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添加の効果

(学生員) 瑞慶覧 章朝 (武蔵工大) (学生員) 神代 渉 (武蔵工大)
 (学生員) 川田 吉弘 (武蔵工大) (正員) 江原 由泰 (武蔵工大)
 (正員) 伊藤 泰郎 (武蔵工大) (正員) 高橋 武男 (富士電機)
 (非会員) 川上 一美 (富士電機) (正員) 高松 武史 (富士電機)

EFFECT OF SURFACTANT ON RE-ENTRAINMENT PHENOMENA IN AN ELECTROSTATIC PRECIPITATOR

Akinori Zukeran, Student member, Wataru Jindai, Student member, Yoshihiro Kawada, Student member, Yoshiyasu Ehara, Member, Tairo Ito, Member (Musashi Institute of Technology)

Takeo Takahashi, Member, Hitomi Kawakami, Non-member, Takeshi Takamatsu, Member (Fuji Electric Co., Ltd.)

The collection efficiency for the particle larger than $1\mu\text{m}$ decreases due to the re-entrainment on an electrostatic precipitator (ESP) for carbon particles. The re-entrainment means that particles on collecting electrodes reflow to gas flow. The re-entrainment may be prevented by increasing the adhesive force between particles and collecting electrodes.

In this work, we have investigated the prevention of re-entrainment by spraying water with surfactant into the gas flow. Diesel exhaust particles were used as particulate matter for the experiments. The particle concentration was measured using a scanning electron microscope which is able to count the particle larger than $0.01\mu\text{m}$. As a result, collection efficiency was improved by spraying water with surfactant into ESP. The results indicate that re-entrainment and particle agglomeration on collecting electrode are prevented.

キーワード：電気集じん装置，再飛散現象，集じん率，界面活性剤，ディーゼルエンジン排気ガス

1. はじめに

大気汚染物質の中で，浮遊粒子に対する対策として様々な集じん装置が用いられている。なかでも電気集じん装置 (ESP) は，他の集じん装置と比べ，微粒子の捕集が容易であり，圧力損失が小さく，消費電力も小さい。このため，家庭用の空気清浄機から大規模な工業用まで幅広く利用されている。

一般に ESP の問題は，帯電理論上サブミクロン粒子の集じん率が低いことである。これに対して，凝集装置の研究が多く行われている^{(1)~(3)}。

一方，ESP の性能は，処理対象粒子の性状によって大きく左右される。特に，カーボンブラック等の低抵抗ダストを処理する場合，再飛散現象による集じん率の低下が問題となる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。再飛散現象は，集じん電極上に集じんされた粒子が気流等⁽⁶⁾⁽⁷⁾の影響のため，再び気流中へ飛散する現象である。再飛散粒子の多くは，集じん電極上における極板凝集粒子⁽⁸⁾であり，再飛散による集じん率の低下は，特に粒径 $1\mu\text{m}$ 以上の大粒径において顕著である⁽¹⁾⁽⁵⁾⁽⁸⁾。また，再飛散粒子は再飛散時の集じん電極と同極性の帯電粒子である⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁹⁾。

再飛散現象が起こることによる集じん率低下の対策とし

て，ESP の後方にサイクロンを設置する PC-MC⁽¹⁰⁾がある。この方法は，本来，凝集装置として開発されたが，再飛散による大粒径粒子の集じん率低下対策としても有効な手段である。しかし，装置の大型化，高級化および既存の ESP への付加が困難である。一方，ガス中への水分等の添加⁽⁵⁾も有効であるといわれている。この方法は装置の大型化が抑えられ，既存の ESP への付加も可能である。また，凝集効果もあり，サブミクロン粒子の集じん率向上という面においても有効な手段の一つである⁽⁶⁾。しかし，再飛散防止に関する研究は極めて少なく，再飛散抑制メカニズムに関する具体的な検討はほとんど見あたらない。

