

摩擦帯電による洗浄後エレクトレットフィルタの再帯電

中村 保博^{*,1}, 稲永 康隆^{*}, 太田 幸治^{*}

(2016年9月29日受付; 2016年12月2日受理)

Using Tribocharging to Recharge Electret Filters After Washing

Yasuhiro NAKAMURA^{*,1}, Yasutaka INANAGA^{*} and Koji OTA^{*}

(Received September 29, 2016; Accepted December 2, 2016)

Non-woven dust filters used in air-conditioning units are being washed then reused. Reusing electret filters after washing have not been implemented due to the difficulty in reapplying their electrical charge which is lost during the washing process. During the manufacturing process, electret filters are electrified via a technique known as corona charging; using this same method to recharge filters which have already been formed into a pleated shape is not an easy task. In this investigation, we simulated the washing of a sheet filter using a diluted solution of AE (PolyoxyethyleneAlkyl Ether), which is commonly used as a surfactant in detergents. We then evaluated the effectiveness of recharging the filter through tribocharging to verify whether or not electret filters can be washed and reused. From the results, we established that AE adhering to the filter inhibits tribocharging. But when we applied ozonation treatment to the AE-laden filter prior to recharging, we achieved strong tribocharging and high collection efficiency.

1. はじめに

空調用の集塵フィルタとして、不織布のエレクトレットフィルタが用いられている。エレクトレットフィルタは濾材の繊維に固定化された電気分極を有し、機械的な捕集効果に加え静電気力的な捕集効果により、低圧力損失で優れた塵埃の捕集率を実現する¹⁾。一般にエレクトレットフィルタのシート材はメルトブローで紡糸したPP (Poly propylene) 不織布濾材を、大気圧下のコロナ放電で帯電させ、PET (Polyethylene terephthalate) 等の厚く構造支持力のある不織布の支持材に対して接着剤等で貼り合せて作製される。このようにして作製したシート材をフィルタとして用いることもあるが、高い性能を得るため Fig.1 に示すようにシート材をプリーツ形状に折り込むことで有効面積を増加して使用することが一般的である。

使用済みのフィルタの再利用に際しては、非帯電のフィルタは洗浄剤を用いた湿式洗浄により使用時に付着した塵埃を除去することで再生使用が可能となる。一方、エレクトレットフィルタの場合、洗浄剤に含まれる界面活性剤等の影響により静電気的捕集効果が喪失されることが知られている。したがって、エレクトレットフィル

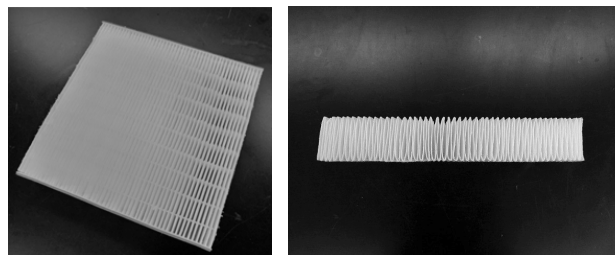


図1 プリーツフィルタ

Fig.1 Pleated filter.

タを洗浄再生利用するためには、プリーツ形状のフィルタに対し再度帯電処理を行わなければならない。コロナ放電ではプリーツ形状の内部を帯電させることが難しく、帯電が表面に限定されるため十分な捕集率回復が得られないことが課題となっている²⁾。

一方、コロナ放電以外の帯電方法として、摩擦帯電で不織布をエレクトレット化させた集塵フィルタがある³⁾。対象と摩擦材とを摩擦させることさえできれば帯電できる摩擦帯電は、プリーツ形状のフィルタを再帯電するうえで有効な帯電方法と考えられる。

本報では洗浄剤の界面活性剤として一般的に用いられるAEの希釈液を用いて模擬洗浄したシート材に対し、摩擦再帯電による捕集率および帯電の回復を評価しエレクトレットフィルタの洗浄再生利用の可能性を検証した。

