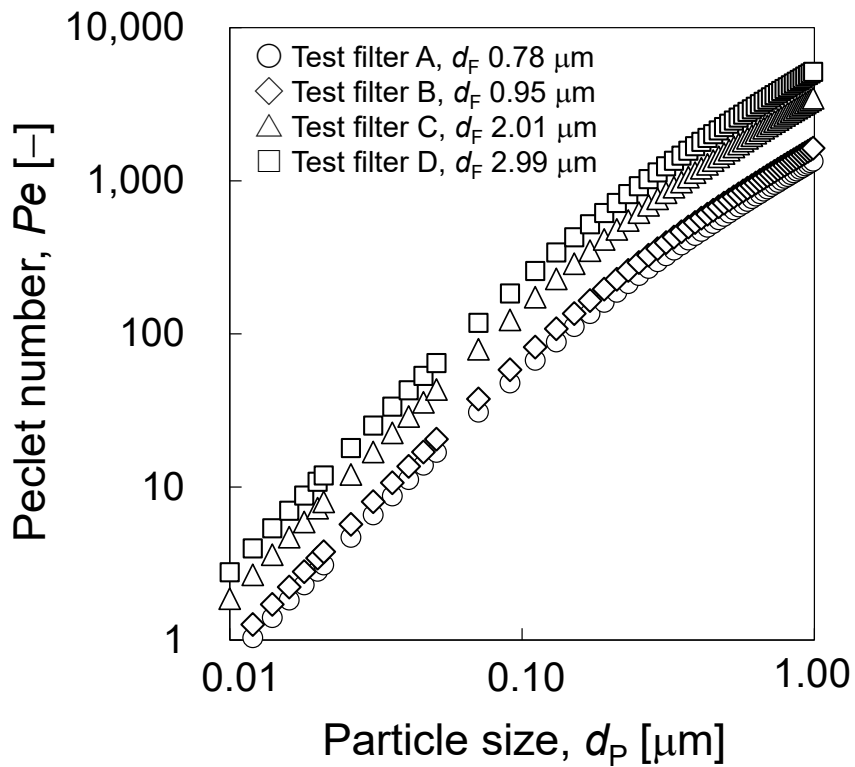


Fig.56 Calculated value of Peclet number for test filter A-D

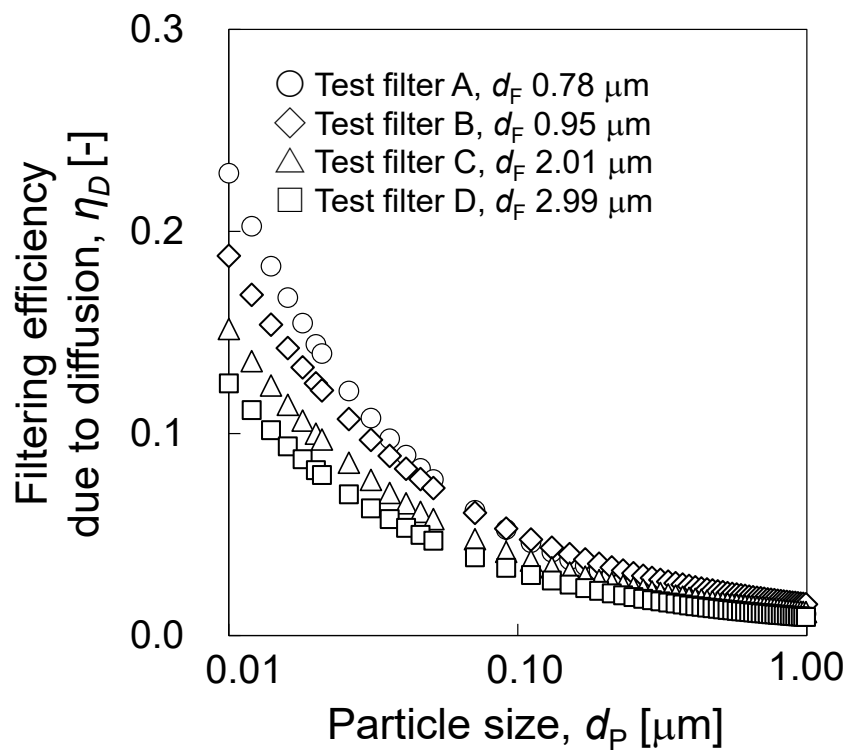


Fig.57 Calculated value of filtering efficiency due to diffusion for test filter A-D

遮り効果による単一繊維の捕集効率 η_R は、最も精度の良い Kirsch(1978)の例を挙げると式(24)で示され、支配因子は式(4)に示す遮りパラメータ R である。テストフィルタ A-D の粒子径 d_p ごとの遮りパラメータ R と遮りによる捕集効率 η_R の計算値を図 58, 図 59 に示す。図 58 において、遮りパラメータ R は、式(4)のとおり粒子径 d_p に比例して上昇した。また、遮りパラメータ R は、繊維径 d_F に反比例するため、テストフィルタの繊維径 d_F の増加につれて低下することがわかる。図 59 において、遮り効果による単一繊維の捕集効率 η_R は、テストフィルタの繊維径 d_F の増加に伴い、急激に低下した。これは、上記のとおり、遮りパラメータ R が繊維径 d_F に反比例するためと考えられる。遮りが強く影響する粒子径 d_p $0.4 \mu\text{m}$ において、テストフィルタの遮り効果による単一繊維の捕集効率 η_R を比較すると、テストフィルタ A (繊維径 d_F : $0.78 \mu\text{m}$) で 0.044 , B (d_F : $0.95 \mu\text{m}$) で 0.032 , C (d_F : $2.01 \mu\text{m}$) で 0.0087 , D (d_F : $2.99 \mu\text{m}$) で 0.0041 となった。上記の拡散による捕集効率と比べると、繊維径 d_F が $0.78 \mu\text{m}$ \rightarrow $2.99 \mu\text{m}$ に増加した際の捕集効率低下率は大きく、 0.093 倍 ($0.0041/0.044$) であった。

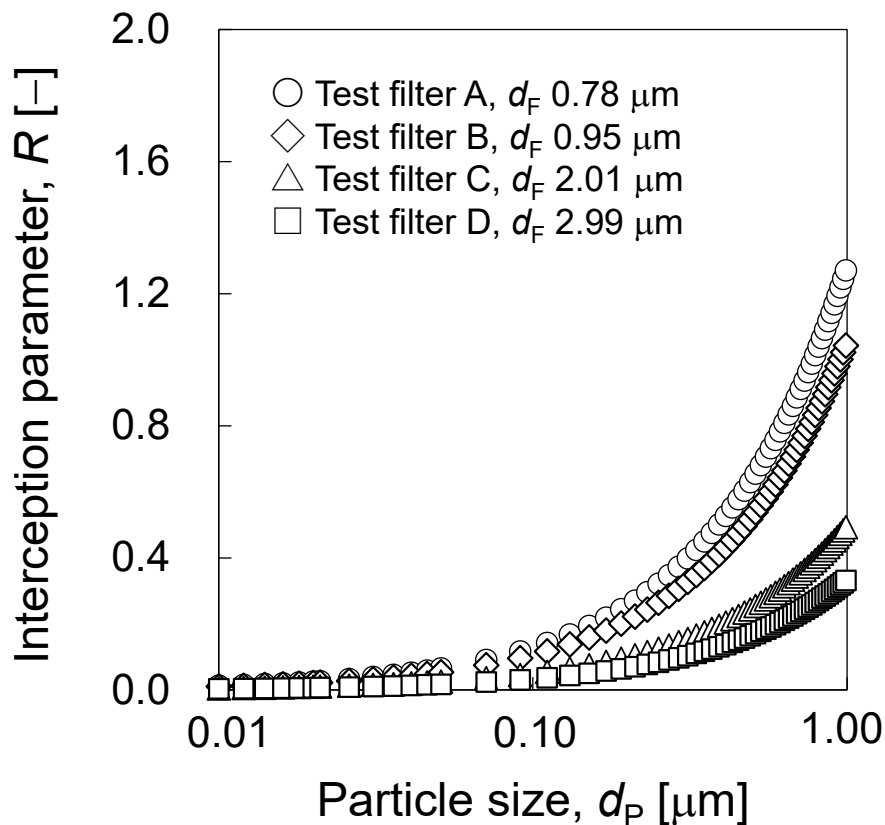


Fig.58 Calculated value of interception parameter for test filter A-D

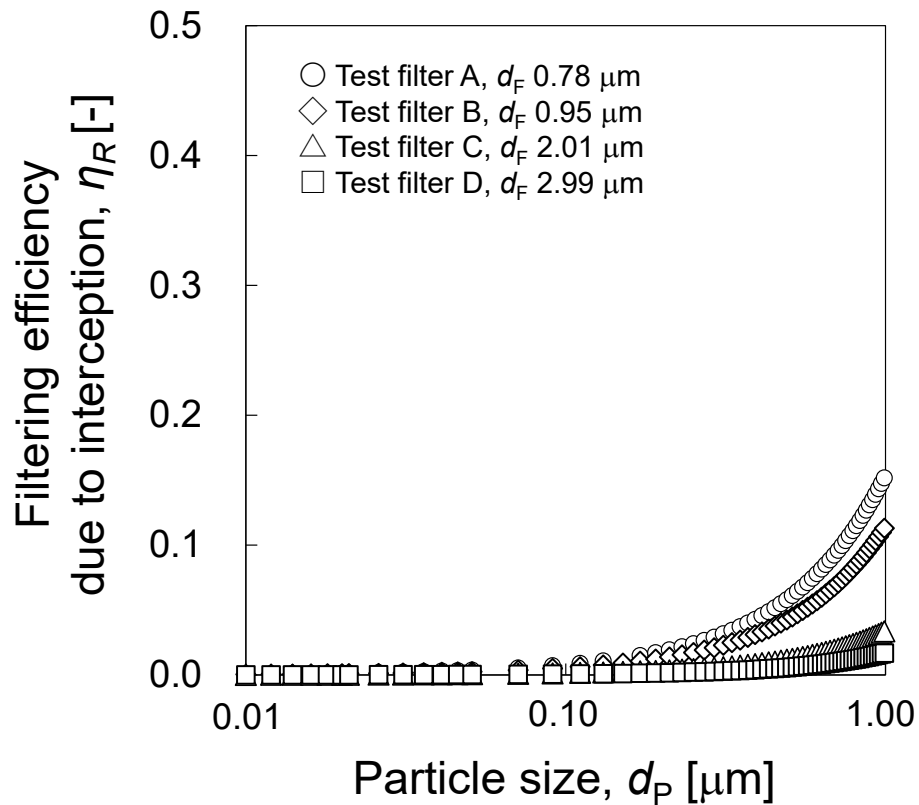


Fig.59 Calculated value of filtering efficiency due to interception for test filter A-D

テストフィルタにおける単一繊維の捕集効率は、繊維径 d_F の増加に伴い低下した。繊維径 d_F が $0.78 \mu\text{m}$ から $2.99 \mu\text{m}$ に変化した際、遮りによる捕集効率 η_R の低下率は 0.093 倍 ($0.044 \rightarrow 0.0041$) で拡散 η_D の低下率 0.56 倍 ($0.144 \rightarrow 0.081$) よりも大きいことが分かった。式(41)に示す FMF の理論式から算出した捕集効率 E と式(42)から求めたテストフィルタ全体の対数透過率 $-\ln P$ を図 60 に示す。FMF 理論式から算出したテストフィルタの対数透過率は、繊維径 d_F の増加に伴い減少するが、拡散効果が強い小粒子径領域 ($0.01\text{-}0.05 \mu\text{m}$) では低下率は小さい。上記のとおり、拡散効果による捕集効率 η_D には繊維径 d_F の影響が小さいためであると考えられる。一方で、遮り効果が強い大粒子径領域 ($0.2\text{-}1.0 \mu\text{m}$) では、繊維径 d_F の増加によって対数透過率 $-\ln P$ は急激に低下した。遮りによる捕集効率 η_R が繊維径増加の影響によって急激に低下するためと考えられる。

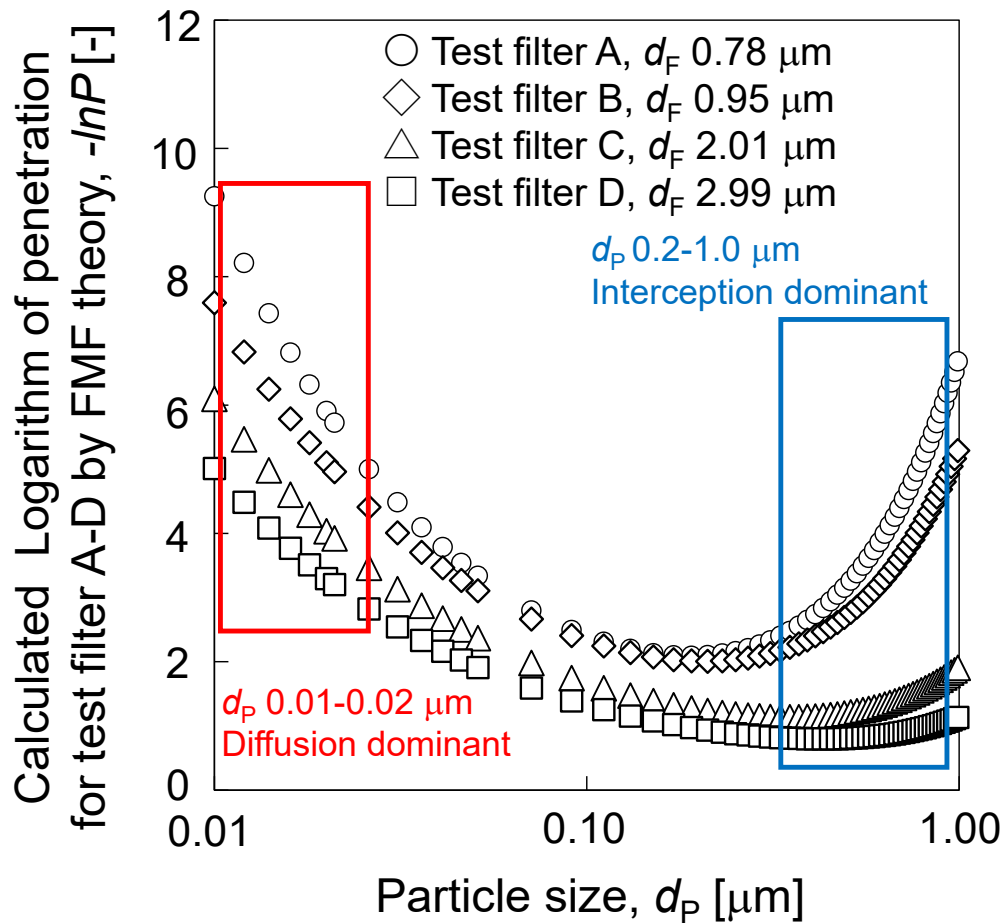
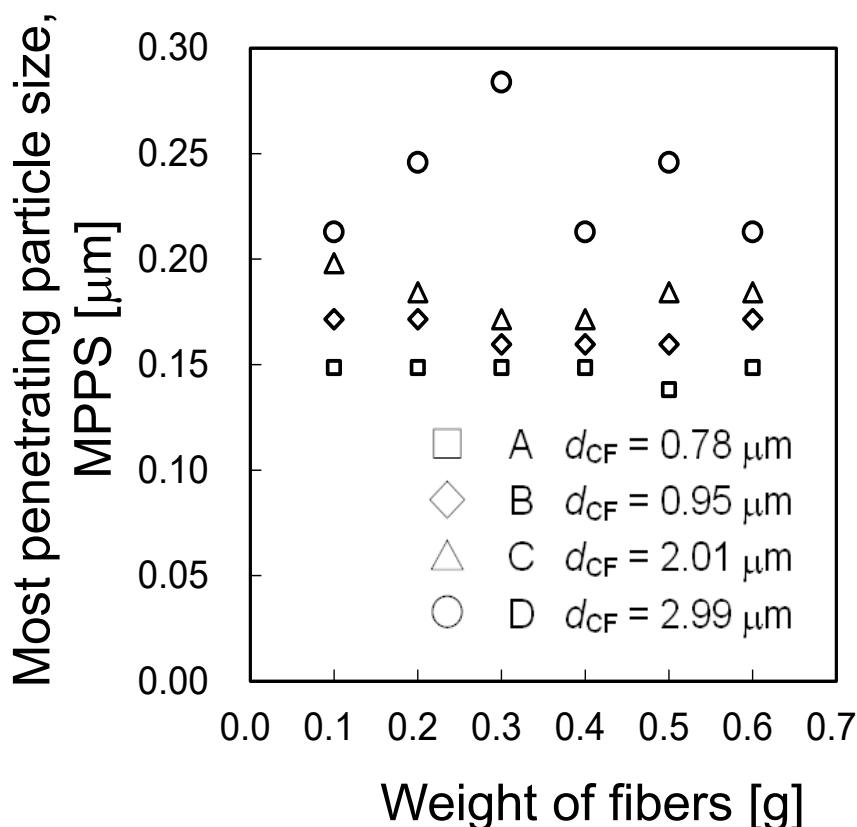


Fig.60 Calculated value of logarithm of penetration for test filter A-D

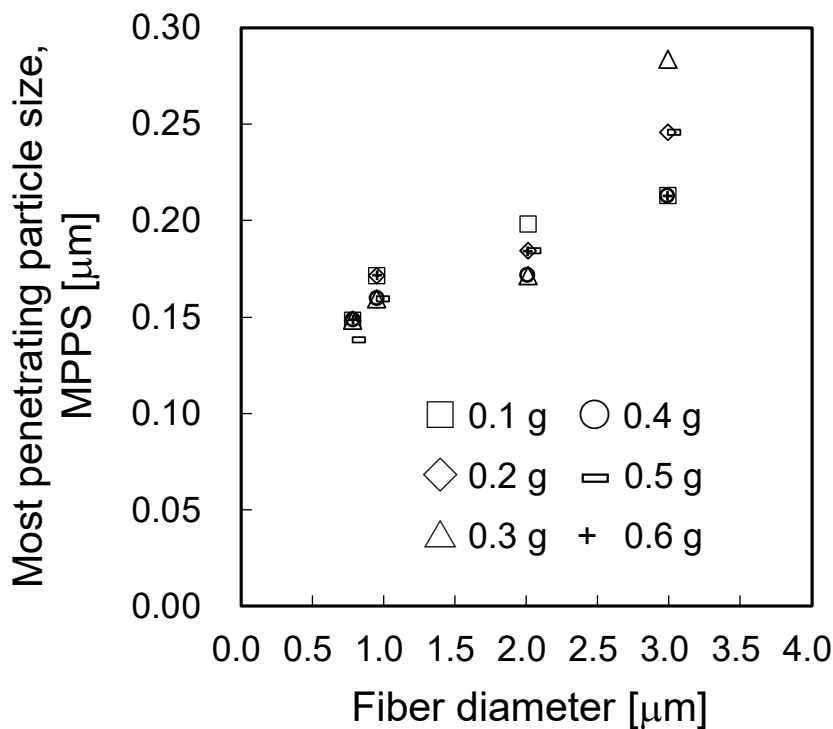
図 60 から、繊維径の増加による対数透過率の低下は、拡散が強い小粒子径側では影響が小さく、遮りが強い大粒子径側で影響が大きくなり、急激に対数透過率が低下することが示された。拡散効果と遮り効果による捕集効率の合算値($\eta_D + \eta_R$)が最も低くなる粒子径は粒子透過率が最大となるため、最大透過粒子径(Most penetrating particle size, MPPS)となる。MPPSは、フィルタの繊維径、ろ過速度等のパラメータによって変動するものの、およそ $0.15 \mu\text{m}$ になると考えられており、テストフィルタ A-D の MPPS は一般的な値である $0.15 \mu\text{m}$ に近い値となった。例えば、テストフィルタ A (繊維径 $0.78 \mu\text{m}$) の MPPS は約 $0.14 \mu\text{m}$ と低い値を示した。一方、捕集効率が低い条件であるテストフィルタ D (繊維径 $2.99 \mu\text{m}$) の MPPS は $0.28 \mu\text{m}$ と高い値を示したため、対数透過率が低い程 MPPS は増加する傾向を持つ。これは、図 60 に示すように、繊維径 d_F が増加すると、粒子径 d_p が小さい領域では、支配因子の拡散による対数透過率が低下しにくい、粒子径が大きい領域で、遮りによる対数透過率が急激に低下することが要因と考えられる。

MPPS における対数透過率は、最も厳しい条件(捕集性能が最も低い)での評価となり、フィルタの性能を安全に担保することができるため、本研究でも MPPS における対数透過率で評価する。MPPS を支配する要因は繊維径 d_F と考えられるが、繊維配合量 W_F が MPPS に与える影響を調査するため、繊維径 d_F と繊維配合量 W_F に対する MPPS の関係を図 61 に示す。図 61 (a)から、繊維配合量 W_F が増加しても、MPPS は同等で変化しないことが示された。図 61 (b)から、繊維径 d_F の増加に伴い、MPPS は顕著に増加したことが示される。図 61(a), 図 61(b)から、2.99 μm のテストフィルタ D では、MPPS が 0.21-0.28 μm と極端に大きくなる上に、繊維配合量 W_F の変化による規則性のない大きなばらつきが見られた。これは、図 55 (d)に示すように、MPPS 付近の対数透過率が極めて小さく、粒子径 d_p の変化に対する対数透過率の変化が小さいためと考えられる。よって、MPPS について、テストフィルタ全体を考慮すると、テストフィルタ A-C (0.78 μm , 0.95 μm , 2.01 μm) の中央値が望ましいと考え、0.15 μm を選定した。



(a) Correlation between weight of fibers and MPPS

Fig.61 Most penetrating particle size for test filter A-D, MPPS



(b) Correlation between fiber diameter and MPPS

Fig.61 Most penetrating particle size for test filter A-D, MPPS

繊維配合量 W_F と対数透過率($-\ln P$)の関係を図 62 に示す. 対数透過率 $-\ln P$ は配合量に対し直線的に増加した. 配合量 W_F が増加すると, 図 34(a) に示すように厚み T が増加するために, 繊維と粒子の接触確率が増加して対数透過率が上昇したと考えられる. また, 図 62 から, 繊維径が細いと配合量に対する対数透過率上昇値, すなわち 1 次式の傾きが大きいことがわかる. これは, 繊維径 d_F が細かい程, 繊維同士が密に隣合い, 図 33(b)のように充填率 α が増加するためと考えられる. 充填率 α が増加することでも繊維と粒子の接触確率は増加するため, 繊維配合量が同じでも, 対数透過率 $-\ln P$ の上昇率は高くなる.

なお, テストフィルタは一定量 0.25 g のバインダーを含むため, 図 38 では繊維配合量 0 g における点において遮光率 LSR は 0 にならず, バインダーが遮光能力に寄与することが示唆された. 一方で, 図 62 の対数透過率については, 0 g における対数透過率は 0 付近となり極めて小さい値となった. 図 62 に示す繊維配合量 W_F と対数透過率 $-\ln P$ の関係からは, 太いバインダー繊維が存在しても, 繊維と粒子の接触確率の増加にはつながらず, 対数透過率には影響しなかったものと読み取れる.

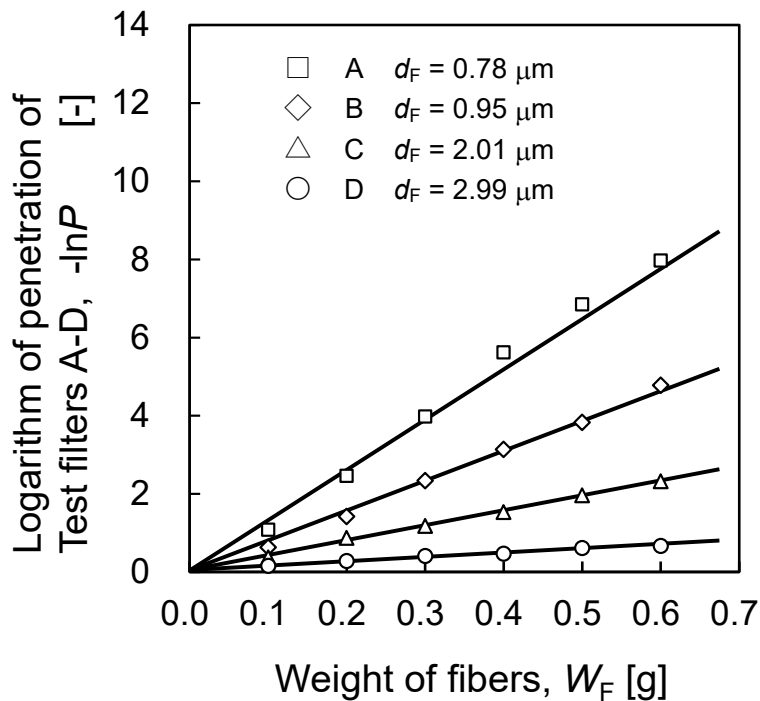
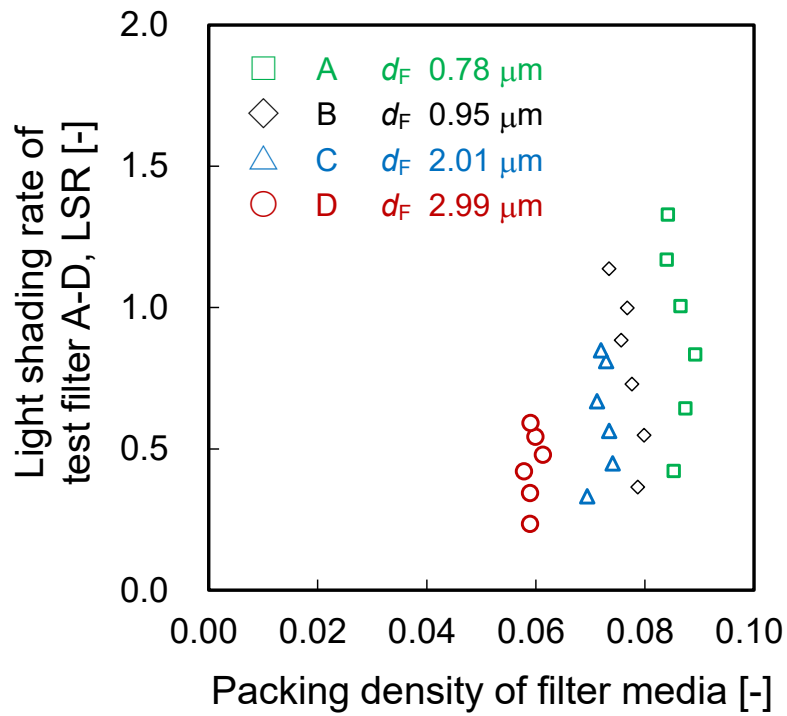


Fig.62 Correlation between weight of fibers and logarithm of penetration

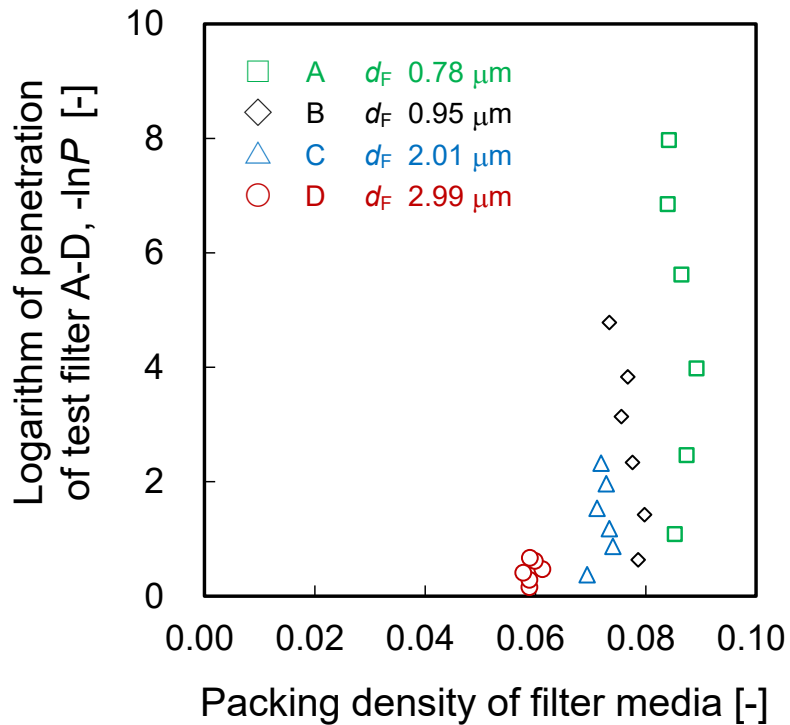
3-6 遮光率と対数透過率の相関関係

図 38 と図 62 から、遮光率 LSR と対数透過率 $-\ln P$ は、いずれも繊維配合量 W_F の増加に対し、直線的に増加することが示された。ここで、テストフィルタの充填率 α と厚み T に対する遮光率 LSR と対数透過率 $-\ln P$ の相関関係を調査した。図 63 に充填率 α に対する性能を示す。遮光率と対数透過率のいずれも、繊維径が細くなり充填率が高くなるにつれて、上昇する傾向を示した。しかしながら、各繊維径で、同じ充填率でも、遮光率と対数透過率には大きな幅が見られた。これは、配合量の違い(0.1-0.6 g)に起因し、図 33 に示すように、繊維配合量 W_F が増えても、フィルタ内の繊維構造が変化しないため充填率 α は変化しないが、図 34 に示すように、厚み T が繊維配合量 W_F に比例して増加するためと考えられる。そこで、図 64 に厚み T に対する性能を示す。遮光率 LSR と対数透過率 $-\ln P$ は、厚みの増加に対し直線的に増加することが示された。

遮光率 LSR と対数透過率 $-\ln P$ は、充填率 α と厚み T のどちらに対しても、比例して増加する相関関係を有する考えられるため、図 65 に充填率と厚みの積 αT に対する性能を示す。図 65 から、遮光率 LSR と対数透過率 $-\ln P$ は、充填率と厚みの積 αT に対して、直線的に増加する傾向を示すことが分かった。遮光率 LSR と対数透過率 $-\ln P$ は、充填率 α 、厚み T 、充填率と厚みの積 αT に対して同様の相関関係を示すため、遮光率 LSR と対数透過率 $-\ln P$ も、相関関係を有すると考えられる。

