無声放電型電気集じん装置における電極上の粒子捕集状態

学生員 川田 吉弘 (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) 正員 高松 武史 (富士電機)

State of the Collecting Particles on Electrodes in Electrostatic Precipitator with Barrier Discharge

Yoshihiro Kawada, Student member, Yoshiyasu Ehara, Member,

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

Akinori Zukeran, Member, Takeshi Takamatsu, Member (Fuji Electric Co., Ltd.)

One application of the electrostatic precipitator (ESP) is the flue gas cleaning in superhighway tunnels. The carbon particles and NOx gases from automobiles accumulate in superhighway tunnels. ESP can eliminate carbon particles effectively, however, the collection efficiency for the particles decreases after few minutes of operation due to the dust re-entrainment phenomena. There is a possibility that particles adversely affect on visibility index in the superhighway tunnels. Therefore, we proposed new type ESP with barrier discharge, since the barrier discharge reactor has been much used for removing NOx. In authors' past investigations, this Barrier Discharge Type ESP removed NOx and particles from air. Then, the majority of particles collected in this apparatus is at the precharger. Thus, the aim of this study is to investigate the characteristic of collecting particles with barrier discharge. As results, at low gas velocity, high particle collection efficiency was maintained for long period for all particle sizes from 0.3 to 5.0 μm . Hence, these behaviors indicate a little re-entrainment. On the other hand, particles are charged and collected to electrode in barrier discharge like One-Stage Type ESP. The re-entrainment phenomena are prevented due to the thin dust layer on electrode.

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，無声放電，再飛散現象

1. はじめに

自動車道路において，半閉鎖的な空間や密集した土地では，排気ガスにより見通しが低下し，有害なガスが高濃度となる⁽¹⁾。有害成分には，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，及び黒煙(DEP: Diesel Exhaust Particles)がある。これらは，三元触媒が使えないディーゼル自動車の排気ガスに多く含まれる。

半閉鎖的な空間の具体例として，自動車道路トンネルがある。通行車の排気ガスによる空気汚染を防ぐために，換気は必要不可欠である。トンネル延長が短い場合では，自然風による自然換気で十分だが，延長の長いトンネル及び交通量の多い場合では，機械力による換気設備や電気集じん装置が必要となる⁽¹⁾。しかし，電気集じん装置は煤煙除去を目的としている。そのため，有害ガスの除去には，他の換気設備を付加する研究が行われている⁽²⁾。

非熱平衡プラズマを用いた有害ガスの除去については，多く研究されている⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。主にNOxについて検討され，またNOx濃度350ppm程度のディーゼルエンジンから排出された直後に除去する研究が行われている。東氏らは，円筒形の無声放電リアクタを用いNOxを除去し，さらにオイル

を併用することでガス中から粒子を除去した⁽⁷⁾。また，吉岡氏らはフィルタにより粒子を除去した後，平行平板型の無声放電リアクタを使用しNOを酸化し，後方のスクラバによりNO₂ガスを除去する研究を行い，除去効率について検討を行っている⁽⁸⁾。同様に，藤原氏らは除塵後のガスをマルチポイント電極バリア放電によりNOx除去し，COや水分の影響を含めた検討を行っている⁽⁹⁾。

このように無声放電を用いたNOxの除去については多くの研究が行われている。粒子に関しては，無声放電空間に流通させることで，プラズマ処理をする研究が行われている⁽¹⁰⁾。また，無声放電により粒子が電極表面に付着することも知られている⁽¹¹⁾。しかし，電極表面に粒子が付着する現象を積極的に用いた例はあまり見掛けない。

本研究では，無声放電を利用し，排ガス中の粒子状物質及びガス状NOxの同時除去を試みた。コロナ放電を用いた電気集じん装置に対し集じん率は僅かに低いものの，本システムにより煤煙とNOxが同時に除去することができた⁽¹²⁾。また，従来の電気集じん装置で低抵抗ダストを処理する際，極板凝集・再飛散現象により大粒径粒子の集じん率は大幅に低下する⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾が，本システムでは大粒径粒子の集じん率を保持できた。しかし，無声放電型電気集じん装

置における粒子捕集プロセスや再飛散抑制プロセスについては、未だ不明であった。

本研究では、粒子の捕集プロセスと、大粒径粒子における再飛散現象の抑制効果の解明を目的として実験を行った。また、無声放電による集じんの特性について検討を行った。

2. 実験装置及び方法

<2.1> 実験装置概要 実験装置概略図を図1に示す。ディーゼルエンジン(980cc)の排気ガスを分流器、混合槽により大気と混合希釈したものをサンプルガスとした。このガスを、ブースタファンを介し小型の実験用電気集じん装置(ESP)に送り込んだ。電気集じん装置で処理されたガスは下流の吸引ファンによりダクト外に排出される。また、吸引ファンを制御し、電気集じん装置内の処理流速を1.5m/sとした。

