

ポリプロピレン不織布エレクトレットフィルタの帯電過程

川部 雅章^{*1}, フェリー イスカンダル^{**2}, 奥山 喜久夫^{**2}

(2009年6月5日受付; 2009年7月18日受理)

Corona Charging Process for Polypropylene Electret Filter

Masaaki KAWABE^{*1}, Ferry ISKANDAR^{**2} and Kikuo OKUYAMA^{**2}

(Received June, 5 2009; Accepted July, 18 2009)

An electrification process of polypropylene nonwovens using a surface discharge was investigated. A surface voltage simulation based on the space charge limiting current showed that the charging rate was considerably fast. This result had a good agreement with experimental results. The charging experiment of blocking film to avoid the penetration of corona ions through nonwovens was carried out. The result revealed that the effect of break down voltage in nonwovens pore played an important role in the filter efficiency due to charge amount on fiber surface. It was also shown that to electrify the filter sufficiently, the corona electrification via surface discharge does not need an excess voltage than the break down voltage as expected from the Paschen's curve.

1. はじめに

Yan Von Trunhout¹⁾が工業的な方法として、コロナ放電によりフィルムをエレクトレット化し開織して得た繊維をエアフィルタとして利用して以来、エレクトレット不織布エアフィルタはその静電気力による高い集塵作用により、低圧損、高効率なフィルタメディアとして家庭用空気清浄機や産業用使い捨てマスクなどに現在広く用いられている。この帯電方法としてコロナ帯電以外にも、帯電列の異なった繊維同士の相互摩擦による帯電²⁾などが用いられているが、簡単な方法で高度に帯電できることからコロナ放電がよく利用されている。コロナ帯電を利用した不織布フィルタ素材として、帯電の持続性が高く成形性に優れたポリプロピレンからなるメルトブロー法により製造される不織布が主として利用されている。これらの帯電不織布のフィルタとしての捕集効率³⁻⁵⁾や帯電状態⁶⁾についてはいくつかの研究が報告されているが、帯電機構についての研究は安藤ら⁷⁾が直流コロナ放電によるポリプロピレン不織布の帯電過程における逆電離現象の重要性を指摘している以外はほとんど報告されてい

ない。

本研究では、不織布の帯電機構を解明するために、沿面放電によるイオン発生装置を用いて、空間電荷制限電流からのシミュレーションによる不織布の帯電速度について検討し、帯電条件と帯電フィルタの大気塵に対する捕集効率との関係を検討した。また、不織布内での電離過程の効果を検証するため、静電容量の異なるフィルムで不織布をはさみ、コロナ放電電荷が直接不織布に作用しない条件で帯電した不織布の捕集効率についても検討した。さらに、繊維の表面電荷量について繊維表面の帯電電荷が作る電界により、フィルタを通過する粒子が受ける誘電分極に起因する誘起力に基づく単一繊維捕集効率の値から考察した。

2. 実験

2.1 コロナ帯電装置

本研究に用いたコロナ帯電装置の概略図を図1に示す。イオン源として、厚さ1 mmのステンレス板を誘起電極としてその表面に1 mmの厚さでアルミナをプラズマ溶射により絶縁体を形成し、アルミナ表面に直径50 μm のタングステンワイヤーを10 mmの等間隔に設けた、210 mm \times 295 mmの平板形状の沿面放電型のコロナ放電電極を用いた。20 kHz, 100 Wの交流高電圧を印加しワイヤー周辺に沿面放電によりイオンを発生させた。試料を設置するアース側電極は、直径80 mmの測定電極を外径210 mmのガード電極で周囲を覆ったものを用いた。沿面放電電極と被帯電試料を設置する接地側電極との空間に平等電界が形成するように、これら2つの電極を図のような形に配置した。この帯電装置の特徴は、ワイヤー対平板電極からなる著しい不平等電界に基づく直流コ

キーワード: エレクトレット, フィルタ, コロナ放電, シミュレーション, 表面電荷

* 日本バイリーン(株)研究所 (349-1205 茨城県古河市北利根7)

Central Research Laboratory, Janpan Vilene Company Ltd., 7 Kitatone, Koga, Ibaraki 349-1205, Japan