2. 実験方法および装置

2.1 実験に用いたエレクトレットフィルタ

原理検証のため Fig.2 に示す不織布エレクトレットフィルタのシート材を用いて実験を行った。シート材はコ

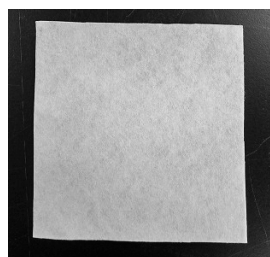
キーワード：エレクトレットフィルタ, 摩擦帯電, 再帯電

^{*} 三菱電機株式会社 先端技術総合研究所

(〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1)

Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corp., 8-1-1, Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki City, 661-8661, Japan

¹ Nakamura.Yasuhiro@ab.MitsubishiElectric.co.jp



フィルタシート材
寸法 [mm]: 140 × 140 × t0.8
構成: コロナ帯電不織布濾材
(PP) + 支持材 (PET)
繊維径:
コロナ帯電不織布濾材約 5 μm
支持材 約 40 μm

図2 実験に用いたエレクトレットフィルタ
Fig.2 Electret sheet filter for experiments.

ロナ放電で負に帯電させた PP の帯電不織布濾材 (目付量 20 g/m²) を PET の不織布支持材 (目付量 100 g/m²) と貼り合わせて作製したものである。

2.2 洗浄方法

洗浄剤には洗浄用途で広く用いられる AE (PolyoxyethyleneAlkyl Ether) を主成分とした非イオン系界面活性剤 (花王社, エマルゲン 709) の希釈液を用いた。AE 濃度が 0.3% となるよう水道水で希釈した。

洗浄方法は超音波洗浄器 (SHARP 社, UT-106) の槽内に AE 希釈液 1.4 L を注ぎ, 新品のシート材を浸漬させた。超音波洗浄器の出力を 37 kHz, 50 W に設定し, 1 分間洗浄した後すすぎを行った。すすぎについては洗浄後のシート材をステンレストレイに移し, 水道水 1 L に 1 分間浸け置いた後, すすぎ水を排水した。以上を 1 セットとし, すすぎ回数を変えて洗浄サンプルを作製した。洗浄サンプルの乾燥は実験室雰囲気中で 12 時間乾燥させた。

2.3 摩擦帯電方法

異なる材料同士を擦り合わせると, 材料の帯電列に従って一方が正, 他方が負に帯電する。Fig.3 に樹脂の帯電列の一例を示す³⁾。帯電列とは材料の帯電傾向をまとめたもので, PP を負に帯電させる場合, PP より帯電列が正側に位置する材料を摩擦材として用いればよく, 対象と摩擦材との帯電列の間隔が離れるほど高い帯電量が得られる。

Fig.4 に摩擦帯電方法を示す。摩擦材にはナイロン 66

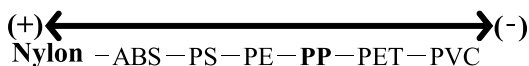


図3 樹脂の摩擦帯電列
Fig.3 Triboelectric series of polymers.

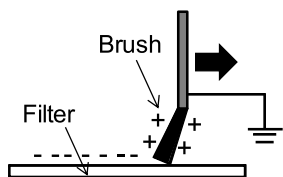


図4 フィルタの摩擦帯電方法
Fig.4 Recharge method of the filter.

を主体としナイロン 6 および導電性カーボンブラックを配合した導電性ブラシ (東レ社, モノエイト 線径 0.3 mm) を用いた。摩擦帯電はフィルタシート材に対しブラシでのスキャンを繰り返すことで行った。導電性を有するブラシをアース接続することで, 摩擦帯電により発生した電荷をブラシ上で飽和させず逃すことができ, 摩擦対象のシート材の規模に制限されることなく帯電できる。

