Improvement of Nano Particle Collection Efficiency in an Electrostatic Precipitator

Koji Yasumoto Non-member (Fuji Electric Systems Co., Ltd., yasumoto-kouji@fesys.co.jp)

Akinori Zukeran Member (Fuji Electric Systems Co., Ltd., zukeran-akinori@fesys.co.jp)

Yasuhiro Takagi Member (Fuji Electric Systems Co., Ltd., takagi-yasuhiro@fesys.co.jp)

Yoshiyasu Ehara Member (Musashi Institute of Technology, ehara@ee.musashi-tech.ac.jp)

Takeo Takahashi Member (Musashi Institute of Technology, uhh54098@nifty.com)

Keywords : electrostatic precipitator , collection efficiency , nano-particle, punched electrode

In this paper, the experiments have focused on improving nano-particle collection efficiency without using additional energy. The experimental ESP was a two-stage type comprised of a pre-charger and a collector. The pre-charger consisted of tungsten wire and stainless plates. The collector had a parallel-plates configuration, including a grounded electrode and a high voltage electrode. A hole-punched stainless plate was used as the high voltage electrode in order to improve nano-particle collection efficiency.

The wire of tungsten was 0.26 mm in diameter, and plates were made of stainless in the pre-charger. Negative corona discharge [dc -9 kV] was used to charge particles. The spacing between each plate was 9mm in the collector. A negative voltage of -7.5 kV was applied. The gas velocity in the duct was approximately 7 m/s.

The upstream and downstream particle concentrations were measured to estimate the ESP performance by a scanning mobility particle sizer (SMPS, TSI, Model3080). The SMPS can measure the particle concentration between 20 to 700 nm

The structure of the high voltage electrode in the collector is shown in Fig.1. The electrode has holes, which are 2.5, 5.0, 10 and 13 mm in diameter.

The electric field distribution of hole-punching electrode was analyzed by Ansys. As a result, the electric field strength became strong near the hole edge, and became low near the center area of the hole. The stronger electric field area was larger than the lower area in the hole diameter smaller than 10 mm.

The collection efficiency as a function of particle diameter for various hole diameter in the case of the constant aperture rate is shown in Fig.2. The number of hole increases with decreasing the hole diameter, because of constant aperture rate. The collection efficiency for the particle smaller than 200 nm increases with decreasing the hole diameter.

Fig. 1. Structure of high voltage electrode in the collector

Fig. 2. Collection efficiency as a function of particle diameter for various hole diameter in the case of constant aperture rate (17.2%)

Fig. 3. Collection efficiency for the particle between 20 to 50 nm as a function of hole edge length in the case of constant aperture rate (17.2%)

The collection efficiency for the particle between 20 to 50 nm as a function of the length of the hole edge is shown in Fig.3. The collection efficiency increases with increasing the length of the hole edge. These results indicate that nano-particle collection efficiency in ESP with hole punched electrode improves compared with ESP without it. This effect is probably due to increasing the electric field intensity near the hole edges of the hole punched electrode.

電気集じん装置におけるナノ粒子の集じん率向上

非会員 安本 浩二* 正 員 瑞慶覧章朝*
 正 員 高木 康裕* 正 員 江原 由泰**
 正 員 高橋 武男**

Improvement of Nano Particle Collection Efficiency in an Electrostatic Precipitator

Koji Yasumoto*, Non-member, Akinori Zukeran*, Member, Yasuhiro Takagi*, Member,

Yoshiyasu Ehara**, Member, Takeo Takahashi**, Member

Electrostatic precipitators are used in decontaminating polluted gases in expressway tunnels in order to improve both driver safety and the environment around the tunnels. A conventional electrostatic precipitator has high collection efficiency but is still needed to improve collection efficiency for nano-particles smaller than 0.1 μm . The experiments carried out in this study have focused on improving nano-particle collection efficiency without using additional energy. The experimental electrostatic precipitator was a two-stage type consisting of a pre-charger and a collector. The collector had a parallel-plates configuration, including a grounded electrode and a high voltage electrode. A hole-punched stainless plate was used as the high voltage electrode in order to improve nano-particle collection efficiency. The collection efficiency as a function of the particle diameter was studied. As a result, the nano-particle collection efficiency on the ESP with the hole-punched high voltage electrode was significantly improved. In the case of certain number of hole, the nano-particle collection efficiency increases with increasing the punched hole diameter. In the case of the constant of aperture rate, the nano-particle collection efficiency increases with decreasing the punched hole diameter. This effect is probably due to increasing the electric field intensity near the hole edges of the hole punched electrode.

