

論 文

加圧直流コロナ放電によるポリプロピレンフィルタの エレクトレット化に関する研究

Tun Lwin*, 成 奉 祚*, 高 島 和 則*, 桂 進 司*,², 水 野 彰**,¹

(2003年9月11日受付, 2003年11月20日受理)

Charging Characteristic of Polypropylene (PP) Filter Using High Pressure DC Corona

Tun LWIN*, Bong Jo SUNG*, Kazunori TAKASHIMA*,
Shinji KATSURA*,² and Akira MIZUNO**,¹

(Received September 11, 2003; Accepted November 20, 2003)

Filter material carrying an electric charge (electret filter) is not only widely used in disposable filtering face pieces, but also it has a place in vacuum cleaners, small-scale air cleaners, air-conditioning units, and so on. The advantage of that material is the augmentation of filtration efficiency without any increase of airflow resistance by means of an attractive force between airborne particles and charged fibers. The purpose of this study is to investigate the charging conditions for non-woven polypropylene fibrous material and to find the most effective charging condition(s) to make effective electrets. In this paper, the polypropylene (PP) filters were exposed to negative DC corona under various pressures. The penetrations of these PP filters were evaluated. While the face velocity was 5.19cm/sec, the penetration of the sample raw filter (uncharged filter) was about 75% of indoor air particles ($0.3\text{ }\mu\text{m}$) and pressure drop was about 15Pa. For 5.19cm/sec of face velocity, the penetration of the filter charged using a high pressure (0.2MPa) DC corona can be improved to nearly 1/100 of unchanged filter and 1/10 of the filter charged using typical charging technique.

1. はじめに

我々が生活する環境空気は花粉、胞子、バクテリア、ウイルス、菌類、飛散灰、タバコ煙、油煙などの様々な汚染粒子状物質(Particulate Matter)が無数に浮遊している。大気汚染研究において主に关心を持たれている浮遊粒子(SPM)は粒径 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ から数十 μm である⁽¹⁾。これらの浮遊粒子(SPM)の存在は我々の健康に有害なおそれもあり、半導体工業、精密機械工業などにも悪影響を与えている。人間に対しては空気中の高い浮遊粒子(SPM)濃度は呼吸器系の病気の原因となり、花粉、胞子はアレルギーの原因となっている。また、工業など

での産業においても空気中を浮遊している粒子が製品に付着し、歩留まり低下の原因になる⁽²⁾。したがって、環境衛生学上からも、また産業上の必要性からもこれらの汚染物質を除去して空気を浄化することが要求されている。浮遊粒子の捕集方法としては濾過による方法が最も一般的な方法であり、繊維層フィルタがサブミクロン粒子を高効率で捕集する方法として空気浄化に広く用いられている⁽³⁾。

しかし、繊維層フィルタを用いる方法では、集塵効率を上げるとフィルタの圧力損失も併せて上昇する欠点がある。そこで、静電的な効果を利用して繊維層フィルタの濾過性能を強化しているエレクトレットフィルタが開発された。エレクトレットフィルタは通常ポリプロピレン(PP)などのポリオレフィン系高分子の繊維に電荷を注入することによる作製され、電気分極が半永久的に保持されている。繊維が帶電しているため空気中の浮遊粒子は普通の繊維層フィルタと同様な物理的捕集に加え、静電気力(クーロン力及びグレーディエントル)によって捕集されることで、フィルタの性能を普通のフィルタより高くできる^(4, 5)。エレクトレットフィルタは普通のフィルタより低圧力損失で汚染粒子を高い効率で捕集でき

キーワード: エレクトレット化, 加圧直流コロナ放電, 逆電離, 微粒子, PP フィルタ

* 豊橋技術科学大学エコロジー工学(441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

Department of Ecological Engineering, Toyohashi University of Technology, 1-1 Tempaku-cho, Toyohashi 441-8580 Japan

** 分子科学研究所 (444-8585 岡崎市明大寺町字西郷中38)

Institute for Molecular Science, Okazaki National Research Institutes, 38 Nishigo-naka, Myodaiji, Ogasaki City, 444-8585 Japan