** 広島大学大学院工学研究科物質化学システム専攻 (739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

Department of Chemical Engineering, Graduate School of Engineering, Hiroshima University, 1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8527, Japan

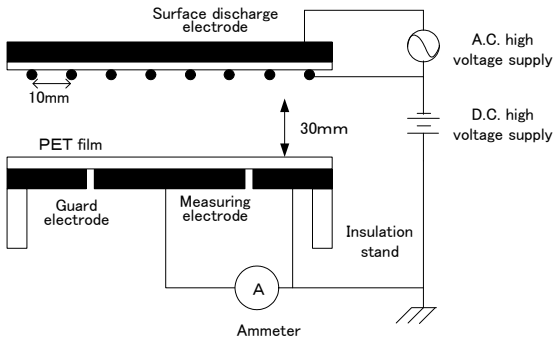


図1 沿面放電による試料の帯電装置概略図
Fig. 1 Schematic diagram of charging system for specimen by surface discharge.

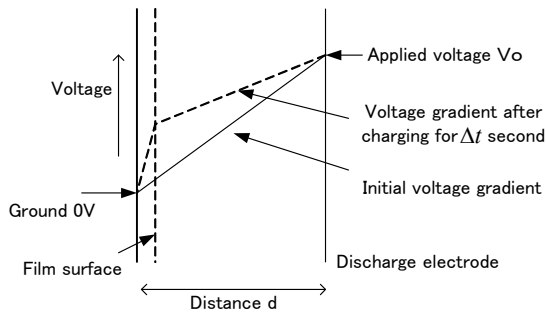


図2 シミュレーションのための電位関係図
Fig. 2 Voltage diagram of charging system to simulate charging rate.

コロナ放電電極系とは異なり、イオンの発生と荷電対象物へのイオンの移動過程が独立しているために、高い電流密度が得られやすくなり、容易に空間電荷制限電流値に到達する。さらに、被帯電体の表面電位はほぼ印加した直流電圧まで帯電が進行すると考えられる。荷電対象試料を設置する接地側電極は、シミュレーションを実験検証するときは、図のようにガード電極を用いて平行電界を確実に形成した。なお、フィルタ試験用に不織布試料を帯電するときにはガードとの隙間部分での帯電不良を避けるためにアース側を一枚の電極にして行った。帯電試料の表面電位の測定は、所定の時間帯電した後にコロナ放電を止め、表面電位計（トレック㈱製 Model 344）を用いて実施した。

2.2 試料

シミュレーション用のフィルム試料として厚さ 30 μm 、比誘電率 3.1 のポリエチレンテレフタレート (PET) を用いた。不織布試料には面密度 20 g/m^2 、厚さ 0.19 \pm 0.01 mm (3 kPa 加圧条件下)、比誘電率 1.2 のメルトブロー法により製造したポリプロピレン製の不織布を用いた。フィルタ捕集性能実験は、粒径 0.3 から 0.5 μm の大気塵を用い、面風速 10 cm/s の条件下で行い、パーティクルカウンター（㈱リオン製 KC-18）によりフィルタ前後の濃度を測定して求めた。不織布の比誘電率は 1 kHz での値を三端子コンデンサー法に基づきインピー

ダンスアナライザー（ヒューレットパッカード社製 HP-4192A）により測定した。

3. 帯電シミュレーション

不織布の帯電過程のシミュレーションを行うに当たり以下の仮定を行った。

①沿面放電電極とアース間の荷電空間では平等電界が実現している。

②イオン発生量は十分高く、空間電荷制限電流が達成されている。

③荷電試料表面に付着した電荷は散逸しない。

シミュレーションは図1に示した放電電極と接地電極間の距離 30 mm について行い、電位関係を図2に示した。図中横方向は距離を現し、縦方向は電圧を示している。なお、シミュレーションには表計算ソフト (EXCELL) を用いた。

増田⁸⁾により、平行平板系の空間電荷制限電流密度 J (A/m^2) は、次式で表される。

$$J = \frac{9}{8} \epsilon_0 V \frac{V^2}{d^3} \quad (1)$$

ここで ϵ_0 は空気の誘電率 (Fm^{-1})、 V はイオンの移動度 ($\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) で、 d は放電電極と接地電極間の距離 (m) である。