キーワード：電気集じん装置，集じん率，ナノ粒子，パンチング電極

Keywords : electrostatic precipitator, collection efficiency, nano-particle, punched electrode

1. はじめに

都市部に建設される高速道路は，交通混雑，景観破壊，市街地の分断といった問題から地下トンネルが多くなっている。地下トンネル内は自動車の排出する粒子状物質が存在し，その多くはディーゼル排ガス微粒子（Diesel Exhaust Particles: DEP）である。DEP は健康に影響をあたえるといわれ⁽¹⁾，トンネル内では視界の低下も引き起こす⁽²⁾。このDEP を除去するために電気集じん装置（ESP: Electrostatic Precipitator）が設置されている。ESP の性能は 1970 年代後半における初期段階では，処理風速 7m/s において集じん率は 80%であった。近年では処理風速 9m/s において 90%の高

集じん率が得られており，高風速，高集じん率化が図られている⁽³⁾。

一般に ESP の集じん率は粒子質量にて評価されており，粒子数はその大半を占める⁽⁴⁾が質量は軽い粒径 100nm 以下の超微粒子や粒径 50nm 以下のナノ粒子（以下，粒径 100nm 以下の粒子をナノ粒子と呼ぶ）の重み付けは軽い。近年では，DEP が自閉症の原因である可能性⁽⁵⁾が指摘されたり，ナノ粒子は人体に吸入されると迅速に血流に取込まれ各臓器に転移したり⁽⁶⁾することが報告されている。ナノ粒子は高濃度で存在するため，高効率で除去することが重要といえる。

一方，ESP は集じん理論上サブミクロン粒子（100～1000nm）の集じん率が他の粒径粒子に比べ低くなる。サブミクロン粒子の集じん率向上を目的として，静電植毛を利用し集じん面積を増加させたりグレーディエント力により再飛散を防止したりする方法が考えられている⁽⁷⁾。また，電界振動⁽⁸⁾，超音波⁽⁹⁾や両極性荷電⁽¹⁰⁾を利用した凝集装置など多くの研究が行われている。これらの方法は，サブミクロン粒子を凝集により捕集の容易な大粒径粒子に成長させた

* 富士電機システムズ（株）
〒191-8502 日野市富士町 1 番地
Fuji Electric Co.Ltd.,
1 Fjimachi, Hino 191-8502

** 武蔵工業大学
〒158-8557 世田谷区玉堤 1-28-1
Musashi Institute of Technology
1-28-1, Tmazutsumi, Setagaya 158-8557

後、ESP や他の集じん装置で空気中から除去する。ナノ粒子の集じん率向上を目的とした研究は、コロナ放電と軟 X 線を併用し帯電量を増加する方法⁽¹¹⁾などがあるが、あまり見掛けない。筆者らも、交流コロナ⁽¹²⁾や水分噴霧⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾による凝集装置の開発を行ってきた。いずれの方法も、サブミクロン粒子の集じんに対する有効性は示されたが、集じん装置の他に新たな装置が必要なことやエネルギーを追加注入しなければならないなど、トンネル用として実用化するにはかなり遠い。

本研究では、新たな装置やエネルギーをなんら追加することなく、ナノ粒子の集じん率向上を目指した。具体的には、集じん部の集じん電極表面を開口シェッジを設け、集じん電極表面に部分的に高電界を形成した。これにより、集じん電極間の印加電圧を高くすることなく、電極付近を通過する粒子の移動速度を速くすることができ、集じん率が向上すると考えた。

2. 実験システム

〈2・1〉 実験装置概要 本研究に用いた実験装置の概略を図 1 に示す。道路トンネル内の空気を模擬するため、ディーゼルエンジンからの排ガスをを用い、その一部を分流器により取り込み、混合層で大気と希釈混合させた。さらにブースタファンによりダクト内に送りこみ、ESP で DEP を除去し吸引ファンによってダクト外に排出させた。実用機の処理風速とほぼ同一にするため、ダクト内の平均ガス流速は 7m/s とした。また、各実験の条件を統一するため ESP 稼動時間は 30 分間とした。模擬ガスの粒子濃度はナノ粒子測定が可能な Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS, TSI 社 MODEL3080) を用いて測定した。模擬ガスの粒径分布を図 2 に示す。個数ピーク値は約 73.7nm であり、トンネル内とほぼ同様である⁽²⁾。