著者らは，ディーゼルエンジン排気ガス中微粒子 (DEP) の集じんにおける再飛散防止に対して，水分の付着力 (液架橋力) に着目し，ガス中への純水噴霧を検討してきた⁽⁵⁾。その結果，再飛散現象の抑制が示されたが，その効果は理論効率に比べ未だ十分ではなかった。この原因として，DEP はその主成分が疎水性のカーボンであることが挙げられる。

本研究では疎水性の粒子と水分との親和力の増加および，集じん電極上での濡れ性の向上を目的とし，界面活性剤水溶液の噴霧を試みた。粒子濃度の測定には，粒径 $0.01\mu\text{m}$ 以上の測定が可能な電子顕微鏡 (SEM) 法を用いた。再飛

散抑制効果，集じん電極上の粒径分布および粒子の形状係数を測定し，界面活性剤水溶液噴霧による再飛散抑制メカニズムを検討した。ただし，実験装置は実用機ではなく，再飛散の発生および確認が容易な実験用 ESP とした。

2. 実験装置および方法

＜2.1＞実験装置概要 実験装置概略を図1に示す。サンプルガスであるディーゼルエンジン排気ガスは，分流器により濃度が調整され，混合槽で大気と希釈混合される。さらに，ブースタファンによってダクト内に送り込まれ，吸引ファンによって ESP を通過し処理されダクト外に排出される。純水，界面活性剤水溶液を吸引口2の位置において，超音波加湿器（ウェットマスター（株）製，ENS30U）によりガス中へ噴霧した。噴霧水分量は8.75 l/h とした。ダクト内の処理流速は，吸引ファンの回転数によって制御でき7m/s とした。以下，処理ガスへ水分噴霧を行わない場合，純水噴霧の場合，界面活性剤水溶液の噴霧の場合を，それぞれ，乾式 ESP，湿式 ESP，界面活性剤噴霧時と呼ぶ。界面活性剤は，非イオン系である以下の4種類を用いた。

Type A: ポリオキシエチレンノニルフェニルエーテル

Type B: ポリオキシエチレンラウリルエーテル

Type C: ポリオキシエチレンジステチレン化フェノールエーテル

Type D: ポリオキシエチレントリベンジルフェノールエーテル

以上の4種類の親油性（HLB 値）と臨界ミセル濃度時の表面張力を表1に示す。実験に用いた界面活性剤は非イオン系であり，HLB 値および表面張力以外の性質はおおよそ等しい。

表1 HLB値と表面張力 (10^{-5} N/cm)

Table 1. Value of HLB and surface tension (10^{-5} N/cm)

	Type A	Type B	Type C	Type D
HLB 値	12.4	16.9	12.8	13.2
表面張力	33.5	40.0	43.5	49.7

＜2.2＞電気集じん装置の電極構成 本研究で用いた ESP は帯電部と集じん部で構成される2段式 ESP である。各電極の配置図と粒子サンプリング位置を図2に示す。帯電部は直径0.26mm のタングステン製の高電圧印加用線電極とアルミニウム製の接地平板電極で構成されており，ガス流方向に3段，計15の帯電部を持っている⁽⁴⁾。集じん部は高電圧印加用平板電極と接地平板電極が6mm 間隔で交互に並んだ構造をしており，合計42の集じん部を持っている⁽⁴⁾。帯電部および集じん部における印加電圧は，直流正極性11 kV，5.5kV とした。すなわち，帯電部における正極性コロナ放電によって正に帯電した粒子は，集じん部における接地平板電極上に集じんされる。

図1 実験装置概略

Fig.1 Schematic experimental apparatus

図2 電極配置と粒子サンプリング位置

Fig. 2 Arrangement of sections and particle sampling locations

＜2.3＞粒子のサンプリング 粒子濃度の測定には SEM 法を用いた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。SEM 法を用いることによって光学測定器では困難なナノメータ粒子まで計測が可能である。粒子濃度は，空間粒子および集じん粒子に関して測定した。空間粒子のサンプリングは，図2に示した ESP の前後においてダクト中央にメンブレンフィルタ（Coster Scientific Corporation，ニュークリポア，孔径 0.015 μ m）を設置し，ポンプを通して一定時間吸引することでフィルタ上に空間粒子を付着させて行った。ポンプの吸引流量は0.15 l/min とした。