¹ mizuno@ims.ac.jp

² katsura@eco.tut.ac.jp

るので、エアコン、マスク、空気清浄機などの空気浄化装置に主として利用されている。

フィルタ性能への影響因子としてフィルタの密度(目付)、繊維直径及びガスの処理速度(面速度)などがある。また、フィルタの荷電方法によってフィルタ性能が影響される⁽⁶⁾。本研究ではより高い捕集効率、より低い圧力損失を持つPPエレクトレットフィルタを作製する荷電方法の開発を目的として研究を行った。荷電時の気圧をパラメータとして、試料PPフィルタを直流コロナ放電により作成し、フィルタ性能の比較を行った。

エレクトレットフィルタはPPフィルタなどに電荷を注入することで製造されており、フィルタを可能な限り強い電界強度の中で荷電する方がフィルタ性能を向上できると考えられる。しかし、コロナ放電による荷電では、最大電圧は火花電圧で規定され、それ以上では火花放電によりフィルタにピンホールが生じ破損してしまう。また、火花電圧以内でも、コロナ放電電流が大きくなると、フィルタ層に逆電離が起こり除電してしまうためエレクトレットフィルタの性能を向上することが困難となっている。(逆電離はフィルタ層内のフィルタ繊維周囲の空気の絶縁破壊であるが、電流密度は火花閃絡に比べてはるかに小さいため、フィルタ層にピンホールなど物理的破損は与えない。)そのため、従来のエレクトレットフィルタでは細い繊維を使用して性能向上を図っており、その結果として圧力損失が高くなる問題点がある。また、市販されているエレクトレットフィルタの帶電されている部分は40%程度と報告されているが⁽⁵⁾、帶電していない部分を減らすことができれば、さらに高捕集効率で低圧力損失のエレクトレットフィルタを作製できると考えられる。

パッシェンの法則から、加圧条件では火花電圧が高くなるため高い電圧でフィルタを荷電できる。また、高電気抵抗率のPPフィルタにコロナ放電電流が流れることでフィルタ層が絶縁破壊して逆電離が発生するが、加圧条件下ではフィルタ層の絶縁破壊強度が高くなるので、逆電離が阻止され、有效地に荷電できるものと考えられる⁽⁷⁾。本研究では、フィルタ性能をフィルタの面速度と圧力損失の関係、室内空気中の浮遊微粒子の透過率から評価し、加圧条件で荷電したフィルタ性能を大気圧で荷電したフィルタ性能と比較した。

2. 実験装置

フィルタ性能の評価装置を図1に示す。フィルタの微粒子透過率の測定は室内空気中の粒子を用い、作製した試料フィルタを装着して、下流のプロワで吸引することにより行った。

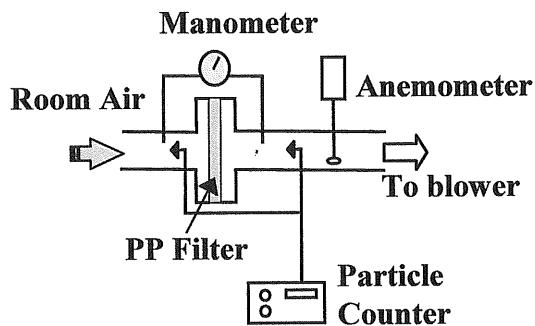


図1 フィルタ性能測定装置

Fig.1 Experimental Setup of Filter Tester

空気流速は熱線式風速計(Testo 405-V1)を用いて計測し、フィルタの面速度を式1で求めた。

$$U_b = \frac{Q}{A} \quad (式1)$$

但し、 U_b =フィルタの面速度

Q =フィルタを通る流量

A =フィルタの断面積

圧力損失はマノメータで求めた。フィルタの透過率はフィルタ通過前と通過後の室内微粒子をダストカウンタ(ダニ科学82-1800)により計測し、式2を用いて求めた。

$$P (\%) = \frac{N_{out}}{N_{in}} \times 100 \quad (\%) \quad (式2)$$

但し、 P =フィルタの透過率

N_{in} =フィルタ通過前の微粒子数(個)

