

.....
 論 文

静電植毛電極を用いた電気集じん装置における サブミクロン粒子の捕集効果

成 奉祚*, Ahmed ALY*, 李 成華***, 高島 和則*, 桂 進司**, 水野 彰*¹

(2005年8月4日受付; 2006年3月7日受理)

Fine Particles Collection Using an Electrostatic Precipitator Equipped with Electrostatic Flocking Electrodes as Collecting Plates

Bong-Jo SUNG*, Ahmed ALY*, Sung-Hwa LEE***, Kazunori TAKASHIMA*,
Shinji KATSURA** and Akira MIZUNO*¹

(Received August 4, 2005; Accepted March 7, 2006)

In recent, special environmental concern is directed towards controlling the emission of fine particles (from 0.1 to 1.0 μm). These fine particles possibly cause serious health hazard because of heavy metals and toxic compounds adsorbed on the particles. To improve the collection efficiency of fine particles, electrostatic flocking technique has been employed in this study. This technique is based on increasing surface area of the collecting electrode and on producing gradient force at the tip of fibers to suppress reentrainment. In this article, an experimental study was performed to evaluate the effect of fine fiber on the collection efficiency of fine particles using the ESP with electrostatic flocking electrodes as collecting plates. The ESP achieved collection efficiency over 94%, which was higher than that of the flat plate electrode for fine particles (0.3–0.5 μm in diameter) with a short residence time (0.06 s). We confirmed that fine particles agglomerated at the tip of the flocking fibers. These results indicate that the new type ESP examined in this study is effective to improve removal performance of fine particles.

1. はじめに

大気中には様々な粒径の微粒子が浮遊している。その中でも、粒径が 1 μm 以下の微粒子は呼吸器を通して肺胞に付着する可能性が高く、人体にとって有害性が大きいとされている。また、粒子表面に吸着した重金属ならびに有害物質が呼吸によって

体内に取り込まれることで深刻な健康上の問題をもたらすことが指摘されている¹⁻³⁾。従って、空気中に浮遊しているこれらの微粒子を除去することが非常に重要である。これらの微粒子の除去技術として、電気集じん装置(Electrostatic Precipitator:ESP)、湿式スクラバー、バグフィルタなどが用いられている。その中でも、電気集じん装置は、他の除去技術と比べ、低い圧力損失で高効率の集じんが可能であり、大容量の工場排ガスの浄化、住居空間の空気浄化など、室内空気浄化から産業施設の換気装置まで幅広く利用されている。一般に電気集じん装置は 99%以上の高い集じん率を有しているが、粒径約 0.1-1.0 μm の粒子に対して集じん率が低くなる領域(penetration window)が存在する^{2,5-6)}。この集じん率低下は、サブミクロン粒子の荷電率が低下し粒子の電氣的移動度が減少するためである^{2,4-6)}。また、粒子の見かけ上の電気抵抗率が小さい場合は集じん電極からの再飛散による集じん率の低下も問題となる。再飛散現象は集じん電極上に付着した粒子が気流などの影響で再びガス中に飛散する現象である。電気集じん装置におけるこのような問題点を克服するために、微粒子凝集装置を用いたサブミクロン粒子の集

キーワード: 電気集じん装置, 静電植毛電極, サブミクロン粒子, グレーディエント力, 再飛散

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

Dept. Ecological Eng., Toyohashi University of Technology, 1-1 Tempaku-cho, Toyohashi 441-8580 Japan

**群馬大学工学部生物化学工学科(376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

Dept. Biological and Chemical Eng., Gunma University, Kiryu, Tenjin-cho 1-5-1, 376-8518, Japan

***LG 電子

Research Laboratory, Digital Appliance Company, LG Electronics, 391-2, Gaeumjeong-dong, Changwon City, Gyeongnam, 641-711, Korea