集じん電極上に捕集された粒子のサンプリングは，接地平板電極(Cg)，高電圧印加用平板電極(Cp)上にアルミ箔を貼り付け，電極に電圧を印加することにより粒子を付着させた。

＜2.4＞粒子濃度の測定 サンプリングした試料を真空蒸着器によって白金パラジウムを蒸着し SEM (S-4100，(株) 日立製作所) によって粒子の拡大画像を得た。さら

図3 面積等価円直径の算出

Fig. 3 Calculation of particle diameter

図4 各条件における集じん率の粒径特性

Fig. 4 Collection efficiency as a function of particle diameter for various conditions

図5 各条件における再飛散率の粒径特性

Fig. 5 Re-entrainment rate as a function of particle diameter for various conditions

に、SEM で得た画像を画像処理装置 (LUZEX III, (株) ニレコ) によって二値化処理し、図3に示すように面積等価円直径 d 、粒子最大長 d_L 、周囲長 l を測定した。各測定値より、粒径分布および粒子の形状係数を求めた。粒子の粒径分布から集じん率を次式で算出した。

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

図6 カーボンドスト上の水滴 (純水) の状態

Fig. 6 Drop condition of pure water on carbon dust

すなわち、集じん率が正の値の時には流入側に対する流出側の粒子濃度の減少、負の値の時には増加を意味する。

3. 実験結果および検討

3.1 <集じん率の粒径特性> 各条件における集じん率の粒径特性を図4に示す。図中には本実験条件下の Deutsch の理論式⁽¹⁾による計算結果を示してある。理論的には粒径約 $0.2 \mu\text{m}$ を極小値として粒径が大きくなるに従い、集じん率は向上する。これに対し、乾式 ESP において、再飛散現象により粒径 $1 \mu\text{m}$ 以上の大粒径粒子の集じん率が低下している⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁸⁾。湿式 ESP においては、純水噴霧の効果により、大粒径粒子の集じん率は向上する⁽⁶⁾が、理論値よりも低い値を示している。一方、界面活性剤噴霧時においては、大粒径粒子の集じん率は飛躍的に向上している。このことは界面活性剤が、再飛散を抑制していることを示唆している。

3.2 <再飛散抑制効果> 二段式 ESP の集じん部における再飛散粒子の多くは、再飛散時の電極と対向した電極板上に再捕集されることが知られている⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。このことより、次式によって再飛散率を定義する⁽⁶⁾。

$$\text{再飛散率} = \left(\frac{\text{正極性側の粒子数}}{\text{接地側と正極性側の粒子数の和}} \right) \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

各条件における再飛散率の粒径特性を図5に示す。粒径 $1 \mu\text{m}$ 以下の微粒子では、実験条件による再飛散率に差は見られない。しかし、大粒径において乾式、湿式、界面活性剤噴霧時の順に、再飛散率は低下している。このことは、界面活性剤水溶液噴霧による再飛散抑制の効果により、大粒径粒子の集じん率が向上したことを示している。

カーボン粒子が堆積した電極上に滴下した純水の水滴の状態を図6に示す。純水の接触角は約 144° であり、カーボン粒子が疎水性であることが明瞭である。これに対し、界面活性剤水溶液とカーボンの接触角は 0° であった。これは界面活性剤水溶液を噴霧することで、カーボン粒子の濡れ性が著しく向上することを示している。すなわち、再飛散の抑制効果は、濡れ性の向上に起因していると見ることができる。

再飛散抑制効果のもう一つの要因として、粒子形状に着目し検討する。粒子形状を評価するため、粒子形状係数 α_1 および α_2 を次式で定義する。

a) α_1

b) α_2

図7 α_1 , α_2 の形状係数分布 (粒径1.6 μ m以上)