フィルム表面の帯電過程を考えると、時間 $t = 0$ で電流値 J_0 は次式となる。

$$J_0 = \frac{9}{8} \epsilon_0 V \frac{V_0^2}{d^3} \quad (2)$$

ここで V_0 は沿面放電電極とアース間に印加する直流電圧である。

微小時間 Δt 秒後にフィルム表面に蓄積される電荷 $q_{\Delta t}$ は次式となる。

$$q_{\Delta t} = J_0 \Delta t \quad (3)$$

このときフィルムの表面電位 V_s は次式となる。

$$V_s = \frac{q_{\Delta t}}{C_p} \quad (4)$$

ここで、 C_p はフィルムの静電容量である。

したがって、 Δt 秒後の空間電荷制限電流密度 $J_{\Delta t}$ は次式となる。

$$J_{\Delta t} = \frac{9}{8} \epsilon_0 V \frac{V^2}{d^3} \quad (5)$$

ここで、 V は Δt 秒後電圧差すなわち、印加電圧 V_0 からフィルム表面電圧 V_s を引いた値である。時間刻みを十分小さく

し、式 (3), (4), (5) を繰り返すことにより、表面電位のシミュレーション曲線が得られる。

4. 結果と考察

4.1 PET フィルムのシミュレーション

図2に基づいて厚さ 30 μm の PET フィルムについて電極間距離 30 mm, 直流荷電電圧 3 kV の条件で行ったシミュレーション結果を図3に示す。なお、この条件における空間電荷制限電流 (J) の理論値は、空気中の負イオンの移動度⁹⁾を $1.5 \times 10^4 \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ とすると 0.50 mA/m^2 となり、それに対して実測値は 0.53 mA/m^2 で満たしていた。このシミュレーションにおいて、時間刻み Δt を小さくしていくと一定の曲線に収束し、0.1 秒程度にするとほぼ収束する結果が得られた。このシミュレーション結果に対して実際に図1の装置で帯電した場合の結果を図中に白丸で示す。実測値はシミュレーションによく一致しており本シミュレーションの結果が実際の帯電を再現していることが分かる。PET フィルムの場合には20 秒後に印加電圧の 80% に達しており帯電には比較的時間を要することが分かる。

4.2 不織布のシミュレーション

次に不織布における帯電のシミュレーションを行った。不織布の厚さが 0.5 mm の場合の結果を図4に示した。不織布

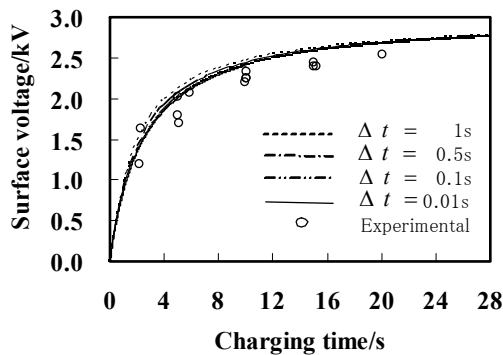


図3 PET フィルムのシミュレーション結果
Fig. 3 Simulation results of charging rate for PET film.

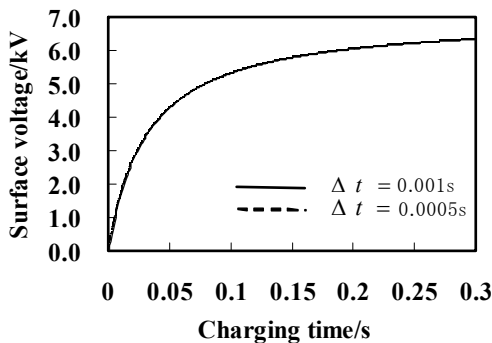


図4 不織布のシミュレーション結果
Fig. 4 Simulation results of charging rate for nonwovens.

