ディーゼル排ガス粒子の電気集塵技術*

Technology of Electrostatic Precipitator for Diesel Exhaust Particle

江 原 由 泰**
EHARA Yoshiyasu

Abstract The particles emitted from diesel engine exhaust have low resistive in nature and extremely small in the range of 70-120 nanometers. These particles are penetrated into an alveolus and extremely harmful to human health. These particles are generated from various emissions such as diesel automobiles, marine engines, power generation engines, and construction diesel machines. These particulates also exist in tunnel or underground parking. An electrostatic precipitator has been extensively used for the collection of these particles. In the present technical report, the technology of electrostatic precipitator on diesel exhaust particle was explained.

Keywords: Electrostatic precipitator, Diesel exhaust particle, Corona discharge, Reentrainment, Electrohydrodynamics

1. はじめに

大気汚染物質の中には NO_x や SO_x 、 CO_2 のようなガス状物質の他に、粒子状汚染物質がある。大気中の粒子状物質には粒径が大きく短時間に地上に降下する煤じんと、粒径が小さく軽いので長時間大気中に浮遊する浮遊粒子状物質 (Suspended Particulate Matter: SPM) とがある。降下煤塵は健康的には大きな問題はないが、SPM は肺や気管支に入り呼吸器疾患の原因になるので、環境的に問題となる物質である。SPM の主な発生源は各種のボイラーや自動車からの排ガスである。

自動車排ガス規制は段階的に厳しくなり、ガソリン車ではエンジンの改良や三元触媒の適用により、大気汚染物質の低減化は進んでいる。一方、ディーゼル車においてもエンジンの改良や燃料噴射システムであるコモンレールを導入により燃焼効率も改善され、ディーゼルパティキュレートフィルタの実用化により、PM の低減が図られてつつある。

ディーゼルエンジンから排出される PM の粒径分布は Fig. 1 に示すように、質量分布では 200~300 nm に極大を持つ。しかし、粒子数分布で見るとナノ粒子が圧倒的に多い。粒子が小さければ小さいほど呼吸器系の深部まで吸入されるため、粒径に応じて呼吸器系の各部位に沈着し、人の健康に大きな影響を与える。約 2 μm 以下の PM は呼吸器系の最深部である肺領域の気管支や肺

Fig. 1 Distribution of diesel exhaust Particle.

* 2013.8.1 受付

** 東京都市大学工学部電気電子工学科 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1

TEL: (03)5707-0104 E-mail: yehara@tcu.ac.jp

胞に沈着する[1]。

SPM を除去する技術として様々な集塵方式が考案されている。集塵方式には重力集塵やサイクロン集塵、スクラバー、スプレー塔、フィルタや電気集塵装置 (Electrostatic Precipitator: ESP) などがある。なかでも ESP は他の集じん装置と比べて、圧力損失が小さく運転費用が安価、粒径 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下の微粒子に対して集じん率が高いことが利点である。したがって、火力発電所や工場などの産業用から自動車道路トンネル用、ビル空調用、家庭用空気清浄器など多くの空気環境保全に役立っている。本稿ではディーゼル排ガス中の PM を処理する技術として ESP を取り上げ、ESP 内の粒子挙動や集塵特性、最新の技術動向について解説する。

2. 電気集塵理論

一般に電気集塵における空間内の粒子に加わる力とは電氣的な力、拡散付着力、慣性力、重力などが挙げられる。この中でも電氣的な力が最も大きく支配的となっている。これは、電気集塵では粒子をコロナ放電で帯電させ電界からのクーロン力によって捕集するためである。ESP の外装を Fig. 2 に示す。一般に ESP には一段式と二段式があり、図には二段式を示した。二段式電気集塵装置では帯電部と集塵部に分かれており、帯電部でコロナ放電を発生させる。この放電により放電極近傍で多数のイオンが発生し、イオンは接地電極方向へ加速される。ここに PM が通過すると、イオンとの衝突やイオンの熱拡散による衝突で PM は帯電される。帯電された粒子は平行平板を形成する集塵部で、クーロン力によって電界方向に引き寄せられ、接地電極へと捕集される。クーロン力は次式で与えられる[2]。

$$F_c = QE_c = neE_c \quad (1)$$

F_c : クーロン力 [N]、 Q : 電荷量 [C]、 e : 電気素量 (1.6×10^{-19} [C])、 n : 電荷の数、 E_c : 集塵部電界強度 [V/m]