2.4 捕集率および帯電評価方法

シート材の捕集率は Fig.5 に示す装置を用いて評価した。ダクト内に評価対象のシート材を設置する。ダクトの端部に備えたファンによりダクト内に大気を引き込み, パーティクルカウンタ (Kanomax 社, ジオアルファ Model3886) でシート材の上流と下流の空気を 2.83 L/min で 0.5 min 吸引し 0.3~0.5 μm 径の粒子数を計測した。粒子数の計測結果を下式に代入することで捕集率 E を算出した。

$$E = 1 - (M_1 / M_2) \quad (1)$$

ここで M_1 はフィルタ下流での 0.3~0.5 μm 径粒子のカウント数, M_2 はフィルタ上流でのカウント数を表す。 M_2 は試験毎にばらつくが, 概ね 35,000~45,000 個/L の範囲に収まる。また差圧計 (長野計器社, GC63) と風速計 (Kanomax 社, Model6551) を備え, フィルタの上流と下流の差圧およびダクトの風速を測定した。試験風速は 0.2 m/s とし, このときのシート材の圧力損失は 14 Pa である。

シート材の帯電は, 表面電位計 (KEYENCE 社, 高精度静電気センサ SK-0301200) を用いシート材の中心から Φ80 mm の領域の平均表面電位を測定し評価した。

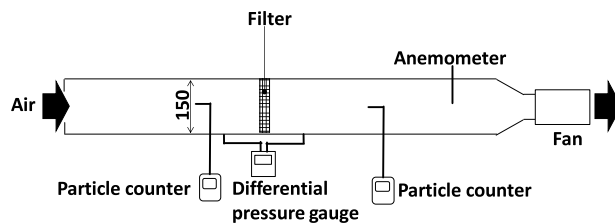


図5 フィルタ性能評価装置
Fig.5 Apparatus for evaluating filter performance.

3. 実験結果

3.1 洗浄による捕集率および帯電の低下

洗浄によるシート材の捕集率および帯電の低下を調べた。Table.1 に新品のシート材およびすすぎ 1 回の条件で作製した洗浄サンプルの捕集率および表面電位の測定結果を示す。表面電位を比較すると, 新品のシート材が -311 V であるのに対し, 洗浄後は 0 V まで低下した。ま

表1 洗浄後による捕集率および表面電位の低下

Table 1 Deterioration of collection efficiency and surface voltage after washing.

	New filter	Washed (Time of rinse 1)
Collection efficiency	0.51	0.17
Surface voltage [V]	-311	0

た捕集率は新品のシート材の捕集率が0.51であるのに対し、洗浄後は0.17に低下した。このように洗浄によりシート材の帯電および静電的捕集率が失われた。

エレクトレットシート材の捕集率 η は(2)式に示されるように機械的捕集率 η_0 と静電的捕集率 η_e との和で表わされる。洗浄によりシート材の静電的捕集効果がすべて失われるとすると、実験用いたシート材の機械的捕集率 η_0 は0.17、新品のシート材の静電的捕集率 η_e は0.34と考えられる。

$$\eta = \eta_0 + \eta_e \quad (2)$$

3.2 AEの付着が摩擦再帯電に与える影響

洗浄によるシート材へのAE付着が摩擦再帯電に与える影響について調べた。Fig.6は洗浄時のすすぎ回数が異なる洗浄サンプルをそれぞれ摩擦再帯電した場合の表面電位の変化を表している。いずれのシート材も摩擦スキャン回数8回程度で表面電位が飽和傾向を示した。新品のシート材はTable 1で示したように-311 Vで帯電しているが、摩擦帯電するとさらに表面電位が増加し飽和値は-1400 Vであった。一方、すすぎをしなかった洗浄サンプルの表面電位は0 Vであり、摩擦帯電しても表面電位の変化はなかった。すすぎ1回の洗浄サンプルは摩擦帯電で正に帯電し飽和値は+260 Vであった。またすすぎ4, 7, 10回の洗浄サンプルは摩擦帯電で負に帯電し、すすぎ回数が多いほど表面電位の飽和値は新品のシート

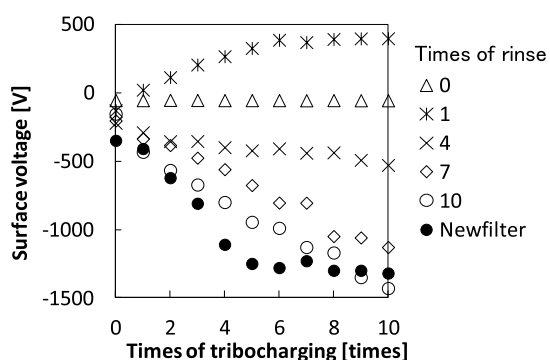


図6 洗浄後シート材の摩擦再帯電結果

Fig.6 Result of Using tribocharging to recharge electret sheet filters after washing.