¹mizuno@eco.tut.ac.jp

ん率の向上⁵⁻⁶⁾, ガス中に水分などの添加剤を加えて再飛散を防止することなど, 多くの研究が行われている⁷⁻⁸⁾. 本研究では電気集じん装置におけるサブミクロン粒子の集じん率を向上するために以下の二つの点に着目した. (1)集じん電極表面にパイルを静電植毛することでパイル先端部に電界が集中するため, 集じんされた微粒子がグレイディエント力によって押さえつけられ, 再飛散を起こしにくくなる可能性がある. (2)また, 集じん電極の面積が増加することや, その表面に形成される微細な空間の中での空気の流れが穏やかになるため, 微粒子を機械的に保持しやすくなる可能性がある. この電気集じん装置を用いて電圧-電流特性, サブミクロン粒子の集じん性能及び集じんされた粒子の状態または気流中における粒子挙動を実験的に検討した.

2. 実験

2.1 静電植毛の原理

平板電極間に直流電圧を印加すると電極間に電界が形成され, 電極上に置かれた繊維状の誘電体パイルは電界中で分極し, その両端に分極電荷を生ずる. 分極の結果, 誘電体パイルは電界方向に配向する. さらに誘導帯電され, 対向電極の方向へクーロン力が作用する. 静電植毛はこれらの力を利用して基盤に垂直に繊維を植毛するものである. 例えば, 下部電極上に置かれたナイロンパイルに負の電荷を与えると, ナイロンパイルにクーロン力が作用して接地電極である基材へ向かって飛翔を開始する. 基材上にあらかじめ接着剤を薄く均一に塗布しておけば, そこに到達したパイルは基材表面に垂直に固定される.

2.2 静電植毛電極製作

静電植毛集じん電極の製作に用いた装置の概略を Fig.1 に示す. 上部電極と下部電極はそれぞれ 60mm×120mm の大きさ

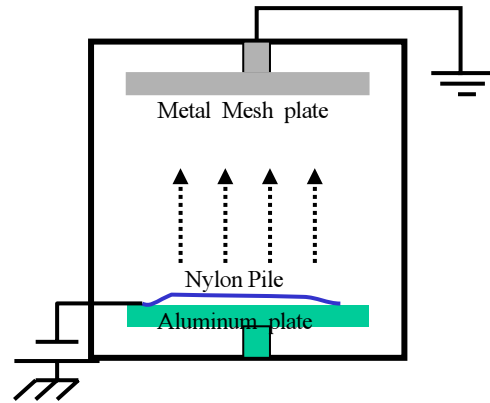


Fig.1 A schematic illustration of the preparation of electrostatic flocking electrode.

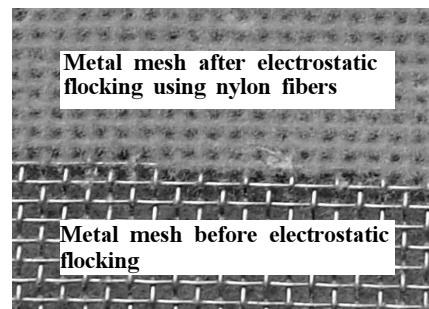


Fig.2 A photograph of electrostatic flocking electrode.

の金属網(20 メッシュ, 厚さ 1mm)及びアルミニウム板である. 電極間距離は 35mm に設定した. 非導電性の合成樹脂接着剤を均一に塗布した金属網を上部電極に固定し, ナイロンパイルを下部電極上に置いた. なお, パイルの飛翔性及び導電性付与のために本研究では体積抵抗率 $10^8 \Omega m$ 以下のナイロンパイルを用いた. ナイロンパイルの直径は約 20 μm , 長さ 1mm である. 直流電源装置 (H.V REGULATED D.C POWER SUPPLY MODEL-502, Pulse Electronic Engineering Co. Ltd)を用いて 10kV の負極性電圧を 30 秒間印加してナイロンパイルを飛翔さ