は PET フィルムに比べて静電容量が小さいためにわずかに 0.2 秒で印加電圧の 85% に達しており、非常に短時間に表面電位が上昇することが分かった。シミュレーションの条件で実際に不織布を帯電し、後述する方法で大気塵による集塵効率 (3 回平均) を測定したところ、帯電時間 0.5 秒で約 71%, 1 秒で 70%, 3 秒で 72% であり、シミュレーションにおける表面電位上昇と同様に非常に速く効率が飽和することが分かった。

一方、不織布は非常に空隙率の高い多孔体である。この場合、不織布表面に蓄積する電荷が高まると不織布層内の絶縁破壊が考えられる。安藤ら⁷⁾ は、メルトブローPP 不織布の帯電に伴って蓄積される表面電荷の作る電界が不織布の空気層の絶縁破壊を超えると、不織布表面の蓄積電荷と空間に向かって逆電離放電が発生し反対極性のヘテロ電荷が注入されることを、不織布での微弱発光の観測とダストフィギュア一法による電荷分布図で示した。さらに、塚本ら⁶⁾ は、超微細トナー粒子を用いて比較的太目の繊維 1 本における微視的な帯電分布を求め、不規則な帯電分布があることを示している。これらのことから不織布内での放電が帯電の重要な過程であると考えられる。

4.3 絶縁フィルムによるコロナ放電電荷の阻止

不織布内部の空間での放電による電荷の付与が大きな要因であればアース電極からの電荷注入が無くても帯電は進行すると考えられる。そこで、不織布の表裏を絶縁フィルムで挟み込みコロナ放電電極からの電荷の阻止とアースからの逆電荷注入を阻止した状態での帯電量をフィルタの捕集効率から検討した。この様子を図5に示した。不織布等の帯電試料を設置する電極は、沿面放電電極部と同じ面積にしたフィルムによりコロナ電荷を阻止することで、フィルム表面の蓄積電荷により誘起された不織布層での電界が放電開始電圧を上回ると、不織布内部で放電が開始すると考えられる。この放電開始電圧に大気中のパッシェンの法則が適用できるとすると厚さ 0.19 mm の不織布相当では $1,470 \text{ V}^{10)}$ 程度である。この放電はアース上及びコロナ電極側のフィルムのそれぞれ不織布側に付着し、不織布層の電界を下げて停止する。

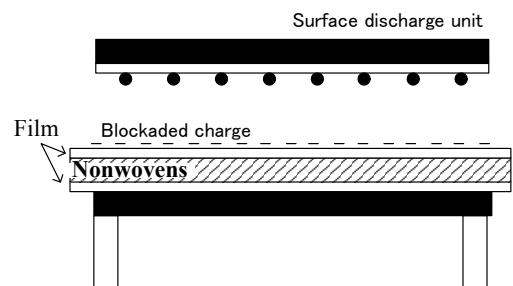


図5 フィルムを用いた帯電の概略図
Fig. 5 The charging system for nonwovens with films.

表1 テストフィルムの電気物性

Table 1 Electrical parameters of test films.

Film*	Film thickness	Relative dielectric const.	Electric capacities A	Applied voltage B	Charge(A×B)
	μm		C/(m ² V)	kV	C/m ²
PE	60	2.3	3.39×10 ⁻⁷	18.57	6.300×10 ⁻³
PE	60	2.3	3.39×10 ⁻⁷	8.57	2.907×10 ⁻³
PE	60	2.3	3.39×10 ⁻⁷	4.57	1.550×10 ⁻³
PE	120	2.3	1.70×10 ⁻⁷	18.57	3.150×10 ⁻³
PE	180	2.3	1.13×10 ⁻⁷	18.57	2.100×10 ⁻³
PE	240	2.3	8.48×10 ⁻⁸	18.57	1.575×10 ⁻³
PET	100	3.1	2.74×10 ⁻⁷	8.57	2.351×10 ⁻³
PTFE	200	2.1	9.29×10 ⁻⁸	8.57	7.964×10 ⁻⁴
PTFE	200	2.1	9.29×10 ⁻⁸	18.57	1.726×10 ⁻³
73.3%BaTiO ₃ /PMMA	210	26.9	1.13×10 ⁻⁶	8.57	9.715×10 ⁻³
67.3%BaTiO ₃ /PMMA	220	21.4	8.61×10 ⁻⁷	8.57	7.378×10 ⁻³

* PE, PTFE, PMMA mean polyethylene, polytetrafluoroethylene, polymethylmethacrylate respectively.