〈2・2〉 ESP の電極構成 本実験で用いた二段式 ESP の構成を図 3 に示す。ESP は実用機と同様に帯電部と集じん部から構成されている。帯電部は線対平板電極構造であり、線電極は直径 0.26mm のタングステン製、平板電極は板厚 1mm のステンレス製とした。線電極の中心と平板電極表面の距離は 9.5mm (air gap: 9.37mm) とした。平板電極を接地とし、ワイヤ電極に直流 -9kV を印加し、電極間に負極性コロナ放電を発生させた。すなわち、帯電部を通過した粒子は、負極性に帯電される。放電電流は 0.06mA 一定とした。

〈2・3〉 集じん電極の構造 集じん部は接地用平板電極 (ステンレス製、板厚 1mm、縦 70mm、横 180mm、2 枚。) と高電圧用平板電極 (ステンレス製、板厚 0.8mm、縦 70mm、横 160mm、1 枚。) の合計 3 枚をギャップ間距離 9.1mm でガス流方向に平行かつ交互に配置した。すなわち、帯電部に負極性に帯電された粒子は、集じん部の静電界によって接地平板電極上に集じんされる。高電圧用平板電極はパンチング加工の都合上、板厚 0.8mm とした。

高電圧用平板電極として、表面を開口したパンチング電

図 1 実験装置概略

Fig. 1. Schematic diagram of electrostatic precipitator.

図 2 模擬ガスの粒径分布

Fig. 2. Particle size distribution.

図 3 二段式 ESP の電極構造

Fig. 3. Structure of electrode on two-stage type ESP.

図 4 パンチング電極の構造

Fig. 4. Structure of hole-punched electrode.

極と開口しない平板電極を用いた。本実験では帯電粒子を集じん部の接地用平板電極上に集じんする。そのため、接地用平板電極には開口を設けず、有効集じん面積を確保した。パンチング電極の電極構造を図 4、パンチング電極の開

表 1 パンチング電極の開口条件

Table 1. Condition of hole-punched electrodes.

	Hole-punch diameter [mm]	The number of hole [part]	Aperture rate [%]	Total hole edge length [mm]
Case of certain number of hole	2.5	21	1.1	165
	5.0	21	4.3	330
	10	21	17.2	659
	13	21	29.0	857
Case of the constant aperture rate	2.5	336	17.2	2638
	5	84	17.2	1319
	10	21	17.2	659

開口条件を表 1 に示す。パンチング電極表面には、直径 2.5, 5, 10, 13mm のいずれかの円形状の開口を設けた。開口条件は、「開口数一定」と「開口率一定」とした。開口数一定の場合、電極表面の開口数を 21 個に固定し、開口直径を変化させた。開口率一定の場合は、電極面積に対する総開口面積の比（開口率）を 17.2%一定とし、開口直径と開口数を変化させた。集じん部には絶縁耐電圧を考慮し直流 -7.5kV を印加した。また、いずれのパンチング電極も、電圧印加時の電流は検出されず、開口部での放電も観測されなかった。

〈2・4〉 粒子濃度及び集じん率の測定 ESP の集じん率を評価するため、ESP 上流及び下流の粒子濃度を測定した。ESP 上流及び下流からガスの一部を測定器に吸引し SMPS を用いて、粒径 700nm 以下の空間粒子濃度を測定した。粒径 30nm から 50nm, 50nm から 100nm, 100nm から 200nm, 200nm から 300nm, 300nm から 500nm, 500nm から 700nm の平均粒子濃度を求め、次式により集じん率を算出した。

$$\eta_{(d)} = \left(1 - \frac{N_{D(d)}}{N_{U(d)}}\right) \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

$N_{U(d)}$: ESP 上流における粒径 d の粒子濃度
[parts/m³]

$N_{D(d)}$: ESP 下流における粒径 d の粒子濃度
[parts/m³]

d : 粒径 [nm]

3. 結果及び検討

〈3・1〉 パンチング電極における電界分布 集じん電極をパンチング電極とすることによる集じん性能向上の有効性について検討するため、集じん空間の電界強度分布を解析した。