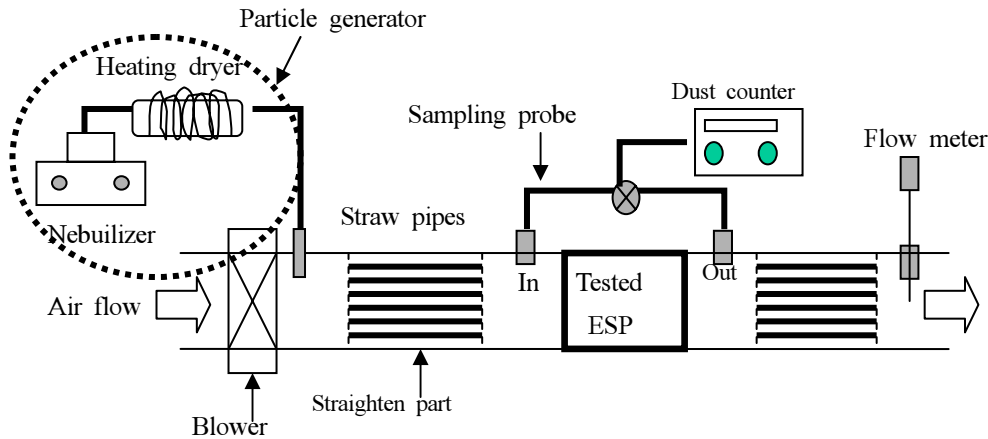


Fig. 3 Experimental set up for collection efficiency.

せ金属網に植毛し, この金属網を集じん電極とした. この集じん電極の写真を Fig. 2 に示す.

2.3 実験装置概要

Fig.3 に実験システムの概略図を示す. 装置は送風部, 整流部(孔の直径 3mm, 長さ 10mm のスレーナー), ネブライザー(オムロン製, NE-CB(コンプレッサー式))および加熱装置を用いた粒子発生部, 実験用電気集じん装置, 粒径別の個数濃度を測定するダストカウンタ(ダン科学, 82-1800)で構成されている. ダクトの断面積は 9 cm²である. 送風部からクリーンルーム内の室気と実験用微粒子をダクト内に供給し, 整流部を通過させて一様な空気の流れを作った. ダクト内部の気流速度は流速計(KANOMAX MODEL 6311)を用いて測定し 1m/s, 電気集じん装置内部での滞留時間を 0.06s に設定した. Fig.4 には厚さ 3mm のアクリル平板を用いて製作した縦 60mm, 横 36mm, 高さ 36mm の電気集じん装置の詳細を示す. 電気集じん装置の放電電極としてステンレス線(直径 0.1mm)を用い, 集じん電極にはアルミニウム平板(アルミテープ)電極(Aluminum flat plate, A.F.P. Electrode)あるいは静電植毛電極(Electrostatic flocking, E.F. Electrode)を用いて比較を行った. 電極間距離はアルミニウム平板電極の場合 15mm, 静電植毛電極は 13mm である. 実験にはサブミクロン粒子として蛍光粒子(Fluoresbrite Multifluorescent 直径 0.5 μm Microspheres)とタバコ煙を用いた. 蛍光粒子を用いた実験では濃度 3.9×10¹¹ 個/mL の蛍光粒子を純水で 4000 倍に希釈し, ネブライザーを用いて噴霧, そのミストを乾燥させることにより粒子を気流中に導入した.

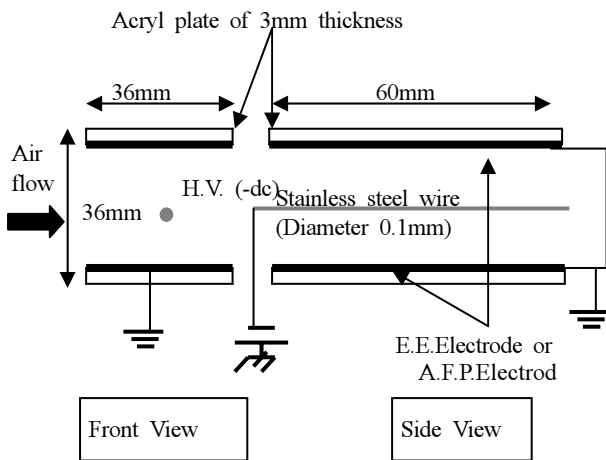


Fig.4 Schematic diagram of tested ESP.