コロナ放電による粒子の帯電機構は、おもにイオンの熱運動にもとづく拡散帯電とイオンの衝突による電界帯電に分けられる。粒子の帯電量は拡散帯電量と電界帯電量の和として(2)式で表され、拡散帯電量 q_d は(3)~(5)式、電界帯電量 q_f は(6)~(8)式で表される[2,3]。

Fig. 2 Schematic of ESP.

$$q = q_d + q_f \quad (2)$$

$$q_d = q^* \ln \left(1 + \frac{t}{\tau_d} \right) \quad (3)$$

$$q^* = \frac{2\pi\epsilon_0 dkT}{e} \quad (4)$$

$$\tau_d = \frac{8\pi\epsilon_0 kT}{dC_i n_i e^2} = \frac{8\pi\epsilon_0 kT \mu_i E}{dC_i J_i e} \quad (5)$$

$$q_f = \frac{q_{fs} (t/\tau_f)}{1 + (t/\tau_f)} \quad (6)$$

$$q_{fs} = \frac{3\pi\epsilon_0 \epsilon_s d^2 E}{\epsilon_s + 2} \quad (7)$$

$$\tau_f = \frac{4\epsilon_0}{\mu_i \rho_i} = \frac{4\epsilon_0 E}{J_i} \quad (8)$$

q^* : 拡散帯電定数[C]、 t : 帯電時間[s]、 τ_d : 拡散帯電時定数[s]、 d : 粒子径[μm]、 ϵ_0 : 真空の誘電率 8.85×10^{-12} [F/m]、 k : Boltzmann 定数 1.38×10^{-23} [J/K]、 T : 絶対温度[K]、 C_i : イオンの平均熱運動速度[m/s]、 n_i : イオン密度[m^{-3}]、 μ_i : イオンの移動度[m^2/Vs] 正イオン: 0.00014、負イオン: 0.00021、 J_i : イオン電流密度[A/m^2]、 τ_f : 電界帯電時定数[s]、 q_{fs} : 飽和電界帯電量[C]、 ϵ_s : 粒子の比誘電率 5.5、 ρ_i : 空間イオン電荷密度[C/m^3]

理論帯電量の粒径特性の例を Fig. 3 に示す。拡散帯電量および電界帯電量のいずれにおいても、粒径が大きくなるに従い増加する。しかし、粒径約 $0.15\text{ }\mu\text{m}$ を境として、それ以下では拡散帯電、

それ以上では電界帯電が優勢となる。

帯電部で帯電された粒子は集塵部にて集塵される。この時、粒子には風速によるガス流方向の力とクーロン力による電界方向の力の合力によって電極に到達する。このクーロン力による電界方向への移動速度 W_{th} は次式で示される[2,3]。

$$W_{th} = \frac{qE}{3\pi\eta d} C_m \quad [m/s] \quad (9)$$

$$C_m = 1 + 2.54 \frac{\lambda}{2d} + 0.8 \frac{\lambda}{2d} \exp\left\{-0.55\left(\frac{2d}{\lambda}\right)\right\} \quad (10)$$

$$\lambda = 6.11 \times 10^{-8} \frac{T}{293} \times \frac{1}{p} \quad (11)$$

Fig. 3 Theoretical charge of particle.

Fig. 4 Migration velocity and Cunningham correction.

