矩形波交流電界印加による集じん粒子の再飛散現象防止法

学生員 川田 吉弘 (武蔵工大) 学生員 久保 隆文 (武蔵工大)
 正員 江原 由泰 (武蔵工大) 正員 高橋 武男 (武蔵工大)
 正員 伊藤 泰郎 (武蔵工大) 正員 瑞慶覧 章朝 (富士電機)
 非会員 河野 良宏 (富士電機) 非会員 安本 浩二 (富士電機)

The Prevention of Particle Re-entrainment Phenomena in Electrostatic Precipitators with Rectangular AC Wave

Yoshihiro Kawada, Student member, Takafumi Kubo, Student member,

Yoshiyasu Ehara, Member, Takeo Takahashi, Member, Tairo Ito, Member (Musashi Institute of Technology)

Akinori Zukeran, Member, Yoshihiro Kono, Non-Member, Kouji Yasumoto, Non-Member (Fuji Electric Co., Ltd.)

Electrostatic Precipitators (ESP) are used extensively for decontaminating of industrial gaseous pollution and air cleaning of building. One application of the ESP is decontaminating polluted gases and increasing the visibility index in expressway tunnels. However, the collection efficiency of large particle decreases due to particle re-entrainment phenomena, since lots of particles in expressway tunnels are made of carbon that has low resistivity. Therefore, large particle has the adverse effect of decreasing visibility index. It is important to prevent re-entrainment for increasing the visibility index. In this work, we discussed the method preventing particle re-entrainment, and devised applying rectangular AC high voltage to the collecting electrodes. DC voltage is applied to precharger in all test conditions. The collection efficiency of large particles decreases due to particle re-entrainment with DC high voltage applied to electrode in collecting section. However, when rectangular AC high voltage applied to the collecting electrodes, the collection efficiency of large particles improves with increasing frequency. The re-entrainment phenomena are prevented on applying rectangular AC high voltage (1Hz). And then, the collection efficiency of submicron particles on applying rectangular AC high voltage (1Hz) is as high as DC high voltage.

キーワード：電気集じん装置，ディーゼルエンジン排ガス，集じん率，再飛散現象，交流電界

Keywords: Electrostatic precipitator, Diesel exhaust gas, Collection efficiency, Re-entrainment, Alternating electric field

1. はじめに

自動車用道路トンネル等の半閉鎖的な空間では，自動車の内燃機関から発生する一酸化炭素，窒素酸化物，炭化水素，亜硫酸ガス等のガスや，ディーゼルエンジン排気ガス中微粒子(以下，DEP)等の粒子状物質⁽¹⁾が存在し易い。これら有害物質を含むガスは，トンネル内だけでなく，その周辺大気への影響が考えられるため，高効率で除去することが望まれる。なかでも DEP は重要視され，人体に影響を及ぼすだけでなく，トンネル内の視程の低下を引き起こし⁽²⁾，交通障害とも成り得る。この DEP を除去するため，トンネル内には電気集じん装置(以下，ESP)が設置されている。

従来，トンネル用 ESP の性能としては処理流速 7.0m/s で，重量評価の集じん率 80%以上が標準仕様⁽²⁾とされてきたが，近年では，処理流速 9.0m/s，重量集じん率 90%以上の高性能 ESP の設置例もある。一方，トンネル内の DEP は見掛け固有抵抗値が $10^4 \sim 10^5 \Omega \text{ cm}$ であるため再飛散現

象が生じやすい⁽¹⁾。再飛散現象は主に集じん電極上で誘電分極により凝集肥大化⁽³⁾⁽⁴⁾した粒子が，流速等の影響を受けることにより生じる⁽⁵⁾。そのため，大粒径粒子の集じん率が著しく低下することがある。再飛散現象は，ESP 下流壁面⁽⁶⁾等の汚染やトンネル内を通行する自動車運転者の見通しに影響を与える⁽⁷⁾。