N_{out} =フィルタ通過後の微粒子数(個)

フィルタを加圧条件で荷電できる装置を図2に示す。直径0.5mmのステンレスワイヤ1本をステンレス板の接地電極($\phi=150\text{mm}$)の表面から25mmの位置に置き、接地電極上に試料PPフィルタを置いて負極性の直流高電圧を印加した。加

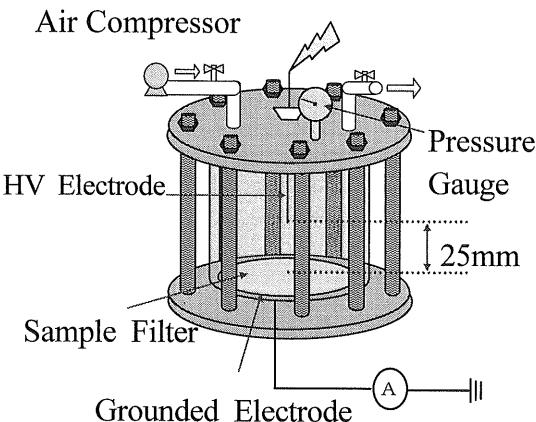


図2 フィルタを荷電する荷電装置

Fig.2 Schematic diagram of the charging Reactor

圧の条件下で荷電したときはエアコンプレッサーで室内空気を封入して装置を加圧した。予備実験で、大気圧条件下でPPフィルタを荷電し、荷電時間と透過率の関係を帶電時間5分間まで調べた。その結果、1分間に十分にエレクトレット化できたため、本実験の荷電時間を1分とした。

試料 PP フィルタの見かけ電気抵抗率は高い（約 $10^{12} \Omega \text{cm}$ 以上）ので荷電するときは PP フィルタに逆電離（絶縁破壊）が生じると予想される。逆電離とは放電電圧の上昇に伴ってフィルタ層に流れる電流が増加すると層内に高い電界が生じ、フィルタ層内でフィルタ纖維周囲の空気が絶縁破壊を起こす現象である。逆電離が発生するとフィルタ層の絶縁破壊点から（負極性高電圧で印加した場合）多量の正イオンが空間に放出されるため、フィルタ纖維そのものの負電荷が中和され、電流の異常増加が起こる^⑦。

フィルタを放電空間の接地電極表面に挿入すると電圧上昇に従ってフィルタ層の弱点部分が次々と絶縁破壊し、それに従ってフィルタ層の全表面が発光するようになる。その後、さらに電圧を上げると逆電離からストリーマを生じ、著しい電流の増大をきたす。その電流増加のために、フィルタ無しよりフィルタ有りのほうが、同じ電圧に対する電流が増加することが観察される^⑧。しかし、本実験で利用した荷電装置は加圧の条件で荷電するため、試料フィルタを荷電する際フィルタの状態を目で確認できない。そこで、本実験ではコロナ電流の異常増加は逆電離発生によるものであると考え、この現象が起こる電圧を逆電離発生電圧として試料フィルタの状態をフィルタ有無の電流電圧特性の比較から逆電離が生じるかどうかを判断した。なお逆電離の電圧電流特性には通常ヒステリシスが見られるが、本実験ではフィルタを荷電することが目的であるため、電圧を上昇させたときのコロナ電流値をもとに逆電離の発生を調べた。なお、電流が異常な増加を始める点が逆電離発生点であるが、本実験では電流値がフィルタ挿入無しの場合に比べて明らかに大きくなつた点を逆電離が発生している領域とした。

3. 実験結果

3.1 電流電圧特性

図3に大気圧及び加圧の条件でフィルタ無しのときと PP フィルタを負極性直流コロナ放電で荷電したときの電流電圧特性を示す。フィルタを従来の荷電方法である大気圧で荷電した場合、印加電圧-5kV から放電が開始し、-21kV から急激に電流が上昇して-26kV で火花開始が発生しフィルタが破損してしまった。フィルタ無しの場合に比べると図3に示すように-21kV 以上でフィルタ無しより電流が増加した。これは、フィルタで逆電離が起こっていると考えられる。