材の値に近づいた。

以上の結果から、洗浄サンプルの表面に付着したAEがシート材本来の摩擦帯電性を阻害していると考えられる。摩擦ブラシに対するAEの摩擦帯電傾向は正であり、シート材への付着量が多いほどシート材の帯電傾向はAEの傾向を示すものと考えられる。すすぎをしなかった洗浄サンプルが帯電しなかった理由はAEの大気水分吸着の影響によりシート材表面の導電性が高まり摩擦帯電で発生した電荷が直ちに漏えいしたためと考えられる。

Fig.7は摩擦再帯電したシート材の表面電位の経時的な減衰を表している。実験時の雰囲気温度は24℃、相対湿度は41%である。再帯電直後は表面電位の急な減衰がみられたが1,200秒程度で減衰が緩やかになった。

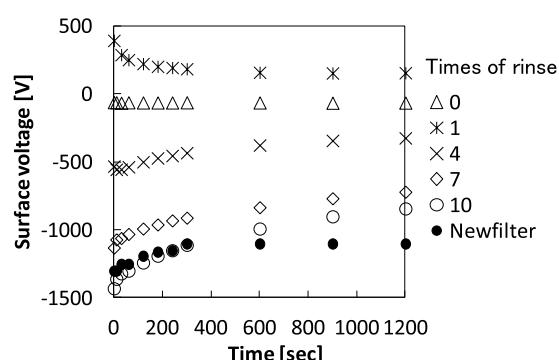


図7 再帯電後フィルタの帯電減衰

Fig.7 Chargeability decrement of recharge electret filters.

3.3 オゾン処理による摩擦帯電性の改善

空気放電で発生させた酸素系活性種を利用して材料表面に付着した有機物を分解する材料の表面処理が行われている⁴⁾。また高分子材料に対し酸素系活性種を照射することで表面が改質され摩擦帯電性が変化することが知られている。摩擦帯電性の変化は材料表面に酸素系の親水基が導入されることによる影響と推定されている^{5,6)}。

そこで洗浄サンプルに付着したAEの分解除去および表面改質による摩擦帯電性の改善し、フィルタ洗浄におけるすすぎ回数を減らすことを目的とし、洗浄後シート材に対し再帯電前に酸化系活性種による表面処理を行い摩擦再帯電への影響を調べることとした。酸化活性種として酸素ラジカルを用いれば高い効果が期待できるが、大気下での寿命が短くブリーツ形状のフィルタに適用できないため、酸化力は酸素ラジカルに劣るが大気下での寿命が比較的長いオゾンによる処理を試みた。

オゾン処理試験装置をFig.8に示す。装置はダクト、ファン、オゾナイザ、オゾン濃度測定器で構成されており、オゾナイザで発生させたオゾンを風路内に供給し、ファンの送風によりダクト内に取り込んだ大気とオゾン

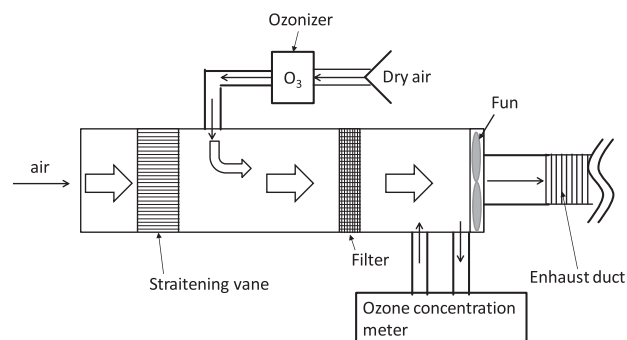


図8 フィルタのオゾン処理装置
Fig.8 Ozone treatment method of the filter.