再飛散現象の防止に関する研究として，ESP 後方にサイクロン等を設置する方法が提案されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。これらの研究は再飛散対策として有効であるが，設備の大型化，高級化及び既設備への増設が困難である。

筆者らは再飛散の防止による集じん率向上を目的として研究を行ってきた。その結果，電極表面を絶縁膜で被覆することによって再飛散が抑制されることを明らかにした。しかし，運転時間とともに集じん率が低下する問題があった⁽¹⁰⁾。一方，純水または界面活性剤水溶液を処理ガス中へ噴霧することによって，数珠状凝集粒子を球状に変化させ，再飛散を抑制できた⁽¹¹⁾。しかし，水分を噴霧することによ

って、放電が不安定となりやすく、集じん率を安定に保つことが困難となる。このため、水分に対する電気集じん装置の保護が必要であり、構造が複雑化する問題がある。

本研究では、これまでの研究結果をもとに、極板凝集粒子の形状に着目し、再飛散を防止した新型高性能電気集じん装置を提案する。具体的には、集じん部に矩形波交流電圧を印加することを特徴とする。直流電圧を印加した場合、極板凝集粒子の形状は数珠状となる。また、正弦波交流電圧(50Hz)を印加した場合、凝集粒子形状が変化し、大粒径粒子の集じん率の極端な低下は抑制される。しかし、平均印加電圧(電界)が小さくなるため、微小粒径の集じん率は低下する⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

そこで、本研究では矩形波交流を用いた。本実験に用いた集じん部印加電圧は、矩形波 $\pm 5.0\text{kV}$ 一定とし、周波数を $0.001\sim 1\text{Hz}$ の範囲で変化させ、直流印加時の集じん率の比較を行った。

2. 実験装置及び方法

<2.1> 実験装置概要 実験装置の概略を図1に示す。ディーゼルエンジン(980cc)の排気ガスを分岐器、混合槽により大気と混合希釈しサンプルガスとした。ガスは、ブースタファンにより実験用ESP内に送り込まれ、処理された後、下流の吸引ファンによりダクト外に排出される。また、ダクト内の平均流速は吸引ファンにより制御され、 5.0m/s とした。

<2.2> 電気集じん装置の電極構成 本研究では帯電部および集じん部からなる二段式ESPを使用した。各電極構造を図2に示す。

帯電部は接地用平板電極の中央に、直径 0.26mm の線電極を配置し、ガス流方向に3段、計15の帯電空間を持つ構

造とした。線電極に $\text{DC}+11\text{kV}$ を印加し、コロナ放電を発生させた。一方、集じん部は同一サイズの高電圧用平板電極と接地用平板電極を、ガス流方向と平行に間隔 6mm で交互に配置し、計42の集じん空間を持つ。高圧-接地平板電極間に $\text{DC}+5.0\text{kV}$ 、 $\text{AC}5.0\text{kV}(50\text{Hz}, \text{実効値})$ もしくは矩形波交流 $\pm 5.0\text{kV}(1\sim 0.001\text{Hz})$ を印加した。

<2.3> 矩形波交流発生回路 本研究では新方式として、集じん部に矩形波の交流電圧を印加した。矩形波交流発生回路を図3に示す。最大値 5.0kV 、 1Hz の矩形波交流波形を図4に示す。矩形波交流は $\text{DC}+5.0\text{kV}$ と $\text{DC}-5.0\text{kV}$ の電源に高圧用リードリレー(三協インターナショナル(株), DPE1A12-1)を直列に接続し、二つのリードリレーをリピータイマにより開閉する。また、矩形波交流の周波数はリピータイマにより調節した。