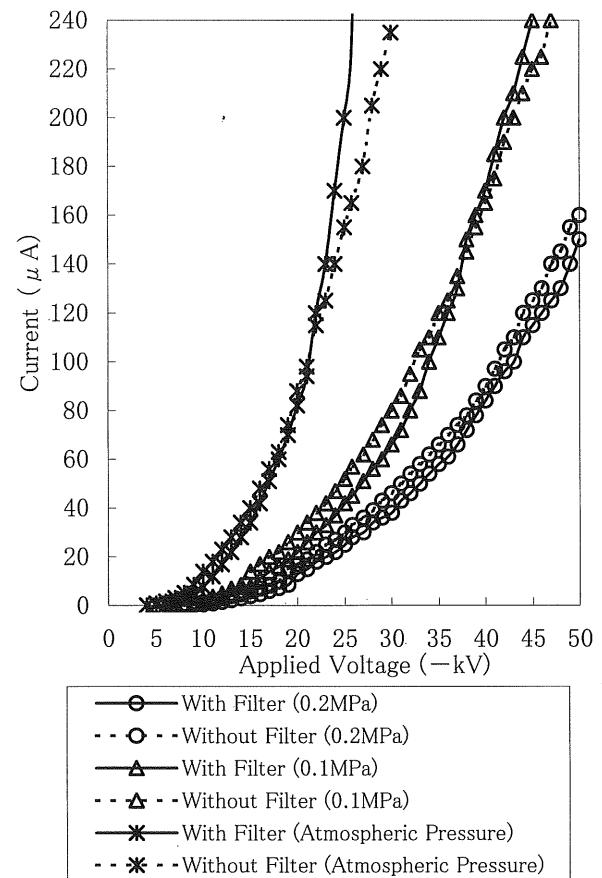


図3 PP フィルタを荷電したときの電流電圧特性
Fig.3 Current-Voltage Characteristic for PP filter

加圧して試料 PP フィルタを荷電した場合、0.1MPa の加圧のときは-8kV から放電が開始して-41kV で火花放電が起り、フィルタが破損した。この条件でも-37 kV を超えるとフィルタ無しの時より電流が増加し逆電離が起こっていることが見られた。装置を 0.2MPa まで加圧して試料 PP フィルタを荷電した場合、-50kV まで印加電圧を増加させることができた。この条件ではフィルタ自体に逆電離が起こっていないことが図3から確認できた。

3.2 試料フィルタの性能

本研究で利用した試料はメルトブロー紡糸法により作製された PP 不織布フィルタである。試料 PP フィルタは厚み 0.5mm、纖維直径 $3.5 \mu\text{m}$ 、目付 $40\text{g}/\text{m}^2$ のものである。フィルタの面積は 225cm^2 である。使用したフィルタの圧力損失と空気流量の関係を図4に示す。試料 PP フィルタは流量 $56\text{L}/\text{min}$ の吸引で 10Pa 、流量 $70\text{L}/\text{min}$ の吸引で 15Pa 、流量 $151\text{L}/\text{min}$ の吸引で 40Pa の圧力損失となり式1で計算した結果、フィルタの面速度は流量 $56\text{L}/\text{min}$ の場合 4.17cm/sec 、 $70\text{L}/\text{min}$ で 5.19cm/sec 、 $151\text{L}/\text{min}$ の吸引で 11.2cm/sec である。試料 PP フィルタは比較的太い纖維を用いているため、フィルタの面