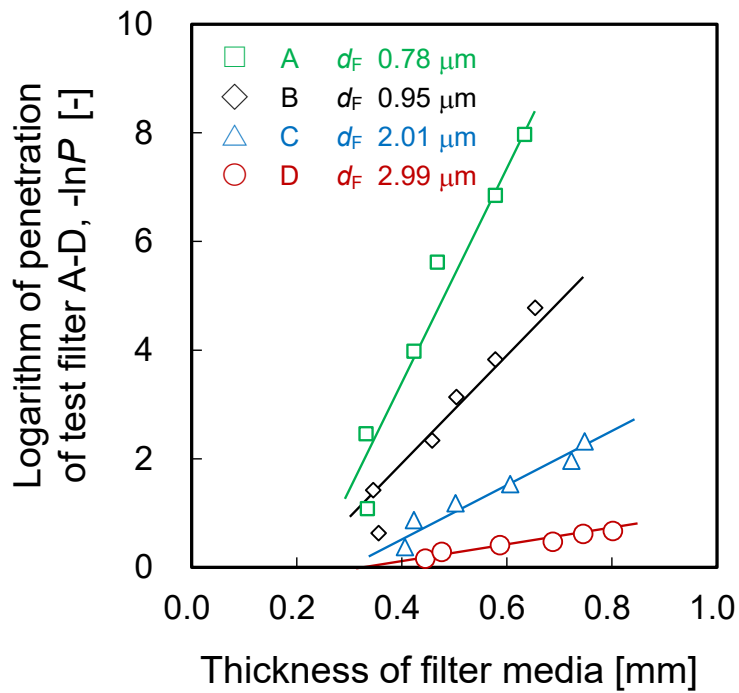


(a) Correlation between the packing density and the light shading rate

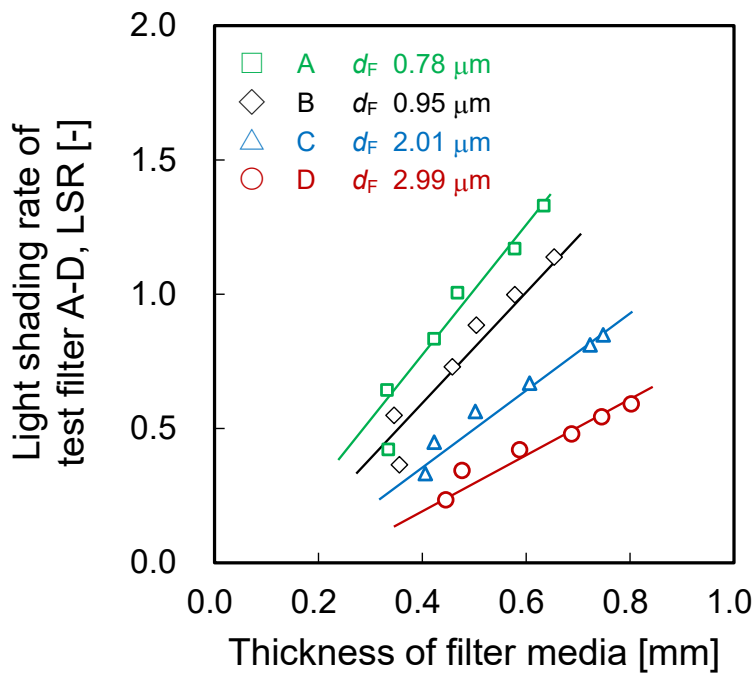


(b) Correlation between the packing density and the logarithm of penetration

Fig.63 Performances of test filter against the packing density

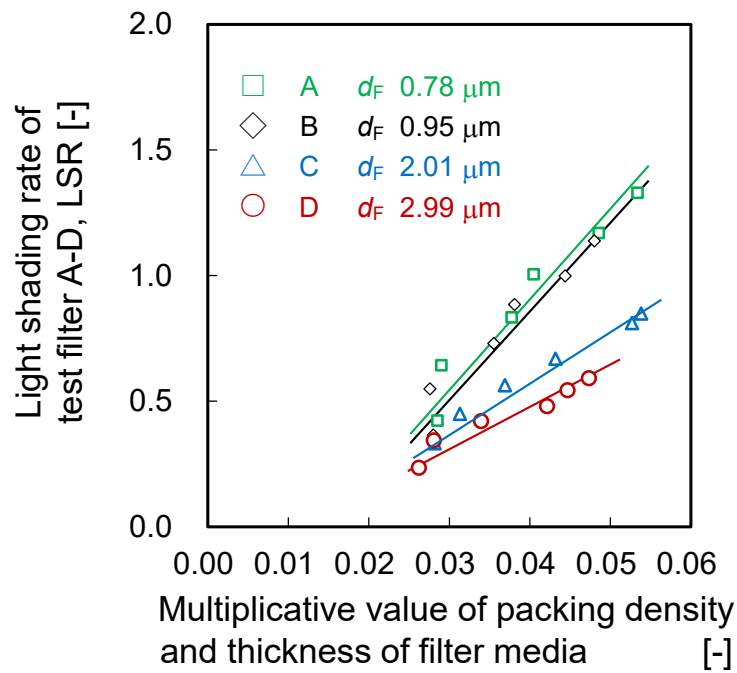


(a) Correlation between the thickness and the light shading rate

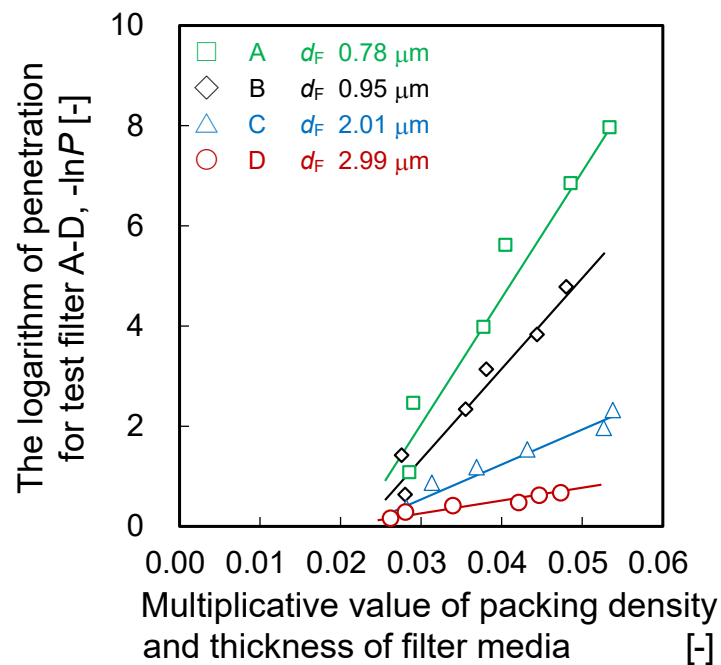


(b) Correlation between the thickness and the logarithm of penetration

Fig.64 Performances of test filter against the thickness



(a) the multiplicative value of packing density and thickness vs. the light shading rate



(b) the multiplicative value of packing density and thickness vs. the logarithm of penetration

Fig.65 Performances of test filter against the multiplicative value of packing density and thickness

遮光率 LSR と対数透過率 $-\ln P$ の関係を図 66 に示す. 対数透過率は遮光率の 2 乗に比例する結果が得られた. また, 遮光率に対する対数透過率の関係は, テストフィルタの種類ごとに異なり, フィルタを構成する繊維径 d_f が増加すると, 遮光率の増加に対する対数透過率の上昇値が低くなる傾向が見られた. そこで, 繊維径ごとに整理した遮光率に対する対数透過率の上昇値($I_{-\ln P/LSR}$)を図 67 に示す. 遮光率に対する対数透過率の上昇値 $I_{-\ln P/LSR}$ は, 繊維径に反比例し, 遮光率からの対数透過率予測式は, 式(46)で得られた.

$$-\ln P = \frac{4.8}{d_f} LSR^2 \quad (46)$$

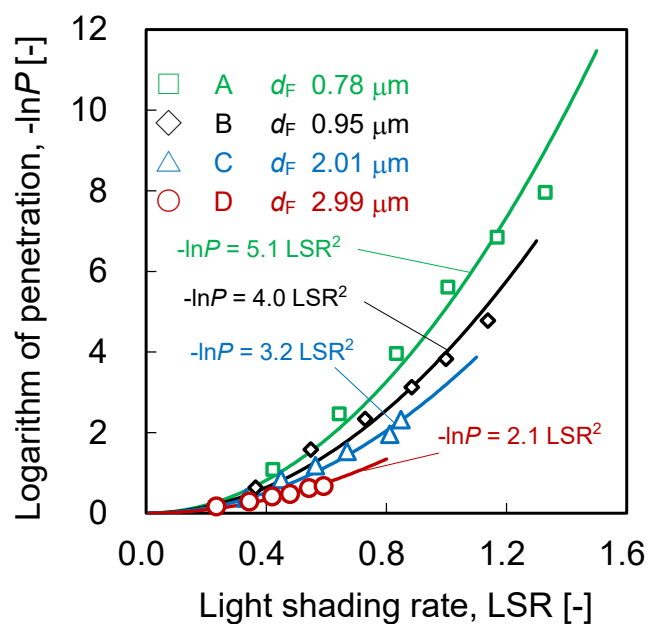


Fig.66 Correlation between LSR and logarithm of penetration

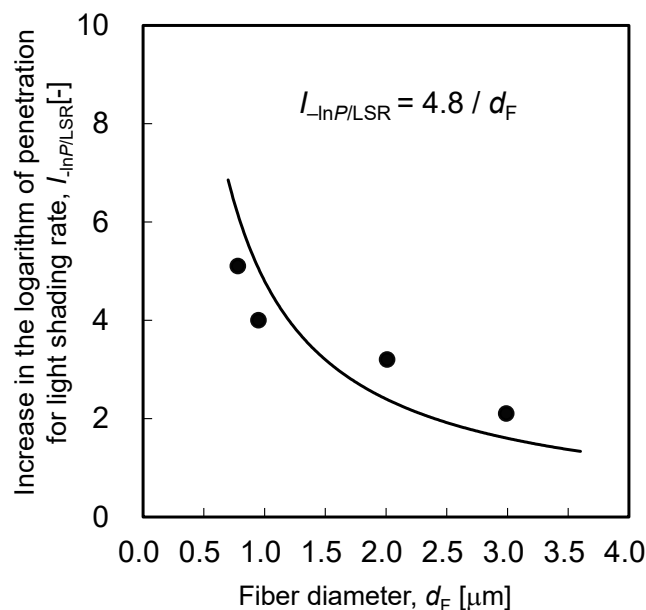


Fig.67 Correlation between fiber diameter and increase in the logarithm of penetration for LSR

ここで、対数透過率 $-\ln P$ が遮光率 LSR の 2 乗に比例し、遮光率に対する対数透過率上昇値 $I_{-\ln P/LSR}$ が繊維径 d_F に反比例する要因を考察する。まず遮光率 LSR の 2 乗に比例する理由から述べる。対数透過率と遮光率はどちらも、繊維配合量の増加に伴い、直線的に増加することが、図 38 及び図 62 から示されている。一方で、遮光率と対数透過率の関係において、対数透過率が遮光率 2 乗に比例するという事は、遮光率が 1 未満の領域では、遮光率の上昇値が対数透過率を超え、遮光率が 1 以上の領域では、対数透過率の上昇値が遮光率を超えることを意味する。つまり、遮光率は一定の領域までは上昇しやすいが、その領域を超えると上昇率が低下し収束することを示す。遮光率が一定の領域(遮光率 1)に達するまで上昇しやすい理由は、対数透過率が繊維と粒子の接触確率に支配されるため、フィルタの厚み方向に対し多数の繊維が充填されていないと粒子が容易に透過してしまうのに対し、遮光率はフィルタ厚み方向に対し、繊維が 1 本でも存在すればある程度の遮光が可能のためと考えられる。一方で、対数透過率と遮光率が一定の領域(遮光率 1)を超えると、フィルタの厚み方向の繊維数は無数に存在するため、対数透過率は繊維数に比例して上昇し、捕集効率(百分率)で 100 % 近くまで上昇する。一方で遮光率に関しては、ガラス繊維による光散乱も発生するため、フィルタの厚み方向の繊維が無数に存在しても、完全に遮光することはできず、百分率においては 100 % 付近に達しないという仮説を立てた。

この仮説が正しいかを確認するため、厚み T 、充填率 α 、繊維径 d_F 等の情報から、厚み方向における繊維本数を調べる必要がある。そこで、同じ径の繊維が等間隔で均一に充填したと仮定した繊維の充填状態を図 68 に示す。図 68 から、繊維の充填率 α は、繊維径 d_F と繊維同士の繊維間距離 (D_i) を使用し式(47)で示される。式(47)の式変形によって、繊維間距離 D_i は式(48)で求められる。また厚み方向における繊維本数(N_F)は式(49)のとおり、厚み T を繊維間距離 D_i で除することで求められる。テストフィルタ A-D の繊維径 d_F 、繊維の充填率 α 、厚み T は既知であるため、算出した厚み方向における繊維本数 N_F を図 69 に示す。同じ配合量の場合、繊維径が細くなるにつれて繊維本数が多くなることと、配合量に比例して繊維本数が増えることが示された。

$$\alpha = \pi(d_F/2)^2 / D_i^2 \quad (47)$$

$$D_i = d_F/2 \sqrt{\pi/\alpha} \quad (48)$$

$$N_F = \frac{T}{D_i} = \frac{2T}{d_F \sqrt{\pi/\alpha}} \quad (49)$$

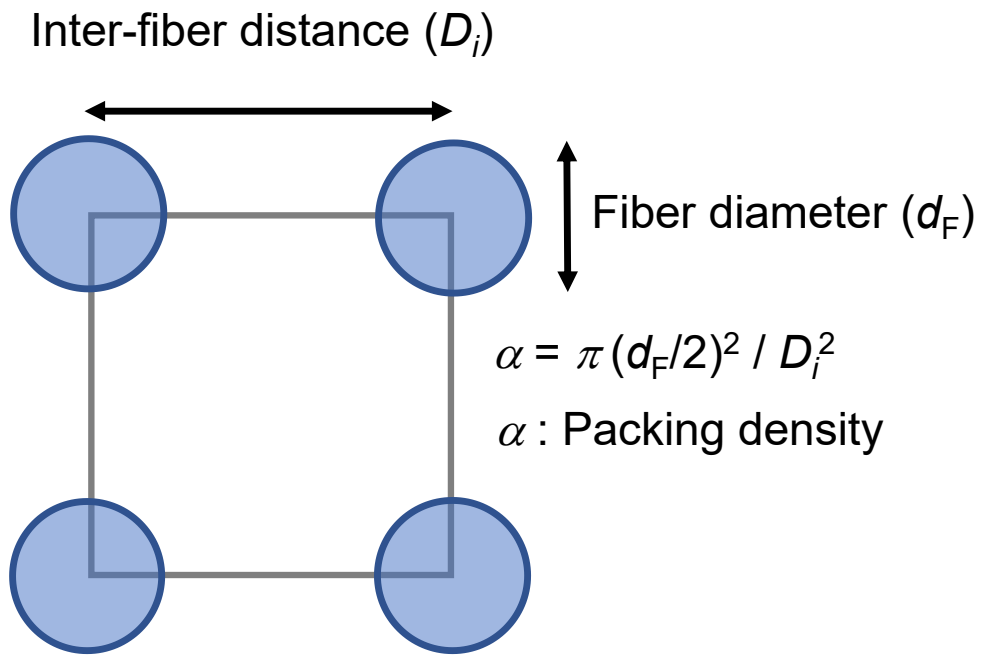


Fig.68 The image of packing density with fiber diameter and inter-fiber distance

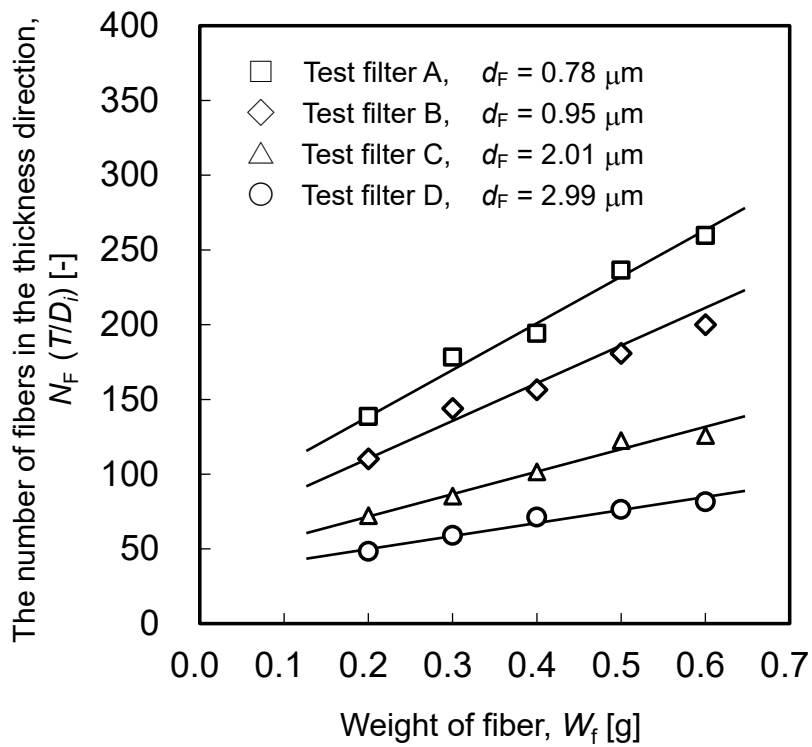


Fig.69 The number of fibers in the thickness direction of test filters A-D

それぞれ対数透過率 $-\ln P$ と遮光率 LSR の測定値を厚み方向の繊維本数で除することで、繊維 1 本当りの対数透過率 $-\ln P/\text{fiber}$ と繊維 1 本当りの遮光率 LSR/fiber を得た(図 70, 図 71 参照). 繊維 1 本当りの対数透過率 $-\ln P/\text{fiber}$ は、繊維径が細い程高い. また、配合量 W_F の増加に伴い徐々に傾きは小さくなるものの、繊維当たりの対数透過率 $-\ln P/\text{fiber}$ は配合量 W_F に比例して増加する関係が示された. 一方で、繊維 1 本当りの遮光率 LSR/fiber は、繊維径が細い程低い. また、繊維 1 本当りの遮光率 LSR/fiber は、配合量 W_F が 0.2 g に達するまでは比例して上昇するものの、0.2 g を超えてからは、配合量 W_F が増加しても同等の値を示した. よって、繊維 1 本当りの性能に着目すると、対数透過率 $-\ln P/\text{fiber}$ は繊維量 W_F の増加に伴い上昇し続けるが、遮光率 LSR/fiber は繊維量 W_F が増加しても、一定の値に収束することが示された.

上記の結果から、仮説のとおり、対数透過率 $-\ln P$ が遮光率 LSR の 2 乗に比例する要因は次の通りと考えられる. 繊維 1 本当りの遮光率 LSR/fiber は対数透過率 $-\ln P/\text{fiber}$ と比べ、一定の領域(遮光率 1)までは上昇しやすい傾向を持つ. これは、対数透過率が厚み方向に多数存在する繊維の捕集能力の積算で示されるために、繊維 1 本では粒子をほとんど捕集できないが、遮光率は光の遮りであるため、厚み方向に 1 本でも繊維が存在すればある程度の遮光が可能で、粒子捕集より遮光能力が強く働くためと考えられる. 一方で、一定の領域(遮光率 1)を超えてからは、遮光率より対数透過率の方が上昇しやすい傾向を持つ. この理由は、遮光率においては、ガラス繊維の表面で光散乱が発生するため、厚み方向において無数の繊維が存在しても、完全に遮光することが困難であるためと考えられる.

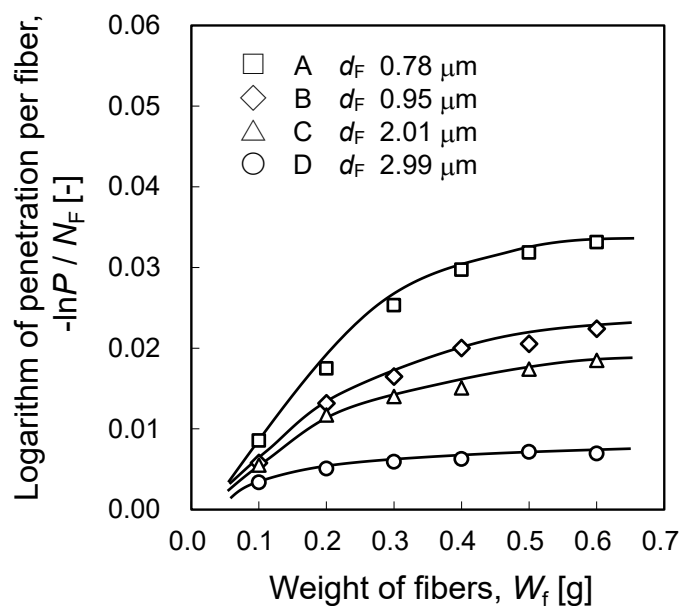


Fig.70 Logarithm of penetration per fiber, $-\ln P/N_F$

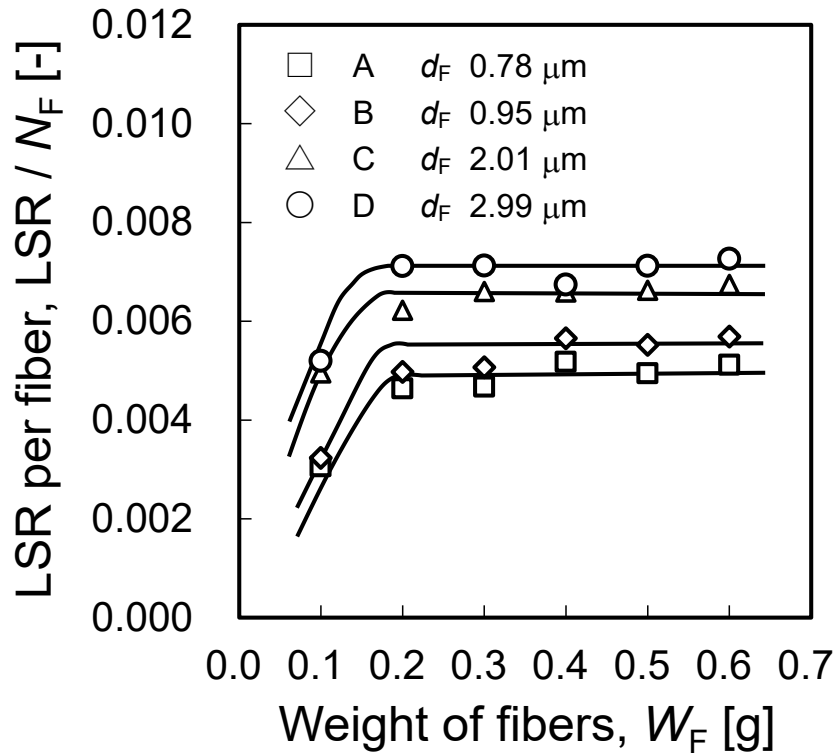


Fig.71 Light shading rate per fiber, LSR/N_F

次に、遮光率に対する対数透過率($I_{\ln P/LSR}$)が繊維径 d_F に反比例する要因を知るために、4種類のテストフィルタについて、単一繊維の捕集効率の理論式による計算値を用いて考察した。使用した繊維径 d_F として、 $0.78 \mu\text{m}$ 、 $0.95 \mu\text{m}$ 、 $2.01 \mu\text{m}$ 、 $2.99 \mu\text{m}$ の4値と評価対象のMPPSとなる粒子径 d_p $0.15 \mu\text{m}$ を式(1)と式(4)に代入することで、ペクレ数 Pe と遮りパラメータ R を求め、拡散による単一繊維の捕集効率予測値 η_D と遮りによる捕集効率予測値 η_R を図72に示す。また、図72から得られたMPPSである粒子径 d_p $0.15 \mu\text{m}$ における繊維径 d_F に依存する拡散による単一繊維の捕集効率予測値 $\eta_{D \text{ at MPPS}}$ と遮りによる単一繊維の捕集効率予測値 $\eta_{R \text{ at MPPS}}$ の関係は、式(50)と式(51)で示される。

$$\eta_{D \text{ at MPPS}} = 0.10 d_F^{-2/3} \quad (50)$$

$$\eta_{R \text{ at MPPS}} = 0.19 d_F^{-1} \quad (51)$$

単一繊維の捕集効率 η_D の支配因子はペクレ数 Pe であり、ペクレ数は式(1)に示すとおり、繊維径 d_F に 1 次比例する。従って、式(23)に示す η_D がペクレ数 Pe の $-2/3$ 乗に比例することからも、式(50)に示す MPPS $0.15 \mu\text{m}$ におけるテストフィルタの拡散による単一繊維の捕集効率予測値 $\eta_{D \text{ at MPPS}}$ が繊維径 d_F の $-2/3$ 乗に比例することは妥当である。次に、単一繊維の捕集効率 η_R の支配因子は遮りパラメータ R であり、遮りパラメータ R は式(4)に示すとおり、繊維径 d_F の -1 乗に比例する。従って、式(24)に示す η_R が遮りパラメータ R に比例することからも、式(51)に示す MPPS $0.15 \mu\text{m}$ におけるテストフィルタの遮りによる単一繊維の捕集効率予測値 $\eta_{D \text{ at MPPS}}$ が繊維径 d_F の -1 乗に比例することは妥当である。ここで、合計の単一繊維による捕集効率予測値 $\eta_{D+R \text{ at MPPS}}$ は、拡散による単一繊維の捕集効率予測値 $\eta_{D \text{ at MPPS}}$ と遮りによる単一繊維の捕集効率予測値 $\eta_{R \text{ at MPPS}}$ の和で示され、式(52)に示すように、繊維径の -1 乗に比例する式で得られた。 $0.15 \mu\text{m}$ においては、 $\eta_{R \text{ at MPPS}}$ が $\eta_{D \text{ at MPPS}}$ の 2 倍程度高く、繊維径の -1 乗に比例する $\eta_{R \text{ at MPPS}}$ が支配的な影響を示したと考えられる。

$$\eta_{D+R \text{ at MPPS}} = 0.31 d_F^{-1} \quad (52)$$

式(52)と図 72 から、MPPS $0.15 \mu\text{m}$ におけるテストフィルタにおける単一繊維の捕集効率は繊維径の -1 乗に比例して減少することが示されたため、この現象が、式(46)において、遮光率に対する対数透過率上昇値 ($I_{\ln P/LSR}$) が繊維径 d_F の -1 乗に比例した要因と考えられる。

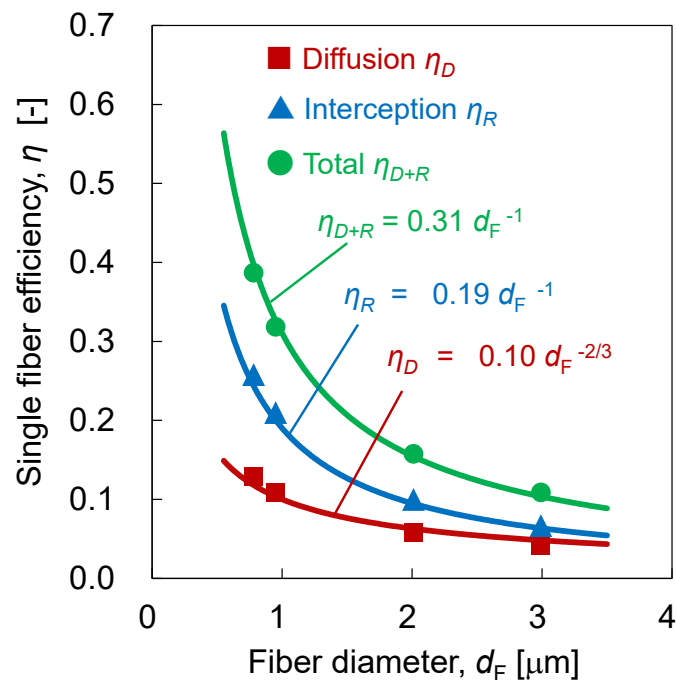


Fig.72 Correlation between Fiber diameter and single fiber efficiency at MPPS

3-7 予測式の妥当性確認

フィルタの対数透過率を予測する上で、相対誤差 0% で予測できることが最善であるものの、対数透過率の測定自体にも一定の誤差は存在するため不可能である。そこで、予測式による相対誤差の許容範囲を設定する必要がある。算出した相対誤差が、実際の防塵マスク用フィルタの捕集効率のバラツキの範囲内であれば十分な予測精度であるものと考えた。そこで、フィルタメーカーの防塵マスク用製品の AFT8130A における 120 個の測定データを調査し、バラツキの程度(Degree of Fluctuation, DF)を調査した。対数透過率の測定値($-\ln P_{\text{indiv.}}$)とその平均値($-\ln P_{\text{Avg.}}$)を用い式(53)から算出した。

$$DF = \left(\frac{-\ln P_{\text{indiv.}} - -\ln P_{\text{Avg.}}}{-\ln P_{\text{Avg.}}} \right) \cdot 100 \quad (53)$$

図 73 に示す性能分布において、120 個の測定データの内、114 個 (95%) が $\pm 15\%$ の範囲に収まっているため、相対誤差は 15% 以内であれば、性能予測の目標値として妥当であると考えた。