を混合させフィルタに照射してオゾン処理を行う。

摩擦再帯電による帯電傾向が正であったすぎ1回の条件で作製した洗浄サンプルを用い、オゾン処理後摩擦再帯電することで所望の負の帯電が得られるか検証した。なお以降に示す実験はすべてすぎ1回の条件で作製した洗浄サンプルを用いた。Fig.9にオゾン濃度 10 ppm, 処理時間 6 min でオゾン処理したシート材を摩擦再帯電し、摩擦スキャン回数と表面電位の関係を調べた結果を示す。洗浄サンプルを摩擦再帯電すると表面電位の飽和値はおよそ +250 V だが、再帯電前にオゾン処理を行うことで摩擦帯電性が負に変化し表面電位の飽和値はおよそ -500 V となった。

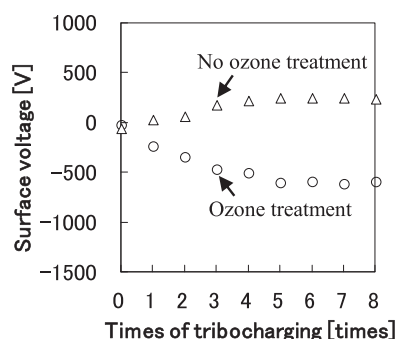


図9 オゾン処理による摩擦帯電性の向上
Fig.9 Improvement of triboelectric chargeability by ozone treatment.

洗浄サンプルを再帯電前にオゾン処理することで、AEの影響により正に変化したシート材の帯電傾向を負に変化させることができた。

次に洗浄サンプルの摩擦帯電性の改善に際し、適切なオゾン処理条件を検討した。Fig.10にオゾン処理のCT値（処理オゾン濃度 $C \times$ 処理時間 T ）と摩擦再帯電後のシート材の表面電位の関係を示す。表面電位の値は再帯電後 20 分間実験室雰囲気（温度 24℃, 相対湿度 41%）に暴露し表面電位の減衰が安定した後の値を示している。CT 値の増加とともに摩擦帯電性が正から負に変化

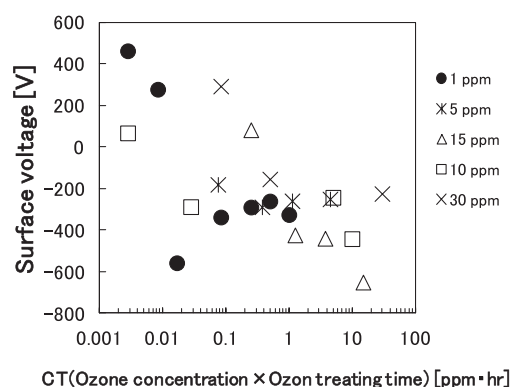


図10 オゾン処理 CT と表面電位の関係
Fig.10 Relationship between ozone treatment CT and surface voltage.

し、1 ppm · hr 以上で新品シート材の表面電位の -311 V 以下に帯電することが示された。またオゾン濃度を様々に変えて実験したが、摩擦帯電後の表面電位の値と CT 値との間に相関が認められた。よって、本実験で用いた洗浄サンプルにおいては CT が 1 ppm · hr 以上となる条件でオゾン処理すれば高い摩擦再帯電効果が得られることが分かった。

3.4 乾燥が摩擦帯電に与える影響

摩擦帯電でより高い帯電を得るため、洗浄サンプルをオゾン処理後に乾燥させて摩擦帯電することによる効果を調べた。洗浄サンプルをオゾン処理し、60℃のホットプレート上で 15 分間乾燥した後再帯電を行った。結果を Fig.11 に示す。シート材を乾燥させることで表面電位は飛躍的に向上し摩擦再帯電後の表面電位は -1200 V に達した。オゾン処理を未実施の洗浄サンプルについては乾燥することで高い正の帯電が確認された。乾燥により帯電量の絶対値を向上できることが分かった。

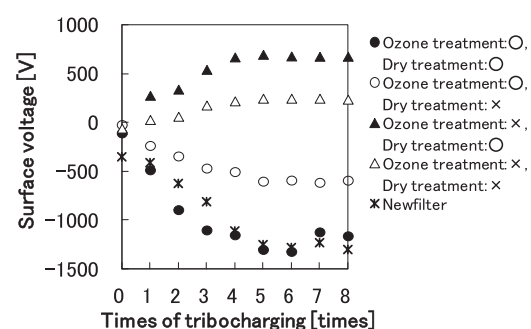


図11 乾燥処理による摩擦帯電量向上
Fig.11 Improvement of triboelectric chargeability by drying treatment.