集じん空間の電界強度分布は、汎用有限要素法解析プログラム ANSYS (ANSYS Inc) の静電場解析を用いて計算した。解析条件を図 5 に示す。ただし、図 5 は集じん部の一部分の電極配置を断面的に表している。静電場解析は、集じん電極に設けた 1 つの円形開口 (Aperture) における中心断面に対して行った。すなわち、図 5 における開口寸法 (F-I または H-K 間距離) は、一つの円形開口の直径を意味する。電極間距離は 9.1mm, ガス流方向に対する解析範囲は 20mm とした。境界線 A-B, C-D を接地電極とし、電位を 0V とし

た。境界線 E-F, G-H, F-H, I-J, K-L, I-K, を高電圧電極とし、電位を -7.5kV とした。分割メッシュは三角形で、大きさは最大 0.5mm に設定し計算した。

開口直径 5mm のときの集じん空間における電界強度分布の解析結果を図 6 に示す。ただし、電界強度が強い領域ほど赤色、弱い領域ほど青色で表現している。平板電極 (電極に開口を設けない電極) の場合の電界強度 (以下、平板時電界強度) は 8.33×10^5 V/m であり、水色で表されている。平板時電界強度に対して、電極の開口部エッジ近傍で電界強度が強くなる領域が発生し、開口部中心付近で弱くなる領域が発生しているのが分かる。集じん電極間距離 9.1mm に対して、電界強度は最大 1.4mm 付近まで強くなっている。

平板時電界強度に対して、電界強度の強い領域と弱い領域を評価するため、面積比 R_S , R_W [%] を次式で定義する。

$$R_S = S_S / S \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

$$R_W = S_W / S \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

ただし、 R_S は電界強度が強くなった領域の面積比、 R_W は電界強度が弱くなった領域の面積比、 S は接地電極と高電圧用平板電極間の面積[m²] (図 5 における A-E-F-I-J-B の面積)、 S_S は平板時電界強度に対して強くなった領域の面積[m²]、 S_W は平板時電界強度に対して弱くなった領域の面積[m²]とする。

平板時電界強度に対して強くなった領域と弱くなった領域の面積比の開口直径特性を図 7 に示す。開口直径 10mm までは、電界強度が弱くなる領域よりも強くなる領域の方が大きい。しかし、開口直径 13mm では、電界強度が弱くなる領域の方が強くなる領域よりも大きくなっている。これは、電極間距離に対して、開口直径が十分大きくなったためである。

集じん電極をパンチング電極とすることで、電界強度の強い領域が大きくなる。すなわち、その領域では帯電粒子の移動速度が速くなり、集じん率の向上が期待できる。

〈3・2〉 帯電粒子の軌跡 パンチング電極を採用したときの電界強度分布の変化が集じん率に影響するかを確認するため、電界解析結果をもとに帯電粒子の軌跡を計算した。

電界方向への帯電粒子の移動速度 W_{th} は (4) ~ (7) 式で表せることが知られている⁽¹⁵⁾。(4) 式は終端速度であり、計算では帯電粒子の加速過程は無視した。また、ガス流方向へ

図5 集じん空間の電界強度分布解析条件
Fig. 5. Analytical area and analysis condition by Ansys.

図6 集じん空間の電界強度分布解析結果
(開口直径 5mm のとき)

Fig. 6. Electric field distribution of hole-punching electrode
(Hole diameter is 5 mm).

の帯電粒子の移動速度はガス流速と等しく、任意の位置におけるガス流速は 7m/s 一定とし流速分布は無視した。

$$W_{th} = \frac{qE}{3\pi\mu d} C_m \quad [\text{m/s}] \quad (4)$$

$$q = q_d + q_f \quad [\text{C}] \quad (5)$$

$$q_d = q * \ln \left(1 + \frac{t}{\tau_d} \right) \quad [\text{C}] \quad (6)$$

$$q_f = \frac{q_s(t/\tau_f)}{1 + (t/\tau_f)} \quad [\text{C}] \quad (7)$$

ただし、 q は粒子の帯電量 [C]、 E は電界強度 [V/m]、 μ は空気の粘性係数 (1.81×10^{-5} [Ns/m²])、 d は粒径[m]、 C_m はカニンガムの補正係数、 q_d は電界帯電量[C]、 q_f は拡散帯電量[C]、 t は帯電時間[s]、 τ_d は電界帯電時定数[1/s]、 τ_f は拡散帯電時定数[1/s]である⁽¹⁵⁾。

図7 平板時電界強度より強い領域と弱い領域の増加割合

Fig. 7. Area enhancement ratio of stronger and lower electric field as a function of punched hole diameter.