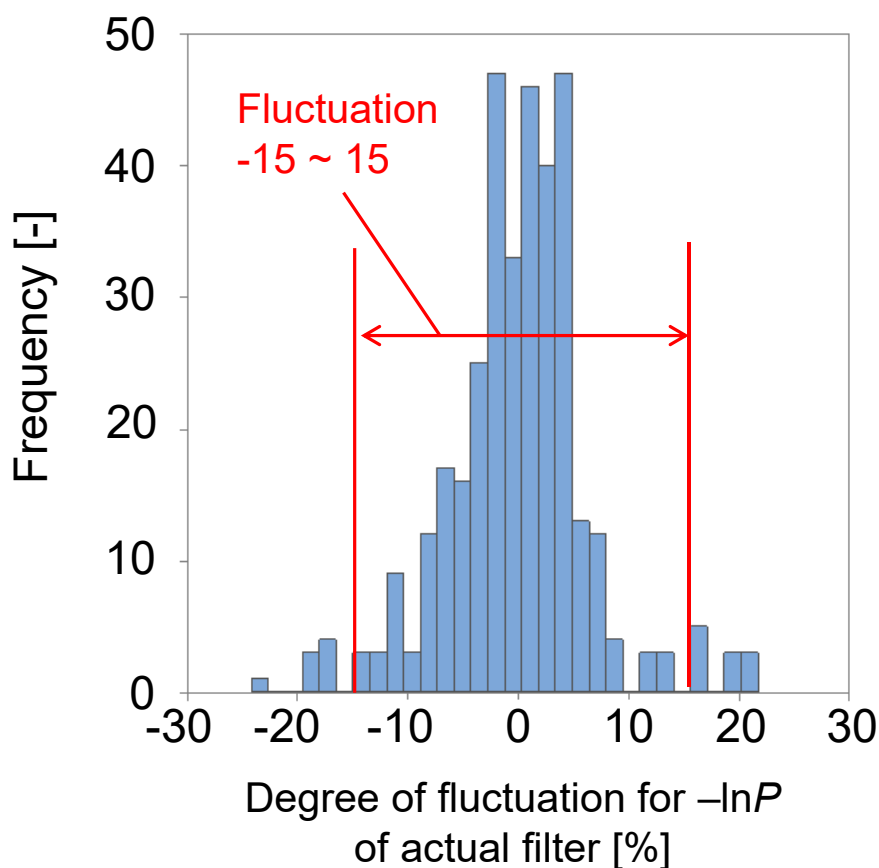


Fig.73 Fluctuation for Logarithm of penetration for actual filters

テストフィルタ A-D について、構築した実験式の式(46)を使用し、測定した遮光率 LSR から算出した対数透過率と実測した対数透過率を比較した(図 74 参照)。また、構築した実験式の妥当性を確認するために、式(54)のとおり、対数透過率の実験値(-lnP_{Meas.})と実験式からの計算値(-lnP_{Calc.})の差の絶対値を実測値で除することで、相対誤差 (Relative error, RE)を求めた(表 9 参照)。なお、図 74 には、比較対象として、Kirsch ら(1978)による FMF の理論式による計算値を示す。

$$RE = \frac{(|-\ln P_{Meas.} - \ln P_{Calc.}|)}{-\ln P_{Meas.}} \cdot 100 \quad (54)$$

構築した実験式から求めた -lnP 計算値の実験値に対する相対誤差の平均値は 23.4 %となり、相対誤差が 52.4 %である FMF の理論式よりも精度が大幅に改善したと言える。FMF 理論の理論式からの計算値は実測値よりも過小評価されており、理論上はすべての繊維が流れ方向に対して垂直に配向していることを前提としているが、実際には必ずしもすべての繊維が垂直であるとは限らないためと考えられる。一方で構築した実験式は実測した遮光率と対数透過率の相関関係をベースに構築したため、表 9 に示すとおり、相対誤差は小さく、テストフィルタ A (繊維径:0.78 μm)で 13.6 %、テストフィルタ B (繊維径:0.95 μm)で 20.4 %、テストフィルタ C (繊維径:2.01 μm)で 31.1 %、テストフィルタ D (繊維径:2.99 μm)で 28.4 %となった。このことから、遮光率と対数透過率の測定は正確に実施され、相関関係を正確に把握できたものと考えられる。しかしながら、予測精度の目標値である 15 %以下を満足したのは、テストフィルタ A のみであった。これは、遮光率に対する対数透過率が繊維径に反比例して低下するため、それを繊維径により補正する式(46)を構築したものの、補正が十分ではなかったものと考えられる。

また、第 4 章で詳細を示すように、実際の防塵マスク用エアフィルタには、複数の繊維で構成されることがしばしばある。遮光率 LSR による捕集効率の予測は繊維径 2 μm 以下のフィルタに対しては有用であると考えられるが、それ以外の繊維径や複数の繊維で構成されるエアフィルタに適用させることは困難であると考えられる。

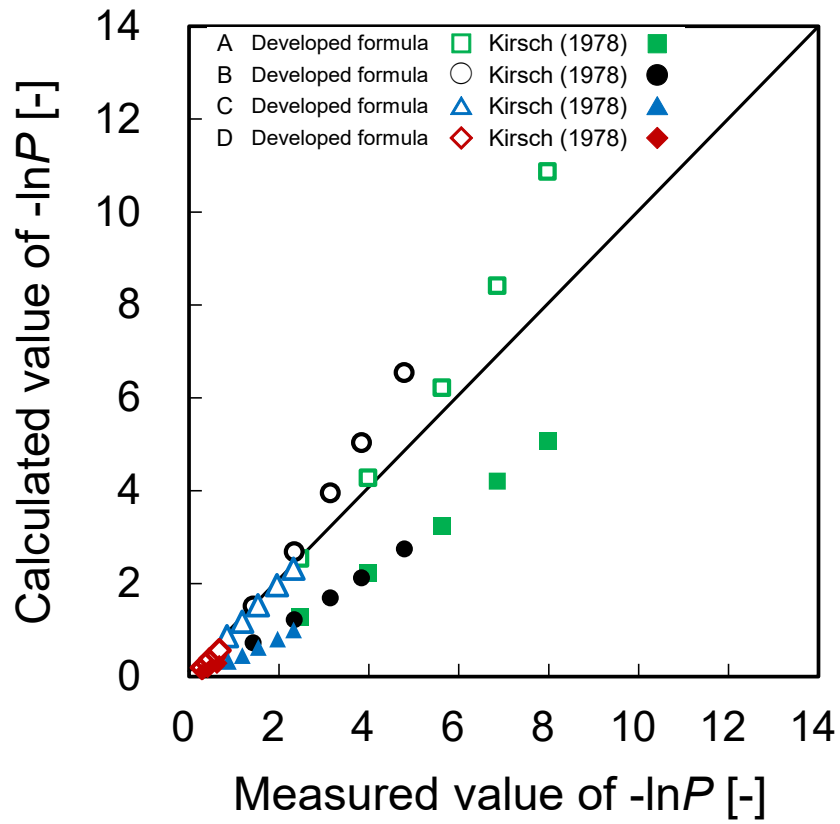


Fig.74 Comparison of measured $-\ln P$ and calculated one

Table 9 Relative error for logarithm of penetration

Test filter	Fiber diameter [μm]	Mean relative error [%]	
		Developed formula	Kirsch (1978)
A	0.78	13.6	41.7
B	0.95	20.4	45.8
C	2.01	31.1	60.0
D	2.99	28.4	61.9
Avg.	1.68	23.4	52.4

第4章 2種の繊維径を考慮した対数透過率の予測

4-1 実用エアフィルタの仕様

第3章において、単一径の繊維で構成されるフィルタの捕集効率を予測するための既存の理論式はその精度が極めて低いことについて述べた。また、新しい概念としてフィルタ繊維の光を遮るパラメータに着目し、遮光率 LSR による予測を検討したところ、その相対誤差は 23.4 % となり、既存の理論式の相対誤差(52.4 %)よりも低下した。しかしながら、予測精度の目標値である 15 % 以下を満足せず、実際のエアフィルタへの適用は困難であると分かった。

さらに、実際のエアフィルタに適した予測式を構築するために、実際の防塵マスク用に使用されるメカニカルフィルタに使用する繊維について述べる。メカニカルフィルタは、そのデメリットである通気抵抗の高さを低減するために、ろ過面積を稼げるプリーツ構造となることが多い。プリーツフィルタの折畳構造を保持するために、実際のフィルタには機械的な強度も求められる^[62]。捕集効率を示す式(41)から、捕集効率の向上には細い繊維が有利であると言えるが、フィルタの強度を高めるには、強直な太い繊維が必要である。以上の背景から、防塵マスク用メカニカルフィルタは、以下2種の繊維を組み合わせで製造されることがしばしばある^[62-65]。

- Coarse fiber (CF) : 繊維径 0.7 μm 以上
- Fine fiber (FF) : 繊維径 0.7 μm 未満

2種の繊維で構成されるフィルタに FMF の理論式である式(41)を適用させることはできない。2種の繊維径の平均値等を用い、簡易的に代表繊維径を決定すれば、理論式に当てはめること自体は可能となる。ここで、Brown(2001)は2種の繊維で構成されるフィルタの代表繊維径を求める方法として、CF, FF の繊維径をそれぞれ d_{CF} , d_{FF} 、繊維数をそれぞれ n_{CF} , n_{FF} と定義し、式(55)に示す数平均繊維径、面積平均繊維径、堆積平均繊維径を提案している^[64]。

$$d_{eq}^{(\alpha)} = \frac{n_{CF}d_{CF}^{\alpha} + n_{FF}d_{FF}^{\alpha}}{n_{CF}^{\alpha-1} + n_{FF}^{\alpha-1}} \quad (55)$$

$\alpha = 1$: Number-weighted average

$\alpha = 2$: Area-weighted average

$\alpha = 3$: Volume-weighted average

Jagnathan (2008)は、実際に2種の繊維径で構成されるフィルタについて式(55)による数平均繊維径、面積平均繊維径、堆積平均繊維径を表10のとおり算出した^[65]。

Table 10 Representative fiber diameter of a filter composed of fibers with two different diameters^[65]

Number of fibers of each diameter		Number-weighted average diameter	Area-weighted average diameter	Volume-weighted average diameter
80.00 μm	40.00 μm			
4	0	80.00	80.00	80.00
3	1	70.00	74.29	76.92
2	2	60.00	66.67	72.00
1	3	50.00	56.00	62.86
0	4	40.00	40.00	40.00

しかしながら、求めた代表繊維径を式(21)に代入して求めた通気抵抗計算値と実測値には乖離があり、CFの繊維径(d_{CF})とFFの繊維径(d_{FF})の差が大きいとその乖離が大きくなることを報告した。式(55)によって求めた代表繊維径は精度が低いと考えられる。Tafreshi (2009)は式(55)は繊維の本数、面積、堆積に加重をおいて、平均値を単純に求めていることが問題と考え、繊維長平均値を提案した^[66]。繊維長平均値 d_L は、繊維径と充填率 α の比から式(56)で示される。

$$\frac{1}{d_L^2} = \frac{\alpha_{CF}}{\alpha} \frac{1}{d_{CF}^2} + \frac{\alpha_{FF}}{\alpha} \frac{1}{d_{FF}^2} \quad (56)$$

CFとFFの密度が同じであれば、式(57)のとおり充填率の比(α_i/α)は質量比(W_i/W)に等しいため、式(56)は式(58)に変形できる。

$$\alpha_i/\alpha = W_i/W \quad (57)$$

$$\frac{1}{d_L^2} = W_{CF} \frac{1}{d_{CF}^2} + W_{FF} \frac{1}{d_{FF}^2} \quad (58)$$

それぞれの質量 W_{CF} と W_{FF} は式(59)及び式(60)で表わされるため、繊維長平均値を示す式(61)が成立する。

$$W_{CF} = \frac{n_{CF} d_{FF}^2}{n_{CF} d_{CF}^2 + n_{FF} d_{FF}^2} \quad (59)$$

$$W_{FF} = \frac{n_{FF} d_{CF}^2}{n_{CF} d_{CF}^2 + n_{FF} d_{FF}^2} \quad (60)$$

$$d_L = \frac{d_{CF} d_{FF}}{\sqrt{n_{FF} d_{CF}^2 + n_{CF} d_{FF}^2}} \quad (61)$$

ここで、2種の繊維で構成されるエアフィルタで、実際の捕集効率に加え、繊維の径と配合量すなわち本数の比が既知である試料を用いて、数平均、面積平均、堆積平均、繊維長平均のそれぞれによる代表繊維径を算出した。それぞれの代表繊維径を式(41)に代入することで、対数透過率の計算値を図75に示すとおり求めた。Tafreshi(2009)が提唱したように、式(61)に示す繊維長平均値の精度が最も高かったものの、その相対誤差(49.3%)は単一繊維で構成されるフィルタの相対誤差(44.5%)より大きかった。2種の繊維で構成される実用エアフィルタの捕集効率を予測することは単一繊維のフィルタよりも困難であると言える。

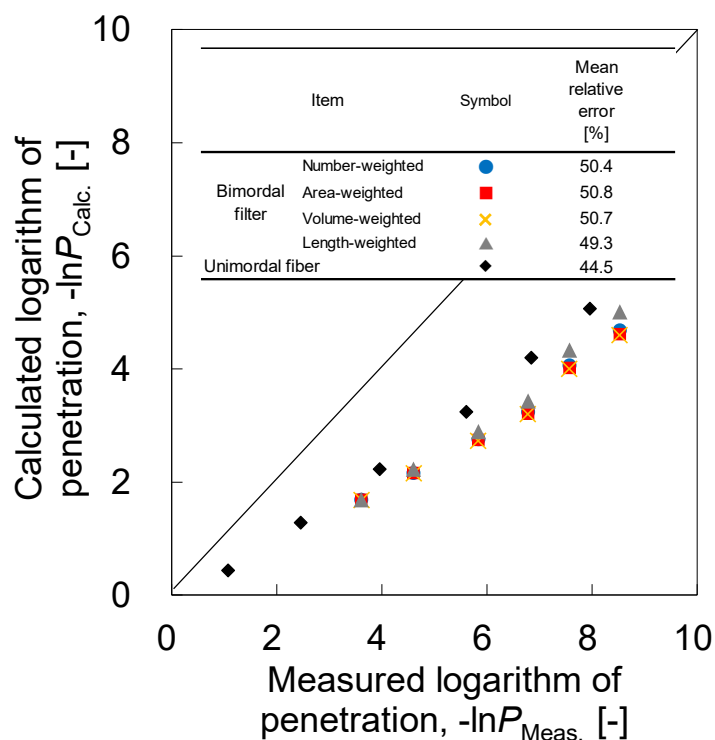


Fig.75 Measured and calculated logarithm of penetration for air filters composed of two types of fibers.

結論として、FMFの理論式は捕集効率の予測精度が低い上に、実際のメカニカルフィルタは繊維径が異なるCF、FFの2種で構成されており、代表繊維径をFMFの理論式に当てはめて捕集効率を算出すると、単一繊維のフィルタと比べて精度はさらに低下すると言える。

ここで、防塵マスクメーカーのフィルタ製造プロセスに改めて着目すると、CFとFFの繊維径と配合量を調整して新製品の試作品を作製しているが、開発者の感覚や経験等が主な根拠となっていることがあり、繊維径と配合量を変えた際の捕集効率の挙動は明確になっていない。第3章においては、Coares fiber (CF)の繊維径に該当する単一径の繊維フィルタ(0.78, 0.95, 2.01及び2.99 μm)の繊維充填率 α 、厚み T 、遮光率LSR、対数透過率 $-\ln P$ を評価したが、本章において、FFの影響も調査することとした。しかしながら、図26に示す抄紙器を使用し、FFのみで抄紙すると厚みが薄く、強度が低くなるため、作製できなかった。

そこで、第3章で述べた4種の繊維と同じもの(4種のCF)を強度増加のための骨組みとし、一定量配合した上で、3種の繊維径のFFを用い、FFの配合量を一定量0.02gずつ増加させることで、フィルタの厚み、充填率、対数透過率への影響を調査することとした。さらに、CFとFFそれぞれの繊維径、配合量等から実用フィルタの捕集効率を正確に推定する予測式の構築を目指した。

4-2 テストフィルタ作製

表11に示すように、繊維径が0.8-2.7 μm のCF4種と、繊維径が0.33-0.65 μm のFF3種を選択した。ただし、第3章と同様に Brunauer Emmett Teller (BET)法によって求めた比表面積からの交渉値でしかないため、走査型電子顕微鏡:SEM(Model Phenom ProX, Thermo Fisher SCIENTIFIC)で図76のとおり繊維径を実測し、各種1000値の平均値を代表繊維径として扱った。

Table 11 Fiber diameter of CF and FF for test filter

		Fiber diameter [μm]						
Glass fiber		Coarse fiber, CF				Fine fiber, FF		
		C1	C2	C3	C4	F1	F2	F3
BET (Manufacturer data)	Mean diameter	0.80	1.00	1.80	2.70	0.33	0.50	0.65
SEM	Mean diameter	0.78	0.95	2.01	2.99	0.42	0.52	0.65

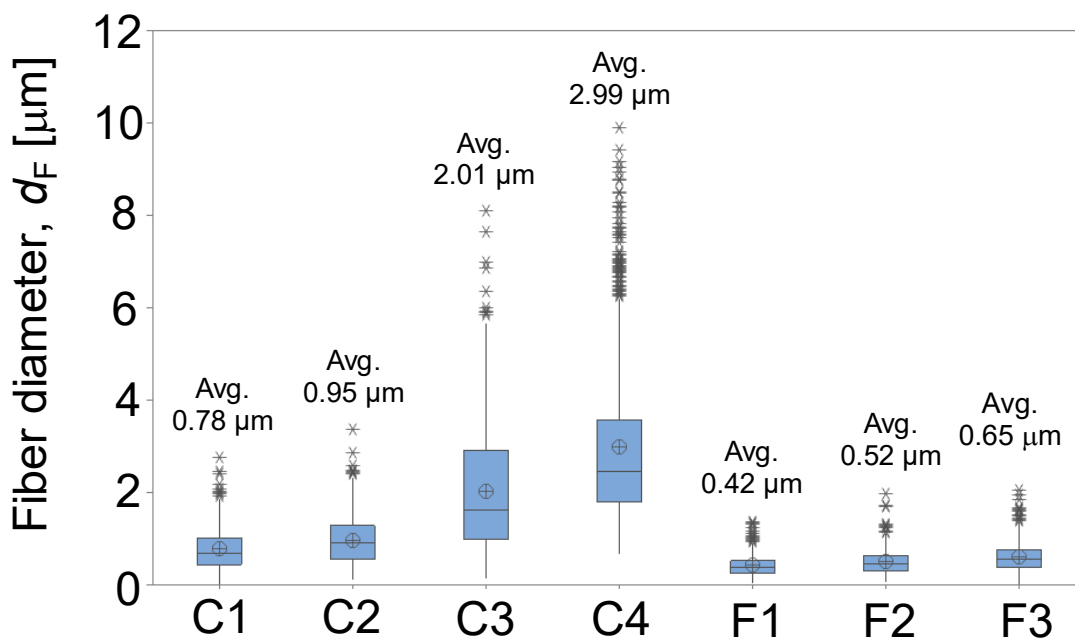


Fig.76 Fiber diameter measured with SEM

テストフィルタは表 12 に示す 12 種類を作製した。テストフィルタ E-P は、CF 配合量(W_{CF}) は 0.25 g で一定とし、FF の配合量(W_{FF})は 0.00 g から 0.10 g まで 0.02 g ずつ増加させた。なお、FF のみのテストフィルタ作製も検討したが、繊維が細すぎるために強度が弱く、作製することができなかった。第 3 章で報告(表 8 参照)したテストフィルタ A-D (d_{CF} : 0.78, 0.95, 2.01, 2.99 μm)は CF のみで構成されるテストフィルタとなり、CF が性能に与える影響を議論する上で必須であるため、本章において再度、その性能について述べる。

Table 12 The fiber diameter and weight of CF and FF for test filters E-P

Test filter	Weight of fibers [g]							Binder
	Coarse Fiber (CF)				Fine Fiber (FF)			
	C1 (0.78 μm)	C2 (0.95 μm)	C3 (2.01 μm)	C4 (2.99 μm)	F1 (0.42 μm)	F2 (0.52 μm)	F3 (0.65 μm)	
E					0.00 - 0.10	-	-	
F	0.25	-	-	-	-	0.00 - 0.10	-	
G					-	-	0.00 - 0.10	
H					0.00 - 0.10	-	-	
I	-	0.25	-	-	-	0.00 - 0.10	-	
J					-	-	0.00 - 0.10	0.25
K					0.00 - 0.10	-	-	
L	-	-	0.25	-	-	0.00 - 0.10	-	
M					-	-	0.00 - 0.10	
N					0.00 - 0.10	-	-	
O	-	-	-	0.25	-	0.00 - 0.10	-	
P					-	-	0.00 - 0.10	

図 77 は、SEM で測定されたテストフィルタ E-P の外観を示している。すべての画像で見られる直径が 10 μm を超える繊維はバインダーである。また、CF のみのテストフィルタ A-D と同様に、バインダーが直径数マイクロメートル程のガラス繊維を巻き込んで接着させており、ほとんどの繊維はフィルタメディア内に均一に分散していることがわかる。ただし、テストフィルタ A-D の SEM 画像 (図 29) と比べ、繊維径の細い FF を配合しているため、全体的に繊維径が細いことがわかる。

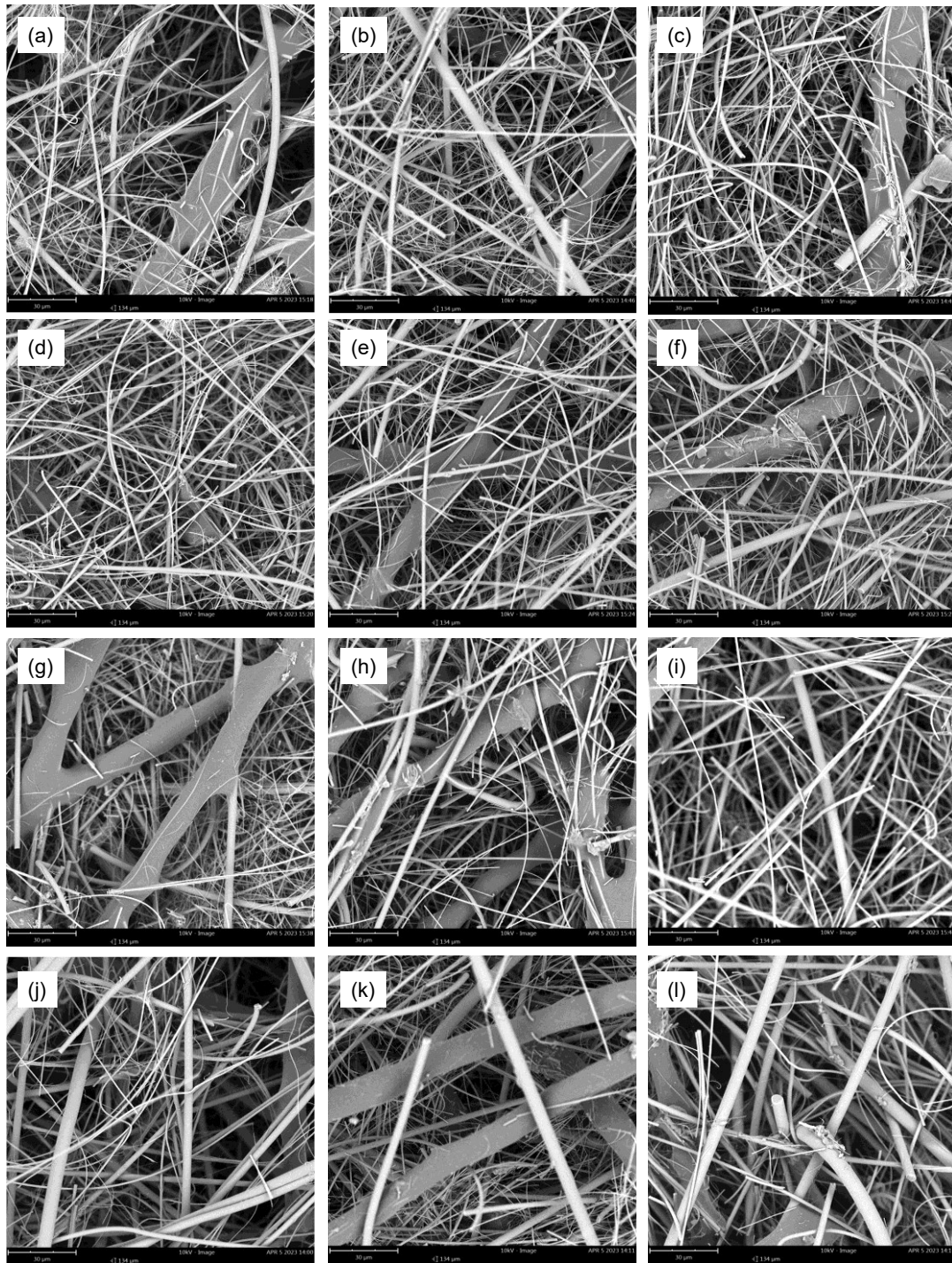


Fig.77 Scanning electron microscope (SEM) image of (a)-(l) test filters E-P
(Coarse fiber 0.25 g, Fine fiber 0.10 g)

4-3 繊維充填率と厚み測定

テストフィルタ E-P は、フィルタ性能に対する FF の繊維径 d_{FF} と配合量 W_{FF} の影響を調査するために作製した。そこで、FF の配合量に対するテストフィルタ E-P の充填率 α を図 78 に示す。CF と FF のいずれも繊維径が細くなるにつれ充填率 α が増加した。これは、CF のみで構成されるテストフィルタ A-D と同様に繊維径が細い程、より緻密に充填するためと考えられる。さらに、FF の配合量の増加に伴い充填率 α は増加した。これは、一定量 0.25 g 配合されている繊維径の太い CF に対し、繊維径の細い FF が増加することで、全体量の内、細い繊維の比率が増えて平均繊維径が細くなるためと考えられる。

次に FF の配合量 W_{FF} に対するテストフィルタ E-P の厚み T を図 79 に示す。CF の繊維径が太くなるにつれ厚みが増加する傾向を示した。これは CF のみで構成されるフィルタと同じ傾向であると言える。一方で、FF の繊維径が厚みに与える影響は小さい。さらに FF の配合量が増加しても、厚みはわずかに上昇するだけで、FF の配合量の影響も小さいことが示された。これは CF(繊維径 0.78-2.99 μm) に対して、FF(0.42-0.65 μm) は細いためと考えられる。ここで、CF と FF で構成されるフィルタの内部構造として、CF と FF の配置を考察する。CF は太く剛直な繊維であるため、フィルタの骨格を成すようにフィルタ内に配置され、繊維と繊維の間には大きな空隙が生じているものと予想される。太い CF で構成されているフィルタに細い FF が配合されると、FF は CF 同士の繊維間に存在する大きな隙間を埋めるように配置されると考えられる。従って、FF は空隙を埋めるだけであり、FF の配合量を増やしても厚みの増加には寄与せず、充填率の増加のみに寄与している可能性があると考えられる。

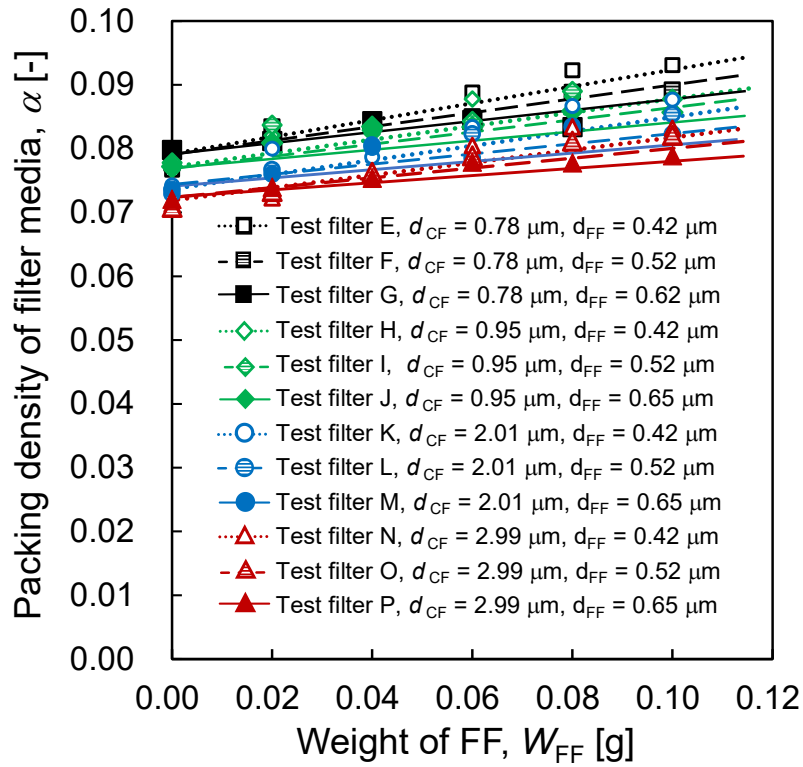


Fig.78 Correlation between weight of FF and packing density

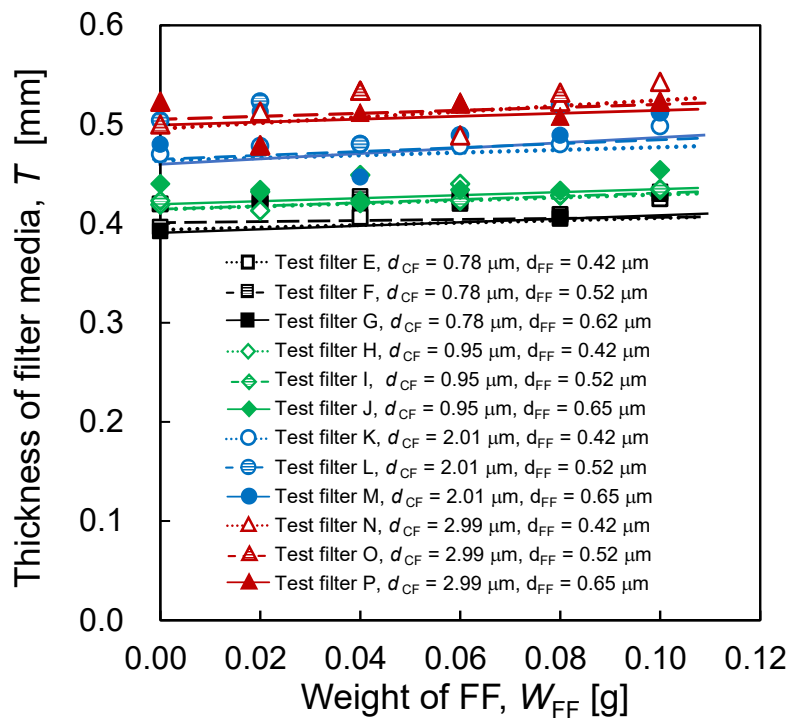
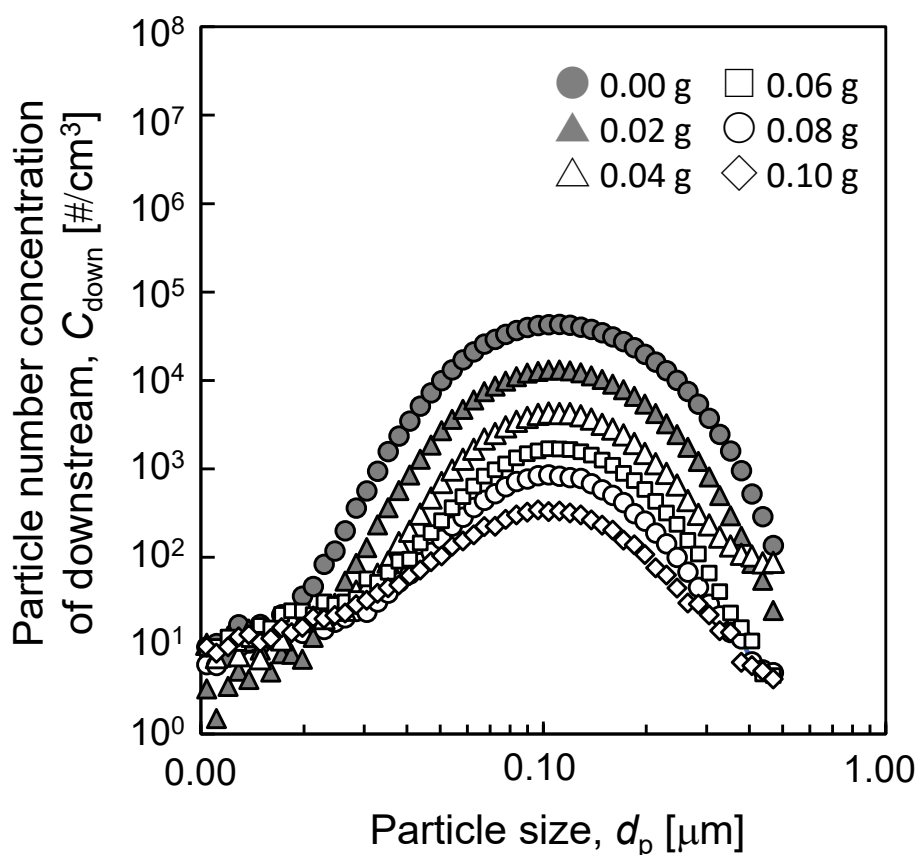