Electrode)を用いて比較を行った. 電極間距離はアルミニウム平板電極の場合 15mm, 静電植毛電極は 13mm である. 実験にはサブミクロン粒子として蛍光粒子(Fluoresbrite Multifluorescent 直径 0.5 μm Microspheres)とタバコ煙を用いた. 蛍光粒子を用いた実験では濃度 3.9×10¹¹ 個/mL の蛍光粒子を純水で 4000 倍に希釈し, ネブライザーを用いて噴霧, そのミストを乾燥させることにより粒子を気流中に導入した.

2.4 電圧-電流特性測定

Fig.4 に示す電気集じん装置に対して負極性電圧を印加し,各

集じん電極について印加電圧とコロナ放電電流との関係を電流計(Digital Multimeter IWATSU VOAC 86, IWATSUElectric Co., Ltd)を用いて測定した.

2.5 サブミクロン粒子の集じん性能測定

アルミニウム平板電極と静電植毛電極を用いた電気集じん装置によるサブミクロン粒子の集じん性能の比較を Fig.3 に示す実験システムで行った. 整流部入り口において蛍光粒子やタバコ煙を気流に混合して電気集じん装置に供給した. 集じん率は, 電気集じん装置通過前後の粒子個数濃度をダストカウンタにより測定し, (1)式により計算した. ただし, 粒子個数濃度における測定粒径は 0.3-0.5 μmとした.

$$\text{集じん率} = \left(1 - \frac{\text{流出側微粒子濃度}}{\text{流入側微粒子濃度}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

また, 蛍光微粒子を用いて集じん電極上にサブミクロン粒子が集じんされる様子を観察した. 電極上に集じんされた蛍光微粒子を倒立型落射蛍光観察装置(IX-FLA, OLYMPUS)で観察した.

3. 実験結果及び検討

3.1 電圧-電流特性

Fig.5 に本研究で用いた静電植毛電極及びアルミニウム平板電極の電圧-電流特性を示す. なお, 実験は温度 32°C 相対湿度 60%の条件で行った. 負極性電圧を印加した場合いずれの電極を用いた場合も 5.5kV からコロナ放電が開始し. 13kV 以上で火花放電が起こった. コロナ電流はアルミニウム平板電極に比

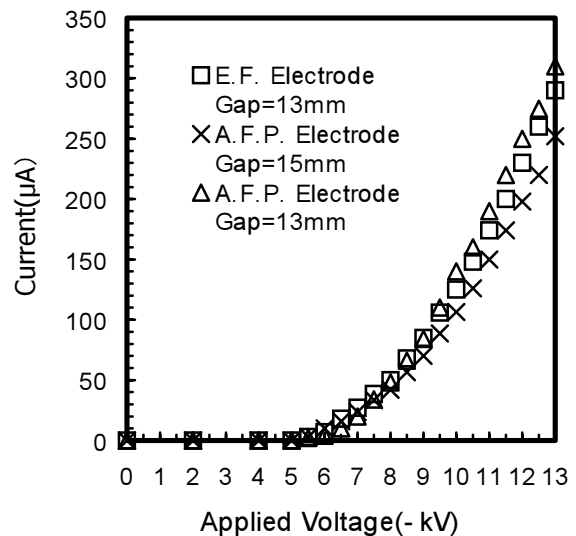


Fig. 5 Voltage-Current Characteristics.