図8 粒径 50nm の帯電粒子の集じん空間における軌跡 (開口数一定: 21 個)

Fig. 8. Locus of charged particles ($d=50$ nm) in collector
(case of certain number of hole: 21 pieces).

なお、(4)式は平等電界下で成立する。パンチング電極を採用した不平等電界下において適用する妥当性については〈3・3〉節で述べる。

集じん部空間における粒径 50nm の粒子の軌跡を図 8 に示す。横軸 X は集じん部におけるガス流方向への距離、縦軸 Y は集じん部高電圧印加用平板電極から接地平板電極方向への距離を示している。図 5 における E 点が $(X, Y)=(0, 0)$ である。図中には、平板電極および開口直径 2.5, 5, 10, 13 mm のパンチング電極としたときの結果を示した。各パンチング電極は、開口数 21 個一定の条件とした。計算結果より、開口直径 10mm のときが最も接地平板電極に向かう速度は速くなる。開口部の直径が 2.5~13mm 程度であれば、ナノ粒子の集じん率を高くできると考えられる。

〈3・3〉 集じん性能に与えるその他の要因 高電圧印加用平板電極をパンチング電極とすることで、電界強度が局所的に強くなる以外に「流れ場の変化」、「グレーディエ

ント力の発生」が考えられる。これらの集じん性能に対する影響について検討する。

流れ場の変化の集じん性能に対する影響については、レイノルズ数 Re を用いて検討する。 Re は(8)式で定義され、 $Re < 2000$ で層流、 $2000 < Re < 4000$ で遷移領域、 $4000 < Re$ で乱流となる⁽¹⁶⁾。

$$Re = \frac{\rho_e V_g a}{\mu} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 ρ_e は空気の密度 (気温 20℃ のとき $\rho_e = 1.205 \text{ kg/m}^3$)、 V_g はガス流速 (m/s)、 a は円形ダクトの直径 (m) である。本実験における集じん部の高電圧印加用平板電極と接地用平板電極間の空間では $Re = 7456$ であり、流れ場は乱流である。ただし、 $V_g = 7 \text{ m/s}$ 、 a は相当直径⁽¹⁷⁾ ($a = 4 \times (\text{管路断面積}) / (\text{管路断面の周の長さ}) = 4 \times 0.0091 \times 0.07 / \{2 \times (0.0091 + 0.07)\} = 0.016 \text{ m}$) として計算した。パンチング電極を採用することで、開口部に渦流 (乱流) が発生する。集じん空間はすでに乱流状態にあるため、開口部に発生した渦流の集じん率への影響は大きくないと思われる。しかしながら、開口部に発生する渦流の集じん率へ与える影響については、今後の課題である。

グレーディエント力は、電界強度自体に勾配がある結果、電界の強い方向にはたらく力であり(9)式で表される⁽¹⁵⁾。すなわち、グレーディエント力 F_g は、パンチング電極方向に働く力である。

$$F_g = \frac{1}{4} \pi d^3 \frac{\epsilon_s - 2}{\epsilon_s + 2} \epsilon_0 \epsilon_m \text{ grad } E^2 \quad [\text{N}] \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 ϵ_s は粒子の比誘電率 (5.5)、 ϵ_0 は真空の誘電率 ($8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)、 ϵ_m は空気の比誘電率 (1.0) である。

ここで、図 6 から $\text{grad } E^2 = 1.6 \times 10^{11} (\text{V}^2/\text{m}^2)/10^{-3} (\text{m})$ であるとする、粒径 $d = 50 \text{ nm}$ における F_g は $6.5 \times 10^{-20} \text{ N}$ となる。一方、グレーディエント力 F_g と反対方向の接地用平板電極方向へはたらくクーロン力 F_p は(10)式で表され、粒子の帯電量 q は、拡散帯電量と電界帯電量の和となる。

$$F_p = qE \quad [\text{N}] \dots\dots\dots (10)$$

本実験条件における粒径 $d = 50 \text{ nm}$ の帯電量 q は 1.7×10^{-19} であり、不平等電界化ではたらくクーロン力は $F_p = 2.2 \times 10^{-13} \text{ N}$ となる。ただし、図 6 より電界 E は $1.3 \times 10^6 \text{ V/m}$ とした。これらの結果から、 F_g/F_p は 4.5×10^{-7} であり、クーロン力 F_p に対してグレーディエント力 F_g は非常に小さいことがわかる。パンチング電極を採用することによるグレーディエント力が集じん率に与える影響は小さいといえる。また、このことはパンチング電極を採用した不平等電界の場合においても、平等電界下で成立する(4)式を用いて帯電粒子の移動速度 W_{th} を計算することの妥当性も示している。