Fig.79 Correlation between weight of FF and thickness

4-4 対数透過率測定

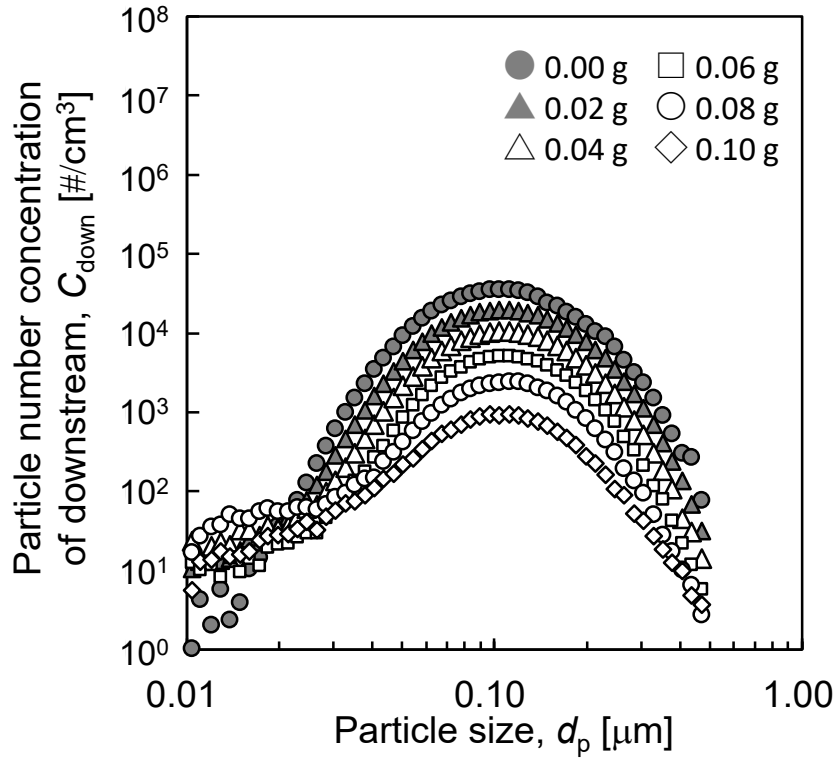
第3章と同じ方法で測定した透過側の粒子個数濃度 C_{down} を図 80 に示す. 全てのフィルタで FF の配合量 W_{FF} の増加に伴い粒子個数濃度 C_{down} は低下したため, 粒子の透過量が低下したことを示す. FF の配合量 W_{FF} を増加させた場合, 図 79 に示す厚みはほとんど上昇せず, 図 78 に示す充填率 α は FF の配合量に比例して増加した. よって, 粒子個数濃度 C_{down} が低下した要因は充填率 α の増加と考えられる. 粒子 FF 及び CF のどちらも, 繊維径が大きくなるにつれて透過側の粒子個数濃度 C_{down} が増加した. これは, テストフィルタ A-D と同様に径が大きくなる程, 繊維充填率 α が低下するため, 粒子と繊維の接触確率が低下し, 粒子捕集性能が低下したためと考えられる.

テストフィルタ E-P の対数透過率 $-\ln P$ を図 81 に示す. MPPS は, 一般的な値と考えられている $0.15 \mu\text{m}$ 付近となったものの, 条件による変動が見られた. CF のみのテストフィルタ A-D と同様に, 捕集効率が低い条件で MPPS が増加する傾向が見られた. そこで, テストフィルタ E-P の条件と MPPS の関係を調査した.

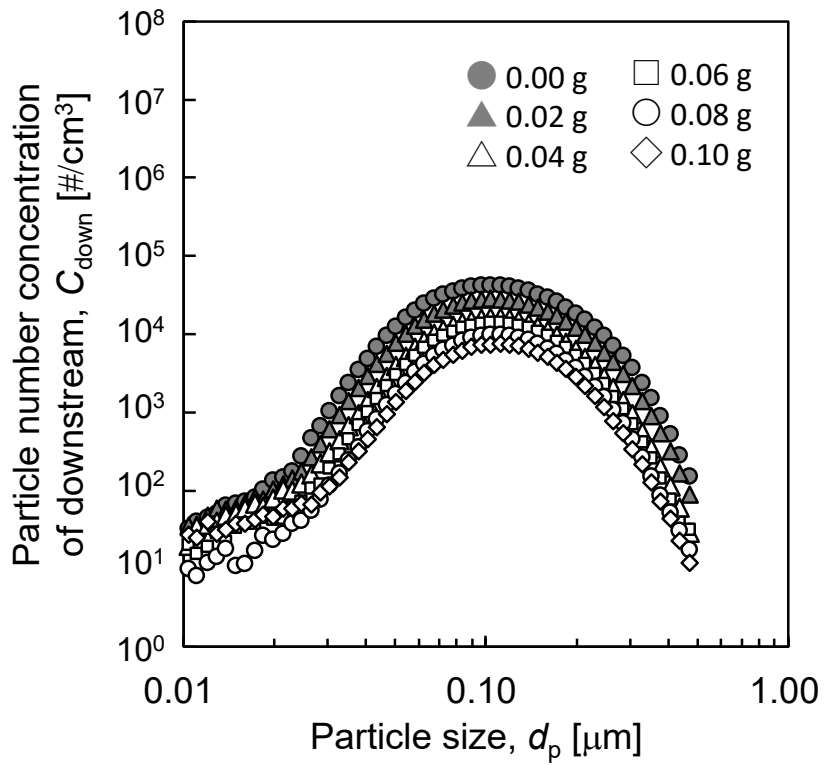


(a) Test filter E ($d_{\text{CF}} : 0.78 \mu\text{m}$, $d_{\text{FF}} : 0.42 \mu\text{m}$)

Fig.80 Particle number concentration of downstream for test filter E-P, C_{down}

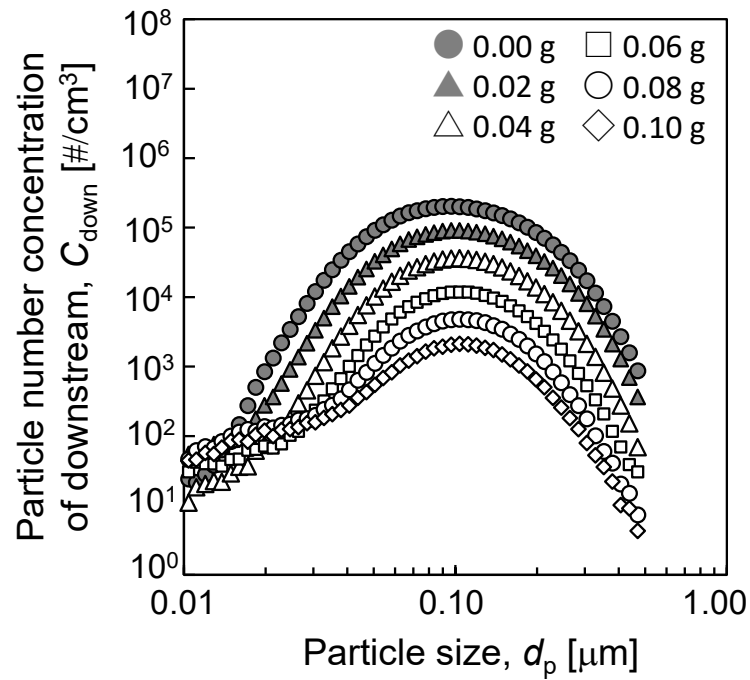


(b) Test filter F ($d_{CF} : 0.78 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.52 \mu\text{m}$)

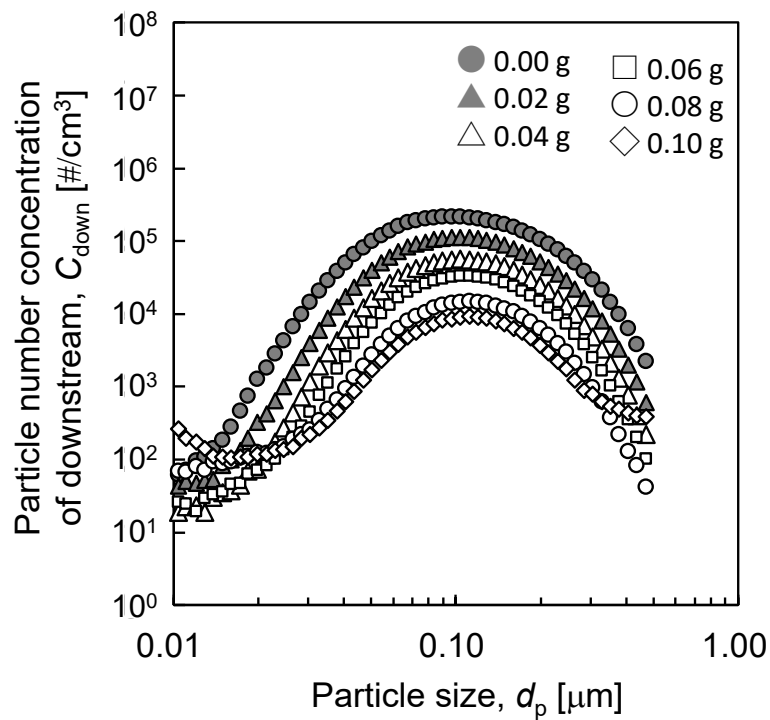


(c) Test filter G ($d_{CF} : 0.78 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.65 \mu\text{m}$)

Fig.80 Particle number concentration of downstream for test filter E-P, C_{down}

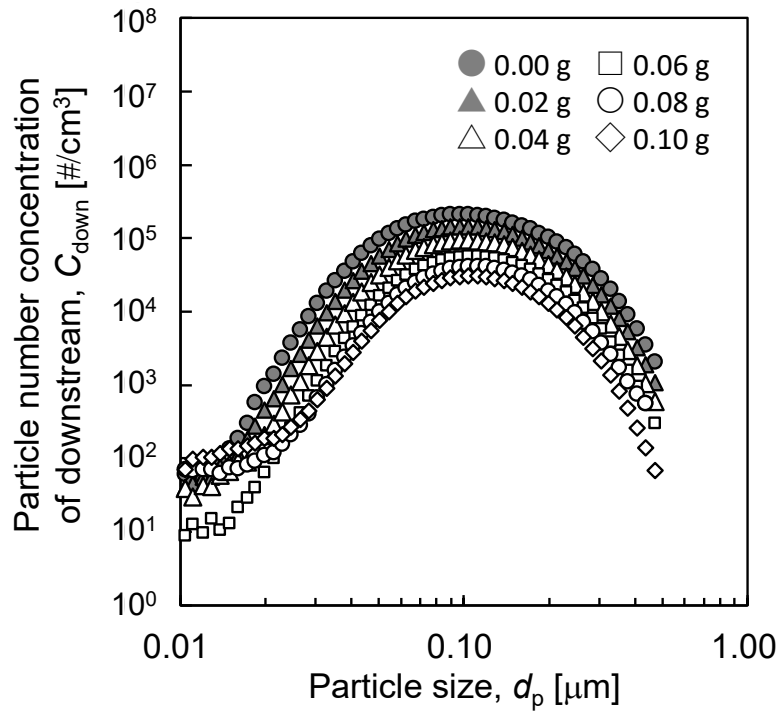


(d) Test filter H ($d_{CF} : 0.95 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.42 \mu\text{m}$)

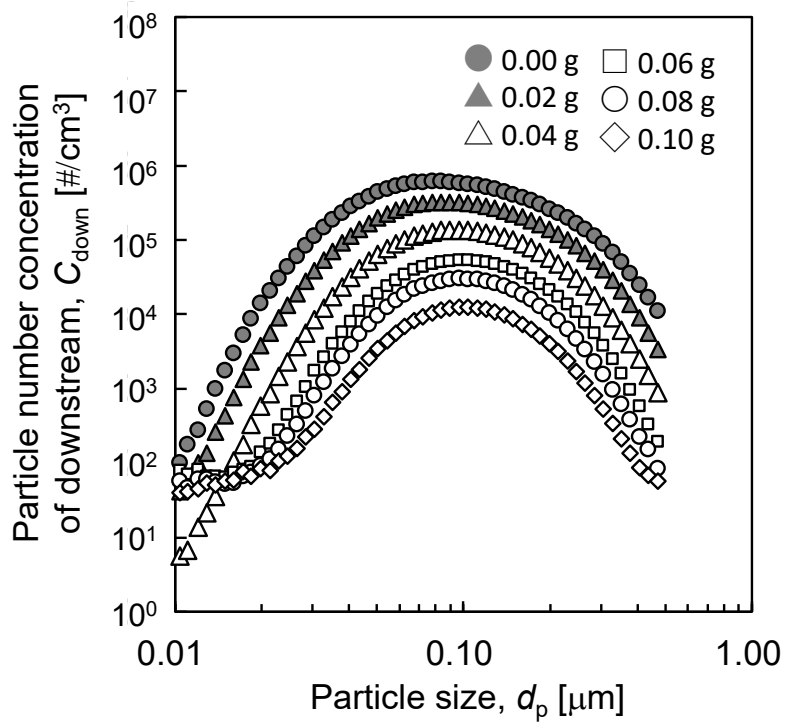


(e) Test filter I ($d_{CF} : 0.95 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.52 \mu\text{m}$)

Fig.80 Particle number concentration of downstream for test filter E-P, C_{down}

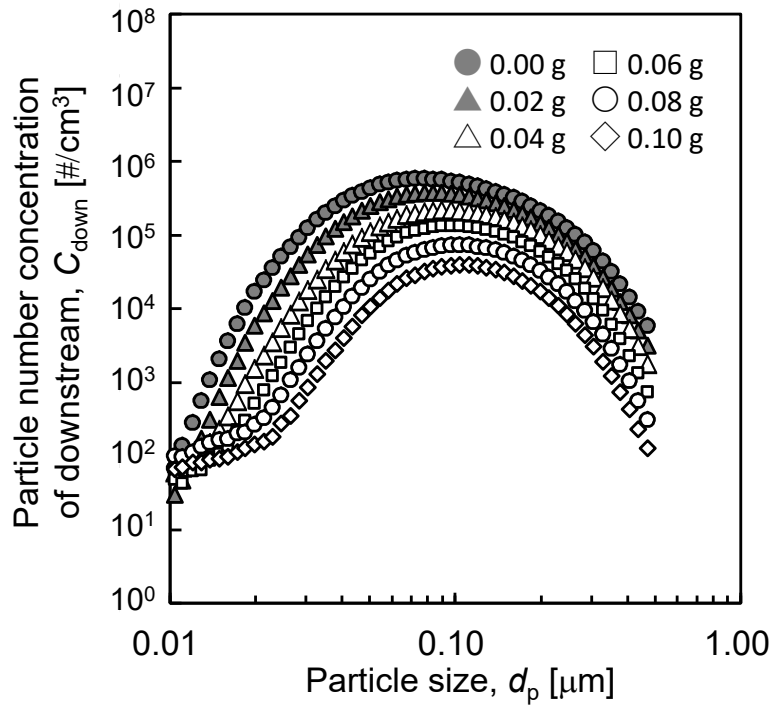


(f) Test filter J ($d_{CF} : 0.95 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.65 \mu\text{m}$)

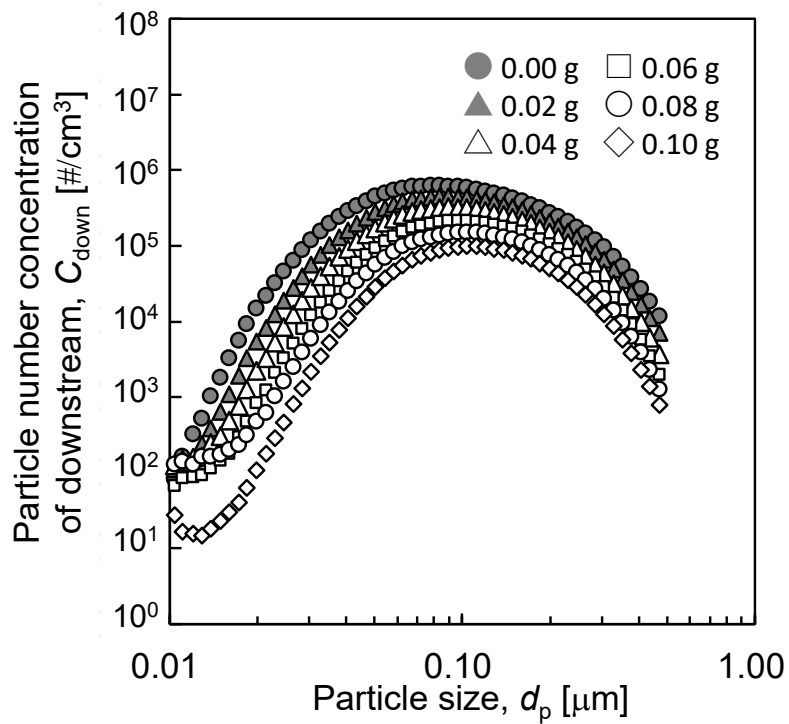


(g) Test filter K ($d_{CF} : 2.01 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.42 \mu\text{m}$)

Fig.80 Particle number concentration of downstream for test filter E-P, C_{down}

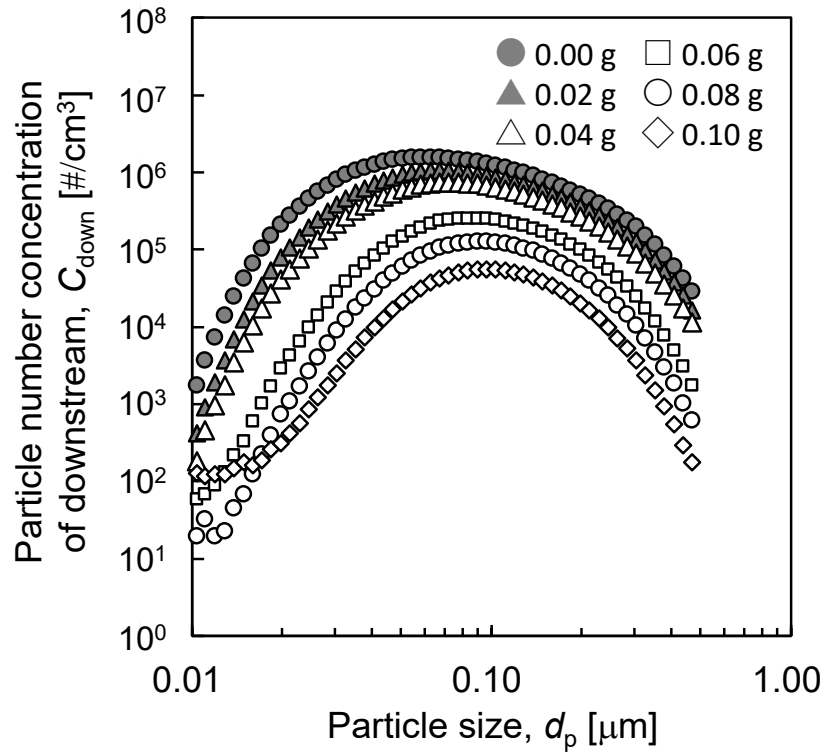


(h) Test filter L ($d_{CF} : 2.01 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.52 \mu\text{m}$)

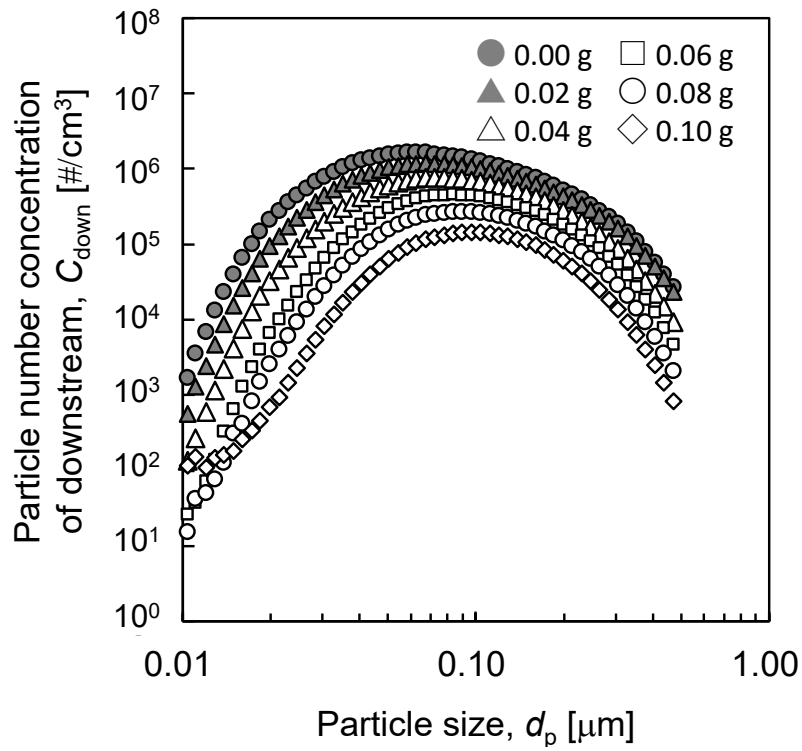


(i) Test filter M ($d_{CF} : 2.01 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.65 \mu\text{m}$)

Fig.80 Particle number concentration of downstream for test filter E-P, C_{down}

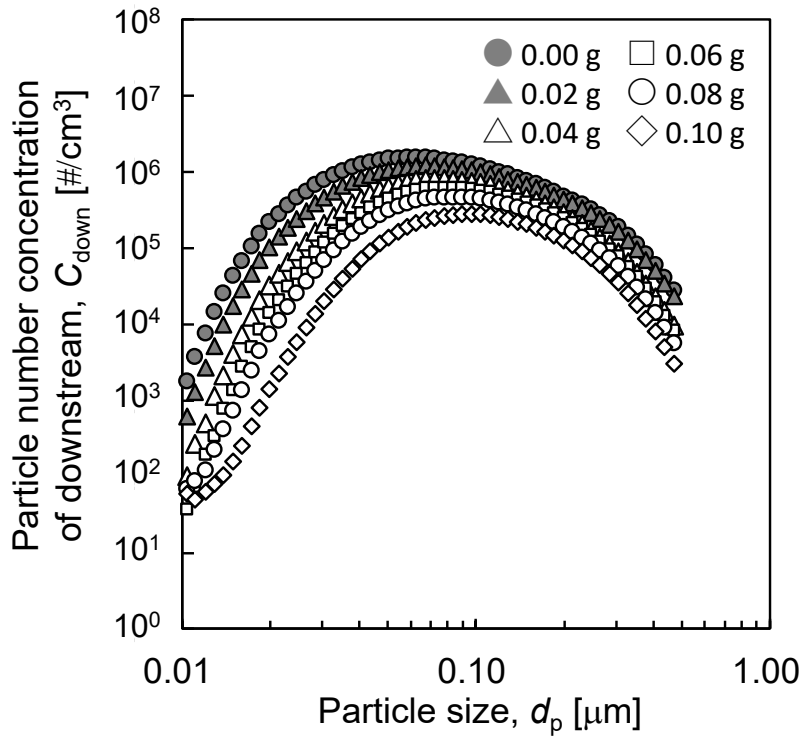


(j) Test filter N ($d_{CF} : 2.99 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.42 \mu\text{m}$)



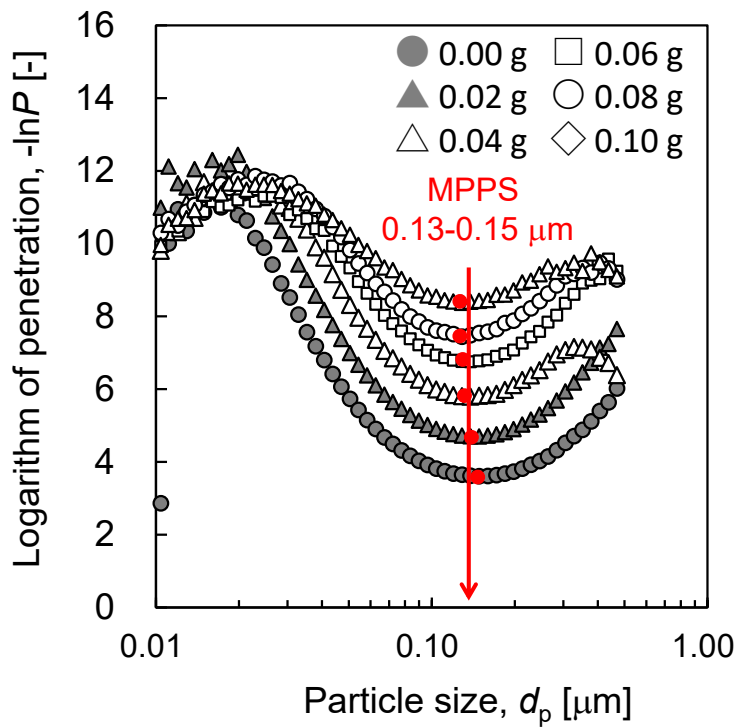
(k) Test filter O ($d_{CF} : 2.99 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.52 \mu\text{m}$)

Fig.80 Particle number concentration of downstream for test filter E-P, C_{down}



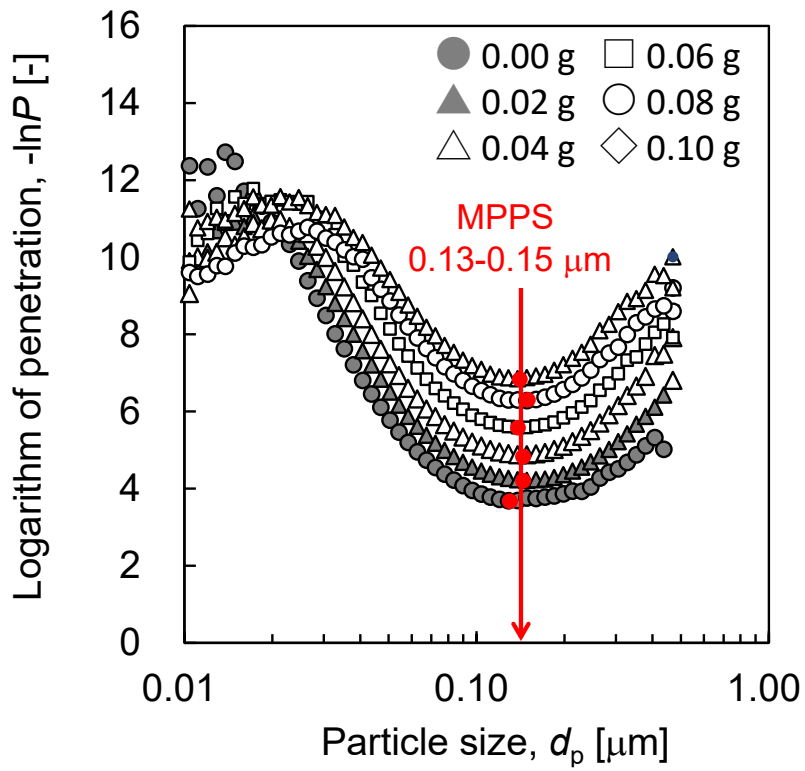
(l) Test filter P ($d_{CF} : 2.99 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.65 \mu\text{m}$)

Fig.80 Particle number concentration of downstream for test filter E-P, C_{down}

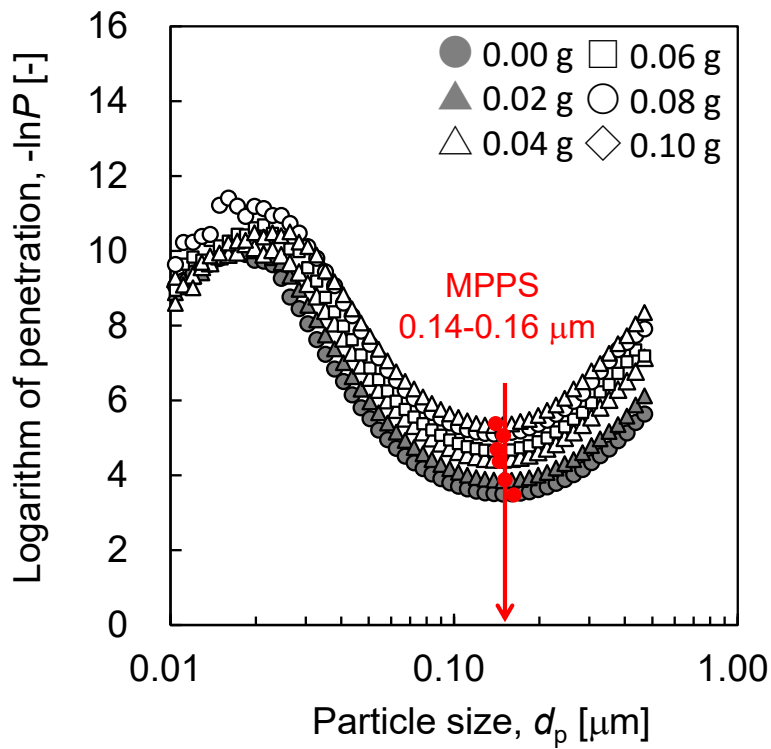


(a) Test filter E ($d_{CF} : 0.78 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.42 \mu\text{m}$)