<2.4> 粒子濃度の測定 粒子濃度の測定は、空間および集じん電極上の粒子に対して行った。粒子のサンプリング位置を図5に示す。

個数法による空間粒子のサンプリングは、ダクト中央から、流通ガスの一部をポンプにより測定用ダクトに吸引し、測定用ダクトの中央からパーティクルカウンタ(リオン(株), model KC-01B,C 以下 PC)に取り込む。PCにより $0.3\mu\text{m}$ 以上の粒子の個数濃度を測定した。集じん部上流、下流の粒子濃度を測定し、集じん部における集じん率を算出した。個数集じん率 η_{PC} の算出は次式を用いた。

$$\text{集じん率 } \eta_{\text{PC}} = \left(1 - \frac{\text{流出側の粒子濃度}}{\text{流入側の粒子濃度}}\right) \times 100[\%] \quad (1)$$

図3 矩形波交流回路

Fig.3 A Generation Circuit for Rectangular AC Voltage

図4 矩形波交流回路出力波形

Fig.4 Wave Form of Rectangular AC Voltage (1Hz)

図1 実験装置概略

Fig.1 Schematic Diagram of Experimental System

図2 ESPの電極構造

Fig.2 Structure of Electrodes on Two-Stage Type ESP

集じん電極上粒子は集じん部高圧電極 Ch, 接地電極 Cg のそれぞれの位置にテストピース (アルミニウム箔, 1.5cm × 1.5cm) を貼り, ESP を 12 分間稼働させた後, 走査電子顕微鏡 ((株)日立製作所, S-4100) により観測した。

図 5 空間および電極上粒子のサンプリング位置
Fig.5 Sampling Locations of Suspended Particles and particles on the Collecting Electrodes

3. 結果及び検討

<3・1> 直流印加時における集じん特性 従来の ESP では集じん部に直流電圧が印加されている。本実験装置における, 直流印加時の集じん特性について示す。

集じん部における個数集じん率の時間特性を図 6 に示す。粒径が大きくなるにつれて集じん率は低下し, 粒径 $2.0\mu\text{m}$ 以上では負の集じん率となる。この大粒径粒子の集じん率の低下は装置稼働 2~3 分後から始まっており, 粒径 $1.0\mu\text{m}$ 以上の集じん率が顕著に低下する。

図 6 集じん部における集じん率の時間特性(直流印加時)
Fig.6 Time Dependence of the Collection Efficiency at the Collecting Section (at DC voltage applied)

図 7 集じん部における帯電粒子捕集モデル(直流印加時)
Fig.7 Collecting Process of the Charged Particles at the Collecting Section (at DC voltage applied)

(a) 集じん部接地側電極

(b) 集じん部高圧電極

図 8 集じん電極上捕集粒子の SEM 画像(直流印加時)
Fig.8 SEM Images of Particles on the Collecting Electrode (at DC voltage applied)

直流印加時における帯電粒子捕集モデルを図 7 に, 集じん電極上捕集粒子の SEM 画像を図 8(a),(b)に示す。図 7 のように, 帯電部で正極性に帯電された粒子は, 集じん部の接地電極で捕集される。捕集粒子は負極性に誘導帯電し, 数珠状に極板凝集粒子を形成すると考えられる。図 8 に示す SEM 画像では, 集じん電極表面が黒, 粒子が白で示される。高さ方向は確認できないが, 接地側電極上に多くの粒子が捕集され, さらに粒子が数珠状に凝集していることが分かる。ガス流の影響により, 大粒径粒子は再飛散し, その一部は図 8(b)に観察されるように高電圧側電極に捕集されたり, または集じん装置後方に流出する⁽⁵⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。

<3・2> 矩形波交流印加時における集じん特性 集じん部における個数集じん率の時間特性を図9(a)～(c)に示す。ここで各周波数における、個数集じん率の時間平均を凡例に示した。

(a)粒径 0.3-1.0 μm においては、いずれの周波数においても集じん率に顕著な差は見られない。また、直流印加時では僅かに高い集じん率を得られた。これは矩形波交流の場合、極性の変化の影響により集じん率が若干低下するためである。

(b)粒径 1.0-5.0 μm においては、周波数が低くなるに従い集じん率は低下する。装置稼働7分程度から、直流および0.001Hz 印加時において、集じん率は急激に低下し、再飛散現象が生じた。