Fig.7 Shape coefficient distribution of α_1 and α_2 ($d > 1.6 \mu\text{m}$)

$$\alpha_1 = \frac{d_L}{d} \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \frac{l}{\pi d} \quad (4)$$

図3に示すように、 α_1 は粒子の最大長と面積等価円直径の比であり、 $\alpha_1=1$ のとき真円、1より大きいほど細長い粒子であることを意味する。また、 α_2 は粒子の周囲長と面積等価円の周囲長の比であり、 $\alpha_2=1$ のとき真円、1より大きくなるほど粒子表面の凹凸が多いことを意味する。帯電粒子は集じん部接地平板電極上において、極板凝集により数珠状凝集粒子を形成する⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁸⁾。すなわち、接地平板電極上における粒子形状が再飛散現象に大きく影響すると考えられる。接地平板電極上における粒子形状係数分布を図7に示す。 α_1 , α_2 ともに、乾式、湿式 ESP に比べ、界面活性剤噴霧時のいずれの場合も、分布の最大値の形状係数は小さく、形状係数の大きい粒子の比率は低下している。このことは、界面活性剤水溶液の噴霧により、極板凝集粒子が細長い数珠状から球状に変化したこと、および凝集粒子表面が平滑化したことを意味する。集じん部接地平板電極上における粒子

a) 乾式 ESP

b) 界面活性剤噴霧時

図8 集じん部接地平板電極上粒子のSEM写真 (低倍率)

Fig. 8 Typical SEM images on collecting electrode, a) Dry Type ESP, b) Spraying Surfactant (low magnification)

の SEM 写真を図8に示す。a)の乾式 ESP において、細長い数珠状の極板凝集粒子が多数観測される。これに対し、b)の界面活性剤噴霧時には、数珠状粒子がなく、球状粒子が観測される。極板凝集粒子の球状化により、再飛散発生原因の一つである風力による剥離の影響が縮小する。また、凝集粒子表面の平滑化により、粒子と集じん電極間の接触面積が増大し、van der Waals 力および液架橋力等が増加する。このため、再飛散現象が抑制されるといえる。

図7には、親油性がほぼ等しく表面張力のみが異なる Type A, C, D の界面活性剤水溶液 (表面張力: $33.5 \times 10^{-5} \sim 49.7 \times 10^{-5} \text{N/cm}$) を処理ガス中へ噴霧した場合の結果も示してある。形状係数分布は α_1 , α_2 いずれも、界面活性剤の種類、すなわち、表面張力が大きいほど極大値の形状係数は小さくなる傾向を示している。このことは、極板凝集粒子の球状化および粒子表面の平滑化は界面活性剤水溶液の表面張力に起因していることを意味している。

以上より、界面活性剤噴霧による次の二つの効果により再飛散が抑制されていると考えることができた。

1. 濡れ性の向上

2. 極板凝集粒子形状の球状化および平滑化

<3.3>極板凝集の抑制 界面活性剤水溶液噴霧による大粒径粒子の集じん率向上の要因として、再飛散抑制効果が見された。一方、再飛散粒子の多くは、集じん部接地平板電極上における極板凝集粒子である。界面活性剤水溶液噴霧による極板凝集現象への影響について検討する。高倍率における集じん部接地平板電極上粒子の SEM 写真を図9に示す。乾式 ESP に比べ界面活性剤噴霧時は、微粒子の状態で集じん電極上に捕集されており、図8からも極板凝集による大粒径粒子はほとんど存在しない様子が分かる。また、画像処理により粒径 $1 \mu\text{m}$ 以下の集じん電極上の粒子個数濃度を測定した結果、乾式 ESP では約 1.5×10^{12} 個/ m^2 、界面活性剤噴霧時には約 4×10^{12} 個/ m^2 であった。すなわち、乾式 ESP に対し、界面活性剤噴霧時には、微粒子が高密度で存在している。極板凝集抑制モデルを図10に示す。a)の乾式 ESP において、集じん電極上に低抵抗粒子が捕集さ

a) 乾式ESP

b) 界面活性剤噴霧時

図9 集じん部接地平板電極上粒子のSEM写真(高倍率)