このときの放電量はフィルムの静電容量で規制されると考えられる。電荷の阻止に用いたフィルムと種々の印加電圧時の容量等を表1に示した。表中の厚さは表裏2枚のフィルムの合計厚さであり静電容量もこの複合静電容量 (Electric capacities A) である。また, Applied Voltage B は印加電圧から不織布層の放電開始電圧 1,470 V を差し引いた値でありこれがフィルム部分にかかる電圧と考えられる。帯電は電極間距離 30 mm, 帯電時間 60 秒の条件にて実施した。先の PET フィルムのシミュレーションの結果から帯電時間は十分と考えられる。

表1の条件で帯電したときの結果を図6に示す。図中縦軸は(6)式で表したクオリティファクターであり、圧損当たりの集塵性能の指標である。

$$Q = \frac{-100 \log(1 - \eta)}{\Delta p} \quad (6)$$

η : 粒子の透過率

Δp : 圧力損失

Q 値が高いほど集塵性能は高い。また、横軸は印加電圧から不織布層の放電開始電圧分を差し引いた電圧がすべてフィルム層にかかる場合と仮定した場合の、フィルムの仮想的な表面電荷量密度 q (C/m²) である。フィルムの材質及び印加電圧によらず Q 値と表面電荷量の関係は一定の関係を示しているように思われる。フィルタ性能は表面電荷量とともに向上し本測定範囲内では飽和値に達しなかった。さらに Q 値は、フィルムを用いず沿面コロナ帯電した場合 (図中点線で示した) に比べて、 q 値が 2.5×10^3 C 当たりを境にそれより上では高くそれより下では低い結果となった。本フィルムによる

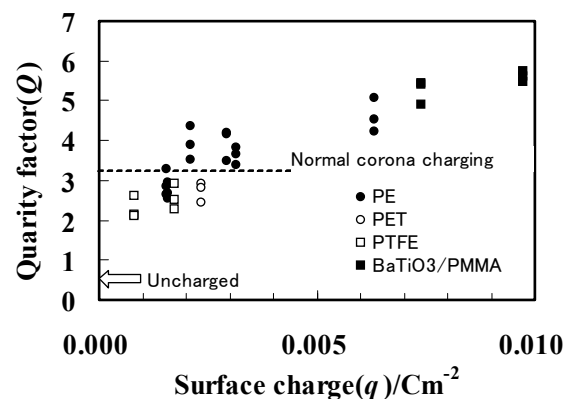


図6 Q 値に対するブロッキングフィルム電荷の影響
Fig. 6 Dependencies of film surface charge of blocking film on quality factor.

帯電と通常の沿面コロナ帯電において不織布が受ける電界は、双方とも厚み方向の平行電界とみなすと、不織布内部にある蓄積電荷量の差がそのままフィルタ効率に影響していると考えられる。したがって通常のコロナ帯電においては不織布内の電荷量は平行電界における帯電の飽和値に達していないと思われる。

通常のコロナ帯電では先に述べたように、不織布表面電荷により形成される電界で絶縁破壊が起こり、逆極性の電荷注入により不織布表面電荷は見かけ上中和されるので、不織布の電界は下がる。不織布層の薄い部分は絶縁破壊電圧が低くそのため全体として表面電位が上がらなくなり、結果として帯電電荷量が小さくなるものと考えられる。一方、本検討のフィルム帯電ではフィルムの効果で不織布が受ける電界はフィルム間の距離に対する放電開始電圧分だけ均等にかか

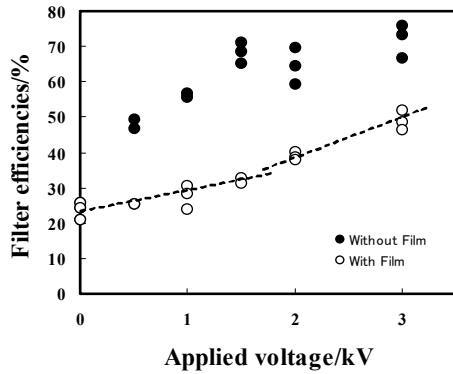


図7 印加電圧とフィルタ効率の関係
Fig. 7 Dependencies of applied voltage on filter efficiencies.