〈3・4〉 電極表面開口の効果と開口直径特性 集じん電極をパンチング電極とすることで、電界の強い空間を形成し集じん率を向上できると考え実験を行った。本実験ではパンチング電極の開口数を 21 個で一定とした。開口直径は 2.5, 5, 10, 13mm とし、集じん率に対する開口直径の効

図 9 集じん率の粒径特性に対する開口直径の効果 (開口数一定: 21 個)

Fig. 9. Collection efficiency as a function of particle diameter for various punched hole diameter (case of certain number of hole: 21 pieces).

図 10 粒径 50 から 100nm の集じん率の総エッジ長特性 (開口数一定: 21 個)

Fig. 10. Nano-particle collection efficiency between 50 to 100 nm as a function of hole edge length (case of certain number of hole: 21 pieces).

果を検討した。

開口数一定における集じん率の粒径特性に対する開口直径の効果を図 9 に示す。いずれの条件においても、粒径が小さくなるに従い集じん率は低下し、粒径 100 から 50nm の範囲で極小値となり、それ以下の粒径でわずかに向上している。開口のない平板電極に対して、いずれのパンチング電極も、粒径 200nm 以下のほとんどの範囲で集じん率は向上しており、開口直径 (開口率) が大きいほどその効果も大きい。ここで、粒径 50 から 100nm における集じん率の総エッジ長特性を図 10 に示す。総エッジ長とは、開口によって形成されたパンチング電極におけるエッジ部分の総延長を意味する。総エッジ長が 0mm (平板電極) のとき、集じん率は約 48% であるが、総エッジ長が長くなるに従い集じん率は向上し、857mm で約 62% となっている。開口によって得られたエッジ部分がナノ粒子の集じん率向上に効果があることが分かる。すなわち、総エッジ長が長くなると

図 11 集じん率の粒径特性に対する開口直径の効果（開口率一定：17.2%）

Fig. 11. Collection efficiency as a function of particle diameter for various punched hole diameter (case of constant aperture rate: 17.2%).

図 12 粒径 50 から 100nm の集じん率の総エッジ長特性（開口率一定：17.2%）

Fig. 12. Nano-particle collection efficiency between 50 to 100 nm as a function of hole edge length (case of constant aperture rate: 17.2%).

〈3・1〉節で検討した電界強度の強くなる領域が増加し、集じん率が向上したといえる。なお、光学顕微鏡によりエッジ部分を観測したが、粒子付着は見られなかった。また、接地用平板電極上における粒子の堆積状態も目視では変化は見られなかった。

〈3・5〉 開口率一定の場合の開口直径特性 開口数が一定の場合、開口直径を大きくし総エッジ長が長いほどナノ粒子の集じん率向上に効果があることが示された。このことから、さらに集じん率向上を目指し、図 8 において電界方向に進む速度が早く、図 9 においても集じん率の高かったφ10mmにおける開口率（17.2%）を基準として実験を行なった。開口直径は 2.5, 5, 10mm と変化させ個数を変化させる事で開口率を一定とした。すなわち、同一の開口率の場合、開口直径が小さいほど総エッジ長が長くなり、集じん率向上に効果があると考えた。

開口率一定（17.2%）における集じん率の粒径特性に対する開口直径特性を図 11 に示す。粒径 200nm 以下において、ほぼ全ての粒径で、開口直径が小さいほど集じん率は向上している。開口率（17.2%）一定における粒径 50 から 100nm の集じん率の総エッジ長特性を図 12 に示す。総エッジ長が 0mm（平板電極）のとき、集じん率は約 48%であるが、総エッジ長が長くなるに従い集じん率は向上し 1319mm 付近で飽和傾向を示す。集じん率は、総エッジ長 2638mm において約 74%を達成している。総エッジ長が長くなるに従い飽和傾向を示すのは、開口直径が小さくなることや開口数が多くなり開口部間の距離が小さくなるため、エッジ部電界が緩和されるためと考えられる。以上の結果から、同一開口率の場合、開口直径を小さくし総エッジ長を長くすることがナノ粒子の集じん率向上に非常に有効であるといえる。