Fig. 9 Typical SEM images on collecting electrode, a) Dry Type ESP, b) Spraying Surfactant (high magnification)

(a) 乾式ESP

(b) 界面活性剤噴霧時

図10 極板凝集抑制モデル

Fig. 10 Model of agglomeration on electrode, a) Dry Type ESP, b) Spraying Surfactant

れた場合、粒子の近傍は電界が強まる。このため、さらに粒子が捕集されるとき、集じん電極上の粒子と凝集する。一方、b)の界面活性剤噴霧時には、電極表面に水膜が形成され、捕集粒子近傍における電界は緩和される。このため、極板凝集は抑制される。すなわち、粒子と水分の濡れ性が重要な要因となる。濡れ性を決定する因子として、界面活性剤の親油性がある。一般に、界面活性剤の親油性を評価する HLB 値は0~20の値であり、値が小さいほど親油性が強いことを示す。主に極板凝集粒子が形成される集じん部接地平板電極上の粒径分布に対する HLB 値の影響を図11に示す。粒径分布の表現法は様々あるが、本研究に用いた DEP は粒径が広範囲であることから、一般に多く用いられている対数正規分布⁽¹²⁾を用いた。すなわち、縦軸は全粒子数に対する任意の粒径粒子の比率を測定粒径範囲で規格化し、対数変換した値となっている。乾式に対し、湿式 ESP における粒径分布はほぼ等しい。しかし、界面活性剤噴霧時は大粒径粒子の比率が低下している。ここで、表面張力がほぼ等しく親油性の異なる Type B と Type C を比べると、HLB 値が小さいほど大粒径粒子の比率は低下している。この結果は親油性が高いほど極板凝集現象が抑制されていることを意味している。

以上より、界面活性剤水溶液噴霧による大粒径粒子の集じん率向上に対して、極板凝集現象の抑制効果が示された。

図11 集じん部接地平板電極上の粒径分布に対するHLB値の影響

Fig. 11 Influence of HLB on size distribution on grounded collecting electrode

図12 再飛散率に対する界面活性剤水溶液濃度の影響

Fig. 12 Influence of surfactant concentration on re-entrainment rate

また、この効果は界面活性剤の親油性に依存する。

〈3.4〉濃度の影響 ESP における再飛散抑制に対して界面活性剤水溶液噴霧の効果が示された。実用化を考える場合、界面活性剤水溶液の濃度が重要となる。再飛散率に対する界面活性剤水溶液濃度の影響を図12に示す。いずれの濃度においても、再飛散率はほぼ同様である。本研究に用いた界面活性剤の臨界ミセル濃度は約0.01%であることを考慮すると、界面活性剤水溶液噴霧による再飛散抑制効果は臨界ミセル濃度程度で良いことが分かる。

4. まとめ

ESP における再飛散現象を防止するため、処理ガス中への界面活性剤水溶液の噴霧を試みた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) ESP において、界面活性剤水溶液を処理ガス中へ噴霧することで、大粒径粒子の集じん率が著しく向上する。
- (2) 界面活性剤水溶液噴霧による再飛散現象の抑制および極

板凝集現象の抑制の二つの効果により、大粒径粒子の集じん率は向上する。

- (3) 再飛散現象の抑制は、界面活性剤水溶液噴霧による粒子間、粒子-電極間の濡れ性の向上、極板凝集粒子の球状化および粒子表面の平滑化の効果に起因する。
- (4) 極板凝集現象の抑制は、界面活性剤の親油性に起因し、親油性が強いほど抑制される。
- (5) 再飛散現象抑制は臨界ミセル濃度程度で十分である。

本研究の遂行にあたり、尽力を惜しまずにご協力いただいた佐野規一郎氏に心より感謝致します。

[平成10年5月8日受付、平成10年9月29日再受付]