3.5 摩擦再帯電による捕集率回復

摩擦再帯電による捕集率回復効果を評価した。洗浄サンプルを CT = 1 ppm · hr (10 ppm, 6 min) でオゾン処理、

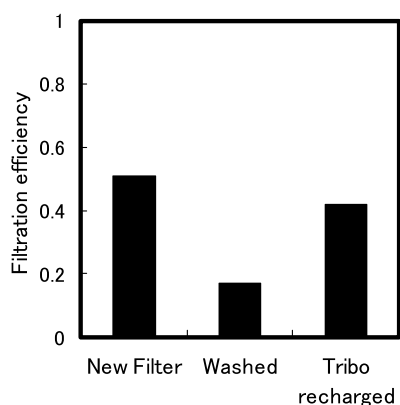


図 12 摩擦帯電による捕集率回復

Fig.12 Improvement of collection efficiency by triborecharging.

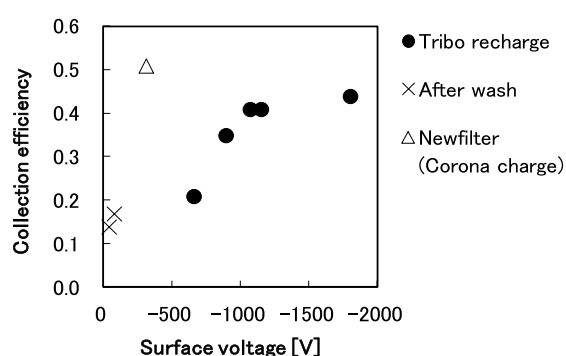


図 13 捕集率と表面電位の関係

Fig.13 Relationship between collection efficiency and surface voltage.

乾燥処理し、摩擦再帯電した場合の捕集率を Fig.12 に示す。摩擦再帯電により捕集率が回復し、新品の捕集率を基準とした場合、新品比で 82% まで捕集率が回復した。

Fig.13 は捕集率と表面電位の相関を表している。表面電位の値は再帯電後 20 分間実験室雰囲気（温度 24℃、相対湿度 41%）に暴露帯電の減衰が安定した後の値を示している。捕集率の値は表面電位の減衰が安定した後に評価した値を示している。表面電位の増加とともに捕集率が増加する傾向が示されている。表面電位がおおよそ -1200 V で捕集率は 0.42 となり捕集率が飽和する傾向が示された。

コロナ帯電させた新品のシート材と比較して再帯電したシート材では同じ捕集率を得るのに高い帯電を要する傾向が確認されたが、コロナ帯電と摩擦帯電とで異なる分極機構で帯電していることや帯電密度の違いが関係していると考えられる。

3.6 オゾン処理による摩擦帯電性改善メカニズム

オゾン処理によって洗浄サンプルに付着した AE が分解され摩擦帯電性が改善されていることが考えられる。ここではすすぎ回数 1 回の洗浄サンプルに含まれる AE 量

表 2 シート材の AE 量

Table 2 Weight of AE in the filter sheet.