(c)粒径 5.0 μm 以上においても、周波数が低くなるに従い集じん率は低下し、0.1Hz 以下では集じん率が負となる。また0.01Hz 以下印加時では、装置稼働20分前後から著しく集じん率が低下する。一方、0.1Hz、1Hz 印加時では、装置稼働25分においても、集じん率の著しい低下は見られず、再飛散現象は防止されている。

矩形波印加時における、集じん電極上捕集粒子のSEM画像を図10に示す。周波数1、0.1Hz では、図8における接地電極のような数珠状の凝集粒子は観測されない。一方、周波数0.01、0.001Hz では、数珠状の凝集粒子が観測される。周波数の増加にともない電極上では数珠状凝集粒子が球状となることが分かる。

図9、10より、1Hzの矩形波を印加したときの再飛散現象の抑制、または1 μm 以上の粒径における集じん率の向上は、極板凝集の抑制、凝集粒子形状の球状化の効果と考えられる。

4. まとめ

電気集じん装置において、低抵抗ダストを処理する際の再飛散現象を抑制することを目的とし、集じん部に矩形波交流電圧を印加した時の集じん特性について、検討を行った。矩形波交流を印加したとき、以下のような結果が得られた。

- 1) 直流印加時より、サブミクロン粒子の個数集じん率は若干低い、大粒径粒子の集じん率は高い。
- 2) 1)において、捕集粒子は球状に凝集するため、再飛散現象が防止される。

以上の結果より、矩形波交流の周波数を調節することにより、大粒径粒子の再飛散現象の防止が可能である。

本研究には既存の設備にそのまま適用することができるなど利点も多く、今後、凝集粒子形状変化のプロセスの把握などにより、更なる集じん率の向上の可能性を持つ。

(平成13年5月16日受付、平成14年4月10日再受付)

図9 集じん部における集じん率の時間特性
(直流及び矩形波交流印加時)

Fig.9 Time Dependence of the Collection Efficiency
at the Collecting Section
(at DC and rectangular AC voltage applied)

文 献

- (1) 社団法人 建設電気技術協会 “道路トンネル用集じん便覧”
- (2) 今井裕一, 新貝和照, 川上一美 “トンネル内の排ガス処理” 電気設備学会誌, Vol.15, No.11 pp.1145-1148 (1995)
- (3) A.Zukeran, Y.Ikeda, Y.Ehara, T.Ito, T.Takahashi, H.Kawakami, T.Takamatsu, “Two-Stage Type Electrostatic Precipitator Re-entrainment Phenomena under Diesel Flue Gases”, IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.35, No.2 pp.346-351 (1999)
- (4) S.Masuda, J.D.Moon, “High Intensity charging device for carbon soot particulates”, Proc.2nd.Conf. on Electrostatic Precipitation, pp.871-878 (1984)
- (5) 高橋武男, 瑞慶覧章朝, 江原由泰, 伊藤泰郎, 高松武史, 川上一美, 藤村英和 “電気集じん装置における集じん率と再飛散現象に対する流速の影響” 電気設備学会誌, Vol.18, No.10, pp.700-706 (1998)
- (6) 高橋武男, 高松武史, 川上一美, 瑞慶覧章朝, 藤村英和, 江原由泰, 伊藤泰郎 “電気集じん装置における壁面への粒子付着” 電気設備学会誌, Vol.18, No.12 pp.853-859 (1998)
- (7) H.Fujimura, A.Zukeran, Y.Ehara, T.Ito, T.Takahashi, T.Takamatsu, “Influence on Visibility Index of Re-entrainment Phenomena in Electrostatic Precipitator”, J.Aerosol Sci., Vol.29, Suppl.1, pp.483-484 (1998)
- (8) 諫早典夫 “静電凝集—遠心集じん方式 (PC-MC) の研究開発” 日立評論, Vol.49, No.11, pp.77-80 (1967)
- (9) C.Wadenpohl, F.Löffler, “Electrostatic agglomeration and centrifugal separation of diesel soot particles”, Chem. Eng. Proc., Vol.33, pp.371-377 (1994)
- (10) T.Takahashi, Y.Kawada, A.Zukeran, Y.Ehara, T.Ito, “Inhibitory Effect of Coating Electrode with Dielectric Sheets on Re-entrainment in Electrostatic Precipitator”, J. Aerosol Sci., Vol.29, Suppl.1, PP.S485-S486 (1998)
- (11) 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” 電気学会論文誌 A, Vol.119, No.3, pp. 367-372 (1999)
- (12) T.Kubo, Y.Kawada, T.Takahashi, Y.Ehara, T.Ito, A.Zukeran, T.Takamatsu, “The Relation Between Shape of Particles and Collection Efficiency by Electrostatic Precipitators” J.Aerosol Sci., Vol.31, Suppl.1, pp.452-453 (2000)
- (13) S.F.Bart, J.R.Melcher, R.M.Ehrlich “Ac Collection Efficiency of Precharged Particulate in Turbulent Flows”, Ind.Eng.Chem.Res., Vol.27, No.1, pp.123-131 (1988)
- (14) 増田弘明 “帯電粒子の拡散, 沈着と再飛散” 静電気学会誌, Vol.12, No.5, pp.324-329 (1988)
- (15) ウィリアム C.ハインズ著 “エアロゾルテクノロジー” 井上書院 (1985)