り、表面電位を一様に高い値まで引き上げ、これが帯電量を大きくしてフィルタ効率を向上させていると推察できる。なお、フィルムの容量以上には不織布内の放電電荷は発生しないから、容量の小さな領域では電荷発生が十分でなくフィルタ効率も下がる。

Trunhout¹¹⁾ は薄いフィルムを用いて不織布を圧縮して厚みを下げることで帯電量を向上させフィルタ効率の向上に成功している。この場合、通常不織布の厚さがパッシェンミニマム以上の範囲であれば、薄くすることにより絶縁破壊電圧は下がるが、破壊時の電界強度は距離の減少とともに単調に増加するので、不織布層にかかる電界強度は上がる。一般に、電界中におかれた誘電体の分極および単極性荷電¹²⁾は電界強度に比例する。したがって、Trunhoutの結果も薄くすることで不織布にかかる電界強度が実質的に上がり不織布の持つ電荷量が増えフィルタ効率の向上に貢献していると思われる。また、安藤ら¹³⁾は逆電離と不織布厚みとの関係を検討し、厚みの増加による表面電荷密度の減少を述べている。

図7はPEフィルムを用い低い電圧領域での集塵効率を測定した結果である。電圧とともに極めて緩やかに効率が上昇し1,500V付近から上昇率が若干大きくなっている。低電圧側では、未帯電の効率にほぼ近く不織布内部で放電が起こっていないことを示している。わずかな増加は試料をフィルムからはがすときに、フィルム表面の帯電による影響で剥離時に帯電が発生したためと思われる。一方、高電圧側では不織布内部での放電開始電圧を境に効率上昇が大きくなると思われる。このときPEフィルムの電荷ブロッキング効果により、印加電圧と放電開始電圧の差に応じた放電発生量があり、それとともに効率の上昇が説明できる。PEフィルムは静電容量が小さく3,000V程度の電圧では十分な放電が得られず通常のコロナより集塵効率は低い。このようなことから変化点はそれほど明確でない。なお、不織布層に実際にかかる電圧

表2 単一繊維捕集効率からの繊維表面電荷の計算結果
Table 2 Calculations results of surface charge densities on fiber from single fiber efficiencies.

Parameters	Charging with film (n-3)	Non-film
q_{nw} ($\mu\text{C}/\text{m}^2$)	82.2, 82.2, 82.2	-
σ_{cal} ($\mu\text{C}/\text{m}^2$)	9.4, 9.4, 9.4	-
P_{InM}	0.134, 0.102, 0.105	0.301
η_{In}	0.274, 0.318, 0.251	0.145
K_{In}	0.288, 0.353, 0.255	0.121
σ ($\mu\text{C}/\text{m}^2$)	115, 127, 108	74

は不織布の静電容量およびPEフィルムのそれから単純なコンデンサーを想定した電圧分配比を計算して算出できる。0.19mmの不織布層に放電開始電圧1,470Vが印加されるためにはフィルム表面の電圧は約1,770Vである。図7における効率の上昇ポイントも、不明瞭であるがこの付近にありそうである。パッシェンの法則に基づいた不織布内放電が主要な役割であるといえる。

図7にはフィルムを用いない帯電の結果も示した。フィルムを用いない場合は、沿面コロナ帯電により印加電圧分の電荷は不織布表面に付与される。したがって印加電圧が低くても集塵効率の向上が見られる。集塵効率は1,500Vでほぼ飽和しており、過剰な電圧は(1)式の電流密度の増加による帯電速度の向上には寄与するが、飽和帯電量には寄与しないといえる。

4.4 単一繊維捕集効率からの繊維表面電荷密度の見積もり

帯電電荷量がフィルタ効率に及ぼす影響について、これまでその電荷量は静電気的な測定からは正確に求められていない。コロナ帯電フィルタではたとえばその表面電位⁷⁾から推察されている。また、その帯電形態として同一繊維中の繊維軸方向に異なった電荷の存在⁶⁾も確認されており複雑である。

本研究において表1と図6から、同じ印加電圧でもPEとTiBaO₃複合フィルムでは複合フィルムの方がフィルタの集塵効率は高く、また同じ60 μm のPEフィルムの場合、印加電圧が高いほど効率が高いことが分かる。これらの場合、フィルタの厚みは同じであり厚みの因子は効率差には関係が無く、放電開始電圧もフィルムの存在によりフィルム間距離が同じになるため同じ値となり、そのため不織布層にかかる電圧(電界)は印加電圧によらず放電開始電圧と同一と考えられる。