	After washing by AE	After rinse (1 time)
Filter sheet Weight change ΔM [g]	12.3	0.22
Weight of AE in the filter sheet $N_{(AE)}$ [mg]	37.2	4.5

について考える。AE の比重が 1.005 (20℃) であることから、実験で用いた AE0.3% 希釈液の AE 濃度は約 3.0 mg/L である。このとき Table 2 に示されるように AE 希釈液への浸漬前後、すすぎ前後の重量変化 ΔM から、シート材 (140 mm 角) のすすぎ回数 1 回の洗浄サンプルに含まれる AE 量 $N_{(AE)}$ は 0.45 mg と推定される。AE の分子式は $C_{m+2n}H_{2+2m+4n}O_{1+n}$ であり、 m はアルキル基鎖長、 n は酸化エチレンの付加モル数を表す。実験で用いた AE は $m = 11$, $n = 15$ であり AE 量 $N_{(AE)}$ [mg] と AE 中の TOC 量 $N_{TOC(AE)}$ [mg] の関係が下式で表わされる。

$$N_{TOC(AE)} = \frac{M_C(m+2n)}{M_C(m+2n) + M_H(2+2m+4n) + M_O(1+n)} N_{(AE)} \quad (3)$$

M_C , M_H , M_O はそれぞれ炭素、水素、酸素の原子量である。(3)式に $N_{(AE)} = 0.45$ mg を代入すると、すすぎ回数 1 回の洗浄サンプルに含まれる AE の TOC 量 $N_{TOC(AE)}$ は 0.27 mg_{TOC} となる。

続いて洗浄サンプルに付着した AE のオゾン処理による分解量を検討した。実験方法として、清浄なスライドガラス (20 mm × 60 mm × 1 mm) の片面に AE を 3 mg 塗布し、スライドガラスをオゾン処理装置内に設置し AE を塗布した面に対してオゾン処理を行なった。オゾン処理後、スライドガラス表面に付着した AE を 1L の超純水に溶かし、オゾン処理による TOC 量の減衰を評価した。Fig.14 に実験結果を示す。オゾン処理未実施

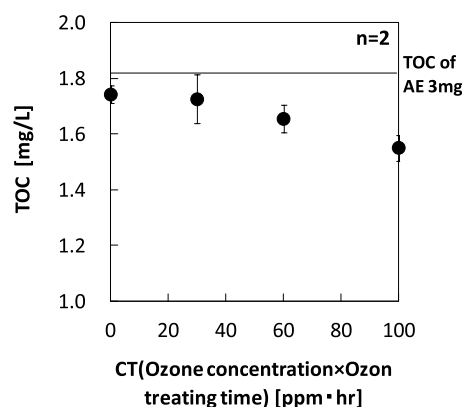


図 14 オゾン処理による AE の分解

Fig.14 Decompose AE by ozone treatment.

の場合 ($0 \text{ ppm} \cdot \text{hr}$) と $100 \text{ ppm} \cdot \text{hr}$ で処理した場合の TOC 量の差から, $CT = 100 \text{ ppm} \cdot \text{hr}$ のオゾン処理によるスライドガラスに付着した AE の TOC 分解量は $0.19 \text{ mg}_{\text{TOC}}$ である.

ここでオゾン処理による AE の TOC 分解量が CT に比例すると仮定すると $CT = 1 \text{ ppm} \cdot \text{hr}$ での TOC 分解量は $0.0019 \text{ mg}_{\text{TOC}}$ である. シート材は不織布構造のため, スライドガラスと比較してオゾンとの反応面積が大きい. スライド硝子の反応面積 $1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ に対し, 濾材と支持材を合わせたシート材の繊維総表面積は $4.0 \times 10^{-1} \text{ m}^2$ であり反応面積が約 268 倍であることを考慮すると, シート材の帯電改善効果が確認できた $CT = 1 \text{ ppm} \cdot \text{hr}$ の条件でシート材をオゾン処理した場合 $0.51 \text{ mg}_{\text{TOC}}$ の分解が可能と推定できる. 前述の通り, 洗浄サンプルが有する TOC 量は $0.27 \text{ mg}_{\text{TOC}}$ なので, $CT = 1 \text{ ppm} \cdot \text{hr}$ でのオゾン処理により, 洗浄サンプルに付着した AE をすべて分解し得ると考えられる. AE の分解反応過程は明らかでないが, 角岡らが示した高分子の劣化モデルのように⁷⁾, 反応の過程で高分子中にラジカルが生じ, ラジカルによる主鎖切断とオゾン酸化により AE は最終的に H_2O と CO_2 に分解され, CO_2 がガスとして大気に放出され TOC 量の低下が生じていると考えられる.