C_m はカニンガム補正係数、 η は空気粘性係数 $1.81 \times 10^{-6} \text{Ns/m}^2$ 、 P : ガス圧力 [atm]

Fig. 4 に上式により計算した移動速度 W_{th} とカニンガムの補正係数 C_m を示す。カニンガム補正係数は粒径約 $1 \mu\text{m}$ 以上においてはほぼ 1 である。粒径が小さくなり、気体の平均自由行程程度になると粒子の表面での“すべり”を考慮する必要がある。このため小さな粒子は通常よりも早く移動するようになる。およそ $1 \mu\text{m}$ 以下の場合に顕著になるため粒子の移動速度はこの範囲で補正を加える必要がある。これがカニンガムの補正係数である。また粒子の電界方向への移動速度は Fig. 3 に示した帯電量に強く影響するため大きな粒子の方が移動速度大きくなる。以上のことから粒子の移動速度は $0.2 \mu\text{m}$ 程度で最小値を持つことになる。

上記の電界方向への移動速度を用いた集塵効率の算出法がある。ESP を評価する上で、最も基本的な集塵率 η の算出法で Deutsch の理論式である。この式は ESP 内の同一断面積上において粒子濃度が均一であるという仮定に基づくもので、次式で示される[2,3]。

$$\eta = 1 - \exp\left(-W_{th} \frac{A}{Q}\right) = 1 - \exp\left(-W_{th} \frac{L}{V_g G}\right) \quad (12)$$

A : 集塵電極総面積 [m^2]、 Q : ガス流量 [L/s]、 L : 集塵電極長 [m]、 V_g : ガス風速 [m/s]、 G : 電極間ギャップ [m]

集塵部に流入した帯電粒子は移動速度 W_{th} で電極方向へ引き寄せられる。集塵電極に到達した粒子を集塵されたものとするため、ガス中の粒子の個数と集塵電極に到達した粒子の割合から集塵率を求めることが出来る。このため集塵率は W_{th} が大きいほど高くなる。

集じん部にガス流速 V_g で入った帯電粒子は、集じん部の静電界からクーロン力を受けて集じん電極方向に速度成分 W_{th} で移動する。全粒子内の集塵電極に捕された割合を集塵効率 η と定義するので、速度成分 W_{th} が大きいほど集塵が容易であるといえる。逆にガス流速 V_g が大きいほど集塵効率は低下する。風速 $10 \sim 25 \text{ m/s}$ における理論集塵率の粒径特性を Fig. 5 に示す。どの風速においても粒径が 200 nm 付近で、集塵率は最小値を持つ。これは粒径が小さくなると帯電量 q は小さくなるが、カニンガムの補正係数 C_m は大きくなる。逆に粒径が大きくなると q は大きくなるが、

C_m は 1 に近づく。よって粒径が 200 nm 付近で集塵率が最小となる。風速を 10 m/s から 25 m/s に上げると、200 nm 付近では集じん率が 35% 程度、低下することになる。

次にディーゼルエンジンから排ガスを実際に ESP で集塵した例を示す。処理風速を変化させ、集塵率を測定した結果を Fig. 6 に示す。粒径 100 nm 程度で、集じん率は最小になっている。この結果は、Fig. 5 に示した理論集塵率とほぼ一致している。また、風速を増加させると集塵率が減少することがわかる。特に、風速 25 m/s 時では 60% を下回る粒径範囲も存在し、集塵率の低下が認められる。しかしながら、実験値の集塵率はどの流速においても、理論集塵率の値より高い。この理由としては、理論集塵率の計算には帯電部における捕集を考慮していないことが主要因だと考えられる。

Fig. 5 Theoretical collection efficiency.
Discharge current 2.5 mA, Collection voltage DC-7.0 kV.

Fig. 6 Collection efficiency for various gas.