文 献

- (1) T. Watanabe, F. Tochikubo, Y. Koizumi, T. Tsuchida, J. Hautanen, E. I. Kauppinen "Submicron particle agglomeration by an electrostatic precipitator", Journal of Electrostatics, 34, pp.367-383(1995)
- (2) 金沢誠司, 足立宜良「二種類荷電法によるサブミクロン粒子の捕集」, 静電気学会誌, 16, 4(1992)
- (3) 瑞慶覧章朝, 池田泰士, 江原由泰, 伊藤泰郎, 高橋武男, 川上一美, 高松武史, 「交流コロナ放電による粉じん粒子の凝集現象」, 電気学会誌 A, 118, 4, pp.367-372(1998)
- (4) 伊藤泰郎, 久保田強, 瑞慶覧章朝, 高橋武男, 新貝和照, 宮本昌広, 吉持達郎「電気集塵機によるサブミクロン粒子の集塵特性」, 電気設備学会誌, 15, 2, pp.113-120(1995)
- (5) 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及び集じん率に及ぼす水分の効果」, 電気設備学会誌, 16, 12, pp.1288-1296(1996)
- (6) J.D.Basset, K.Akutsu, S.Masuda, "A Preliminary of Re-entrainment in an Electrostatic Precipitator", Journal of Electrostatics, 3, pp.311-325(1977)
- (7) 生三俊哉, 和歌山久男, 増田弘昭「沈着層からの気流による粒子の再飛散」, 化学工学論文集, 12, 5, pp.404-409(1994)
- (8) A.Zukeran, Y.Ikeda, Y.Ehara, T.Ito, T.Takahashi, H.Kawakami, "Investigation of Tow-Stage Type Electrostatic Precipitator Reentrainment Phenomena under Diesel Flue Gases", Rec. IEEE/IAS Annual Conf., New Orleans, Louisiana, pp.1737-1743(1997)
- (9) A.Y.H.Cho, "Contact Charging of Micron-Sized Particles in Intense Electric Fields", Journal of Applied Physics, 35, 9, pp.2561-2564(1964)
- (10) 諫早典夫, 「静電凝集-遠心集じん方式(PC-MC)の開発研究」, 日立評論, 49, 11, pp.77-80(1967)
- (11) C.Riehle, "Basic and theoretical operation of ESPs", Chapter 3 of Applied Electrostatic Precipitation, K.R.parker, Blackie Academic & Professional, pp.25 - 88 (1997)
- (12) 例えば, ウィリアム C・ハインズ, 早川一也 監訳, 「エアロゾルテクノロジー」, 井上書院 (1985)

瑞慶覧 章朝

(学生員) 1971年11月15日生まれ。1996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修了。同年同大学院博士後期課程入学。現在に至る。98年電気設備学会論文賞受賞。

神代 渉

(学生員) 1973年11月10日生まれ。1998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修了。同年富士電機(株)入社。現在に至る。

川田 吉弘

(学生員) 1976年2月16日生まれ。1998年3月武蔵工業大学電気電子工学科卒業。同年同大学大学院修士課程入学。現在に至る。

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。84年武蔵工業大学に勤務。98年同講師。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)

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客員研究員。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の劣化、放電化学反応に関する研究に従事。工学博士。

高橋 武男

(正員) 1939年4月29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。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。

川上 一美

(非会員) 1952年4月27日生まれ。1976年横浜国立大学工学部機械工学科卒業。同年富士電機(株)入社。主として、水力タービンの開発設計、原子炉の電熱流動の研究を経て、現在は道路関連設備(トンネルの換気設備等)の取りまとめ業務に従事。

高松 武史

(正員) 1956年8月24日生まれ。1979年秋田大学電気工学科卒業。同年日立プラント建設(株)入社。火力発電設備の建設、エンジニアリング業務に従事。91年富士電機(株)入社。建設付帯設備、クリーンルーム、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企画設計部企画設計第二課課長。