Fig.81 Logarithm of penetration for test filter E-P, $-\ln P$

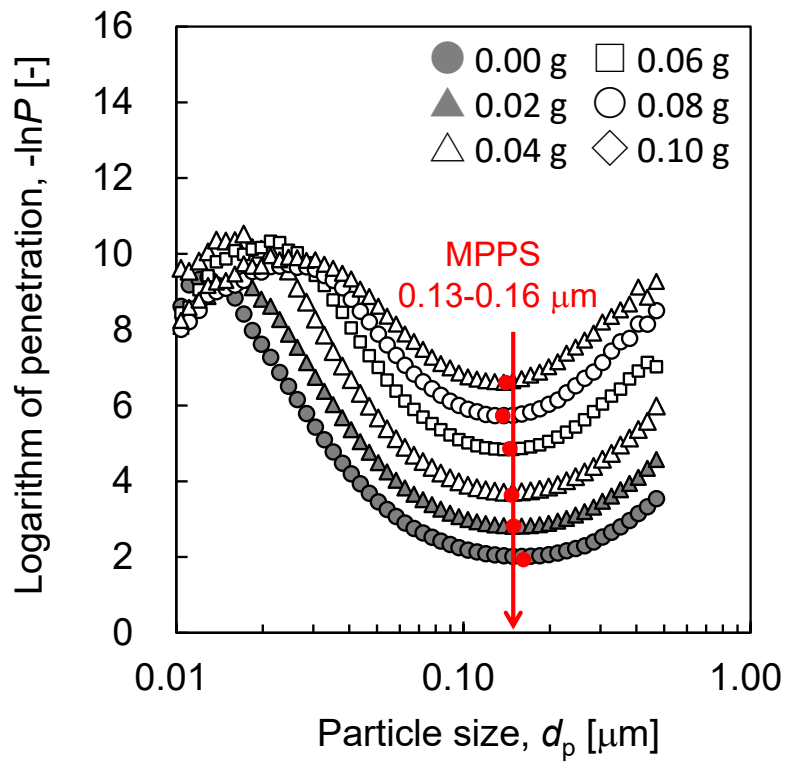


(b) Test filter F ($d_{CF} : 0.78 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.52 \mu\text{m}$)

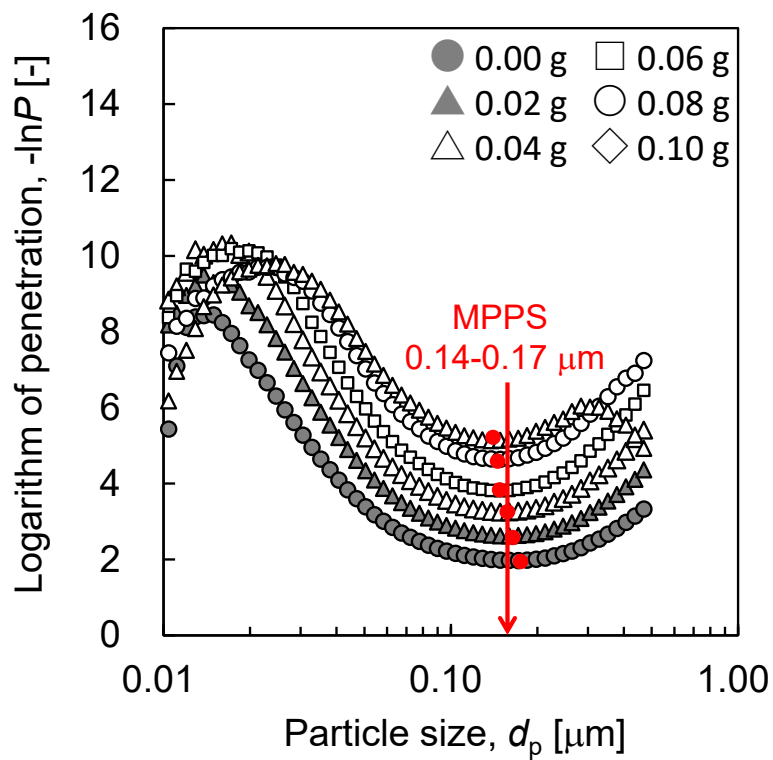


(c) Test filter G ($d_{CF} : 0.78 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.65 \mu\text{m}$)

Fig.81 Logarithm of penetration for test filter E-P, $-\ln P$

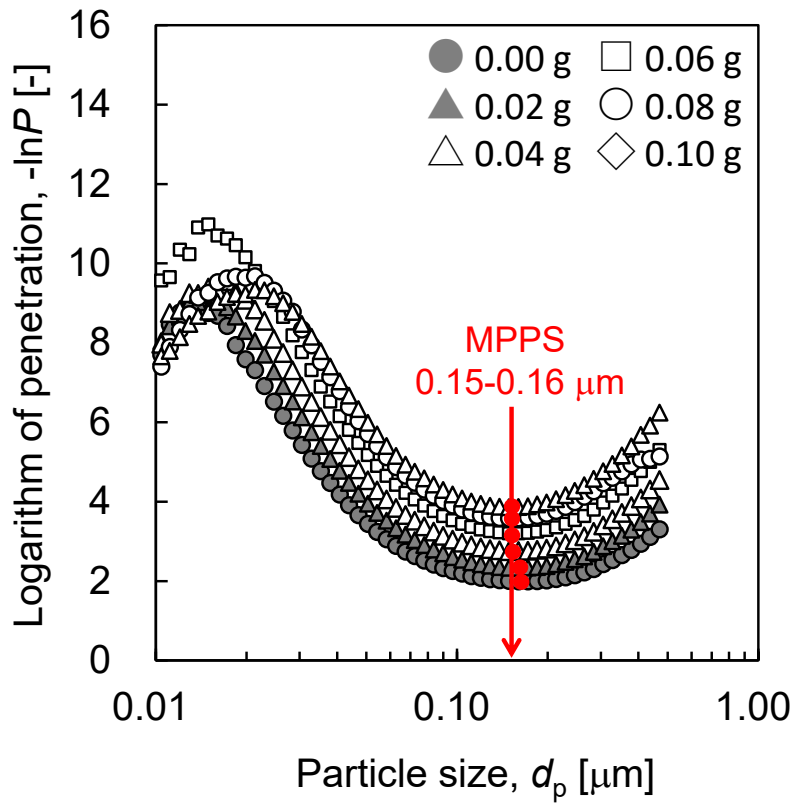


(d) Test filter H ($d_{CF} : 0.95 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.42 \mu\text{m}$)

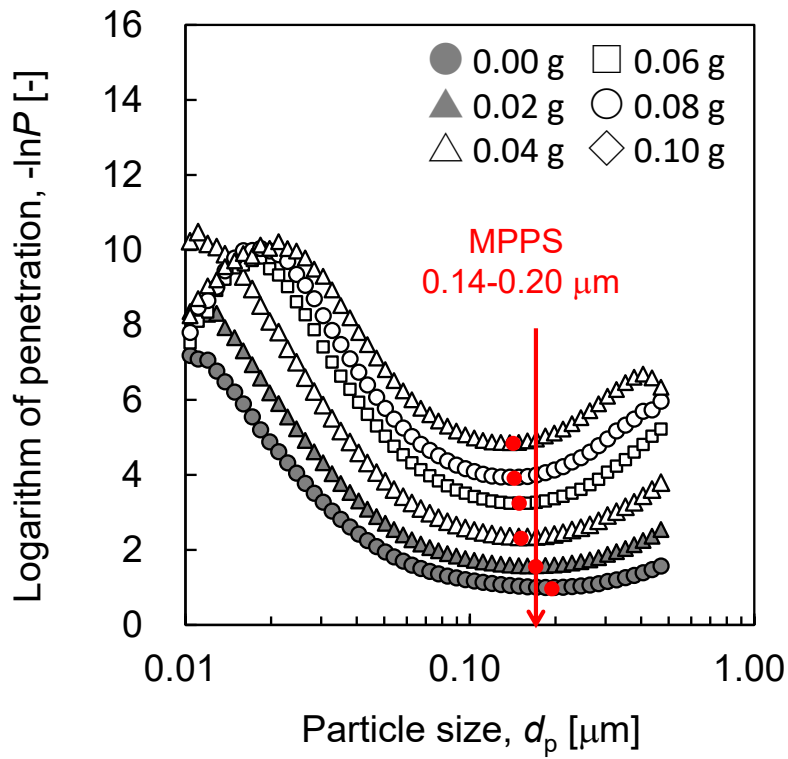


(e) Test filter I ($d_{CF} : 0.95 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.52 \mu\text{m}$)

Fig.81 Logarithm of penetration for test filter E-P, $-\ln P$

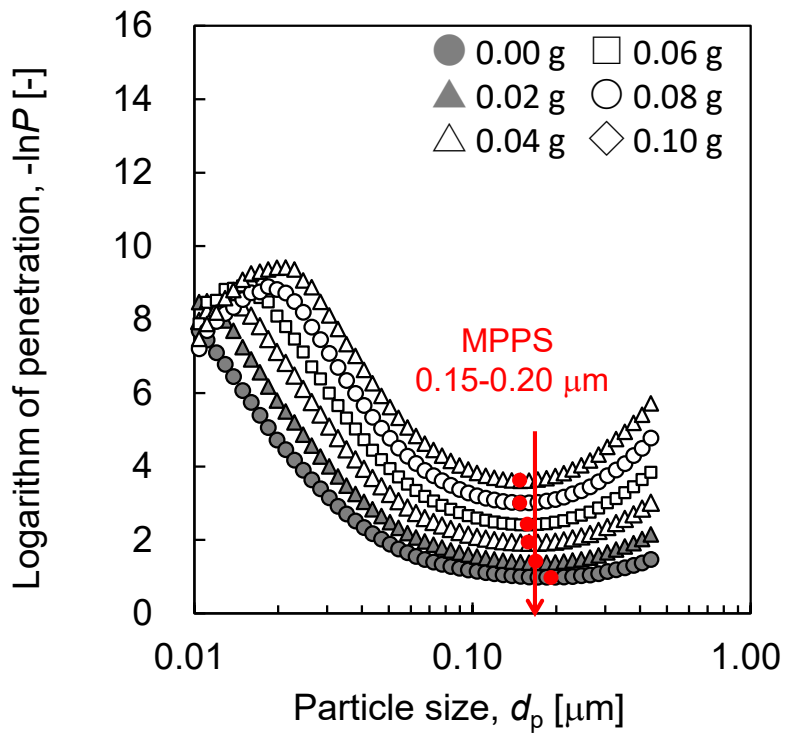


(f) Test filter J ($d_{CF} : 0.95 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.65 \mu\text{m}$)

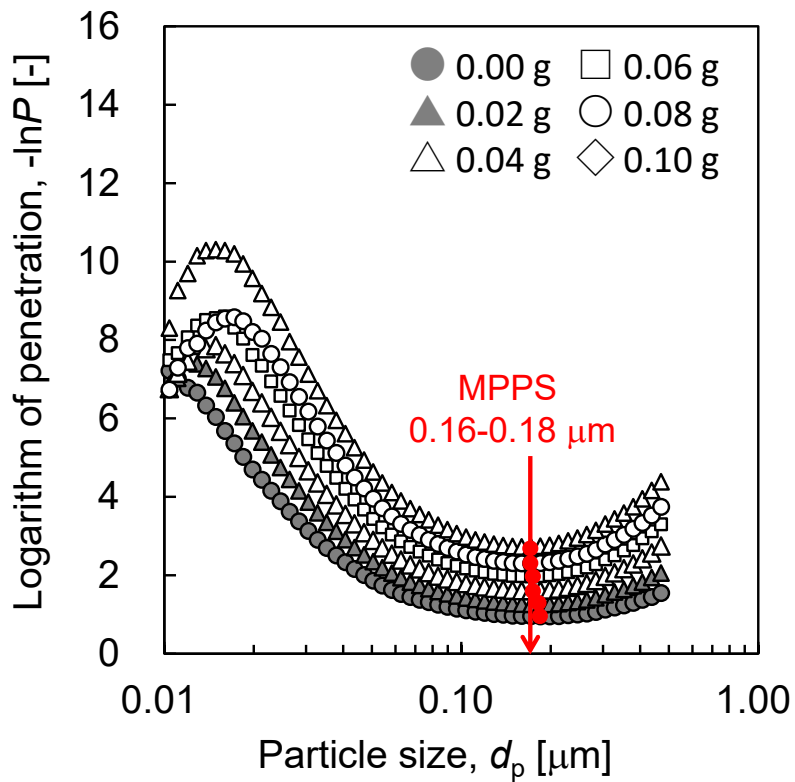


(g) Test filter K ($d_{CF} : 2.01 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.42 \mu\text{m}$)

Fig.81 Logarithm of penetration for test filter E-P, $-\ln P$

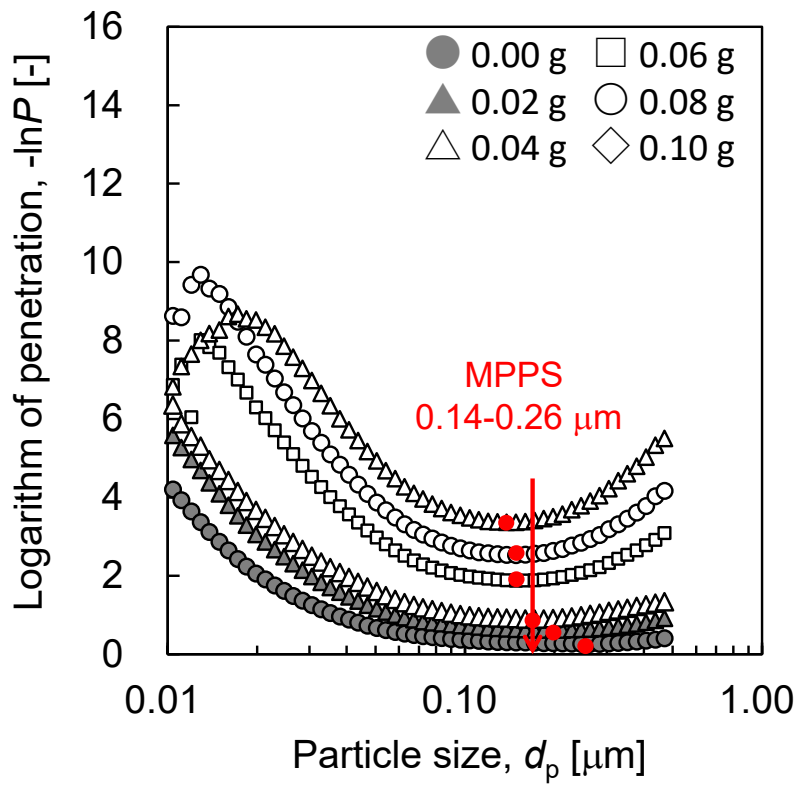


(h) Test filter L (d_{CF} : 2.01 μm , d_{FF} : 0.52 μm)

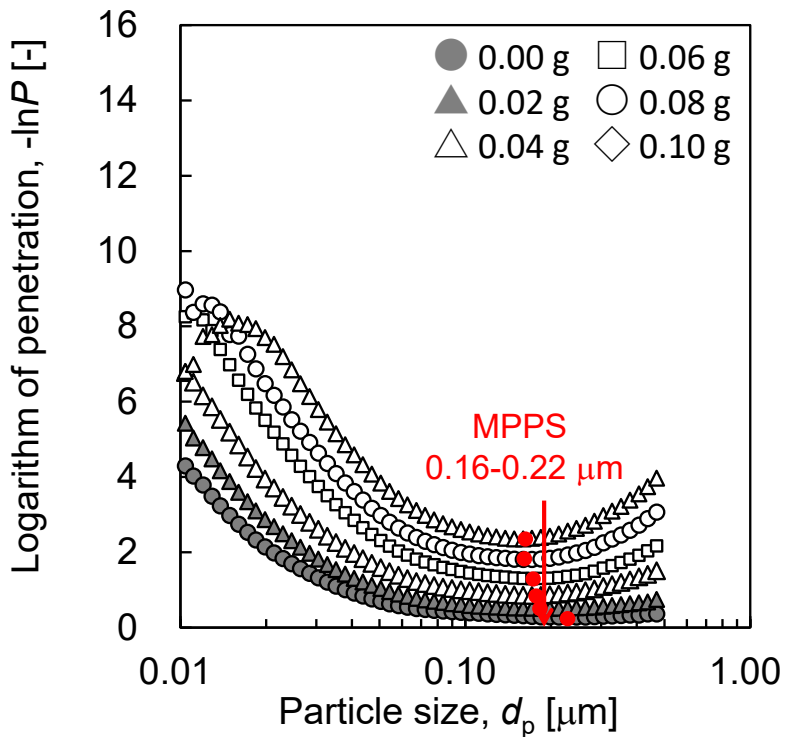


(i) Test filter M (d_{CF} : 2.01 μm , d_{FF} : 0.65 μm)

Fig.81 Logarithm of penetration for test filter E-P, $-\ln P$

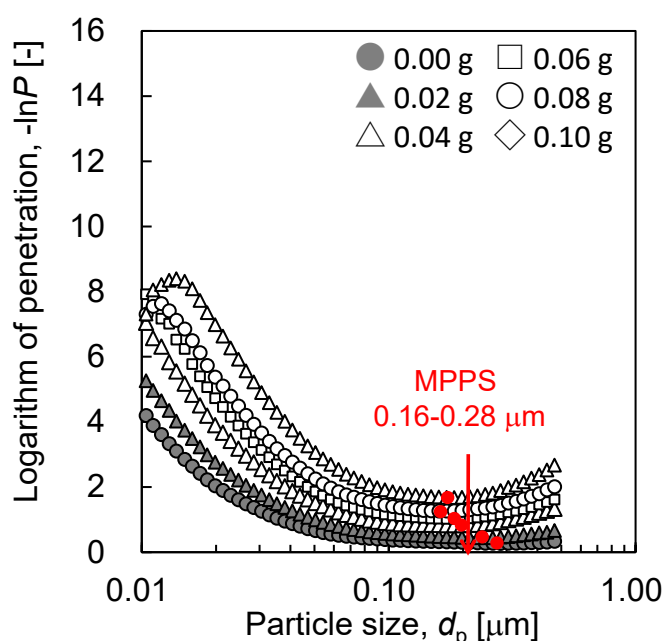


(j) Test filter N ($d_{CF} : 2.99 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.42 \mu\text{m}$)



(k) Test filter O ($d_{CF} : 2.99 \mu\text{m}$, $d_{FF} : 0.52 \mu\text{m}$)

Fig.81 Logarithm of penetration for test filter E-P, $-\ln P$



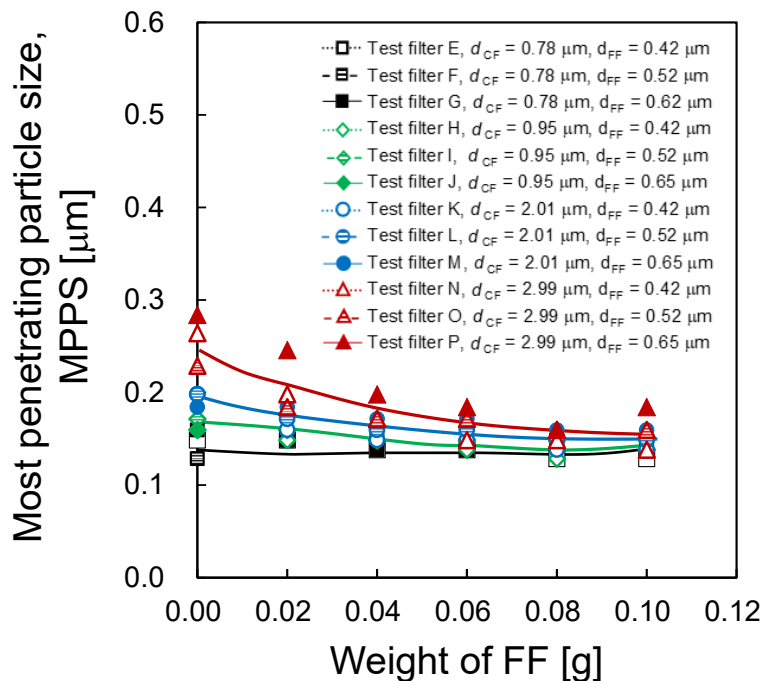
(l) Test filter P (d_{CF} : 2.99 μm , d_{FF} : 0.65 μm)

Fig.81 Logarithm of penetration for test filter E-P, $-\ln P$

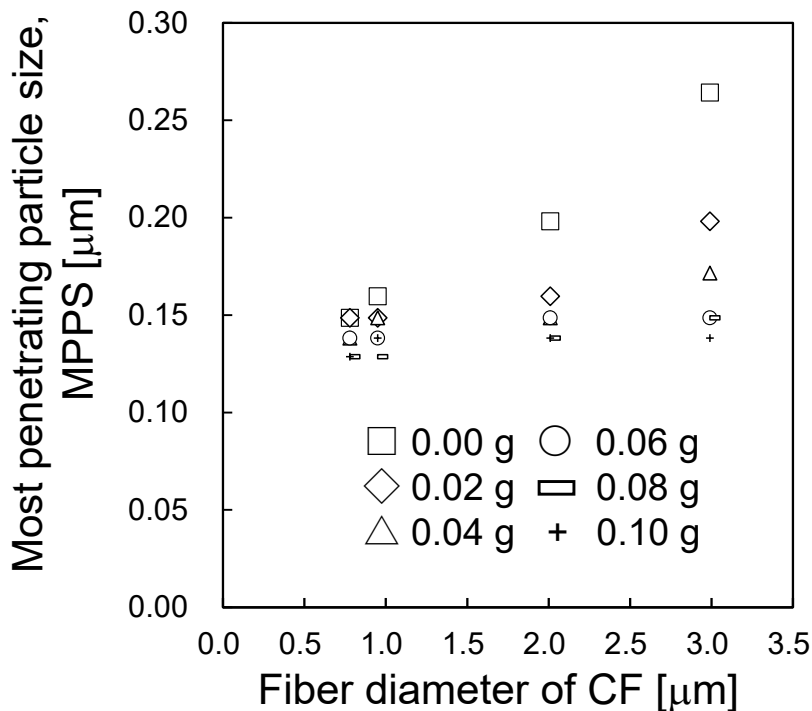
テストフィルタ E-P の条件と MPPS の関係を調査するため、CF と FF で構成されるテストフィルタ E-P の MPPS を図 82 に示す。図 82(a)から、FF の配合量 W_{FF} 増加に伴い、MPPS が減少することに加え、MPPS が CF の繊維径 d_{CF} にも依存することが分かる。そこで、図 82 (b), (c), (d)のとおり、CF の繊維径 d_{CF} ごとの MPPS を調査した。その結果、CF の繊維径の増加に伴い MPPS が増加した。これは、CF のみで構成されるテストフィルタ A-D と同様に、繊維径の増加に伴う遮りパラメータ R の減少により、粒子径が大きい領域における捕集性能が低下したためと考えられる。また、図 82(a)において、特に FF の配合量 0 g で CF の繊維径により MPPS が大きく異なったものの、FF の配合量増加によって、MPPS が 0.2 μm 以下に収束したことが分かる。これは FF の増加によりテストフィルタを構成する繊維の繊維径平均値が低下したことで遮りパラメータ R が上昇し、大粒子径側の捕集性能が向上したためと考えられる。

なお、CF のみで構成されるテストフィルタ A-D と同様に、CF と FF で構成されるテストフィルタ E-P も、CF が 2.99 μm の試料で、MPPS が 0.2-0.3 μm と極端に大きくなり、ばらつきも大きくなった。繊維 C4(繊維径 2.99 μm)を含むと MPPS が安定しなくなると考えられる。この理由は MPPS 付近の対数透過率が極めて小さく、粒子径 d_p の変化に対する対数透過率 $-\ln P$ の変化が小さいためと考えられる。C4 以外の CF 繊維径 (0.78 μm , 0.95 μm , 2.01 μm) のフィルタの MPPS は全て 0.2 μm 以下となり、テストフィルタ A-D と同様に、MPPS の中央値はおよそ 0.15 μm となった。MPPS での捕集効率評価は、フィルタを最も厳しい条件で

評価できるため、テストフィルタ E-P もテストフィルタ A-D と同様に MPPS として $0.15 \mu\text{m}$ で評価を行うこととした。



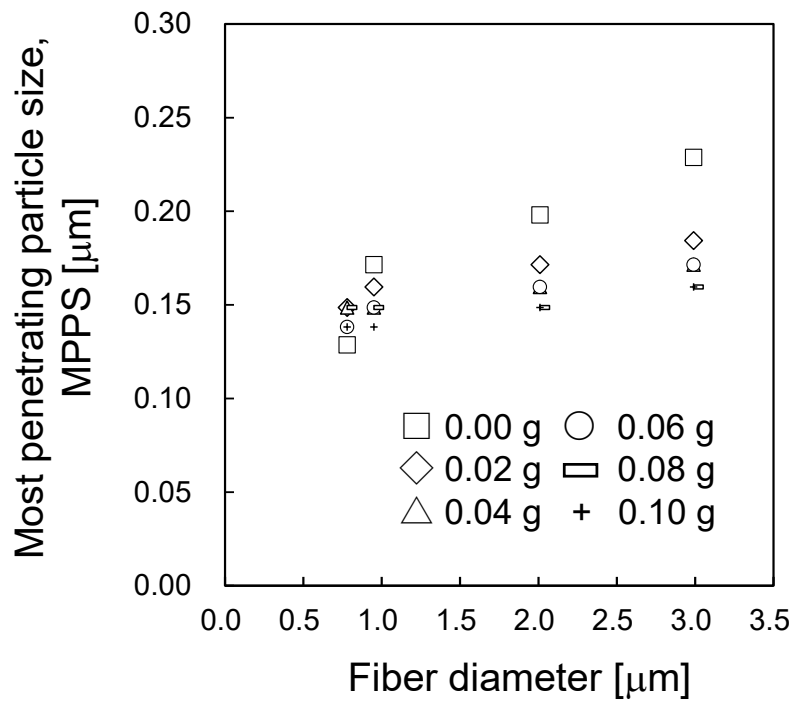
(a) Correlation between weight of FF and MPPS



(b) Correlation between fiber diameter of CF and MPPS

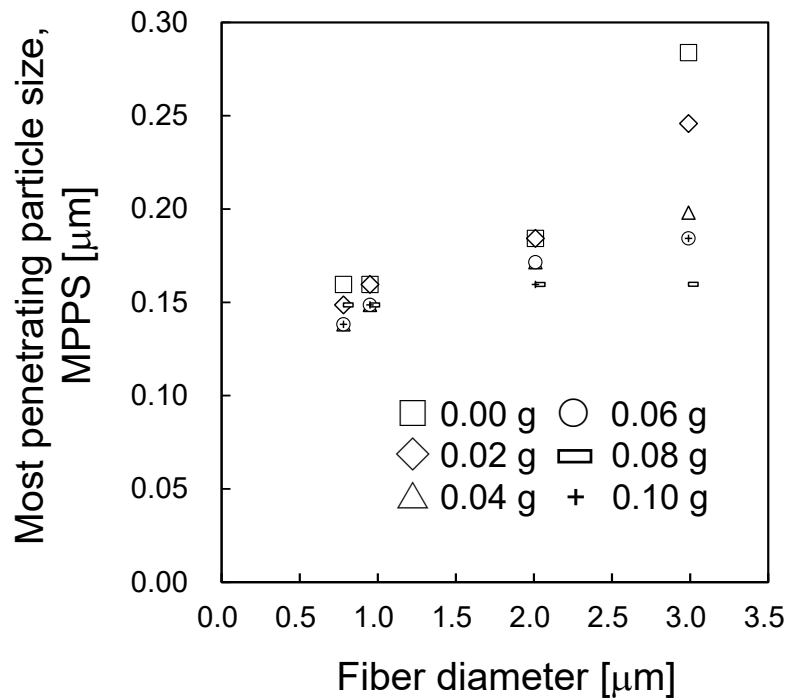
(Test filter E, H, K, N : diameter of FF $0.42 \mu\text{m}$)

Fig.82 Most penetrating particle size for test filter E-P, MPPS



(c) Correlation between fiber diameter of CF and MPPS

(Test filter F, I, L, O : diameter of FF 0.52 μm)



(d) Correlation between fiber diameter of CF and MPPS

(Test filter G, J, M, P : diameter of FF 0.65 μm)

Fig.82 Most penetrating particle size for test filter E-P, MPPS

FFの配合量 W_{FF} と対数透過率 $-\ln P$ の関係を図 83 に示す。対数透過率は、FFの配合量 W_{FF} に対し直線的に増加した。FFの配合量が増加すると、図 78 に示すように充填率 α が増加するために、繊維と粒子の接触確率が増加し、対数透過率が上昇したと考えられる。また、図 83 から、CF と FF のいずれでも、繊維径が細い程、対数透過率が増加することが分かる。この傾向は図 78 に示す充填率 α と同じ傾向であり、繊維径が細くなり、充填率が増加したことが要因と考えられる。また、FFの配合量 W_{FF} が 0 g における対数透過率 $-\ln P$ は 0 にならない。これは、一定量 0.25 g で配合されている CF に由来する対数透過率で、CF のみのテストフィルタ A-D と同様に、CF の繊維径 d_{CF} が細い程に、充填率 α が増加するため、対数透過率 $-\ln P$ は高い値になる。