3. 電気流体力学

電気流体力学 (Electrohydrodynamicis : EHD) は、流体中に外部電界または電流による電気力が作用して流動を発生する現象である[4]。この現象を電場と流れ場と温度場という観点からとらえると、考えられる相互作用は数多くある[5]。各作用力のオーダーを比較すると、電場を決める要因として、流れ場の影響を受ける対流電流分は、伝導電流に比べて 1 桁小さいので第一近似として省略できることから、電場のみで決まる伝導電流が主要となる。流れ場を決める要因としては、イオンに働くクーロン力が大きく、浮力や分極に働く電気力は省略できる。また、温度場を決める要因としては、イオン風による強制対流が主要となる。

イオン風の実機を Fig. 7 に示す。鋸歯対平板の電極構造において、負極性の高電圧を印加すると負極性コロナ放電が発生する。それより生じた負イオンが途中で再結合することなく電界の作用により平板電極へと向かう。その間に中性分子と衝突し、運動エネルギーを中性分子に与える。その結果、イオンならびに中性分子は平板電極へ向かって移動し、移動により発生した流動をイオン風という。EHD 的特性速度は式(13)で与えられる[6]。

$$U_{EHD} = \sqrt{\frac{DJ_p}{\mu\rho_g}} \quad (13)$$

J_p : 集じん電極上の最大電流密度、 D : 電極間距離、 ρ_g : ガス密度、 μ : イオン移動度

正極性直流、負極性直流、交流 (60 Hz) 印加時の、鋸歯直下の最大イオン風とコロナ電流の平方根との関係を見ると、交流<負極性<正極性の関係

Fig. 7 Ionic wind.

である。

ESP 内の流れ場の研究は以前より多くなされており [7-11]、イオン風を可視化する研究も多い [12]。Fig. 8 に著者らが行った、シュリーレン法による ESP 内の流れ場の結果を示す。(a)は従来型 ESP で針対平板の電極構成である。中心の黒い円が電極位置を示している。左から 2 本の流線が観察され、放電極の直下でイオン風の影響がみられる。(b)は著者らが考案した EHD を活用した ESP である。平板電極上に捕集用のポケットを設けている。また、前段のポケットに向かってイオン風が発生するため、主流体は平板電極方向に曲げられ、粒子をポケットに導いている。

実際のディーゼルエンジンを稼働させ、その排ガスを処理した際の集塵率の粒径特性 (20-500 nm) 例を Fig. 9 に示す。従来型 ESP、EHD ESP 共に 90 % 以上の高い効率であるが、EHD ESP の

Fig. 8 Schlieren image of ionic wind.

Fig. 9 Particle size-dependent collection efficiency.

方がより高い集塵率を示している。このように EHD を有効利用して、集塵率の向上が図られている [13]。

4. 再飛散現象

ESP の性能は捕集粒子の見掛けの電気抵抗率に大きく依存する。抵抗率が約 $10^4 \Omega\text{cm}$ 以下では集塵極に捕集された粒子が、再び集塵電極から飛び出す再飛散現象が起こる。一方、抵抗率が約 $10^{11} \Omega\text{cm}$ 以上では堆積した粒子層にコロナ電流が流れることで高電界が形成され、粒子層の絶縁破壊が生じる。すると、放電空間に放電極からのイオンと逆極性のイオンが放出され粒子の帯電を阻害し、また火花電圧値が大幅に低下する。このため集塵効率が大幅に低減する。これが逆電離現象である。逆電離を抑制するため、ガスの調質あるいはガス温度を高くして粒子の見掛けの電気抵抗率を下げたり、パルス電圧を用いてコロナ電流分布を均一化することなどが行われている [2]。

ディーゼルエンジンから排出される PM の主成分はカーボンであり、カーボンのような電気抵抗の低い粒子 ($\rho < 10^3 \Omega\text{cm}$) を捕集する場合、ESP では再飛散現象が問題となる。再飛散現象について、その原理や再飛散粒子を再捕集する研究例 [14,15] はいくつかあるが、再飛散を防止する研究はあまり見かけない。著者等が行ってきた再飛散に関する研究は、①発生原理、②二次的問題、③防止方法に大別でき、以下に概説する。