一方、不織布が放電により帯電するためには、放電による電荷の繊維表面への付与が必要である。不織布層にかかる電圧が放電開始電圧に達して初めて、放電により発生した電荷

の繊維への付与が始まる。この時点において、放電による電荷発生はほとんどない。すなわち、十分に高い印加電圧あるいは大きなフィルムの静電容量により不織布内部での電荷発生量が高まり帯電電荷量が多くなると考えられる。これらのことを総合すると、不織布全面に渡る空間内での均一な電離と電荷移動による繊維への電荷の付与がコロナ帯電型のフィルタにおいては重要な荷電条件であると考えられる。コロナ帯電による帯電フィルタの集塵効率向上には不織布の構造の均一化が重要な要素である。

このようなことから、不織布に付加される電荷量 q_{nw} がその放電開始電圧に相当する電圧 V_s と不織布の静電容量 C からコンデンサーモデルを仮定して計算される値 $q_{nw} = CV_s$ と仮定した場合と、実際の捕集効率から計算された単一繊維捕集効率を用いて繊維表面電荷密度を計算した場合を比較検討した。なお、大気塵の電荷を0、比誘電率をシリカ粒子と同等の $4^{14)}$ とした。電荷の見積もりは大谷ら⁴⁾の行った解析に従った。すなわち、帯電不織布の電荷による誘起効果に基づく単一繊維捕集効率 η_{in} は

$$\eta_{in} = \frac{\pi(1-\alpha)d_f}{4\alpha L} \ln \frac{P_{inM}}{P_M} \quad (7)$$

である。ここで、 α は繊維の充填率で0.116、 d_f は平均繊維径で5.06 μm 、 L はフィルタ厚み0.19 mm、 P_{inM} は全透過率、 P_M は未帯電フィルタの透過率で、本研究で用いた試料では平均0.75である。また η_{in} は

$$\eta_{in} = 0.51hk^{-0.35} K_{in}^{0.73} \quad (8)$$

ただし、 $10^{-2} \leq K_{in} \leq 1$

で表される。ここで hk は桑原の水力学因子で

$$hk = 0.5 \ln \alpha + \alpha - 0.25\alpha^2 - 0.75$$

で表され、誘起力パラメータ K_{in} は(9)式を用いて計算される値である。

$$K_{in} = \frac{(\varepsilon_p - 1)C_c \pi^2 \sigma^2 d_p^2}{6(\varepsilon_p + 2)\varepsilon_0(1 + \varepsilon_f)^2 \mu d_f u} \quad (9)$$

ここで、 C_c はカニンガムの補正係数、 σ は繊維表面電荷密度、 μ は空気の粘性係数、 u はろ過流速、 ε は比誘電率で添え字 p は粒子を f は繊維を表す。

表面電荷密度の計算結果をいくつかのパラメータとともに表2に示した。

表中 σ_{cal} は、放電ギャップ0.19 mmの空気に対するパッシェン曲線の実測値(約1,470 V)から $q_{nw} = CV_s$ により求めた電

荷量を次式により単位繊維表面積当たりに換算した値である。

$$\sigma_{cal} = 2 \frac{q_{nw}}{S} = 2 \frac{CV_s}{S} \quad (10)$$

式中の定数2は、繊維は正負に分極しており、一方の電荷は繊維の全面積の半分が存在するとして密度を計算した。このとき、帯電電荷の発生はフィルム間で起こった放電による正負の電荷に起因しており、そのためフィルム間の電荷の代数和は0であるとみなした。 S は密度と平均繊維径から求められるフィルタ単位面積当たりの全繊維表面積で17.4 m^2 である。実測の透過率から表面電荷密度 σ の計算には図6でもっとも高い Q 値を示したBaTiO₃を含むフィルムの結果と、比較としてフィルムを用いずに沿面コロナ帯電したものを示した。