4. まとめ

新たな装置やエネルギーを追加注入することなく、ナノ粒子の集じん率を向上させるため実験を行い、その目的が達成された。具体的には、次のことが明らかとなった。

（1）電極表面に円形開口を設けたパンチング電極を採用することで、開口部近傍の電界強度が強くなる。また、円形開口直径 10mm 以下では、電界強度が強くなる領域は弱くなる領域よりも大きい。

（2）集じん部高電圧印加用電極にパンチング電極を採用することで、ナノ粒子の集じん率が向上する。

（3）パンチング電極の開口数が一定の場合、開口直径が大きく、総エッジ長が長いほどナノ粒子の集じん率は向上する。

（4）パンチング電極の開口率が一定の場合、開口直径が小さく、総エッジ長が長いほどナノ粒子の集じん率は向上する。

本研究では開口直径 2.5mm、開口率 17.2%が最もナノ粒子の集じん率向上に有効であることが示された。今後、同一開口直径における開口率特性を検討することで、最適な開口条件を得ることが出来る考える。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、ご協力と貴重なご助言をいただいた武蔵工業大学、伊藤泰郎名誉教授、富士電機システムズ株式会社、河野良宏氏、三塚康史氏に感謝いたします。

（平成 19 年 7 月 31 日受付，平成 20 年 2 月 25 日再受付）

文 献

- （1） H. Nitta : "Health effects of diesel exhaust particles", *J. Jpn Air Cleaning Association*, Vol.43, No.2, pp.3-8 (2005) (in Japanese)
新田裕史：「ディーゼル排気粒子の健康影響」，*空気清浄*，**43**，No.2，pp.3-8 (2005)
- （2） Y. Imai, K. Shinkai, and H. Kawakami : "Exhaust Gas Treatment of Road Tunnel", *J. IEIE Jpn*, Vol.15, No.11, pp.1145-1148 (1995) (in Japanese)
今井裕一・新貝和照・川上一美：「トンネル内の排気ガス」，*電気設備学誌*，**15**，No.11，pp.1145-1148 (1995)