まず、①の発生原理について述べる。帯電部で負極性に荷電し、直流の負極性電圧を印加した集塵部における電極上の SEM 写真を Fig. 10 に示す。接地電極の粒子の捕集状態は数珠状になっており、高電圧電極にも捕集されている。粒子は負極性に帯電されているため、高電圧電極には粒子は捕集されないはずである。これは、再飛散により起こった現象である。

直流電圧を印加した時の再飛散現象のモデルを同図に示す。モデルの各ステップは、次のようなプロセスで進むと考えている。

- (A) 帯電部で負極性に帯電した粒子は、集じん部の接地電極に捕集される。捕集された粒子は、抵抗率が低いと直ちに負電荷を失い、静電誘導により逆極性に帯電し正極性に誘導帯電する。
- (B) 捕集された粒子は、極板上の粒子と凝集し、極板上で数珠状に連なる。数珠粒子はガス流の影響を受け、流体抗力が增加する。また、これらの粒子は静電誘導により捕集電極と同極性であるので、クーロン力により対向電極に引き付けられる。この2つの要因により付着力より剥離力のほうが大きくなり、凝集粒子の再飛散現象が発生する。
- (C) 再飛散現象が発生することにより、高電圧電極にも再飛散粒子が捕集される。集じん部後方に流出する粒子も多くあるので、大粒径粒子の集じん率が低下する。

以上のことから、集じん部に直流電圧を印加すると捕集状態は数珠状になり、再飛散現象が発生し、大粒径粒子の集塵率が低下することになる。

実際にディーゼルエンジン排ガスを大気で混合希釈し、2段式 ESP で集塵した場合、再飛散現象が確認される。この場合、粒径 $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ では、時間の経過に対して集塵率はほぼ一定である。しかし、粒径 $2.0 \mu\text{m}$ 以上の大粒径粒子の集塵率は、稼働時間とともに低下する。さらに粒径 $5.0 \mu\text{m}$ 以上では、運転時間の経過とともに集じん率は低下し、ESP 上流の濃度より下流の方が高くなる。これは微小粒子が凝集し、大粒径の粒子となって飛散するからである。

②の二次的問題では再飛散現象は、集塵率の低下の原因[16]となる。そして高速道路トンネル内に ESP が設置されると、再飛散粒子は自動車運転者の視環境に影響を与える。さらに、再飛散粒

Fig. 10 Process of reentrainment.

子は、ESP 下流壁面に付着[17]し、壁面汚染の原因になるとも考えられている。

③については、著者等は主に次の防止方法を提案してきた。粒子間および粒子と集塵電極間の付着力の増加により再飛散を抑制できると考え、処理ガス中への水分噴霧を試みた。ディーゼルエンジン排ガス中の PM は疎水性のカーボンであるため、水噴霧形 ESP では界面活性剤が入った水溶液を噴霧すると、大粒径粒子の集塵率が向上し、再飛散の抑制が確認された[18]。

再飛散の発生は、集塵粒子が接地電極と同極性となることが原因の一つである。このことに着目し、集塵電極表面を誘電体で覆った、絶縁被覆形 ESP の開発を行った。再飛散抑制メカニズムは次のとおりである。集塵部において、帯電粒子は接

地平板電極を被覆している絶縁体表面に捕集される。絶縁体表面に集じんされた粒子は電荷が保持されるため、付着力として静電気が働く。この静電気力によって再飛散が抑制される。この効果は、ポリエチレンシートで覆った電極を使用した実験において実証されている[19]。

また、集塵電極に捕集され凝集する粒子の形状を変化させ、粒子と集塵電極の接触面積を増加させることで、再飛散を防止できないかと考えた。この考えを基にして、集塵部に交流電圧を印加することで、再飛散の抑制を試みた[20, 21]。従来型の直流電圧を集塵電極に印加した ESP では、再飛散現象のため稼動後 10~30 分で集じん率が低下してしまう。しかしながら、交流 ESP では、稼動後 300 分以上経過しても、粒径 $0.3\sim10\ \mu\text{m}$ において集じん率の低下は見られない。