表2より、フィルムによる帯電では3回の測定すべてで σ は σ_{cal} に対して約1桁高い値を示している。誘起力パラメータ K_{in} は粒子径および表面電荷密度 σ の2乗に比例するので、 σ から K_{in} を求める場合は単分散粒子の使用と繊維表面積の正確な見積もりが重要である。しかし今回は繊維表面積の計算には平均繊維径を用い、大気塵の粒径は中心粒径で代用して計算した。数値の大きな開きの要因の一つと考えられる。また、フィルタ測定には不織布を挟んだフィルムをはがす過程があるので、このときに放電し電荷が再注入されていることも考えられる。さらに、 σ_{cal} の見積もりに厚み相当の V_s を用いたが、不織布面内での繊維密度等の違いにより部分的にはより高い V_s が掛っている可能性があり、単純に厚み相当 V_s からの電荷の見積もりにも課題がある。一方、フィルムを用いない帯電(表中のNon-Film Charge)では電荷量は1桁以内の差で σ_{cal} と一致している。この値は安藤ら¹⁵⁾がChlorotrifluoroethylene-Ethylene不織布エレクトレットフィルタについて求めた値 $6.5 \times 10^5 \text{ C}$ にほぼ一致しており通常のコロナ帯電と同じ程度と考えられる。

なお、安藤らも示しているように通常、帯電不織布の表面電位は100から200 V程度であり、この値からコンデンサーモデルを仮定して本研究で用いた不織布について得られる表面電荷量は 10^6 オーダーとなる。さらに繊維表面積当たりに換算すると 10^7 オーダーとなり2桁から3桁解離している。この点を考慮すると、今回得られた値はオーダーとして近い値になっており、パッシェン曲線からの帯電量推察は重要で意味があると考えられる。今後より正確な繊維表面積、繊維径の推算とモデル粒子による検討が必要である。

5. 結論

空間電荷制限電流を仮定した帯電速度のシミュレーションおよびフィルタ集塵効率の結果から、不織布のコロナ帯電

は短時間に完了することが分かった。また、コロナ電荷の阻止フィルムを用いた帯電結果から、不織布の帯電は不織布内での空気の絶縁破壊による過程が重要であることが確かめられた。さらに、通常のコロナ帯電フィルタの電荷は飽和値に達しておらず、フィルタの均一化によりさらに帯電量が向上できることが示唆された。一方、帯電フィルタ効率の実測値から求めた単一繊維捕集効率を用いて誘起パラメータを算出し、これより求めた繊維表面電荷密度は、パッシェン曲線から求めた不織布厚みに相当する放電開始電圧を用いて計算した電荷量より約1桁高いが、不織布の表面電位から推測される値よりよい近似を示しており、放電開始電圧からの電荷の見積もりが有効である可能性が示唆された。今後、より精密な測定に期待できる。

参考文献

- 1) J.V. Turnhout: U.S Patent No.3998916(1976)
- 2) R.C. Brown: UK Patent GB2190689 (1987)
- 3) K. Ando, M. Takahashi, R. Togashi and Y. Okumura: Properties of Electret Filter with Low Pressure Drop and High Collection Efficiency, *Proceedings Third International Aerosol Conference*, Kyoto, p.702 (1990)
- 4) 大谷吉生, 江見準, 森治朔: 化学工学論文集, **18**, 2 (1992) 240
- 5) P.P. Tsai, H.-Y. Huang and L.C. Wadsworth: *Nonwovens Conference & Trade Fair*, p. 115 (1998)
- 6) S. Tsukamoto and Y. Murata: Microscopic Charge Distribution of Fibers of Electret Air Filter, 第24回静電気学会講演論文集, 13a A-15 (2000)
- 7) 安藤勝敏, 近藤五郎: 静電気学会誌, **18** (1994) 119
- 8) S. Masuda, A. Mizuno and H. Nakatani: Conf. Rec. IEEE/IAS Annu. Meet. (1979) 5B 131
- 9) K. Nagato: *J. Atmos. Electricity*, **21**, 1 (2001) 31
- 10) D. Kind and H. Karner: *High-Voltage Insulation Technology*, p. 168, Friedr. Vieweg & Sohn (1985)
- 11) T.A. Petrus and J.V. Trunhout: International Patent WO84/03193 (1984)
- 12) 静電気学会: 静電気ハンドブック, p.1203, オーム社 (1998)
- 13) 安藤勝敏, 近藤五郎: 静電気学会誌, **18** (1994) 444
- 14) H. Fudouzi, M. Kobayashi and N. Shinya: *J. Aerosol Res. Jpn.*, **15**, 2 (2000) 93
- 15) 安藤勝敏, 菅埜幸治: 静電気学会誌, **19** (1995) 388