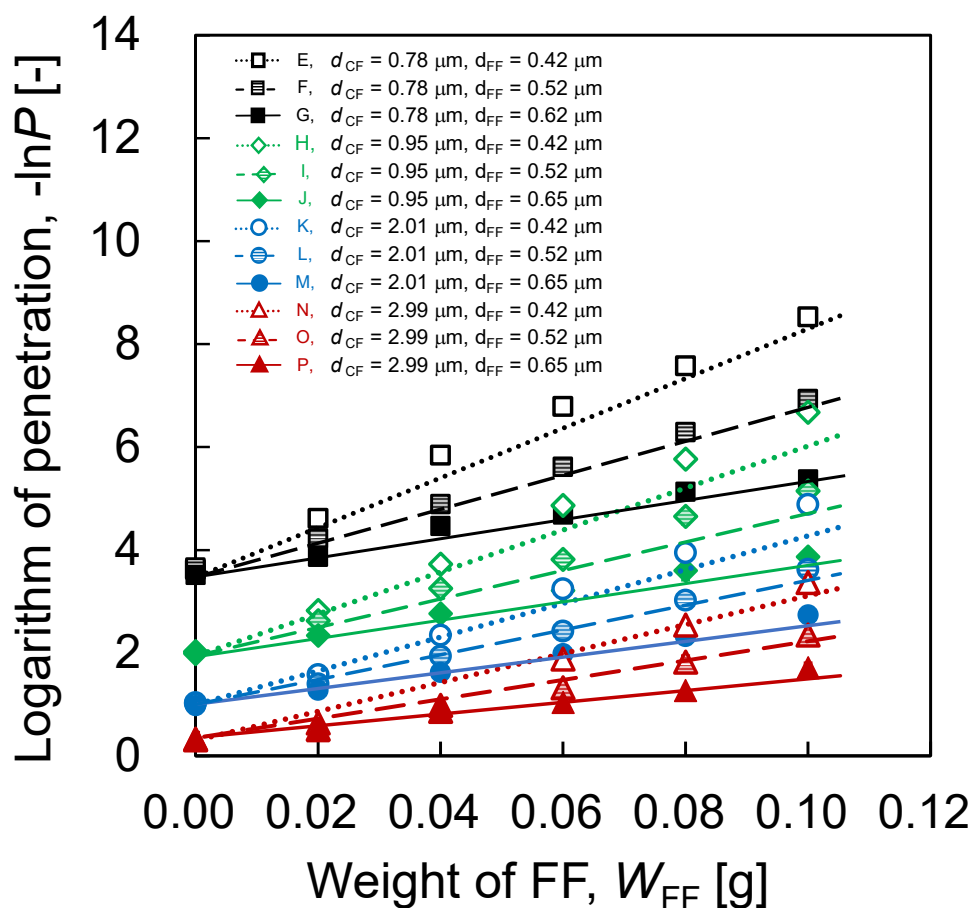


Fig.83 Logarithm of penetration for test filter E-P, $-\ln P$

4-5 CF 及び FF の繊維径及び配合量からの実験式

4-5-1 実験式構築の方法

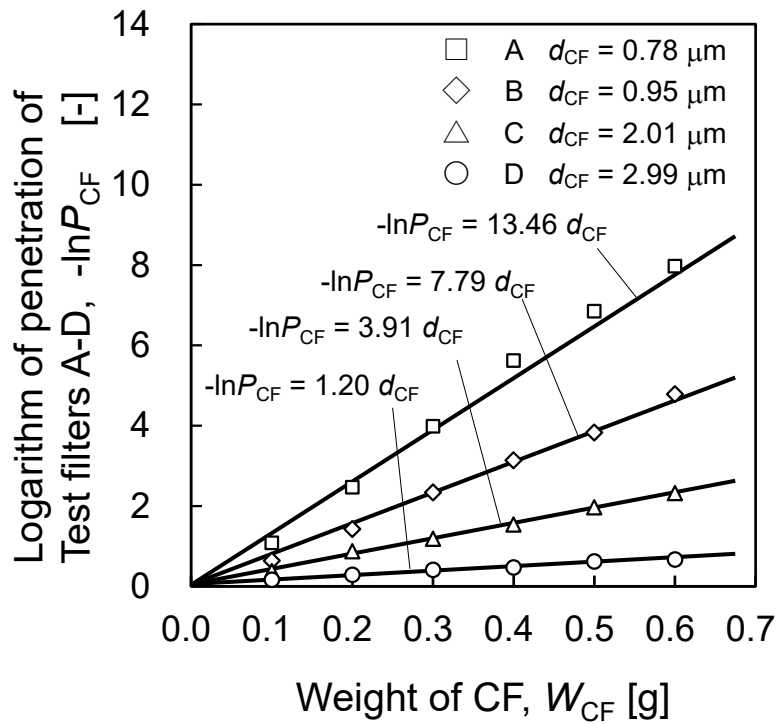
本章までに、CF のみのテストフィルタ A-D と CF と FF で構成されるテストフィルタ E-P の対数透過率は、それぞれ CF と FF の繊維配合量に比例する 1 次式で示されることが分かっている。緒言でも述べたとおり、防塵マスクメーカーのフィルタ新製品の開発プロセスにおいて、CF と FF の繊維径と配合量を調整する。そこで、それぞれ CF, FF に起因する対数透過率を $-\ln P_{CF}$, $-\ln P_{FF}$ と定義し、テストフィルタの対数透過率 ($-\ln P_{CF+FF}$) は、式(62)のように $-\ln P_{CF}$ と $-\ln P_{FF}$ の和で示されると仮定し実験式の構築を検討した。

$$-\ln P_{CF+FF} = -\ln P_{CF} + -\ln P_{FF} \quad (62)$$

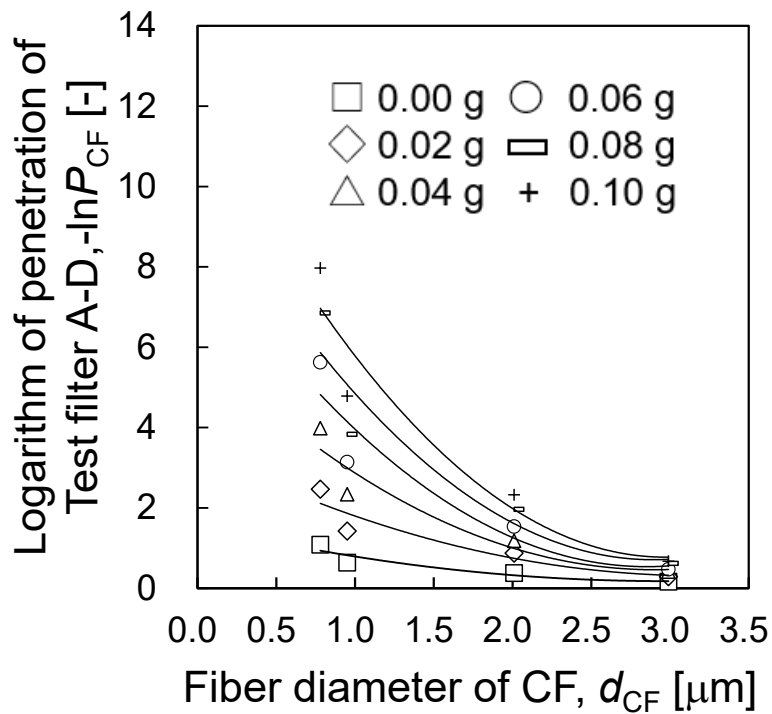
4-5-2 CF のみで構成されるフィルタ

CF のみで構成されるテストフィルタ A-D の透過率 $-\ln P_{CF}$ の実験式から構築する。図 84 に示す CF の配合量 W_{CF} と $-\ln P_{CF}$ の関係から、CF 配合量 W_{CF} に比例する 1 次式になることと、1 次式の傾きは、CF の繊維径 d_{CF} と相関があることが予想される。よって、この 1 次式の傾きを S_{PCF} とすると、CF の繊維径 d_{CF} と S_{PCF} の関係を明らかにすれば CF に由来する対数透過率 $-\ln P_{CF}$ の実験式が求められる。図 85 に示す CF の繊維径 d_{CF} と S_{PCF} の関係から、 S_{PCF} は CF の繊維径 d_{CF} の 2 乗に反比例することが分かった。この理由は次のように考えられる。使用したガラス繊維は全て同じ製法 (火炎法; 高温のバーナーで溶融したガラスを吹き飛ばし繊維化する) であるため、繊維長は全て同等であると考えられている。そのため、繊維径が 2 倍になると、繊維断面積は 4 倍になる。繊維長が同等であれば、必然的に体積は 4 倍になる。素材も同じガラス (主成分: SiO_2 , Al_2O_3) で密度も同等であることから、同じ配合量で繊維径が 2 倍 (体積が 4 倍) になれば、繊維本数は 1/4 倍になる。よって、 S_{PCF} が CF の繊維径の 2 乗に反比例することは妥当であると考えられる。なお、結果として、CF のみで構成されるフィルタの対数透過率 $-\ln P_{CF}$ の実験式は式(63)のとおり得られた。

$$-\ln P_{CF} = 8.5 d_{CF}^{-2} W_{CF} \quad (63)$$



(a) Correlation between the weight of CF and the logarithm of penetration



(b) Correlation between the fiber diameter of CF and the logarithm of penetration

Fig.84 Correlation between parameters of test filter A-D and logarithm of penetration

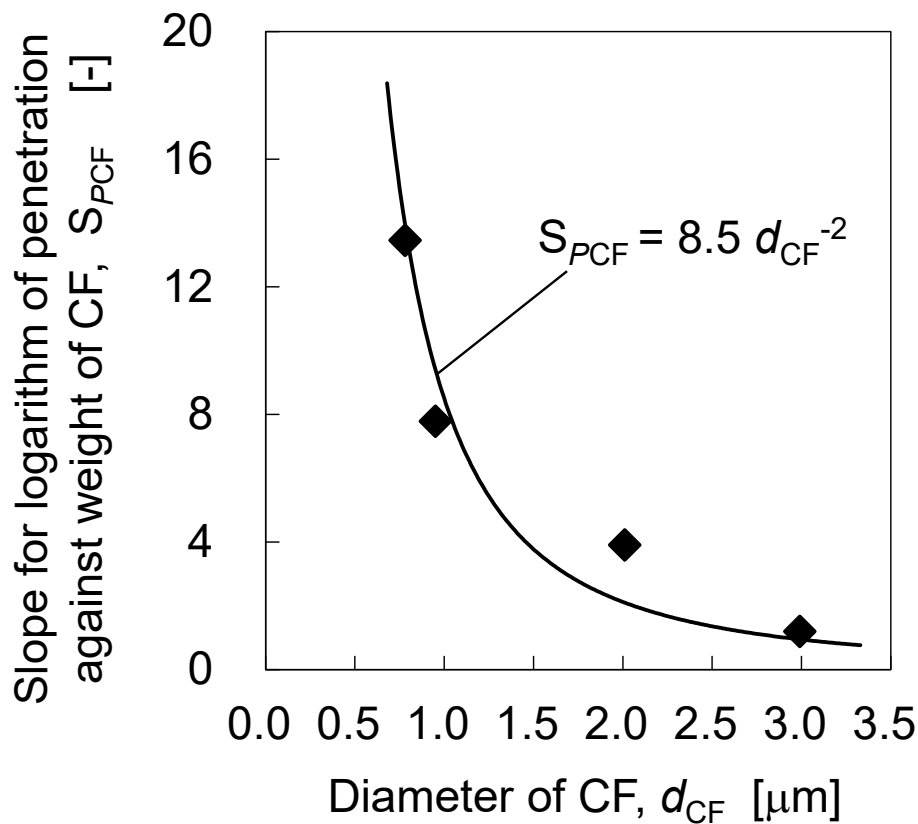


Fig.85 Correlation between fiber diameter of CF and S_{PCF}

4-5-3 CF 及び FF で構成されるフィルタ

CF 及び FF で構成されるフィルタの対数透過率は、式(62)に示すように、CF、FF それぞれに由来する対数透過率 $-\ln P_{CF}$ と $-\ln P_{FF}$ の合算で示される。図 86 に示す FF 配合量 W_{FF} と対数透過率 $-\ln P_{CF+FF}$ の関係から、テストフィルタ E-P の対数透過率は、CF に由来する対数透過率 $-\ln P_{CF}$ が切片を構成し、FF の繊維径 d_{FF} と相関する傾きを持ち、FF の配合量 W_{FF} に比例する 1 次式で構成されると予想される。そこで、CF のみで構成されるテストフィルタ A-D と同じ要領で、図 86 における FF の配合量と対数透過率 $-\ln P_{CF+FF}$ の関係における 1 次式の傾きを S_{PFF} とし、FF の繊維径 d_{FF} と S_{PFF} の関係を明らかにし、対数透過率 $-\ln P_{CF+FF}$ の実験式を構築する。図 87 に示す FF の繊維径 d_{FF} と S_{PFF} の関係から、 S_{PFF} は FF の繊維径 d_{FF} の 2 乗に反比例することが分かった。この理由は、CF と同様に、FF の繊維径が 2 倍になることで、FF の繊維本数が 1/4 倍になるためと考えられる。

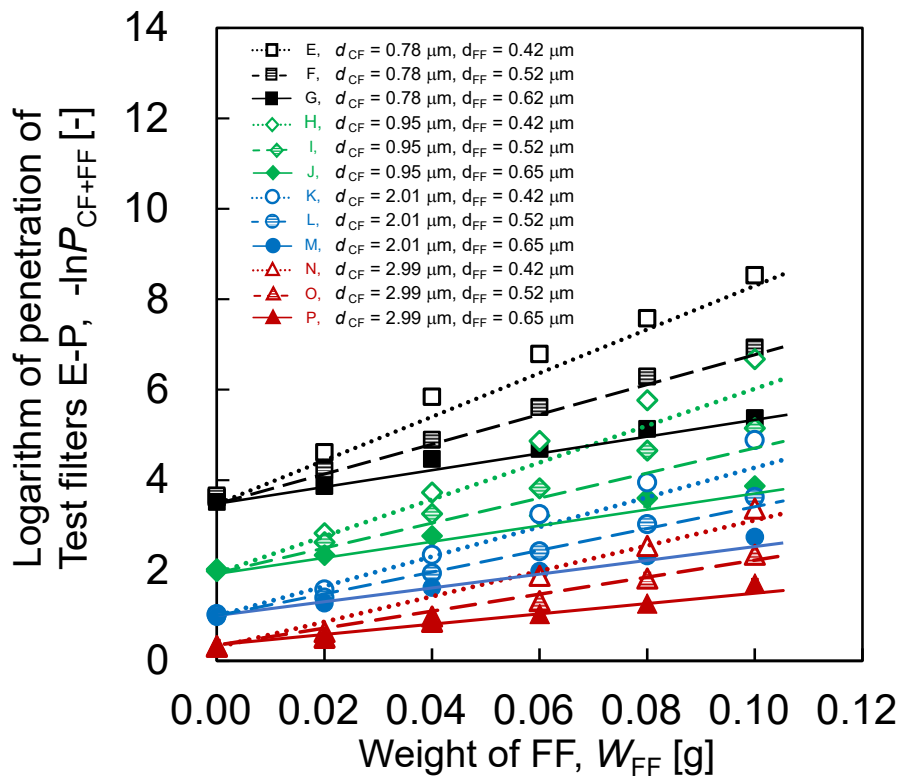


Fig.86 Correlation between the weight of FF and logarithm of penetration

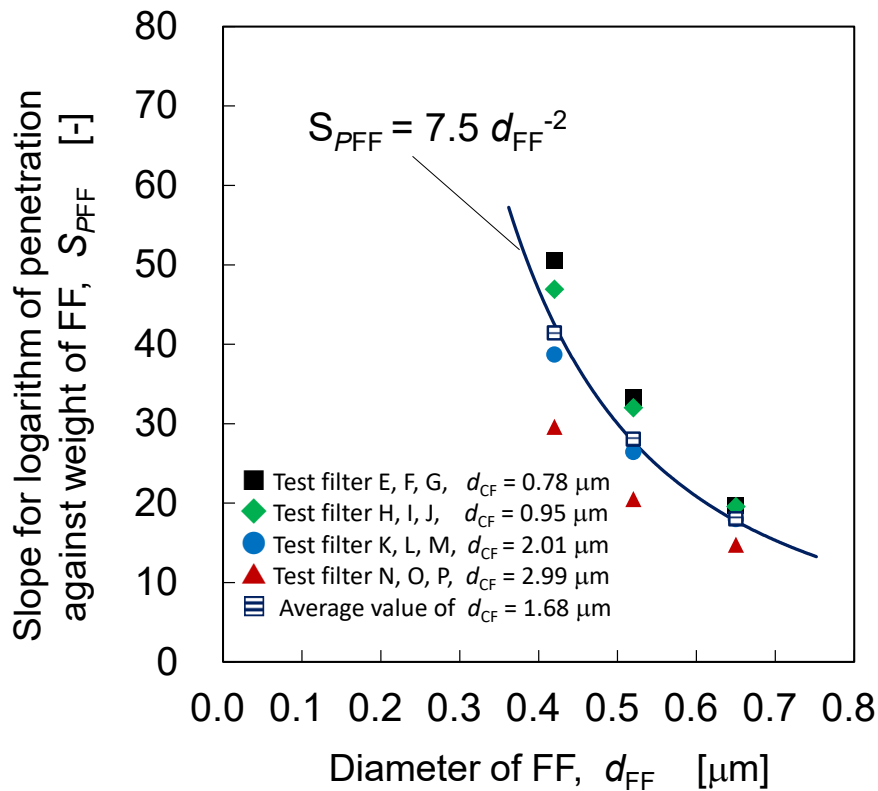


Fig.87 Correlation between fiber diameter of FF and S_{PFF}

図 87 から、FF に起因する対数透過率 $-\ln P_{FF}$ の実験式が求められるため、式(62)と式(63)を組み合わせることで、全体の対数透過率 $-\ln P_{CF+FF}$ が式(64)のとおり求められた。

$$-\ln P_{CF+FF} = -\ln P_{CF} + -\ln P_{FF} = 8.5 d_{CF}^{-2} W_{CF} + 7.5 d_{FF}^{-2} W_{FF} \quad (64)$$

式(64)のとおり構築した $-\ln P_{CF+FF}$ の実験式は、CF に起因する対数透過率 $-\ln P_{CF}$ と FF に起因する対数透過率 $-\ln P_{FF}$ が完全に独立しているため、CF と FF が全体の対数透過率 $-\ln P_{CF+FF}$ に与える影響は、それぞれが互いに干渉しないことを前提としている。しかしながら、CF の繊維径 d_{CF} ごとに整理した S_{PFF} を表 13 と図 88 に示す。FF の繊維配合量追加による $-\ln P_{FF}$ 上昇値を示す S_{PFF} は、CF の繊維径 d_{CF} によっても、わずかに変動することが明らかになった。

Table 13 The fiber diameter of CF and S_{PFF}

Item	Individual values				Avg.
d_{CF} [μm]	0.78	0.95	2.01	2.99	1.68
S_{PFF} [-]	34.1	32.5	26.4	19.6	28.2

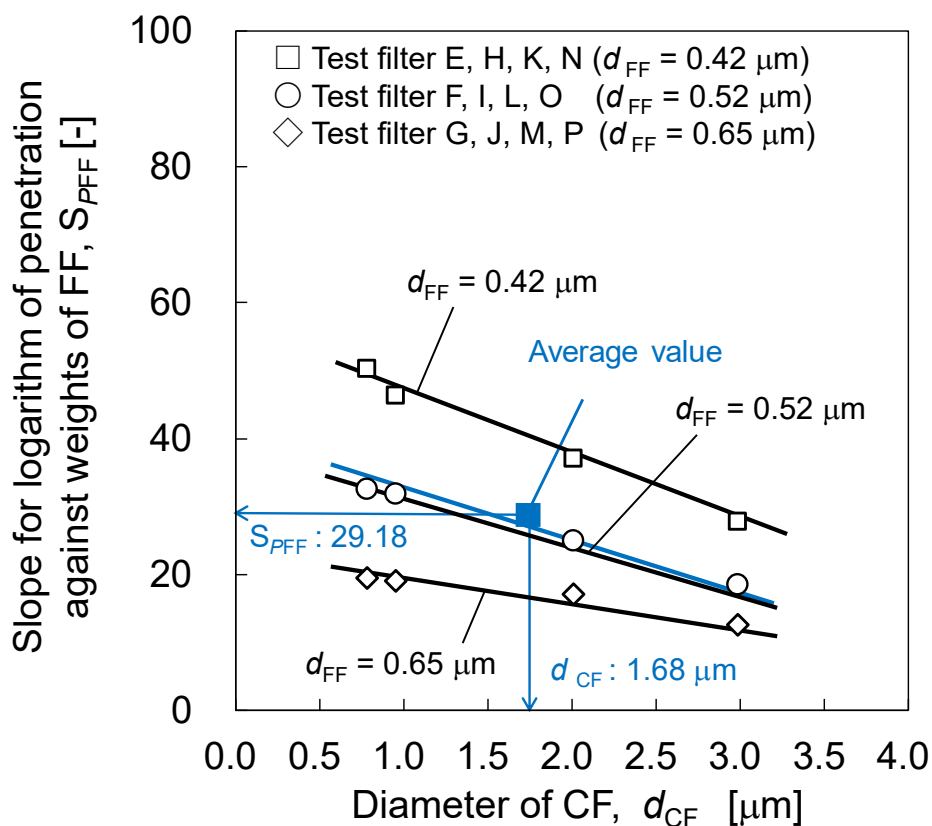


Figure 88 Correlation between fiber diameter of CF and S_{PFF}

上記を考慮すると、 S_{PFF} は、CFの繊維径 d_{CF} によって補整される必要があると考えられ、この補整係数を C_{Factor} と定義する。表13から、使用したCF繊維径の平均値は $1.68\ \mu\text{m}$ であることと、 S_{PFF} の平均値は28.2であることが分かっている。ここで、補整係数 C_{Factor} を求めるためには、CFの繊維径 d_{CF} と S_{PFF} について、それぞれの平均値に対する個別値の相対関係を明らかにする必要があると考えた。そこで、CFの繊維径 d_{CF} と S_{PFF} の各測定値をそれぞれの平均値($1.68\ \mu\text{m}$ 又は28.2)で除することで、表14及び図89に示すとおり、個別のCF繊維径 d_{CF} の値と S_{PFF} の値を平均値に対する相対比として得た。

Table 14 Ratio of fiber diameter of CF and S_{PFF} to each average values

Ratio to Avg.	Individual values				Avg.
$d_{CF}/1.68$ [-]	0.46	0.57	1.20	1.78	1.00
$S_{PFF}/28.2$ [-]	1.21	1.15	0.94	0.70	1.00

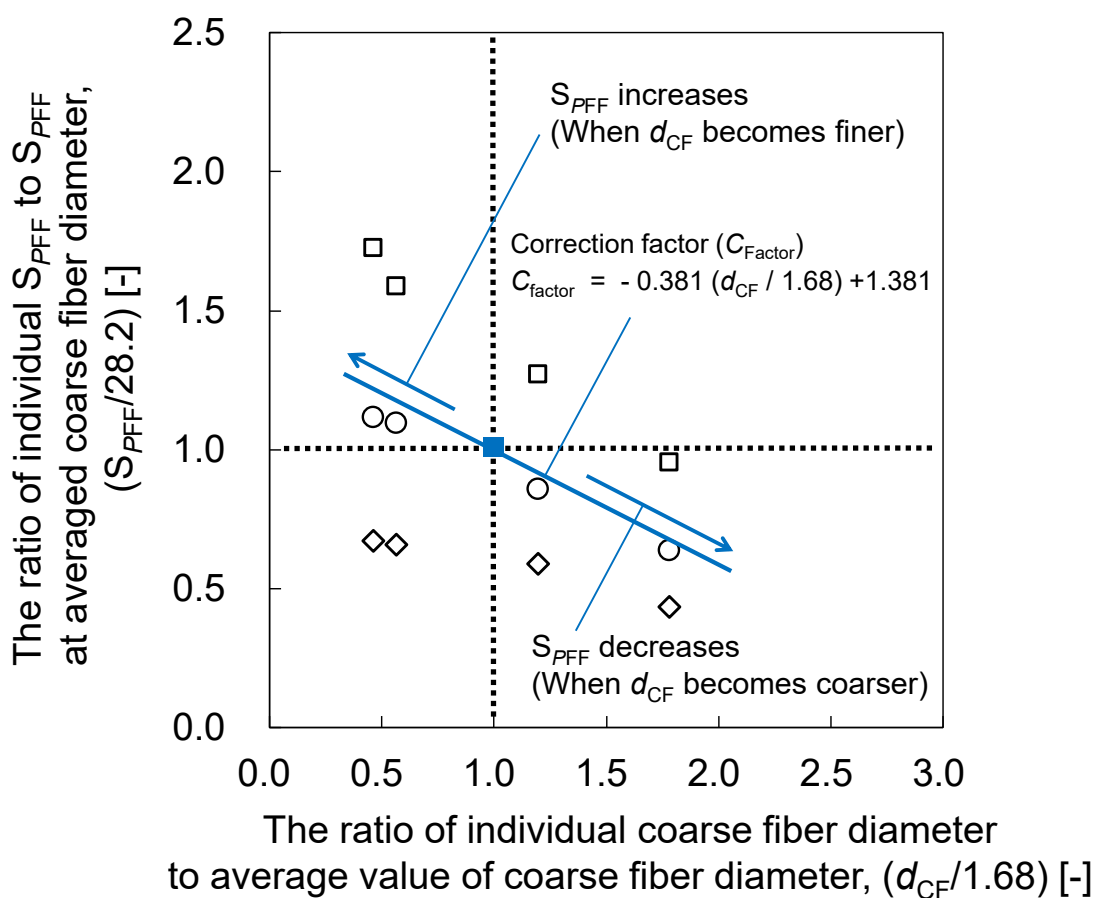


Figure 89 Correlation between the ratio of d_{CF} and S_{PFF} to each average values

図 89 の相対関係から、補正係数 C_{Factor} は式(65)のとおりに得られた。

$$C_{\text{Factor}} = -0.381 \frac{d_{\text{CF}}}{1.68} + 1.381 \quad (65)$$

補正係数 C_{Factor} は CF の繊維径 d_{CF} の増加に比例して低下する 1 次式で示されたため、負の相関を示すことが分かった。この結果は、補正係数 C_{Factor} において、CF の繊維径 d_{CF} が、FF 配合量 W_{FF} 増加による対数透過率の上昇値 S_{PFF} に与える影響は、FF の繊維径 d_{FF} と比べて極めて小さいことを意味する。この要因としては、CF 繊維径 d_{CF} が S_{PFF} に影響を与える理由が、CF が支配するフィルタ内部の繊維充填率 α に影響しているためと考えられる。CF と FF で構成されるフィルタ内部の繊維充填率 α を考察する際、CF のみの影響から見ると、図 33 から、テストフィルタの充填率 α は CF の繊維径 d_{CF} に比例して低下するため、内部の空隙としては大きくなることを示す。テストフィルタ E-P は、FF が配合されるものの、CF により生じた空隙が大きい程に、空隙を埋めるために必要な FF 配合量 W_{FF} は多くなると考えられる。言い換えると同量の FF を配合しても、CF の繊維径 d_{CF} が大きい程、対数透過率の上昇値 S_{PFF} は低くなる。

この補正係数 C_{Factor} は、CF の繊維径 d_{CF} によって変動する FF の配合量 W_{FF} 増加に対する対数透過率 $-\ln P_{\text{FF}}$ の上昇値を補正するため、 $-\ln P_{\text{FF}}$ に乗ずる必要がある。全体の対数透過率 $-\ln P_{\text{CF+FF}}$ は、式(66)のとおりに構築される。

$$\begin{aligned} -\ln P_{\text{CF+FF}} &= -\ln P_{\text{CF}} + C_{\text{Factor}} (-\ln P_{\text{FF}}) \\ &= 8.5 d_{\text{CF}}^{-2} W_{\text{CF}} + \left(-0.381 \frac{d_{\text{CF}}}{1.68} + 1.381 \right) 7.5 d_{\text{FF}}^{-2} W_{\text{FF}} \end{aligned} \quad (66)$$

4-5-4 実験式による予測の妥当性

構築した実験式の妥当性を確認するために、テストフィルタ E-P の対数透過率について実験値($-\ln P_{\text{Meas.}}$)と実験式からの計算値($-\ln P_{\text{Calc.}}$)の関係を図 90 に示す。また、図 90 には、比較対象として、Kirsch ら(1978)による FMF の理論式による計算値を示す。実験値と計算値の相対誤差(RE)を、式(54)から算出した。構築した実験式から求めた $-\ln P$ 計算値の実験値に対する相対誤差(RE)は 13.2%となり、 $\pm 15\%$ を満足した。相対誤差が 44.5%である FMF の理論式よりも精度が大幅に改善したと言える。CF と FF の繊維径と配合量が対数透過率に与える影響を個別に調査し、明らかにした結果、この実験式の精度が改善したものと考えられる。