交流 ESP における集塵電極板上の捕集粒子の SEM 画像を Fig. 11 に示す。直流電圧を印加した ESP では、先に示したような数珠状の極板凝集粒子が多数観測されるのに対し、交流 ESP では数珠状凝集粒子は観測されず、粒子は球状となっている。

ここで、交流 ESP における再飛散抑制モデルを同図に示す。

- (A) 帯電部で負極性に帯電した粒子は、接地極に集塵され、直流電圧印加時と同様に、静電気力により数珠状の凝集粒子を形成する。
- (B) 集塵電極に印加している電圧は交流であり、極性の変化がある。極性反転した時に、接地電極上の凝集粒子は捕集電極に引き寄せられ、数珠状から球状に変化する。
- (C) 極板凝集粒子は極性が変化する度に球状化し、電極との接触面積が増加する。一定周期でこれを繰り返し、極板凝集粒子が球状化するため、接触面積が増加し再飛散は抑制される。

このようにして、電極上に捕集した粒子は流体抗力やクーロン力を受けにくくなり、再飛散現象を抑制できる。また、帯電粒子は高圧・接地の両極板上でほぼ同量捕集される。交流形 ESP は他の再飛散防止対策に比べ電源電圧を変化するだけであり、その効果も大きい。この交流形 ESP は 2004 年に、2 つの自動車道路トンネルの換気設備で実用化されており、有効な結果が得られている。

Fig. 11 Prevention of reentrainment using AC ESP.

5. おわりに

近年、海洋汚染問題は国際的に問題視されており、船用ディーゼル機関から排気される有害物質低減技術の確立は熱望され国際的な緊急課題である。船舶用ディーゼルエンジンの排出ガスには主に PM や NOx, SOx などの大気汚染物質が含まれている。船舶からの大気汚染物質の排出規制については、国際海事機関で審議され、2005 年 5 月 MARPOL 条約付属書 VI が発効され(Tier1), 2011 年からの 2 次規制(Tier2)を経て、2016 年からは 3 次規制(Tier3)として NOx では Tier1 比で 80%削減が求められている。船舶の始動低温時には大量の PM が発生し、NOx

の発生はPMとトレードオフの関係にある。

自動車用ディーゼルエンジンから排出されるPMについては、ディーゼルパティキュレートフィルタが主流である。しかし、船用エンジンからの排ガス量は多く、PM濃度が高いためフィルタによるPM捕集はその再生方法（600°C以上の燃焼法、NO₂や触媒による300°C以上の燃焼法）が非常に高価となり実用的ではない。電気集塵装置は他の集塵装置と比べて、圧力損失が小さいなどの利点を持ち、粒径1 μm以下の微粒子に対して集塵率が高い。この利点を生かし船用ディーゼルエンジンからの排ガス処理にESPが注目されている。現在、著者らも船舶からの排ガス処理に適応可能なESPを研究・開発中であり、ゼロエミッションを視野に入れ省エネルギー化の観点からも検討を行っている。