- (3) Catalogue : “AC Electrostatic Precipitators for Road Tunnels”, Fuji Electric Systems, catalogue no. EK957.
- (4) T. Ito, T. Kubota, A. Zukeran, T. Takahashi, K. Shinkai, M. Miyamoto, and T. Yoshimochi : “Collecting Characteristics of Submicron Particles on Electrostatic Precipitator”, Vol.15, No.2, pp.113-120 (1995) (in Japanese)
伊藤泰郎・久保田強・瑞慶覧章朝・高橋武男・新貝和照・宮本昌弘・吉持達郎 : 「電気集じん機によるサブミクロン粒子の集じん特性」, 電気設備学誌, **15**, No.2, pp.113-120 (1995)
- (5) 菅又昌雄・武田 健 : 「ディーゼル排ガスが自閉症の一因に?」, ニュートン, Vol.26, No.8, p.107 (2007)
- (6) A. Nemmar, P. H. Hoet, B. Vanquickenborne, D. Dinsdale, M. Thomeer, M. F. Hoylaerts, H. Vanbilloen, L. Mortelmans, and B. Nemery : “Passage of inhaled paritocles into the blood circulation in humans”, *Circulation*, Vol.105, pp.411-414 (2002)
- (7) Bong-Jo, A. L. Y. Ahmed, S.-H. LEE, K. Takashima, S. Katsura, and A. Mizuno : “Fine particle collection efficiency using an electrostatic precipitator equipped with electrostatic flocking electrodes as collecting plates”, *J. Inst. Electrostat. Jpn.*, Vol.30, No.2, pp.89-94 (2006) (in Japanese)
成 奉祚・Ahmed ALY・李 成華・高島和則・桂 進司・水野 彰 : 「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」, 静電気学誌, **30**, No.2, pp.89-94 (2006)
- (8) Y. Nakajima, Y. Komuro, and T. Sato : “Scavenging of Submicron Particles by Coarse Particles under the Effects of Electrostatic Field and Particle Vibration”, *J. Inst. Electrostat. Jpn.*, Vol.18, No.1, pp.49-56 (1994) (in Japanese)
中島耀二・小室弥栄・佐藤 孝 : 「電界振動凝集によるサブミクロン粒子の捕集」, 静電気学誌, **18**, No.1, pp.49-56 (1994)
- (9) T. Nakane and K. Seya : “The Experiment of Electrostatic Precipitator with Ultrasonic Agglomeration”, *J. Inst. Electrostat. Jpn.*, Vol.10, No.5, pp.331-337 (1986) (in Japanese)
中根偕夫・瀬谷浩一郎 : 「超音波凝集を併用した電気集じんの実験」, 静電気学誌, **10**, No.5, pp.331-337 (1986)
- (10) Y. Koizumi, F. Tochikubo, T. Watanabe, and J. Hautanen : “Bipolar-charged submicron particle agglomeration”, *J. Electrostatics*, Vol.35, pp.55-60 (1995)
- (11) N. Namiki, H. Emi, and Y. Otani : “Electrostatic separation of gaseous and particulate contaminants with soft X-ray irradiation”, *J. Inst. Electrostat. Jpn.*, Vol.26, No.6, pp.272-274 (2002) (in Japanese)
並木則和・江見 準・大谷吉生 : 「軟 X 線を利用したガス状汚染物質および粒子の静電分離」, 静電気学誌, **26**, No.6, pp.272-274 (2002)
- (12) A. Zukeran, Y. Ikeda, Y. Ehara, T. Ito, T. Takahashi, H. Kawakami, and T. Takamatsu : “Agglomeration of Particles by ac Corona Discharge”, *Electrical Engineering in Japan*, Vol.130, No.1, pp.30-37 (2000)
- (13) A. Zukeran, T. Ito, T. Takahashi, K. Shinkai, and H. Kawakami : “Effect of water on agglomeration and collection efficiency in electrostatic precipitator”, *J. IEIE Jpn.*, Vol.16, No.12, pp.1288-1296 (1996) (in Japanese)
瑞慶覧章朝・伊藤泰郎・高橋武男・新貝和照・川上一美 : 「電気集じん装置の凝集および水分の効果」, 電気設備学誌, **16**, No.12, pp.1288-1296 (1996)
- (14) A. Zukeran, W. Jindai, Y. Kawada, Y. Ehara, T. Ito, T. Takahashi, and T. Takamatsu : “Effect of surfactant on re-entrainment phenomena in an electrostatic precipitator”, *T. IEE Japan*, Vol.199-A, No.3, pp.267-272 (1999-3) (in Japanese)
瑞慶覧章朝・神代 渉・川田吉弘・江原由泰・伊藤泰郎・高橋武男・高松武史 : 「電気集じん装置における再飛散現象に対する界面活性剤の効果」, 電学論 A, **119**, No.3, pp.267-272 (1999-3)
- (15) 静電気学会 : 静電気ハンドブック, オーム社 (1989)

- (16) 例えば, 田古里哲夫・荒川忠一 : 流体工学, 東京大学出版会 (1989)
- (17) 道路トンネル技術基準 (換気編)・同解説, 日本道路協会 (2001)

安 本 浩 二

(非会員) 1960年3月10日生。1982年3月相模工業大学卒業。1988年富士電機(株)(現, 富士電機システムズ(株))入社。電気集じん装置の研究・開発および公共施設・道路施設に関する電気設備のエンジニアリング業務に従事。2008年電機工業技術功労者優良賞受賞。

瑞慶覧 章 朝

(正員) 1971年11月15日生。1999年3月武蔵工業大学大学院博士後期課程修了。同年4月富士電機(株)(現, 富士電機システムズ(株))に入社。現在, 電気集じん装置に関する研究・開発および道路施設に関する電気設備のエンジニアリング業務に従事。博士(工学)。1998年電気設備学会論文賞, 2008年電機工業技術功労者優良賞受賞。

高 木 康 裕

(正員) 1979年4月4日生。2004年3月武蔵工業大学大学院博士後期課程修了。同年4月富士電機システムズ(株)入社, 現在に至る。博士(工学)。

江 原 由 泰

(正員) 1956年9月22日生。1979年3月群馬大学合成化学学科卒業。同年三恵技研工業(株)入社。1984年武蔵工業大学に勤務, 2002年同大学准教授。2002年5月~2003年4月Ford Research Laboratory 客員研究員。主として, 大気汚染物質の放電プラズマによる除去, 高分子絶縁材料の劣化に関する研究に従事。博士(工学)。

高 橋 武 男

(正員) 1939年4月24日生。1963年3月大阪大学工学部卒業。1963年~1999年富士電機(株)に勤務。2000年4月武蔵工業大学電気電子工学科客員教授, 現在に至る。主に電気集じん装置の研究開発に従事。博士(工学)。1998年電気設備学会論文賞受賞。