べて静電植毛電極の方がわずかに高くなった。これは静電植毛電極の方が電極間距離が小さいため電界強度が強くなり、コロナ電流値が高くなったためである。ナイロンパイルおよび接着剤の抵抗率は不明であるが、室温での実験であり、相対湿度も約60%と高いため静電植毛電極を用いた電気集じん装置においても逆電離によるコロナ電流の異常増加は生じなかった。なお、アルミニウム平板電極を用いて電極間距離を 13mm とした実験の結果から、アルミニウム平板電極と静電植毛電極の電圧－電流特性はほぼ同等だった。

3.2 サブミクロン粒子の集じん性能

集じん率およびコロナ放電電流と印加電圧との関係を図6に示す。なお、本実験には蛍光微粒子を使用した。なお、総個数濃度の99%以上は粒子径 0.3 μm から 0.5 μm までの粒子であり、その初期個数濃度は約 1.57×10^4 個/L であった。コロナ電流の大きなところではアルミニウム平板電極より静電植毛電極の方が集じん率は高くなった。静電植毛電極の場合、印加電圧が -9V の時に集じん率は94%以上であった。また、印加電圧 -9kV において集じん率の経時変化を調べた。その結果を Fig.7 に示す。1時間程度では集じん率は95%程度で変化せず高い集じん率を維持することを確認した。一方、アルミニウム平板電極の場合、

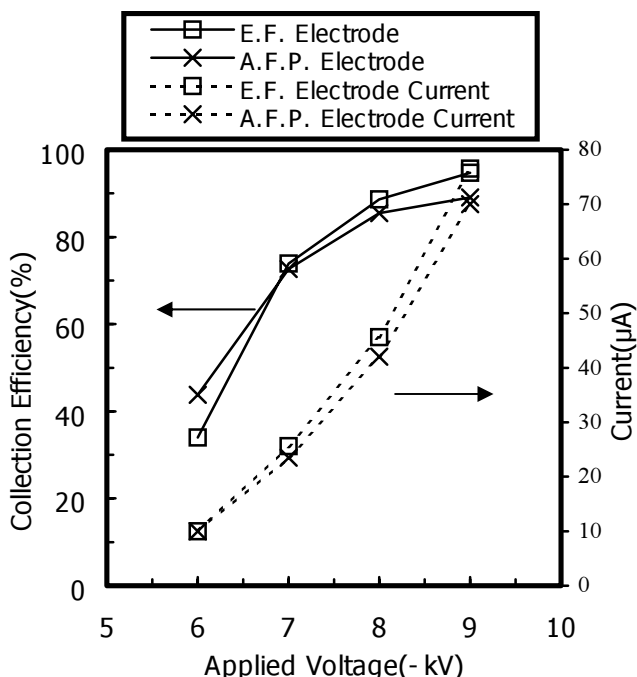


Fig.6 Collection efficiency vs. applied voltage.
R.H., 60%; T, 32°C

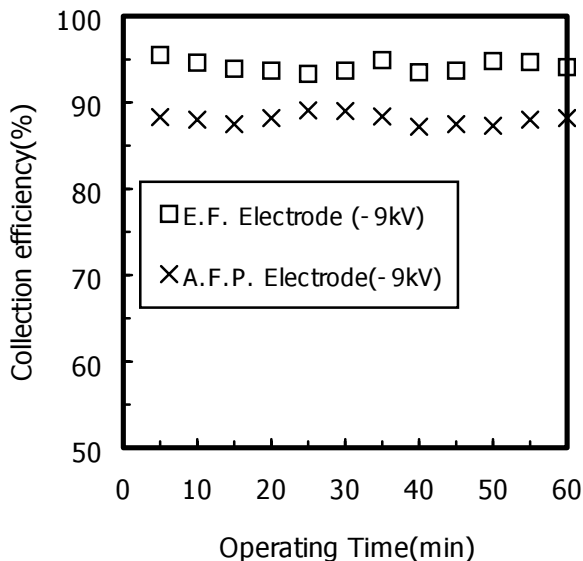
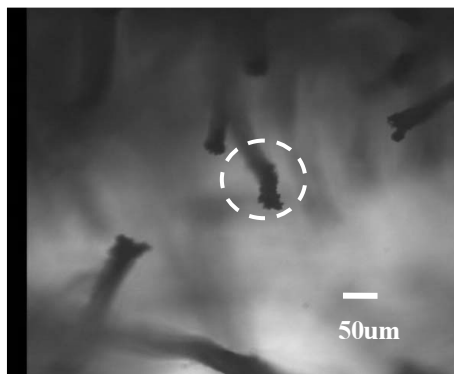


Fig.7 Time-lapse change of collection efficiency.
R.H., 60%; T, 32°C.