参考文献

- [1] Annals of the ICRP, Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection, A Report of a Task Group of the ICRP. (1994).
- [2] Handbook of Electrostatics, Ohmsha (1981).
- [3] Hinds, W., Aerosol Technology, Inoue Shoin (1985).
- [4] Zhao, L. and Adamiak, K., Effects of EHD and External Airflows on Electric Corona Discharge in Point-Plane/Mesh Configurations, IEEE Trans. Ind. Applications, Vol.45(1), 16-21 (2009).
- [5] Handbook of Electrostatics, Ohmsha. (1998).
- [6] Adachi, T. and Kawasaki, M., Ionic Wind Due to Corona Discharging, Proc. Inst. Electostat. Jpn., Vol.11(4), 246-254 (1987).
- [7] Adachi, T., Kawasaki, M. and Nakabayashi, H., The Behavior of Dust Particle in Electrostatic Precipitators, Proc. Inst. Electostat. Jpn., Vol.4(3), 152-159 (1980).
- [8] Yamamoto, T. and Velkoff, H.R., Electro-Hydrodynamics in an Electrostatic Precipitator, J. of Fluid Mechanics, Vol. 108, 1-18 (1981).
- [9] Watanabe, T., Improvement of Electrostatic Precipitation Technology with Aid of Computer Simulation, Proc. Inst. Electostat. Jpn., Vol.10(6), 477-480 (1986).
- [10] Motegi, K., Abe, K., Ohkubo, T. and Nomoto, Y., The Effect of Wire Net Electrode on Flow Field in Duct Type Electrostatic Precipitator, Proc. Inst. Electostat. Jpn., Vol.22(5), 262-267 (1998).
- [11] Adachi, T., Ionic Wind in the Electrostatic Precipitator-Experimental Treatment by the Schlieren Method, Trans. IEEJ., Vol.93(7), 273-280 (1973).
- [12] Fujishima, H., Ueda, Y. and Tomimatsu, K., Numerical and Experimental Investigation of Electrohydrodynamics in Electrostatic Precipitator, J. Inst. Electrostat. Jpn., Vol.28(4), 218-223 (2004).
- [13] Yamamoto, T., Mimura, T., Otsuka, N., Ito, Y., Ehara, Y. and Zukera, A., Diesel PM Collection for Marine and Automobile Emissions Using EHD Electrostatic Precipitators, IEEE Trans. Ind. App., Vol.46 (4), 1606 - 1612 (2010).
- [14] Masuda, S., Moon, J.D. and Aoi, K., AUT-AINER Precipitator System - an Effective Control Means for Diesel Engine Particulates, Actas 5, Congreso Int Aire Pure 1980 Tomo 2, 1149-1153 (1982).
- [15] Matsusaka, S., Shimizu, M. and Masuda, H., Formation of Wall Particle Layers by Simultaneous Deposition and Reentrainment of Fine Particles in Turbulent Aerosol Flows, J. of Chemical Eng. of Jpn., Vol.19(2), 251-257 (1993).
- [16] Zukeran, A., Ikeda, Y., Ehara, Y., Ito, T., Takahashi, T., Kawakami, H. and Takamatsu, T., Two-Stage Type Electrostatic Precipitator Re-entrainment Phenomena under Diesel Flue Gases, IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.35(2), (1999).
- [17] Takahashi, T., Takamatsu, T., Kawakami, K., Zukeran, A., Fujimura, H., Ehara, Y. and Ito, T., Particle Deposit on the Surface of the Wall by Electrostatic Precipitator, J. Inst. Elect. Install. Engr. Jpn., Vol.18(12), 853-859 (1998).
- [18] Zukeran, A., Jindai, W., Kawada, Y., Ehara, Y., Ito, T., Takahashi, T., Kawakami, K. and Takamatsu, T., Effect of Surfactant on Re-entrainment Phenomena in an Electrostatic Precipitator, Trans. IEEJ., A, Vol.119(3), 254-260 (1999).
- [19] Takahashi, T., Kawada, Y., Zukeran, A., Ehara, Y., and Ito, T., Inhibitory Effect of Coating Electrode with Dielectric Sheets on Re-entrainment in Electrostatic Precipitator, J. Aerosol Sci., Vol.29(1), S485-S486 (1998).
- [20] Kawada, Y., Kubo, T., Ehara, Y., Takahashi, T., Ito, T., Zukeran, A., Kono, Y. and Yasumoto, K., The Prevention of Particle Re-entrainment Phenomena in Electrostatic Precipitator with AC Wave, Trans. IEEJ., A, Vol.122(9), 811-816 (2002).
- [21] Zukeran, A., Kawada, Y., Kono, Y., Yasumoto, K. and Ito, T., Performance of an Electrostatic Precipitator Applied Rectangular AC Electric Field for Prevention of Particle Re-Entrainment Phenomena, Safety in Road and Rail Tunnels (2003).