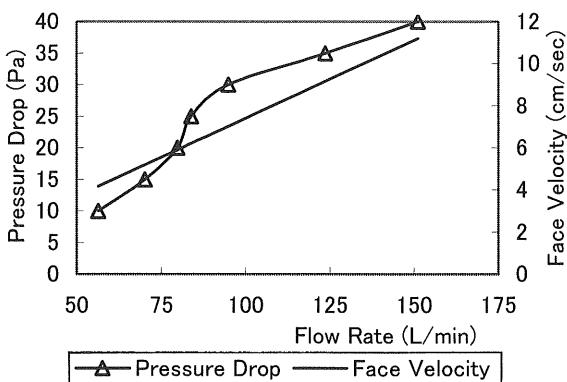


図4 未荷電フィルタの空気流量と圧力損失の関係
Fig.4 Pressure Drop Versus Flow Rate of uncharged Filter

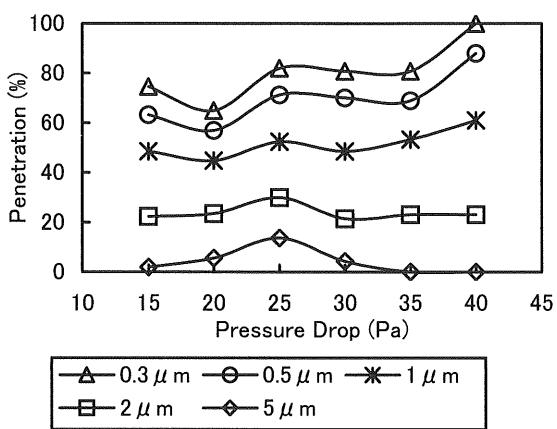


図5 未荷電PPフィルタの圧力損失における透過率
Fig.5 Characteristic of uncharged PP Filter

速度約 11cm/sec に対し約 50Pa の市販の空気清浄機用 PP フィルタ(繊維径約 2~2.5 μ m)より低い圧力損失が得られた。

試料 PP フィルタの透過率を図 5 に示す。流量 70L/min の吸引のとき、圧損は 20Pa で透過率は 0.3 μ m の微粒子に対し 75% 程度、0.5 μ m に対し 63% 程度、1 μ m に対し 50% 程度であった。試料フィルタは 151L/min の流量では、0.3 μ m の微粒子を全く捕集できなかった。

3.3 大気圧条件でのフィルタの性能

大気圧条件で試料 PP フィルタを 1 分間荷電した場合、荷電時の印加電圧に対する電流及び荷電したフィルタ(エレクトレットフィルタ)の透過率を図 6 に示す。この際、空気流量は約 70L/min、面速度は 5.19cm/sec である。絶縁破壊して火花放電が生じる直前 -25kV までフィルタを帶電できたが、大気圧条件で一番低い透過率は印加電圧 -21kV で得られた。

印加電圧が -21kV を超えるとコロナ電流が増加はじめ、逆電離が発生している。印加電圧 -25kV で逆電離が強く電流

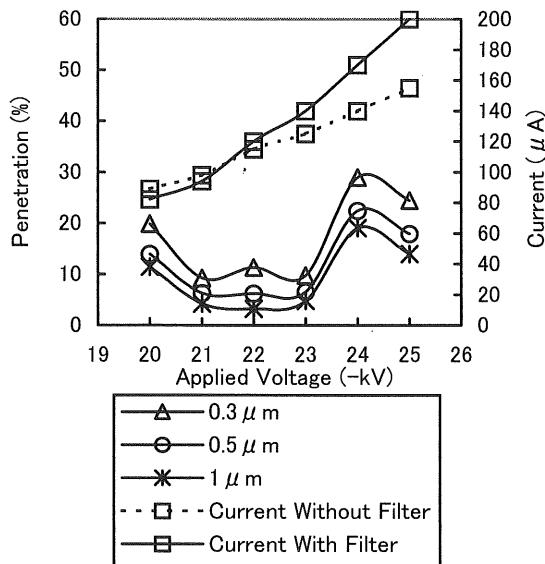


図6 大気圧下で荷電した PP フィルタの印加電圧における透過率

Fig.6 Penetration of PP Filter, Charged in Atmospheric Pressure, for Various Applied Voltage

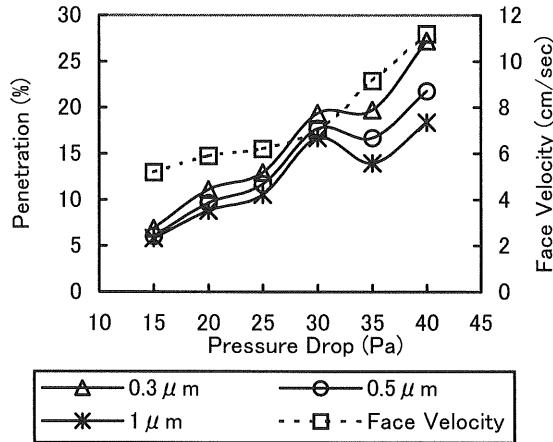


図7 大気圧下で荷電した PP フィルタの圧力損失における透過率

Fig.7 Penetration of PP Filter, Charged in Atmospheric Pressure, for Various Pressure Drop