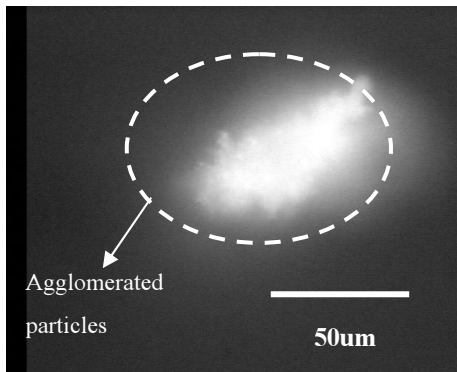
集じん率は約89%であった。従って、静電植毛電極の電気集じん装置を用いることでサブミクロン粒子を高い効率で集じんすることができることが分かった。これは、電極表面に植毛したパイルによる、集じん表面積の向上とグレイディエント力による再飛散抑制で、集じん率が高くなったと考えられる。後述のように静電植毛先端部に集じんされた微粒子が多く観察されることは、静電植毛先端部での電界集中によるグレイディエント力で粒子が押さえ付けられ、再飛散が抑制されていると考えられる。また先端部に集じんされるため、微粒子の凝集肥大化も促進されるものと思われる。

3.3 集じんされた微粒子の観察

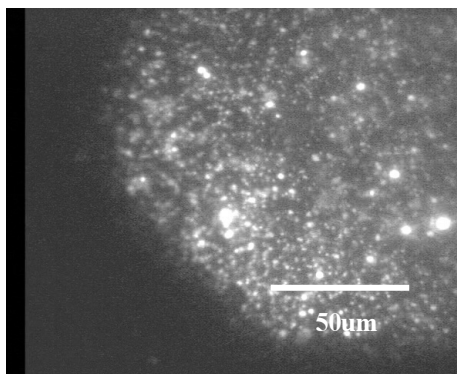
静電植毛電極とアルミニウム平板電極上に集じんされた蛍光微粒子の写真を Fig. 8 に示す。これらの写真は印加電圧 -8kV で2時間集じんを行った時のものである。Fig.8(a)は明視野照明と蛍光視野を組み合わせて得られた写真であり、(b)は同一試料を40倍の対物レンズを用いて得られた蛍光像である。(c)はアルミニウム平板電極を40倍の対物レンズを用いて観察した蛍光像である。Fig.8(b),(c)の比較から、アルミニウム平板電極と比べ、植毛パイル先端部には大きな粒径の粒子が存在することが分かる。このことは3.2節に述べたようにパイル先端では電界強度が高いため、コロナ放電で帯電した微粒子が先端に集じんされやすくなり、そのためパイル先端で凝集肥大化したものと考えられる。また、グレイディエント力で、集じんされた微粒子が押さえ付けられ、再飛散が抑制されたと考えられる。つぎに、バコ煙を用いて集じん電極の違いが微粒子の流れ及び集じんに及ぼす



(a) Electrostatic flocking fibers visualized by combination of light field and fluorescent imaging technique



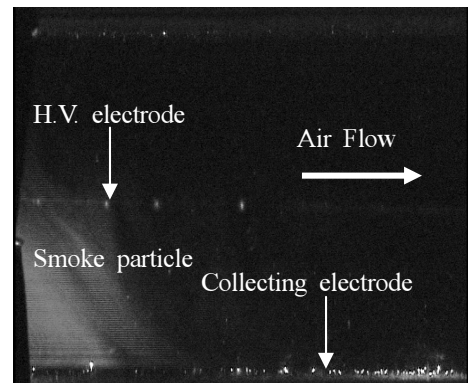
(b) Fluorescent image of the tip of the electrostatic flocking fiber