一方, Fig.11 の実験結果をみると, 洗浄サンプルに対し, 十分なオゾン処理を行っても摩擦再帯電前に乾燥を行わなかった場合, 新品と同等の高い帯電が得られていない. オゾン処理により洗浄サンプルの AE がすべて分解されると仮定するならば, 新品のシート材と同じ帯電特性が得られるはずであり前述の検討結果と矛盾する. この原因について調べるため, 新品のシート材をオゾン処理し, 乾燥処理を行わずに摩擦帯電性を評価した. その結果を Fig.15 に示す. 新品のシート材をオゾン処理することで摩擦帯電性が変化し, 洗浄後のシート材を十分にオゾン

処理した場合と同様の帯電性を示した. 新品の不織布繊維の表面が改質されたためと考えられる. このことからオゾン処理による帯電性改善メカニズムは, 洗浄サンプルに付着した AE の分解および露出した不織布繊維の表面改質により説明できる. 小熊らの FT-IR 分析によればオゾン処理後の PP シート表面からはカルボニル基 ($>\text{C}=\text{O}$) やヒドロキシ基 ($-\text{OH}$) が検出されている. 本実験においてもオゾン処理により PP 繊維表面にこれらの官能基が付与される表面改質が起こっていると考えられる⁸⁾.

4. まとめ

洗浄したシート材の摩擦帯電による再帯電実験を行いエレクトレットフィルタの洗浄再生利用の可能性を検証した. 結果, 以下の結論が得られた.

- 1) 界面活性剤 AE の希釈液により作製した洗浄サンプルは表面に付着した AE が摩擦帯電性を阻害し, 再帯電によりシート材本来の帯電傾向と異なる正に帯電した.
- 2) 洗浄サンプルに対し再帯電前にオゾン処理および乾燥を行うことで摩擦帯電性が改善され, 再帯電により捕集率は新品比で 82% まで回復する.
- 3) オゾン処理により洗浄サンプルに付着した AE が分解される.

参考文献

- 1) J.V.Turnhout et al.: Electret filters for high-efficiency air cleaning. *Journal of Electrostatics* **8** (1980) 369-379
- 2) 倉内利春: エレクトレットフィルタの表面処理方法, 日本特許文献, 特開 2003-210924.
- 3) K.Kimura et al.: Measurement of Thermally Stimulated Current of Resin Wool Filter. *繊維学会誌* **60** [5] (2004) 162-163
- 4) S&T: 大気圧プラズマの生成制御と応用技術 (2006) 68-74
- 5) Y.Murata: Electrostatic Phenomena and Mererial Surface. 表面技術 **56** [8] (2005) 436
- 6) Y.Suzuki et al.: Change in Charging Characteristics and Triboelectric Series of Polymers by Plasma Treatment. *Journal of the Institute of Electrostatics Japan* **28** [2] 145-146
- 7) 角岡正弘: 高分子劣化のメカニズム. *日本ゴム協会誌* **68** [5] (1995)
- 8) 小熊広之ら: 熱可塑性 FRP の高性能化と高度利用に関する研究, 埼玉県産業技術総合センター研究報告第 11 巻 (2013)

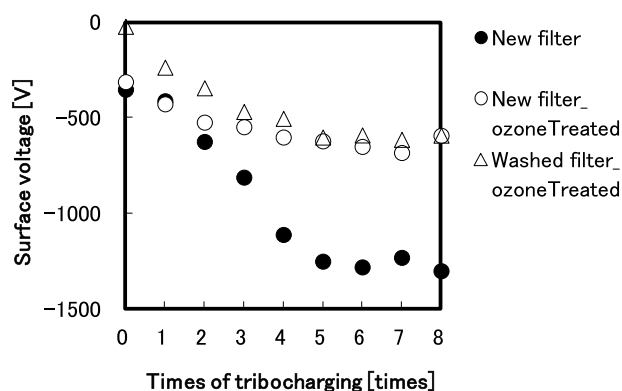


図 15 新品フィルタのオゾン処理結果
Fig.15 Result of newfilter ozone treatment.