増加が顕著な条件では、明らかに透過率が上昇していることが確認された。また、逆電離が起りはじめた -22kV からはフィルタの透過率が上昇したり低下したりして不安定な状態となった。

図 7 に大気圧条件で一番低い透過率を得られた印加電圧 -21kV で 1 分間荷電したフィルタの性能を示す。流量 70L/min で面速度 5.19cm/sec、圧損 15Pa のときに荷電したフィルタの透過率は粒径 0.3 μ m の粒子に対し 7% 程度となり、未荷電フィルタの透過率の 1/10 以下に大きく改善できていることが確認できた。流量約 150L/min で圧損 40Pa のとき、未荷電

フィルタでは $0.3 \mu m$ の粒子を全く捕集できなかったが、コロナ放電で荷電することで透過率 27% 程度が得られて、大幅に改善できた。

3.4 加圧(0.1MPa)条件でのフィルタの性能

加圧 0.1MPa の条件で試料 PP フィルタを 1 分間荷電したときの各印加電圧における電流及び荷電したフィルタの透過率を図 8 に示す。流量 70L/min, 面速度 5.19cm/sec, 圧力損失 15Pa 時の透過率である。火花開始する前の -41kV までフィルタを荷電できたが、この条件で一番低い透過率($0.3 \mu m$ の場合)は印加電圧 -37kV の際に得られた。この電圧も大気圧条件と同じように逆電離が起こる前の電圧であった。

印加電圧 -37kV を超えて逆電離が起こり始めた -38kV からはフィルタの透過率が上昇しているのが見られた。加圧 0.1MPa の条件では逆電離が起こっている場合にフィルタの透過率の低下は見られなかった。印加電圧 -37kV, コロナ電流値 $130 \mu A$ 程度で荷電したときフィルタの透過率は粒径 $0.3 \mu m$ の微粒子に対し 4% 程度、粒径 $0.5 \mu m$ に対し 4% 程度、粒径 $1 \mu m$ に対し 2% 程度であった。印加電圧を高くするとともにコロナ電流値が増加し -37kV を超えると電流が急に上昇した。また、火花電圧が発生する前の -40kV の荷電で粒径 $0.3 \mu m$ に対し 13% 程度、 $0.5 \mu m$ に対して 13% 程度、 $1 \mu m$ に対し 10% 程度の透過率であった。

加圧(0.1MPa)の条件で一番低い透過率が得られた印加電圧 -37kV で 1 分間荷電したフィルタの性能を図 9 に示す。流量

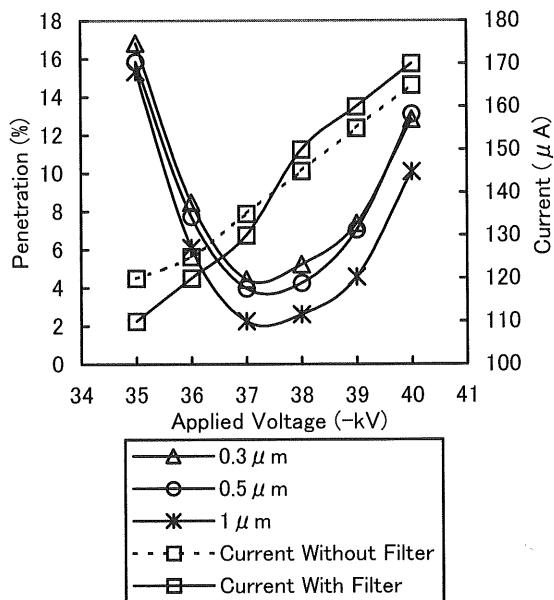


図 8 加圧下(0.1MPa)で荷電した PP フィルタの印加電圧における透過率

Fig.8 Penetration of PP Filter, Charged in High Pressure (0.1MPa), for Various Applied Voltage