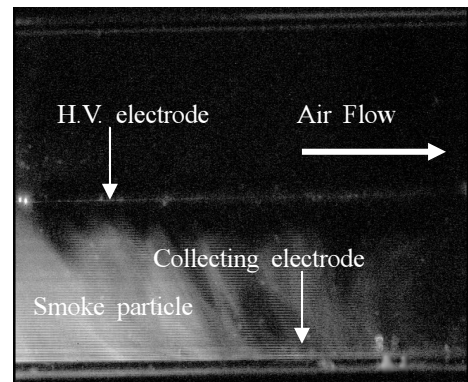
(c) Fluorescent image of aluminum flat plate electrode

Fig.8 Microscopic images of fluorescent particles agglomerated on the collecting electrode.

影響を調べた。集じん率は気流速度 1m/s, 電気集じん装置内の流れの可視化は観測装置の制約のため 0.1m/s で実験を行った。印加電圧 -8kV の場合, 集じん率は静電植毛電極が約 97%, アルミニウム平板電極は約 82% であった。タバコ煙の粒子



(a) Electrostatic flocking electrode



(b) Aluminum flat plate electrode

Fig. 9 Photographs of tobacco smoke particles trajectories in ESP at dc -8kV.

に対しても集じん率はアルミニウム平板電極と比べ、静電植毛電極の方が高い集じん率を示した。Fig.9 はタバコの煙を電気集じん装置内に導入し、レーザーによる散乱光で高電圧電極と集じん電極の間の煙粒子を可視化して、電気集じんの様子を観察した結果である。静電植毛電極を用いた場合 (Fig.9 (a)), 煙粒子は装置内に導入されると直ちに集じん電極上に集じんされ、集じん電極の中心付近より下流には煙粒子を確認することはできなかった。一方、アルミニウム平板電極の場合 (Fig.9 (b)), 集じん装置の出口付近にまで煙粒子を確認することができた。静電植毛電極の場合とアルミニウム平板電極の場合で、電界はほぼ同じであることから、集じん装置入り口付近の挙動は両者ともに、ほぼ同じであると考えられる。従って、アルミニウム平板電極において中心付近より下流に観察された煙粒子は、集じん電極より再飛散した粒子、あるいはイオン風の乱流で電極間に戻された粒子であると考えられる。この結果から、静電植毛電極を用いると、集じん電極からの再飛散が抑制されるということがわかる。再飛散の抑制には、次の二つの要因が寄与していると考えられる。一つはグレイディエント力で、もう一つはイオン風である。イオン風の影響に関しては、次のように考えられる。イオン

風は高電圧電極から集じん電極の方向に発生し、粒子を集じん電極へ輸送する。しかし、集じん電極へ到達したイオン風は、集じん電極と衝突し上方へ吹き上がる(バックワード)。(厳密には、集じん電極へ到達した時点でほとんどのイオンは失われるので、吹き上がる流れはイオン風ではない。)この吹き上がりによって、集じんされる直前の粒子が巻き上げられ、また集じん電極表面に集じんされた粒子の一部が再飛散する。この時、集じん電極に静電植毛を施すと、その静電植毛による摩擦抵抗によってイオン風の吹き上がりが抑制されると思われる。実際にイオン風の様子を観察すると、静電植毛電極の場合はアルミニウム平板電極の場合に比べてバックワードが非常に小さくなっていった。このイオン風の吹き上がりの抑制も再飛散を抑えることに寄与していると考えられる。また、この点に関しては今後の研究課題である。