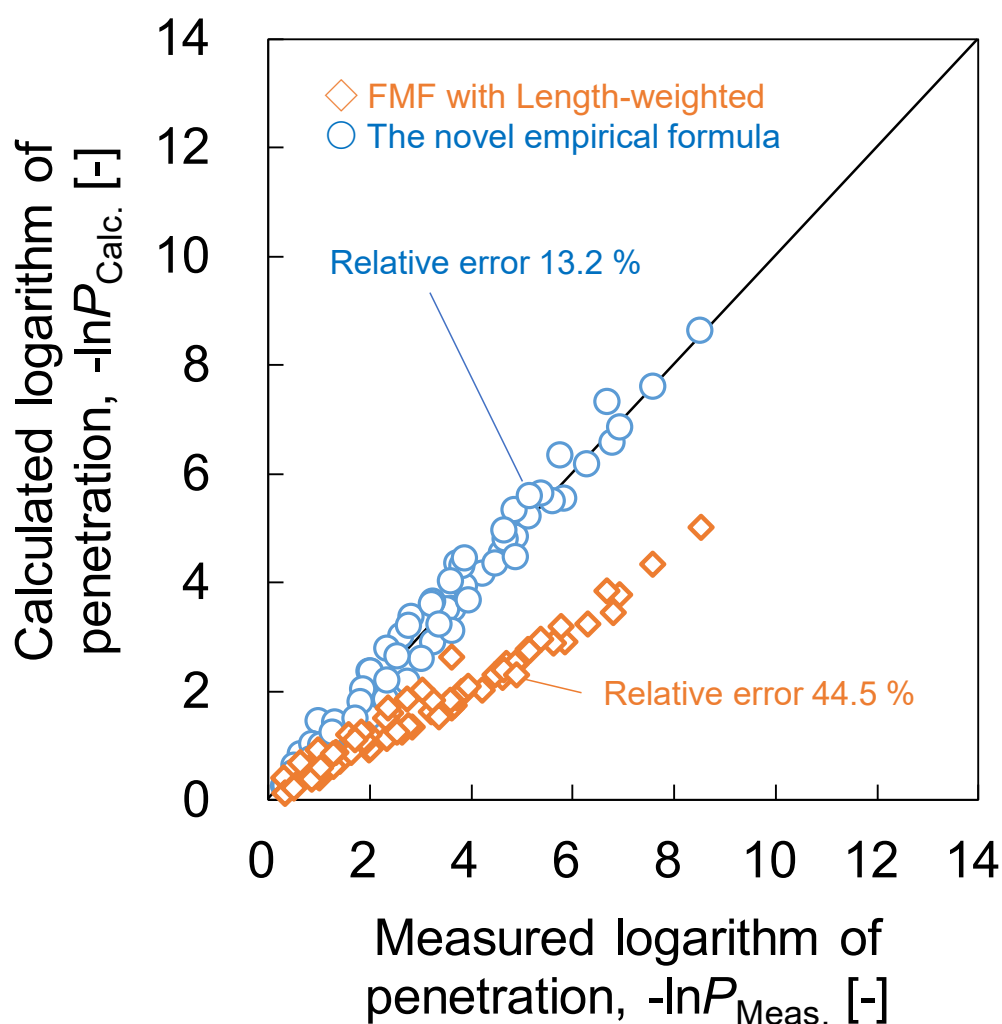


Figure 90 Correlation between the measured logarithm of penetration and calculated one for test filter

次に、実際の防塵マスク用エアフィルタ適用可能かどうかを調査する必要がある。そこで、防塵マスクメーカーから、配合内容（使用する繊維径とその配合量）が既知である4種類の実用フィルタを入手して評価した。ただし、防塵マスク用エアフィルタは、1項の緒言で述べたように、ろ過面積を増加させるために、プリーツ構造となっている。このプリーツフィルタをそのまま、本研究の試験装置に適用することはできない。そこで、テストフィルタと同じ直径 105 μm の円形に切り抜いて実施した。テストフィルタと同じ形状での配合内容を表 15 に示す。今回入手したフィルタの捕集効率区分は、80 %から 99.9 %までの4種類で、試料 1 から 4 の順に、捕集効率は上昇する。また、CF は C2(0.95 μm)と C3 (2.01 μm)の2種類で、FF は F2 (0.52 μm)の1種類であった。CF で厚みを調整し、FF の繊維配合量を増やすことで捕集効率を制御していると考えられる。

Table 15 Fiber diameter and weight for material of actual air filter

Actual filter	Class	CF		FF	
		Diameter [μm]	weight [g]	Diameter [μm]	weight [g]
Sample 1	$\geq 80\%$	2.01	0.42	0.52	0.04
Sample 2	$\geq 95\%$	0.95	0.25	0.52	0.08
Sample 3	$\geq 99\%$	2.01	0.38	0.52	0.17
Sample 4	$\geq 99.9\%$	2.01	0.38	0.52	0.25

実用フィルタから切り抜いたサンプルの対数透過率を実測し、CF と FF の繊維径及び配合量を使用し、構築した実験式から計算値を算出した。また、テストフィルタと同様に、式 (54)から相対誤差を算出し、表 16 と図 91 に示す。まず、従来の FMF による相対誤差は 31.6-53.5 % で平均値は 38.7 %と大きく、テストフィルタの相対誤差(44.5 %)と同様に、精度は低いと言わざるを得ない。構築した実験式の相対誤差は 11.4 – 26.0 %で平均値は 17.0 %となり、目標値の 15 %以内を満足しなかった。実用フィルタの面積はテストフィルタよりも大きいため、繊維分散のばらつきも大きいため誤差が大きくなったと考えられる。

Table 16 Logarithm of penetration and relative error for actual air filters

Actual filter	The logarithm of penetration, $-\ln P$ [-]			Relative error [-]	
	Measured value	Calculated value		FMF	Empirical formula
		FMF	Empirical formula		
Sample 1	2.58	1.20	1.91	53.5	26.0
Sample 2	4.24	2.90	4.94	31.6	16.5
Sample 3	6.12	3.97	5.42	35.1	11.4
Sample 4	8.40	5.51	7.21	34.4	14.2
Avg.	5.34	3.40	4.87	38.7	17.0

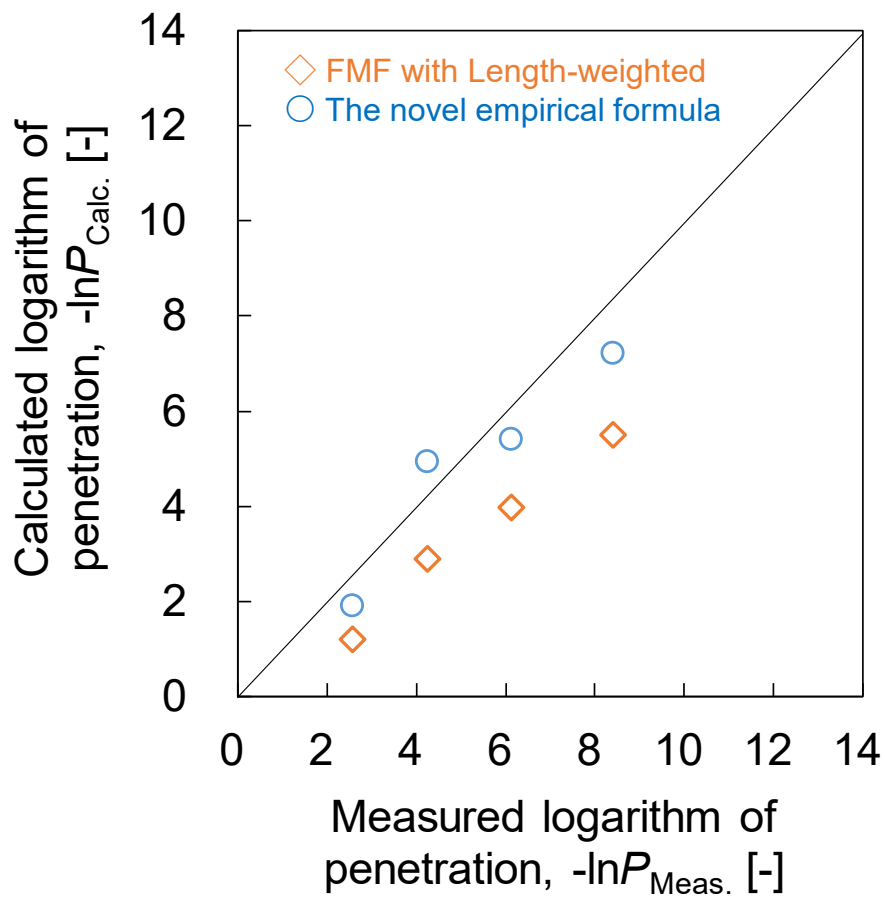


Figure 91 Correlation between the measured logarithm of penetration and calculated one for actual air filter

4-6 FMF 理論に基づいた対数透過率の新規予測式

4-5 項における実験式によるエアフィルタの性能予測による精度は、テストフィルタにおいては十分(相対誤差 $13.2\% \leq 15\%$)であったが、実用フィルタにおいては不十分($17.2\% \geq 15\%$)であったため、実用可能な実験式とは言えない。より正確な予測方法を構築する必要がある。ここで新たなアプローチを探す上で、Kirsch ら(1978)が提案した FMF の理論式には改善できる余地があると考えた。なぜならば、FMF の理論式には、前提条件があり、フィルタを構成する繊維の繊維径が均一であると仮定する必要があるものの、実際のエアフィルタは CF と FF の 2 種類の径で構成されており、CF と FF の繊維長平均値をフィルタの代表繊維径として当てはめているからである。この代表繊維径の導入によって、CF と FF の 2 種で構成されるエアフィルタへの予測精度が、単一繊維で構成されるフィルタよりも低下することは、緒言で述べたとおり明らかである。

CF と FF の 2 種類の繊維で構成されるフィルタに FMF の理論を適用する上で、2 枚重ねのフィルタの捕集理論を参考にすることにした。あるフィルタ A と B の捕集効率が η^A と η^B であると仮定する。フィルタ A と B を重ねて、フィルタ A を上流側に配置し、粒子含有空気を通気した場合、フィルタ A を通過した粒子($1-\eta^A$)のみが、フィルタ B の上流側に到達し、さらに、その内の($1-\eta^B$)のみがフィルタ B の下流側に到達する。従って、フィルタ A と B を重ねた場合の捕集効率 η^{AB} は式(67)で表わされる。

$$\eta^{AB} = 1 - (1 - \eta^A)(1 - \eta^B) \quad (67)$$

CF と FF で構成されるエアフィルタについても、図 92 のように、CF が上流側、FF が下流側と想定し、CF と FF のそれぞれによる捕集効率を η^{CF} , η^{FF} とすると、トータルの捕集効率 η^{CF+FF} は、式(68)で示されると考えられる。

$$\eta^{CF+FF} = 1 - (1 - \eta^{CF})(1 - \eta^{FF}) \quad (68)$$

ここで、 η_{CF} と η_{FF} は、CF と FF で個別に求める必要があり、式(69)と式(70)で示される。 η_{CF+FF} を式(71)に代入することで、フィルタ全体の捕集効率 E が求められる。

$$\eta^{CF} = \eta_D^{CF} + \eta_R^{CF} + \eta_{DR}^{CF} \quad (69)$$

$$\eta^{FF} = \eta_D^{FF} + \eta_R^{FF} + \eta_{DR}^{FF} \quad (70)$$

$$E = 1 - \exp \left\{ \frac{-4\alpha\eta^{CF+FF}T}{\pi(1-a)(1+\sigma)\delta d_f} \right\} \quad (71)$$

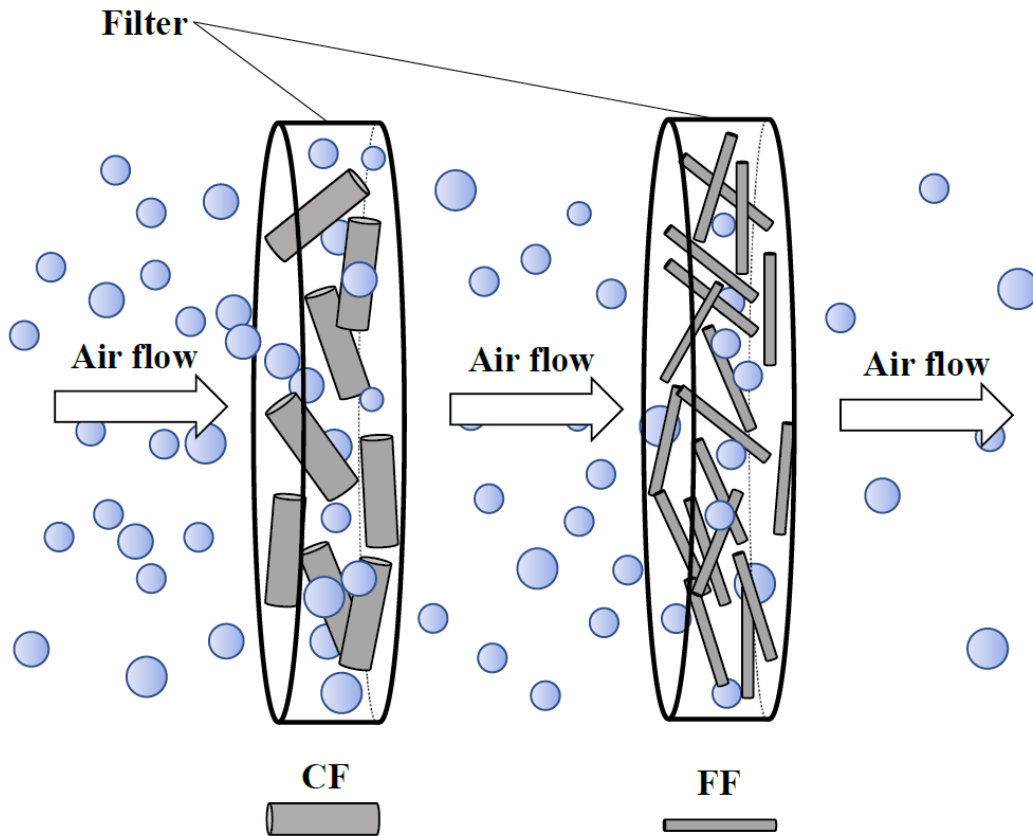


Figure 92 Filtering image of CF and FF

FMF 理論に基づいた新規予測式の妥当性を確認するために、テストフィルタ E-P の対数透過率について実験値($-\ln P_{\text{Meas.}}$)と理論式からの計算値($-\ln P_{\text{Calc.}}$)の関係を図 93 に示す。また、図 93 に、比較対象として、Kirsch ら(1978)による FMF の理論式と 4-5 章で構築した実験式による計算値を示す。実験値と計算値の相対誤差(RE)は、式(51)から算出した。FMF 理論に基づいた新規予測式による計算値と実測値の相対誤差(RE)は 9.9 %で、目標値(15 %以内)を満足しただけでなく、従来の FMF (RE:44.2 %)と 5-1 章で構築した実験式(RE:13.2 %)より極めて高い精度であることを示した。CF と FF による粒子捕集は、2 枚重ねのフィルタと同様に、CF と FF を 2 段階で発生しているものと考えられる。

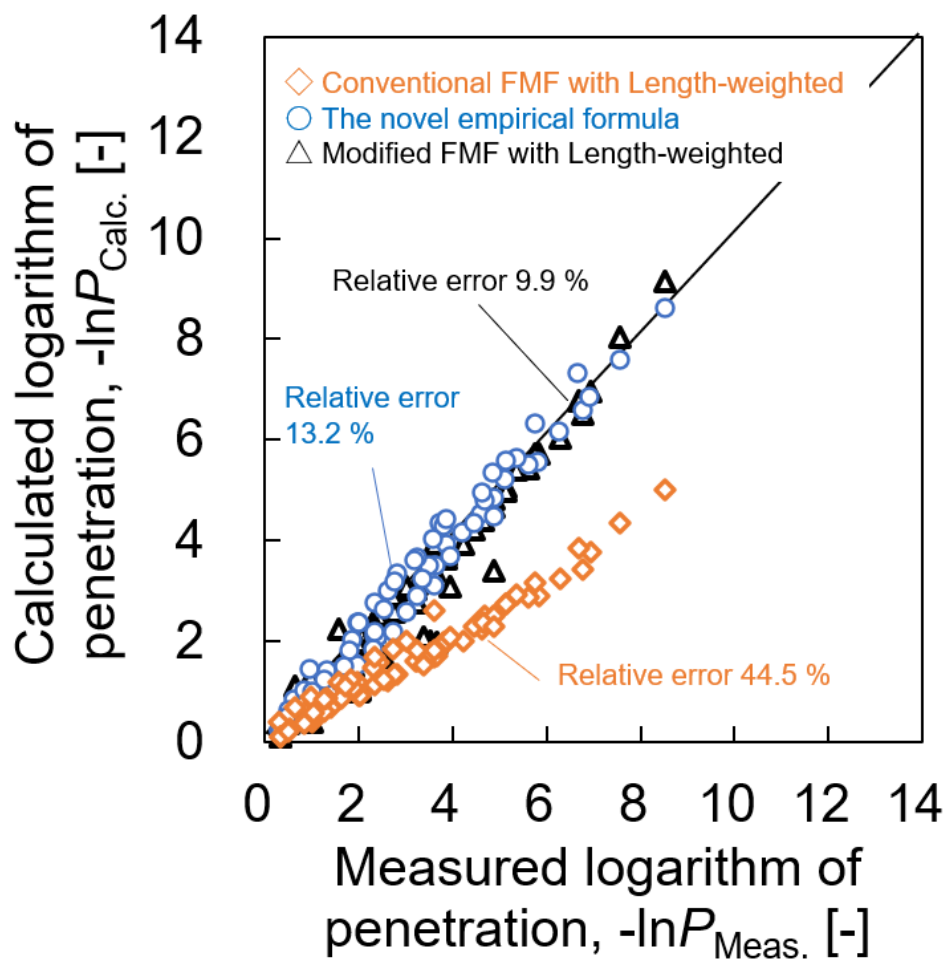


Figure 93 Correlation between the measured logarithm of penetration and calculated one for test filter

実用フィルタから切り抜いたサンプルについても対数透過率計算値を算出し、実測値と比較した(図 94 参照)。また、その相対誤差を表 17 に示す。FMF 理論に基づいた新規予測式を使用して求めた実用フィルタの対数透過率計算値と実測値の相対誤差(RE)は 10.5–19.1% となり、平均値で 14.8% となった。テストフィルタの RE(9.9%)より高い値となったが、目標値の 15% 以内は満足した。このことから、FMF 理論に基づいた新規予測式はテストフィルタだけでなく、実用フィルタに対しても適用可能と結論づけられる。

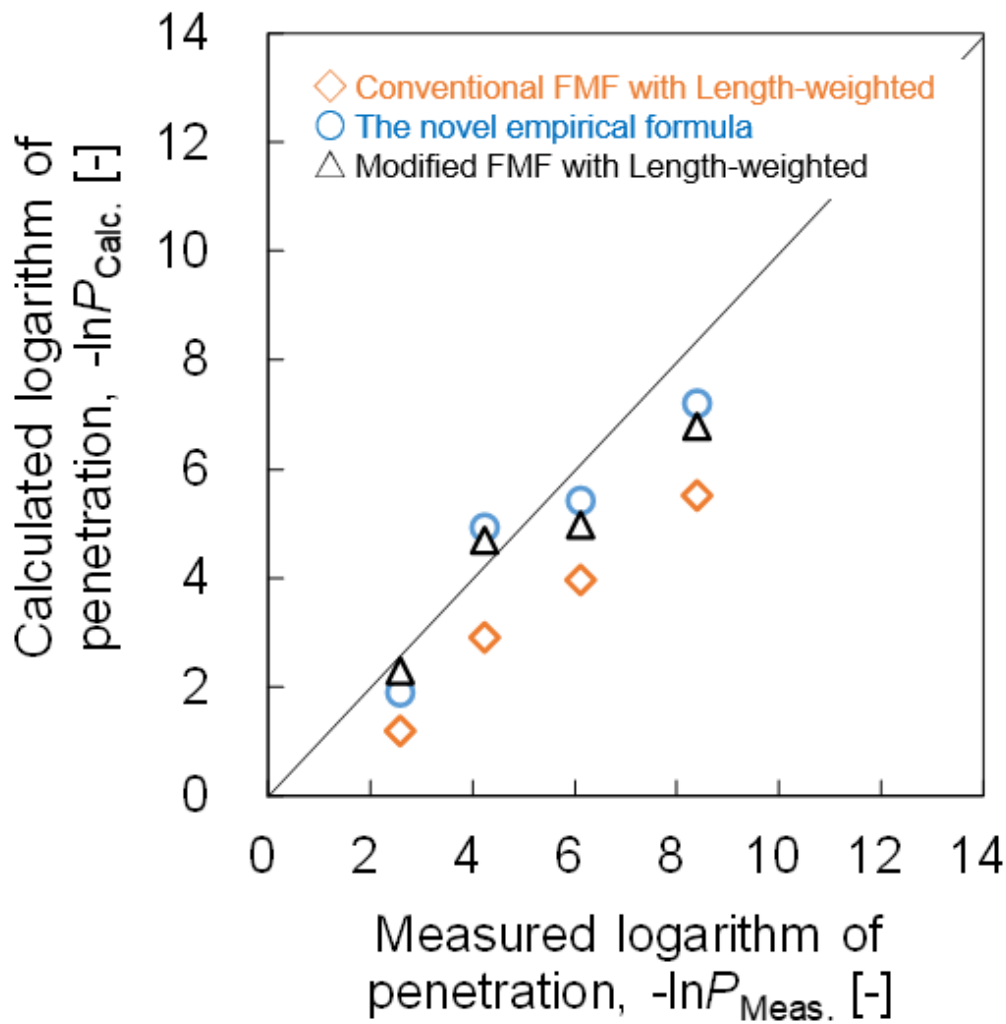


Figure 94 Correlation between the measured logarithm of penetration and calculated one for actual air filter

Table 17 Logarithm of penetration and relative error for actual air filters

Actual filter	The logarithm of penetration, $-\ln P$ [-]				Relative error [%]		
	Measured value	Calculated value			FMF	Empirical formula	Modified FMF
		FMF	Empirical formula	Modified FMF			
Sample 1	2.58	1.20	1.91	2.31	53.5	26.0	10.5
Sample 2	4.24	2.90	4.94	4.70	31.6	16.5	10.8
Sample 3	6.12	3.97	5.42	4.98	35.1	11.4	18.7
Sample 4	8.40	5.51	7.21	6.80	34.4	14.2	19.1
Avg.	5.34	3.40	4.87	4.69	38.7	17.0	14.8

FMF 理論に基づいた新規予測式はテストフィルタだけでなく、実用フィルタに対しても適用可能であることを示すことができたが、適用範囲について述べる必要がある。CF と FF の混合フィルタによる粒子捕集が、CF と FF の 2 段階で生じる理論は、CF と FF がそれぞれ独立しており、互いの捕集機構に干渉しないことが前提にある。従って、CF と FF の粒子捕集が相互に依存しない領域を明らかにする必要がある。CF と FF の繊維間距離が十分に離れていれば干渉しないと考えられる。

そこで、今回使用した CF と FF で構成されるテストフィルタ E-P の繊維間距離の算出を試みた。テストフィルタ E-P は、表 12 に示すように、一定量 0.25 g の CF をベースにし、FF を 0.02 g ずつ増やした構成になっているため、フィルタの繊維径は一定ではなく、CF より細かい FF の配合量が増える程、繊維径平均値 d_{Avg} としては細くなる。テストフィルタ E-P は、CF と FF の繊維径と配合量は既知であり、繊維数が不明である。ただし、各ガラスウールは、繊維長は同等であるため、未知の繊維数は配合量と繊維径の 2 乗に比例すると考えられる。そこで、CF と FF の配合量を W_{CF} , W_{FF} , 繊維径を d_{CF} , d_{FF} とし、 W_{FF} に FF 繊維径に対する CF 繊維径の比の 2 乗を乗じることで繊維数を考慮した式(72)を用いて CF と FF の繊維径平均値 d_{Avg} を算出した。

$$d_{\text{Avg}} = \frac{d_{\text{CF}} W_{\text{CF}} + d_{\text{FF}} W_{\text{FF}} (d_{\text{CF}}/d_{\text{FF}})^2}{W_{\text{CF}} + W_{\text{FF}} (d_{\text{CF}}/d_{\text{FF}})^2} \quad (72)$$

繊維径平均値 d_{Avg} は FF の配合量に応じて変化するため、FF の配合量 W_{FF} に対する相関関係を図 95 に示す。FF の繊維配合量 W_{FF} の増加に伴い、繊維径平均値 d_{Avg} は低下した。また、FF の配合量が小さい領域においては、CF の繊維径 d_{CF} が支配的で繊維径平均値 d_{Avg} に対し、大きな影響を持つ。一方、FF の配合量が多い領域での繊維径平均値 d_{Avg} においては、CF 繊維径 d_{CF} による差ほとんど見られず、FF の繊維径 d_{FF} が支配的であるが、FF の配合量 W_{FF} が 0.08 g を超えると、全体的に 0.5-1.0 μm 付近で収束し、テストフィルタごとの差は小さくなった。ここで、各テストフィルタを構成する繊維が、図 68 に示すように等間隔で均一に充填していると仮定し、図 95 で算出した繊維径平均値 d_{Avg} と実測した充填率 α を用い、式(48)から、繊維間距離 D_i を求めた(図 96)。繊維間距離 D_i は図 95 に示す繊維径平均値 d_{Avg} と同様の傾向が見られた。FF の繊維配合量 W_{FF} が増加し、繊維径平均値 d_{Avg} が細くなるにつれて、繊維間距離 D_i は減少し、FF の配合量が 0.08 g を超えると、全体的に 1.5-3.0 μm 付近で収束し、テストフィルタごとの差は小さくなった。

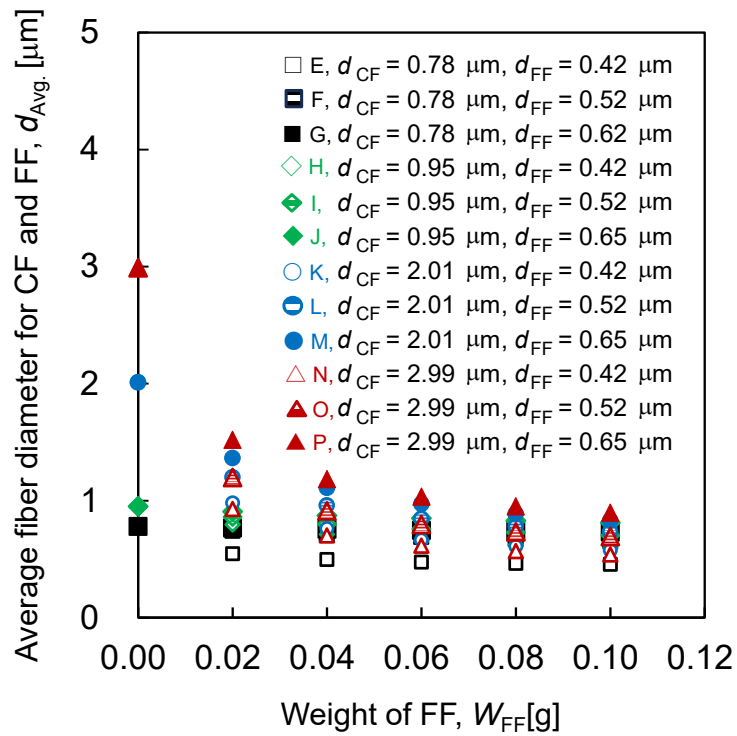


Figure 95 Average fiber diameter for CF and FF

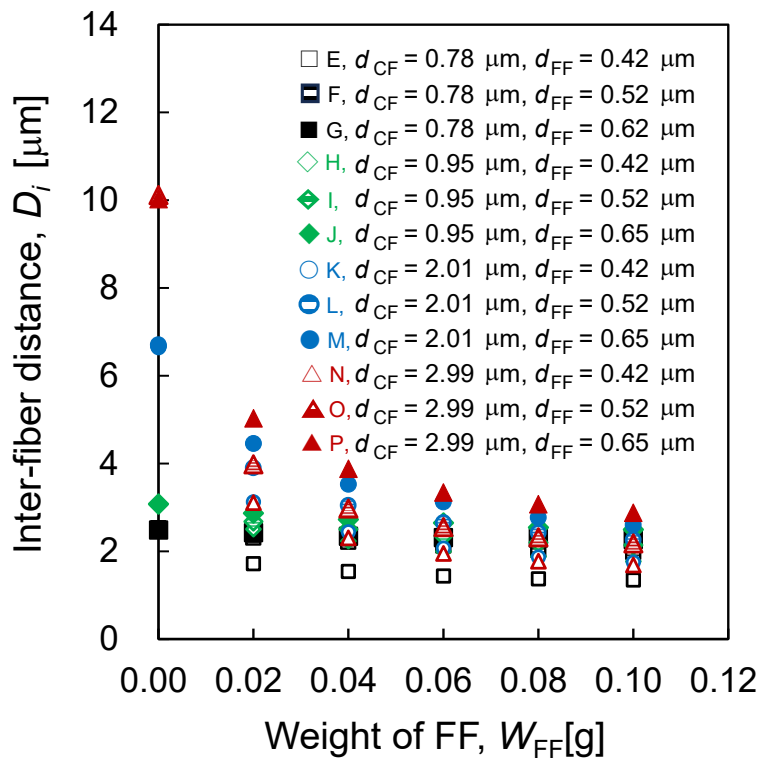


Figure 96 Inter-fiber distance for test filter E-P

そこで、繊維径平均値 d_{Avg} を繊維間距離 D_i で除することにより、繊維間距離 D_i に対する繊維径平均値 d_{Avg} の比 (d_{Avg}/D_i) を求めた(図 97)。繊維間距離 D_i に対する繊維径平均値 d_{Avg} の比 (d_{Avg}/D_i) は、CF の繊維径 d_{CF} が細く、FF の配合量 W_{FF} が大きくなるにつれて、わずかに上昇したが、おおよそ 0.30-0.34 で一定の値となることが示された。繊維径が大きくなると、空隙も大きくなり、繊維間距離 D_i も大きくなるため、繊維間距離 D_i に対する繊維径平均値 d_{Avg} の比 (d_{Avg}/D_i) としては、同等になるものと考えられる。

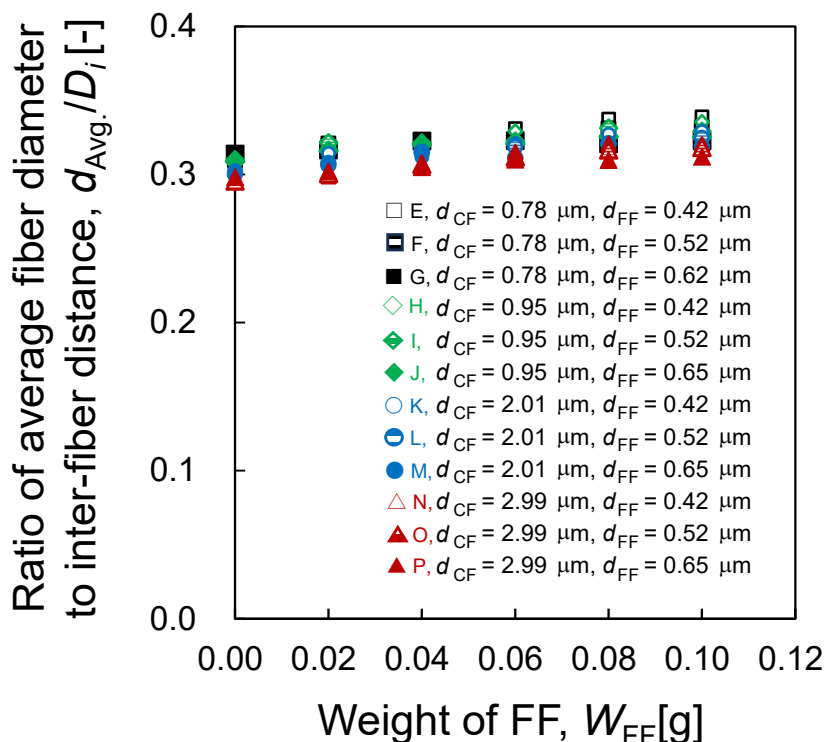


Figure 97 Ratio of average fiber diameter to inter-fiber distance

次に、表 17 で述べた実用フィルタから切り抜いたサンプルについて、繊維径平均値 d_{Avg} 、繊維間距離 D_i 、繊維間距離 D_i に対する繊維径平均値 d_{Avg} の比 (d_{Avg}/D_i) を表 18 に示す。実用フィルタの繊維間距離 D_i に対する繊維径平均値 d_{Avg} の比 (d_{Avg}/D_i) は 0.28-0.32 で、テストフィルタ (0.30-0.34) と比べてやや小さい傾向があるものの、極端な差ではない。

Table 18 Ratio of average fiber diameter to inter-fiber distance

Actual filter	Average fiber diameter [μm]	Packing density [-]	Thickness [mm]	Inter-fiber distance [μm]	ratio of average fiber diameter to inter-fiber distance [-]	Relative error [%]
Sample 1	1.13	0.067	0.81	3.89	0.29	10.5
Sample 2	0.73	0.062	0.61	2.58	0.28	10.8
Sample 3	0.71	0.076	0.82	2.29	0.31	18.7
Sample 4	0.66	0.082	0.88	2.04	0.32	19.1

テストフィルタと実用フィルタのそれぞれについて、繊維間距離 D_i に対する繊維径平均値 $d_{Avg.}$ の比 ($d_{Avg.}/D_i$) と FMF 理論に基づいた新規予測式による対数透過率の予測精度(相対誤差)の関係を図 98 に示す. 実用フィルタは繊維間距離 D_i に対する繊維径平均値 $d_{Avg.}$ の比 ($d_{Avg.}/D_i$) が大きい Sample 3 (0.31) と Sample 4 (0.32) で相対誤差が 18.7 % と 19.1 % と大きくなる傾向があった. しかしながら, テストフィルタでは, $d_{Avg.}/D_i$ と相対誤差に明確な相関関係は見られない. なお, テストフィルタの相対誤差は, およそ 0 から 40 の間で大きくばらついている. 従って, テストフィルタと実用フィルタにおける繊維間距離 D_i に対する繊維径平均値 $d_{Avg.}$ の比 ($d_{Avg.}/D_i$) の分布である 0.28-0.34 の範囲においては, 予測精度に有意な差は見られない. 従って, 少なくとも, $d_{Avg.}/D_i$ が 0.28-0.34 の範囲は, CF と FF の繊維間距離が十分に離れており, CF と FF の粒子捕集が相互に依存しない領域であると予想される.