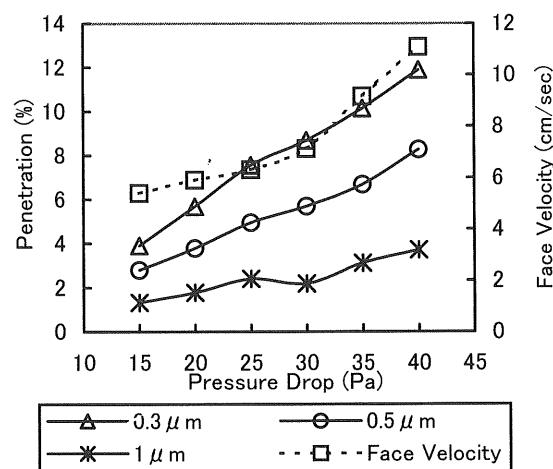


図 9 加圧下(0.1MPa)で荷電した PP フィルタの圧力損失における透過率

Fig. 9 Penetration of PP Filter, Charged in High Pressure (0.1MPa), for Various Pressure Drop

約 70L/min の吸引で面速度は 5.19cm/sec, 圧損は 15Pa となり荷電したフィルタの透過率は $0.3 \mu m$ の微粒子に対し 4% 程度が得られた。流量約 150L/min の吸引で圧力損失 40Pa の場合、未荷電の時 $0.3 \mu m$ の粒子を全く捕集できなくなった試料 PP フィルタは加圧 0.1MPa の条件でコロナ放電にて荷電することで 12% 程度の透過率となった。

3.5 加圧(0.2MPa)条件でのフィルタの性能

加圧 0.2MPa の条件で PP フィルタを荷電した場合、印加電圧とコロナ電流及び荷電したフィルタの透過率の関係を図 10 に示す。フィルタの透過率は流量約 70L/min, 面速度 5.19cm/sec の吸引で圧損 15Pa の条件で得られた結果である。印加電圧の上昇に従って電流も増加しているが、フィルタ無しの場合のコロナ電流値を超えて増加することがなかったため、この加圧条件では逆電離が起こっていないことが分かる。印加電圧の増加とともに PP フィルタの透過率も低下していることが確認できた。この条件で一番低い透過率は高電圧 -50kV の印加で得られた。-50kV の印加で 1 分間荷電した結果、フィルタの透過率は面速度 5.19cm/sec のとき粒子 $0.3 \mu m$ に対し 0.7%, $0.5 \mu m$ に対し 0.5%, $1 \mu m$ に対し 0.3% であった。

図 11 に加圧(0.2MPa)の条件で一番低い透過率を得られた印加電圧 -50kV で 1 分間荷電したフィルタの性能を示す。流量約 70L/min, 面速度 5.19cm/sec, 圧損は 15Pa である。微粒子 $0.3 \mu m$ に対する透過率は未荷電フィルタの 1/100 以下、大気圧で荷電したフィルタの 1/10 程度、また加圧 0.1MPa で荷電したフィルタの 1/5 以下になり、著しい性能改善が見ら

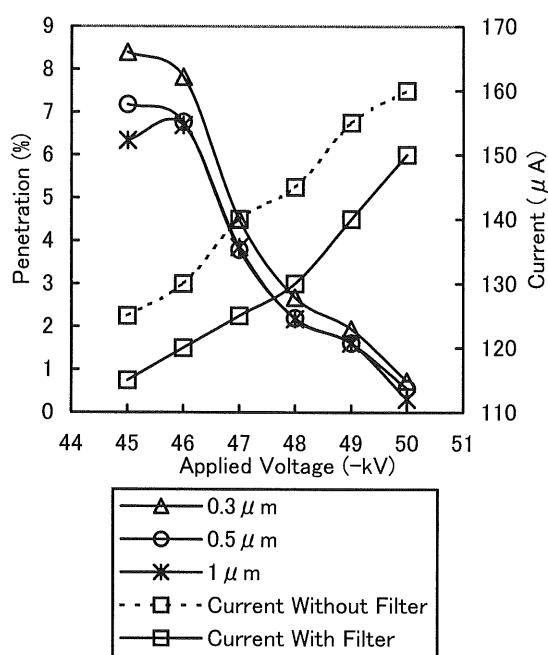


図 10 加圧下(0.2MPa)で荷電したPPフィルタの印加電圧における透過率

Fig.10 Penetration of PP Filter, Charged in High Pressure (0.2MPa), for Various Applied Voltage