3.4 静電植毛電極の集じん及び再飛散抑制モデル

静電植毛電極の微粒子集じん及び再飛散抑制モデルを Fig.10 に示す。ここで、F1 はクーロン力、F2 はグレーディエント力で α は誘導分極(C/m²)、 v は物体の容積(m³)を示す。荷電された粒子は、クーロン力によって集じん電極へ移動する。集じん電極表面は、静電植毛されており、その静電植毛先端に電界が集中するため、粒子は先端により多く集じんされる。また、静電植毛先端の不平等電界は、粒子に対してグレーディエント力をおよぼし、そのグレーディエント力が先端への集じんあるいは再飛散の抑制に寄与すると考える。

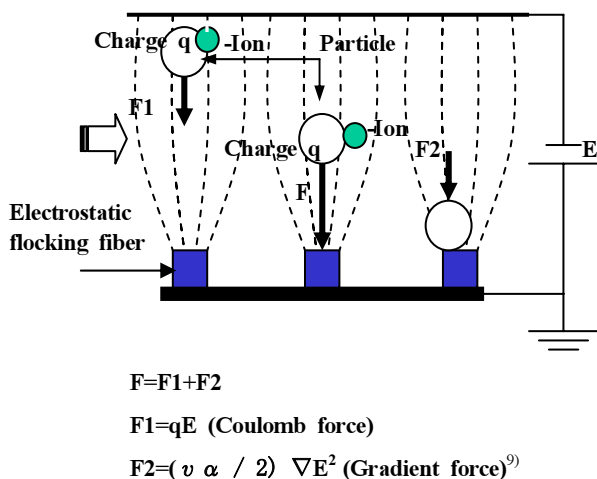


Fig.10 Model of precipitation and reentrainment suppression on an electrostatic flocking electrode.

4. まとめ

電気集じん装置において、サブミクロン粒子に対する集じん率の向上は重大な問題である。本研究ではこの問題点を克服するため、集じん電極上にパイルを静電植毛することで集じん電極の表面積を増加させ、グレーディエント力により再飛散を防止することが可能であるか検討を行った。本研究で得られた主たる知見を以下にまとめる。

- (1) 0.3 μmから 0.5 μmまでのサブミクロン粒子に対する集じん率は静電植毛電極が 94%、アルミニウム平板電極は 89%であり、静電植毛の方が 5%以上高くなった。静電植毛電極を用いることで、平板電極より微粒子に対し、高い集じん性能の達成が可能であった。
- (2) 静電植毛に用いたナイロンパイルの先端部において微粒子が粗大化することが明らかになった。

本研究の一部は(財)喫煙科学研究財団ならびに文部科学省 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。また、この研究に対してご助力を頂いた LG Electronics Digital Appliance Company の研究グループに感謝致します。

参考文献

- 1) L. Morawska, V. Agranovski, Z. Ristovski and M. Jamriska: Indoor Air, **12**(2002)129
- 2) Y. Zhuang, Y. J. Kim, T. G. Lee, P. Biswas: J. Electrostat., **48**(2000) 245
- 3) A. Mizuno: IEEE Trans. On Ind., **7**(2000)615
- 4) T. Watanabe, F. Tochikubo, Y. Koizumi, T. Tsuchida, J. Hautanen, E. I. Kauppinen: J. Electrostat., **34**(1995)367
- 5) Y. Koizumi, M. Kawamura, F. Tochikubo, T. Watanabe: J. Electrostat., **48**(2000)93
- 6) A. Laitinen, J. Keskinen, E. Kauppinen, J. Jokiniemi, K. Lethinen: J. Electrostat., **38**(1996)303
- 7) 瑞慶覧章朝, 伊藤泰郎, 高橋武男, 新貝和照, 川上一美: 電気設備学会誌, **16**(1996)1288
- 8) 瑞慶覧章朝, 神代涉, 川田吉弘, 江原由泰, 伊藤泰郎, 高橋武男, 川上一美, 高松武史: 電気学会論文誌 A, **119**(1999)267
- 9) 静電気学会: 静電気ハンドブック, p 254, オーム社(1989)