(a) 1Hz

(b) 0.1Hz

(c) 0.01Hz

(d) 0.001Hz

図 10 集じん電極上捕集粒子の SEM 画像
(矩形波交流印加時, 0.001~1Hz)

Fig.10 SEM Images of Particles on the Collecting Electrode
(at rectangular AC voltage, 0.001~1Hz)

川田 吉弘 (学生員) 1976 年 2 月 16 日生まれ。2000 年 3 月武蔵工業大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程終了。同年 4 月同大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程入学。現在に至る。

河野 良宏 (非会員) 1968 年 8 月 21 日生まれ。1993 年 3 月大分大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月富士電機(株)入社。電気集じん機の研究・開発、集じん設備の企画・設計に従事。

久保 隆文 (学生員) 1976 年 9 月 4 日生まれ。1999 年 3 月武蔵工業大学工学部電気電子工学科卒業。同年 4 月同大学院工学研究科電気工学専攻修士課程入学。現在に至る。

安本 浩二 (非会員) 1960 年 3 月 10 日生まれ。1982 年 3 月相模工業大学機械工学科卒業。88 年富士電機(株)入社。公共施設の電気設備、道路関連設備のエンジニアリング業務に従事。現在、社会システム事業部所属。

江原 由泰 (正員) 1956 年 9 月 22 日生まれ。1979 年 3 月群馬大学合成化学科卒業。同年三恵技研工業(株)入社。89 年武蔵工業大学に勤務。主に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 日生まれ。1963 年 3 月大阪大学工学部卒業。同年 4 月富士電機(株)入社。2000 年 4 月武蔵工業大学客員教授。主に電気集じん装置の開発に従事。98 年電気設備学会論文賞受賞。博士(工学)。

伊藤 泰郎 (正員) 1935 年 9 月 30 日生まれ。1960 年 3 月武蔵工業大学電気工学科卒業。同年武蔵工業大学に勤務。1982 年同教授。80 年から 81 年米国クラークソン大学研究員。86 年電気学会論文賞受賞。98 年電気設備学会論文賞受賞。主に高分子絶縁材料劣化、放電化学反応に関する研究に従事。工学博士。

瑞慶覧 章朝 (正員) 1971 年 11 月 15 日生まれ。1999 年 3 月武蔵工業大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了。同年 4 月富士電機(株)入社。電気集じん装置による有害ガス除去の研究・開発に従事。現在、社会システム事業部所属。98 年電気設備学会論文賞受賞。博士(工学)。