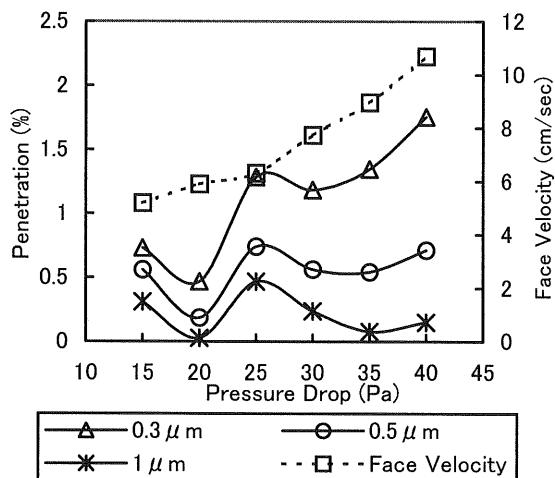


図 11 加圧下(0.2MPa)で荷電したPPフィルタの圧力損失における透過率

Fig. 11 Penetration of PP Filter, Charged in High Pressure (0.2MPa), for Various Pressure Drop

れた。流量約150L/minで、圧損40Paの場合でも、フィルタの性能は0.3 μmの室内微粒子に対し透過率2%程度となった。0.2MPa加圧の条件でフィルタを荷電することで、大気圧

条件及び0.1MPaの加圧ではできなかった高電圧で印加できたため試料PPフィルタを強力に分極でき、さらにフィルタの纖維に電荷注入することができ、フィルタ性能を向上できたと考えられる。

4. 結論

従来の荷電方法である大気圧での直流コロナ荷電方法では印加電圧21kV程度にて1分間不織布PPフィルタを荷電した結果、この条件での一番低い透過率は0.3 μmの室内微粒子に対し7%程度であった。火花開始直前まで電圧を印加しても逆電離の影響でフィルタの性能向上はできなかった。

加圧条件で荷電する方法では気圧が高いほど印加電圧をより高くすることができた。また、加圧0.2MPaでは-50kVまでの印加電圧では逆電離が発生しなかった。このため、-50kVの荷電で面速度5.19cm/secでの透過率は0.3 μmの室内微粒子に対し未荷電PPフィルタの1/100以下に、従来の大気圧コロナ放電による荷電方法の場合に比較しても1/10程度に大きく改善できることが確認できた。

本研究は文部科学省21世紀COE「未来社会の生態恒常性工学」の助成によって行われました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Peavy, Howard S.: Environmental Engineering, McGraw-Hill, (1985)
- 2) Seinfeld, John H.: Atmospheric Chemistry And Physics of Air Pollution, A Wiley-Interscience Publication, (1986)
- 3) ウィリアム C. ハインズ, 早川一也 監訳:エアロゾルテクノロジー, 井上書院, (1985)
- 4) 木林一志:纖維学会誌 51, p.332, (1995)
- 5) 塚本辰平, 村田雄司:エレクトレットエアフィルタ纖維の微視的帶電状態, 静電気学会誌 24, 5, p. 275-276, (2000)
- 6) Tsai, P. Y. And Wadsworth, L. C., "Electrostatic Charging of Meltblown Webs for High-efficiency Air Filters" Advances in Filtration and Separation Technology, Vol. 9, p.473-479, (1995)
- 7) 静電気学会:静電気ハンドブック(新版), オーム社, (1998)
- 8) 増田閃一, 水野彰:静電気学会誌, 2, 3, p.188-198, (1978)