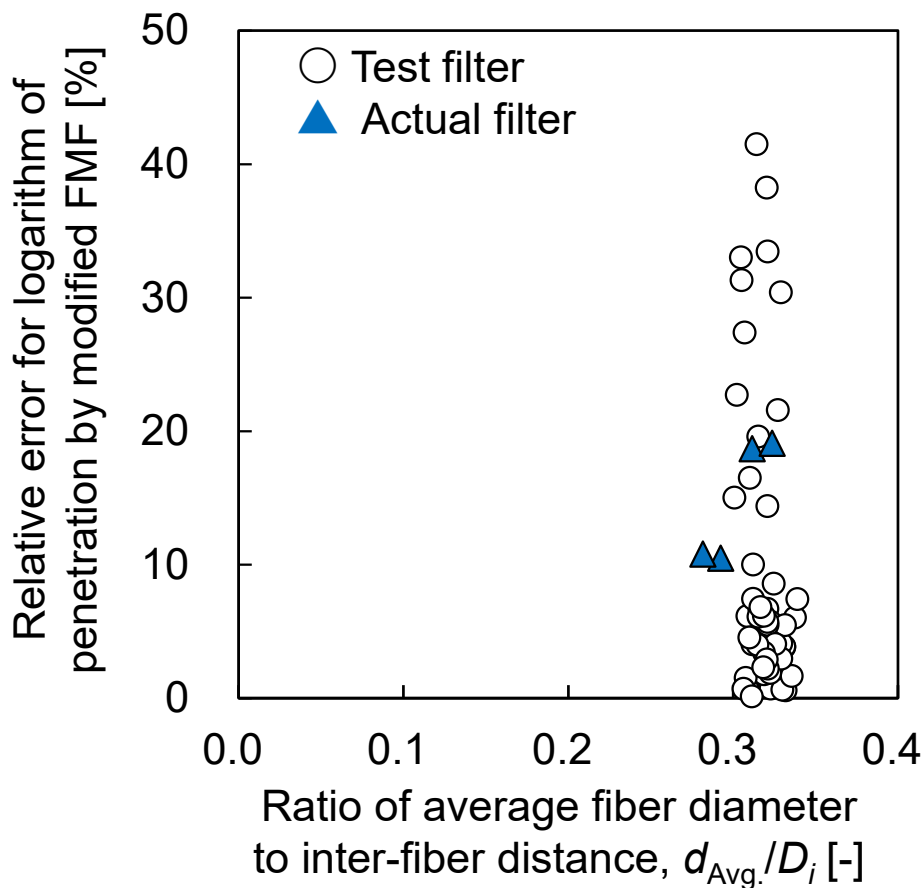


Figure 98 Correlation between ratio of average fiber diameter to inter-fiber distance and relative error for logarithm of penetration by modified FMF

ここで、繊維間距離 D_i に対する繊維径平均値 d_{Avg} の比(d_{Avg}/D_i)が十分に小さければ、CF と FF の距離が十分に離れていると考えられるため、適用範囲として d_{Avg}/D_i の上限を設定する必要がある。しかしながら、本研究の対数透過率の測定結果では、使用したエアフィルタの d_{Avg}/D_i が 0.28-0.34 となり、その範囲内では予測精度に有意な差は見られなかったため、本研究の試験結果から、 d_{Avg}/D_i の上限を設定することは困難である。そこで、同様のメカニズムを持つレーザーによる粒子の光散乱に着目した。大気中の粒子にレーザーを当てた場合、粒子表面で光は散乱し、粒子濃度が低いと単散乱になるが、粒子濃度が高いと散乱した光が周囲の粒子に当たり、再度光散乱が発生し、これを多重散乱と呼ぶ。文献(レーザ計測)によると、この多重散乱が問題になる濃度は、図 99 に示すように、粒子同士の表面間の距離 G_{SP} に対する粒子径 d_p の比(d_p/G_{SP})が 50 以上と考えられている^[67]。ここで、エアフィルタも同様に、繊維同士の表面間の距離に対する繊維径の比が 50 以上となる時が CF と FF がそれぞれの粒子捕集に干渉する基準と考えた。しかしながら、図 100 に示すように、エアフィルタの繊維間距離 D_i は、繊維同士の中心間の距離を示すため、図 99 に示す粒子同士の表面間の距離 G_{SP} と定義が異なる。よって、多重散乱が問題になる濃度の定義に一致させると、式(73)のとおり、繊維同士の表面間の距離($D_i - d_{Avg}$)に対する繊維径平均値 d_{Avg} の比となる $d_{Avg}/(D_i - d_{Avg})$ が 50 以上になる時に、CF と FF の干渉が発生すると考えられる。

$$\frac{d_{Avg.}}{D_i - d_{Avg.}} \geq 50 \quad (73)$$

式(73)を式変形して求めた式(74)のとおり、繊維径平均値 d_{Avg} と繊維間距離 D_i の比(d_{Avg}/D_i)が 0.98 以上になると CF と FF の距離が近すぎて、それぞれ CF と FF の粒子捕集に干渉すると考えられる。

$$\frac{d_{Avg.}}{D_i} \geq 0.98 \quad (74)$$

使用したエアフィルタの繊維径平均値 d_{Avg} と繊維間距離 D_i の比(d_{Avg}/D_i)は 0.28-0.34 であり、0.6 以上の差があるため、十分な繊維間距離であると考えられる。

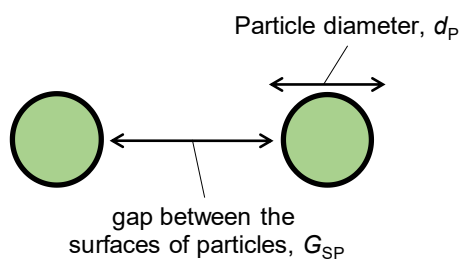


Figure 99 Definition of gap between the surfaces of particles in laser light scattering

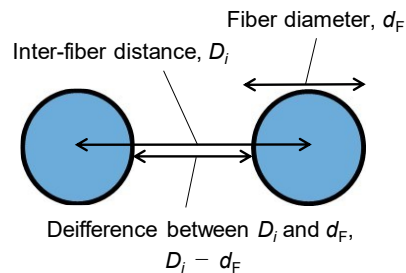


Figure 100 Definition of inter-fiber distance in filtration

次に、エアフィルタの繊維間距離 D_i に対する繊維径平均値 d_{Avg} の比 (d_{Avg}/D_i) が 0.98 以上になる条件を考察する。図 68 のとおり、繊維が等間隔で均一に充填される場合、繊維間距離 D_i は式(48)のとおり与えられるため、繊維間距離 D_i に対する繊維径平均値 d_{Avg} の比 (d_{Avg}/D_i) は、式(75)で求めることができ、繊維の充填率 α のみを変数とした関数であることが分かる。

$$d_{\text{Avg}}/D_i = 2\sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \quad (75)$$

式(75)を用い、 d_{Avg}/D_i が 0.98 となる時の繊維充填率 α を求めるために、繊維充填率 α と繊維間距離 D_i に対する繊維径平均値 d_{Avg} の比 (d_{Avg}/D_i) の関係を図 101 に示す。 d_{Avg}/D_i が 0.98 以上となる繊維充填率 α は、0.75 以上となった。 α が 0.75 以上の領域においては、粒子の光の多重散乱と同じように、CF と FF の粒子捕集が干渉すると考えられる。よって、CF 層と FF 層の 2 段階での粒子捕集を考慮した新規予測式が成立する条件は、エアフィルタの繊維充填率 α が 0.75 未満であることと考えられる。一般的なエアフィルタの繊維充填率が約 0.1 以下と考えられており^[68]、適用条件の 0.75 と 0.6 以上の大きな差があることを考慮すると、新規予測式は、ほぼ全てのエアフィルタに適用可能と考えられる。

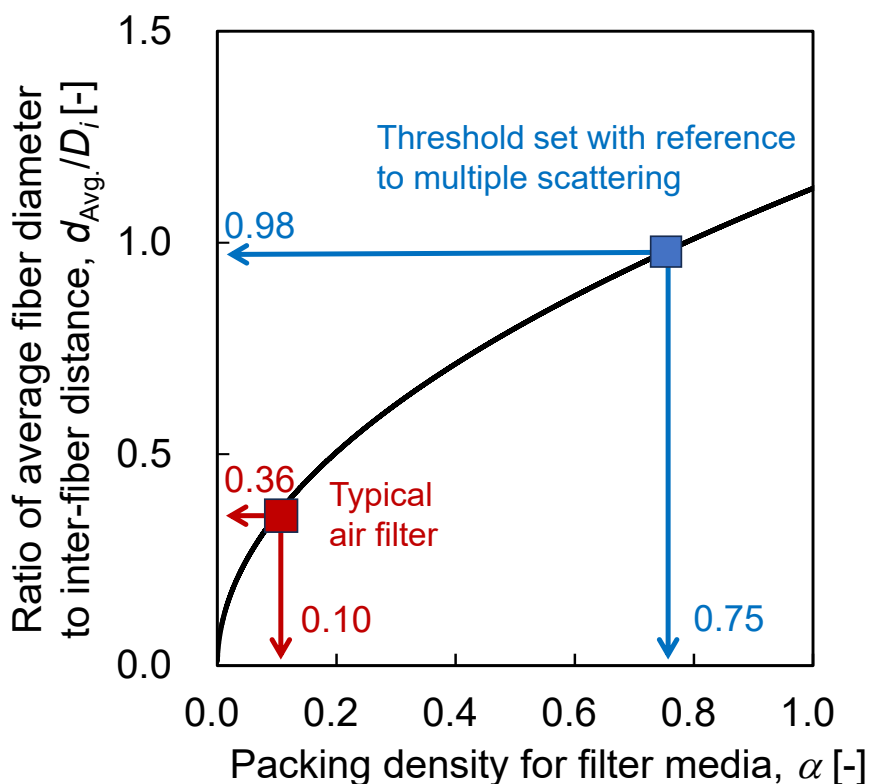


Figure 101 Correlation between packing density for filter media and ratio of average fiber diameter to inter-fiber distance

第5章 結言

エアフィルタの対数透過率を正確に予測する方法を確立するために、構成する繊維径と配合量を検討し、遮光率 LSR と対数透過率 $-\ln P$ を実測することで以下の知見を得た。

1. 遮光率からのエアフィルタの対数透過率予測

- ・エアフィルタの対数透過率は、遮光率の2乗に比例し、構成する繊維の径に反比例することが分かった。
- ・フィルタの繊維径と遮光率を変数とした対数透過率の予測式を確立し、算出した計算値と実測値の相対誤差は平均値で23.4%であり、従来のFMF理論(相対誤差44.5%)と比べ、精度が大幅に向上した。
- ・実用のエアフィルタの対数透過率の平均値に対するばらつきは±15%程度であり、実用のエアフィルタの対数透過率の予測性能は不十分である。

2. Coarse fiber (CF)及び Fine fiber (FF)の2種類で構成されるエアフィルタの対数透過率予測

2-1 CF と FF の繊維径と繊維配合量をパラメータとした実験式による予測

- ・CF と FF の繊維径によらず、エアフィルタの繊維配合量を増やすと対数透過率は直線的に増加し、配合量に対する対数透過率の増加割合は繊維径の2乗に反比例した。
- ・FF の配合量に対する対数透過率の増加割合はCF の繊維径の影響を受け、径が大きくなるにつれて低下する。
- ・FF の対数透過率の増加割合に、CF の繊維径による補正係数を乗ずることで、CF と FF それぞれの対数透過率の和で示される対数透過率の実験式を構築した。
- ・実験式により算出した計算値と実測値の相対誤差は平均値で17.0%であった。

2-2 FMF 理論式に基づいた捕集効率の予測式

- ・CF と FF で構成されたフィルタをそれぞれCF と FF の2層で構成されるフィルタと仮定し、フィルタを透過する粒子をCF と FF の透過率の積として推定するFMFの理論に基づいた新規予測式を構築した。
- ・FMF理論に基づいた新規予測式より算出した計算値と実測値の相対誤差は平均値で14.8%であった。これは、実際の防塵マスク用エアフィルタの対数透過率のばらつきの範囲内であるため、実用フィルタに対し適用可能である。

- ・新規予測式の適用条件は, CF と FF が粒子の捕集へ互いに干渉しないことであり, その条件を満たすエアフィルタの繊維充填率は, 0.75 未満と見積もられた.
- ・一般的なエアフィルタの充填率は 0.1 以下であるため, この予測式は, ほぼ全てのエアフィルタに適用可能である.

参考文献

- [1] M. F. Hallock, P. Greenley, L. DiBerardinis and D. Kallin, Potential risks of nanomaterials and how to safely handle materials of uncertain toxicity, *J. Chem. Health Saf.*, 16, 16–23, (2009)
- [2] D. Iommis, Y. Grosse, B. Lauby-Secretan, F., Ghissassi, V., Bouvard, L. Benbrahim-Talla, N. Guha, R. Baan, H. Mattock, K. Straif, The carcinogenicity of outdoor air pollution, *Lancet Oncol*, 14, 1262–1263, (2013)
- [3] V. A. Senapati, A. Kumar, G. S. Gupta, A. K. Pandey and A. Dhawan, ZnO nanoparticles induced inflammatory response and genotoxicity in human blood cells: a mechanistic approach, *Food Chem. Toxicol.*, 85, 61–70 (2015)
- [4] V. V. Chrishtop, A. Y. Prilepskii, V. G. Nikonorova, V. A. Mironov, Nanosafety vs. nanotoxicology: adequate animal models for testing in vivo toxicity of nanoparticles, *Toxicology*, 462, (2021)
- [5] H. Bahadar, F. Maqbool, K. Niaz, M. Abdollahi, Toxicity of Nanoparticles and an Overview of Current Experimental Models. *Iran Biomed*, 20(1), 1-11, (2016)
- [6] H. Kan, D. Pan and V. Castranova, Engineered nanoparticle exposure and cardiovascular effects: the role of a neuronal-regulated pathway, *Inhalation Toxicol.*, 30, 335–342 (2018)
- [7] M. Awashra P. Mtyrnarz, The toxicity of nanoparticles and their interaction with cells: an in vitro metabolomic perspective, *Nanoscale Advance*, 5, 2674-2723, (2023)
- [8] K. Inoue, H. Takano, Effects of nanoparticles on lung damage in humans, *EUROPEAN RESPIRATORY journal*, 35(1), 224-225, (2010)
- [9] K. Iwai, Biological Effects of Ultrafine (Nano) Particles in Comparison with Fine Particles, *Jpn. Soc. Atmos. Environ.*, 35(6), 321-331, (2000)

- [10] Y. Matsui, Quantitative Relation between Nanoparticle Characters and Endocytic Cellular Uptake, *Eurozoru kenkyu*, 32 (3), 157-161, (2017)
- [11] A. Costa, M. Pinheiro, J. Magalhaes, R. Ribeiro, V. Seabra, S. Reis, B. Sarmento, The formulation of nanomedicines for treating tuberculosis, *Adv Drug Deliv Rev.*, 102, 102-115, (2016)
- [12] V. Kagan et al. Lung Macrophages “Digest” Carbon Nanotubes Using a Superoxide / Peroxynitrite Oxidative Pathway *ACS Nano*, 8 (6), 5610-5621, (2014)
- [13] 黒田 悦史, 吸入性微粒子に対する肺胞マクロファージの応答と免疫毒性研究, *産業医学ジャーナル*, 46 巻 (3 号), 45-50, (2023)
- [14] J. H. Ji, *et al.* Twenty-eight-day inhalation toxicity study of silver nanoparticles in Sprague-Dawley rats. *Inhal. Toxicol.* 19(10), 857–871, (2007).
- [15] M. Crosera, *et al.* Nanoparticle dermal absorption and toxicity: A review of the literature. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 82(9), 1043–1055, (2009).
- [16] J.O. Olugbodi, B. Lawal, G. Bako, Effect of sub-dermal exposure of silver nanoparticles on hepatic, renal and cardiac functions accompanying oxidative damage in male Wistar rats. *Sci Rep*, 13, 10539, (2013)
- [17] L. Yang, *et al.* Comparisons of the biodistribution and toxicological examinations after repeated intravenous administration of silver and gold nanoparticles in mice. *Sci. Rep.* 7(1), 3303, (2017)
- [18] L. Zhang, L. Wu, Y. Mi and Y. Si, Silver nanoparticles induced cell apoptosis, membrane damage of *Azotobacter vinelandii* and *Nitrosomonas europaea* via generation of reactive oxygen species, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 103, 181–186 (2019)
- [19] 小林 実, 馬來 伸吾, 橋本 芳造, 管 誓男, 被覆アーク溶接のヒューム発生現象の研究, *溶接学会誌*, 49 (7), 454-461. (1980)

- [20] 小嶋 純, 溶接ヒューム暴露のリスク低減措置, 産業衛生学雑誌, 65 (2), 95-99, (2023)
- [21] T. Iwasaki Working Environmental Improvement by Local Exhaust System at Aerosol Workplace, *Aerozoru kenkyu*, 13(1), 20-26, (1998)
- [22] 増田 敏充, 平野 秀樹, ドラフトチャンバーの進化と局所排気, 化学と教育, 66 (12), 568-571, (2018)
- [23] Y. Aiba, K. Kobayashi, J. Suzuki, Y. Shimizu, M. Nishimura, N Sasaki, S. Makino, T. Utsunomiya, A Questionnaire Survey on the Use of Dust Respirators among Lead Workers in Small Scale Companies, *Industrial Health*, 33, 35-42, (1994)
- [24] T. Myojo, M. Sugimoto, Comparative study of challenge aerosols for performance test for dust respirators, *Ind Health.*, 35(4), 502-7, (1997)
- [25] T. Myojo, PM_{2.5} and Mask, *Erozoru Kenkyu*, 28(4), 287-291, (2013)
- [26] H. Cho, C. Yoon, J Lee, A. Viner, E, Johnson, Comparison of pressure drop and filtration efficiency of particulate respirators using welding fumes and sodium chloride. *Ann Occup Hyg.*, 55(6), (2011)
- [27] J. Swanson, W. Watts, D. Kittelson, R. Newman, R. Ziebarth, Filtration Efficiency and Pressure Drop of Miniature Diesel Particulate Filters, *Aerosol Science and Technology*, 47, 452–461, (2013)
- [28] Y. Otani, H. Emi, Initial Collection Efficiency of Electret Filter and Its Durability for Solid and Liquid Particles, *The Society of Chemical Engineers Japan* 18(2), (1992)
- [29] 木場 昭人, 繊維とエアフィルタ用不織布, 繊維と工業, 51 (5), 206-120, (1995)
- [30] M. Lee, Y. Otani, N. Namiki, H. Emi, Prediction of Collection Efficiency of High-performance Electret Filters, *JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN*, 35(1), 57-62, (2002)

- [31] S. Yang, W. Lee, H. Huang, Y. Huang, C. Luo, C. Wu, K. Yu, Aerosol penetration properties of an electret filter with submicron aerosols with various operating factors, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, (42), 51-57, (2011)
- [32] R. Cai, L. Zhang, A. Bao, PM collection performance of electret filters electrospun with different dielectric materials-a numerical modeling and experimental study, *Building and Environment*, 131, 210-219, (2018)
- [33] J. Wu, B. Lin, H. Zhou, Y. Rao, C. Xu, Q. Zhou, S. Feng, Z. Zhong, W. Xing, Effect of Pleat Structure on the Air Purification Performance of a Polytetrafluoroethylene/Poly(ethylene terephthalate) Composite Membrane Filter, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62 (39), 16048-16057, (2023)
- [34] 労働安全衛生法第 42 条
- [35] S. Huang, C. Chen, C. Chang, C. Lai, C. Chen, Penetration of 4.5nm to 10 μm aerosol particles through fibrous filters, *Journal of Aerosol Science*, 38 (7), 719-727 (2007)
- [36] C. H. Jung, H. Park, Y. Kim, Theoretical study for the most penetrating particle size of dust-loaded fiber filters, *Separation and Purification Technology*, 116, 248-252, (2013)
- [37] ろ材評価用マスク用試験装置の紹介, 東京ダイレック株式会社
- [38] S. K. Friedlander, Mass and heat transfer to single spheres and cylinders at low Reynolds numbers, *AIChE Journal*, 3 (1), 43-48, (1957)
- [39] G. Natanson, Diffusive deposition of aerosol on a cylinder in a flow in the case of small capture coefficients, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 112 (1), 100-103 (1957)
- [40] M. Lee, H. Choi, M. Kumita, Y. Otani, Present Status of Air Filters and Exploration of Their New Applications, *KONA Powder and Particle Journal*, 37, 19-27, (2020)

- [41] R.F. Mardanov, S.K. Zaripov, V.F. Sharafutdinov, The theoretical study of the efficiency of diffusion deposition of nanoaerosols in the extended range of the Peclet numbers, *Particuology*, 77, 47-55, (2023)
- [42] A.A. Kirsch, N. A. Fuchs, Studies on Fibrous Aerosol Filters - III Diffusional Deposition of Aerosols in Fibrous Filters. *Ann. Occup. Hyg.*, (1968)
- [43] H. Wang, H. Zhao, Z. Guo, C. Zheng, Numerical simulation of particle capture process of fibrous filters using Lattice Boltzmann two-phase flow model, *Powder Technology*, 227, 111-122, (2012)
- [44] S. Kang, H. Lee, S. Kim, D. Chen, D.Y.H. Pui, Modeling of fibrous filter media for ultrafine particle filtration, *Separation and Purification Technology*, 209, 461-469, (2019)
- [45] H. Kim, W. Lee, S. Choi, K. Lee, M. Lee, Dependence of the fiber diameter on quality factor of filters fabricated with meta-aramid nanofibers, *Separation and Purification Technology*, 222, 332-341, (2019)
- [46] S. Kuwabara, The Forces experienced by Randomly Distributed Parallel Circular Cylinders or Spheres in a Viscous Flow at Small Reynolds Numbers, *JOURNAL OF THE PHYSICAL SOCIETY OF JAPAN*, 14 (4), 527-532, (1959)
- [47] T. Takahashi, Theory of Air Filtration and Electrostatic Effects, *Eurozoru Kenkyu*, 3(4), 283-291, (1988)
- [48] S.A. Hosseini, H. Vahedi Tafreshi, Modeling particle filtration in disordered 2-D domains: A comparison with cell models, *Separation and Purification Technology*, 74(2), 160-169, (2010)
- [49] L. Nicolaou, T.A. Zaki, Characterization of aerosol Stokes number in 90° bends and idealized extrathoracic airways, *Journal of Aerosol Science*, 102, 105-127, (2016)

- [50] I.B. Stechkina, A.A. Kirsch, N.A. Fuchs, Studies on fibrous aerosol filters - IV calculation of aerosol deposition in model filters in the range of maximum penetration, *Ann. Occup. Hyg.* 12, 1-8, (1969)
- [51] D. Rosner, M. Arias-Zugasti, Predicting the aerosol capture characteristics of fibrous filters. I. Exact- and tractable (3-moment) approximate-methods to incorporate aerosol polydispersity effects with a multi-mechanism, semi-analytic single-fiber particle capture fraction, *Separation and Purification Technology*, 257, (2021)
- [52] 吉岡直哉, 江見準, 孤立円筒によるエアロゾルの捕集効率-重力および慣性支配領域, *化学工学*, 36 (3), 313-319, (1972)
- [53] I. Langmuir, Report on smokes and filters. Ser. No 353, Filtration of aerosols and the development of filter materials, Office of Scientific Research and Development, 865, (1942)
- [54] I.B. Stechkina, N.A. Fuchs, Studies on fibrous aerosol filters - Calculation of diffusional deposition of aerosols in fibrous filters, *Ann Occup Hyg.*, 9(2), 59-64, (1966)
- [55] A.A. Kirsch, I.B. Stechkina, The Theory of Aerosol Filtration with Fibrous Filters, *Fundamentals of Aerosol Science*, John Wiley & Sons, New York, 170-252, (1978)
- [56] K.W. Lee, B.Y.H. Liu, Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters, *Aerosol Science and Technology*, 1, 147-161, (1982)
- [57] B.Y.H. Liu, K.L. Rubow, Efficiency, pressure drop and figure of merit of high efficiency fibrous and membrane filter media, *Proceedings of the Fifth World Filtration Congress, Nice*, (1990)
- [58] Payet, S. Filtration stationnaire et dynamique des aérosols liquides submicroniques.; Université Paris-Est Créteil Val de Marne (UPEC), (1991)
- [59] T. Soyama, Y. Otani, Effect of Fiber Diameter on the Collection Performance of High Efficiency Air Filters *Erozoru Kenkyu*, 23 (3), 210-216, (1978)

- [60] 瀬戸 章文, エアフィルタとしての不織布, 成形加工, 33(2), 41-44, (2021)
- [61] P. Bulejko, Numerical Comparison of Prediction Models for Aerosol Filtration Efficiency Applied on a Hollow-Fiber Membrane Pore Structure, *Nanomaterials*, 19:8(6), 447, (2018)
- [62] J. Tucny, L.Spreutels, F. Drolet, S. Leclaire, F.Bertrand, D. Vidal, Impact of fiber diameter polydispersity on the permeability of fibrous media, *Chemical Engineering Science*, 262, (2022)
- [63] K. Mattern, W. Deen, Mixing Rules for Estimating the Hydraulic Permeability of Fiber Mixtures, *AIChE Journal*, 54 (1), 32-41, (2008)
- [64] R.C. Brown, A. Thorpe, Glass-fiber filters with bimodal fiber size distributions, *Powder Technology*, 118, 3–9, (2008)
- [65] S. Jaganathan, V. Tafreshi, H. Pourdeyhimi, On the pressure drop prediction of filter media with bimodal fiber diameter, *Powder Technology*, 181, 89-95, (2008)
- [66] H. V. Tafreshi, M.S. A Rahman, S. Jaganathan, Q. Wang, B. Pourdeyhimi, Analytical expressions for predicting permeability of bimodal fibrous porous media, *Chemical Engineering Science*, 64 (6), (2009)
- [67] 大澤 敏彦, 小保方 富夫, レーザ計測, 裳華房, (1994)
- [68] Y. Otani, Present Status and Prospect of Air Filter, *Earozoru Kenkyu*, 35 (2), 83-87, (2020)

謝 辞

本研究を進めるにあたって、多くの御指導をいただきました。群馬大学エネルギー変換工学研究室の座間淑夫准教授、古畑朋彦教授に心より感謝申し上げます。座間淑夫准教授には研究内容の検討から論文の作成まで、研究全般にわたり懇切かつ細微にわたるご指導をいただきました。古畑朋彦教授には毎週のゼミや中間報告などにおいて多くの御指導をいただきました。

また、重松製作所の常務取締役研究部長の野口真様、研究室長の茂木佐登史様をはじめとする本研究にご協力いただいた皆様に心より感謝申し上げます。御二方には本研究についての打ち合わせで多くの御助言をいただきました。なお、重松製作所様には本研究を行う機会を与えていただいたと同時に多くの実験装置、材料をご提供していただきました。心より感謝申し上げます。

本研究を共に行った研究室の後輩である、外山凌真様に心より感謝申し上げます。日々の実験や資料作成など多くの面で手伝っていただきました。これからのご活躍を心よりお祈り申し上げます。

最後に、群馬大学エネルギー変換工学研究室の友人と、私を支えてくださった家族に心より感謝申し上げます。

2024年 1月24日 関口 裕亮