<2.2> 電気集じん装置の電極構成 各電極構造を図2に示す。本研究で用いた電気集じん装置は比較のために2種類であり、無声放電ユニット(a)とコロナ放電ユニットである。コロナ放電ユニットは粒子の帯電用(b)と一段式電気集じん装置(c)の2種類とした。

【無声放電ユニット】

無声放電電極は、図2(a)の様に厚さ0.05mmの銅箔を厚さ0.5mmのガラス板2枚で挟んだ構造とした。電極長65mm(うち銅箔45mm)、エアギャップ5.5mm一定とし、高電圧用平板電極2枚と接地用平板電極2枚の計4枚をガス流方向に平行にかつ交互に並べた。電極間にAC50Hzの高電圧を印加し、無声放電を発生させた。

【粒子帯電用コロナ放電ユニット】

コロナ放電ユニットは図2(b)の様に高電圧用線電極2本と接地平板電極を電極間隔10.75mmで配置し、電極間にDC+11kVを印加した。電極長は65mmであり、空間を通過する粒子を帯電させることを目的としている。

【粒子堆積比較用コロナ放電ユニット】

粒子堆積比較用コロナ放電ユニットは図2(c)の様に高電圧用線電極6本と接地用平板電極を電極間隔10.75mmで配置し、電極間にDC+10kVを印加した。電極長は195mmとし無声放電型の3倍とした。また、電極枚数を少なくし、放電電力7w、電極面積24160mm²と無声放電ユニットの放電電力、電極面積とほぼ同じとした。ただし、無声放電ユニットの電極面積はガラス部分も含めた面積である。

<2.3> 空間粒子濃度の測定 空間粒子濃度の測定は、光散乱法を用いたパーティクルカウンタ(PC, リオン(株), KC01-B,C)法を用いた。粒径0.3μm以上の粒子を5段階の粒径範囲に分けて、2分ごとに連続測定することができる。

空間粒子のサンプリングは次のように行った。測定するユニットの前後のダクト中央において、流通ガスの一部をポンプにより測定用ダクトに吸引した。さらに測定用ダクトの中央からPCに取り込んだ。得られた各位置における粒子の個数濃度から集じん率を次式により算出した。

図1 実験装置概略図

Fig.1 Schematic diagram of experimental system

(a) 無声放電ユニット

(b) 帯電用コロナ放電ユニット

(c) 比較用コロナ放電ユニット

図2 各ユニットの電極構造

Fig.2 Electrode structures for experimental units

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

<2.4> 堆積粒子層の厚さの測定 電極上に堆積した粒子層の厚さを光学顕微鏡(Nikon MICROFLEX HFX-II)により測定した。具体的には、電極表面と粒子上部表面における焦点位置の差から求めた。固定された対物レンズから焦点までの距離が常に一定であることから、焦点を合わせるためのステージの移動距離により粒子層の厚さが測定できる。測定に用いた倍率は 40.4 倍(10.1×対物レンズ(N.A.0.25)と 4×接眼レンズ)とした。

図3 無声放電の印加電圧－放電電流特性
Fig.3 Discharge Current as a function of Applied Voltage in Barrier Discharge Unit

図4 無声放電ユニットの集じん率の放電電流特性
Fig.4 Collection efficiency a barrier discharge unit as a function of discharge current

3. 結果及び検討

<3.1> 無声放電による粒子捕集 無声放電ユニットの電圧電流特性を図3に示す。放電開始電圧は 11.5kVであり、この範囲の電圧変化ではアーク移行のような放電状態の変化は見られず、放電電流は電圧上昇に伴い増加する。無声放電ユニットのみにおける集じん率の放電電流特性を図4に示す。放電電流は印加電圧により制御した。放電電流の増加により、集じん率は向上している。

また、無声放電電流を 0.4mA としたときにおける、集じん率の粒径特性に対する稼動時間依存性を図5に示す。装置稼動 12 時間までは、粒径 0.3~10μm の範囲において、安定した集じん率が保持できることが確認できた。

図5 無声放電ユニットにおける
集じん率の粒径特性に対する稼動時間移動性
Fig.5 Time averaged collection efficiency in 1 hour
as a function of particle size in barrier discharge unit

<3.2> 帯電した粒子の捕集 無声放電ユニットの上流にコロナ放電ユニットを設置し、無声放電ユニットに流入する粒子を正に帯電させた。このとき、無声放電ユニットにおける集じん率の印加電圧特性を図6に示す。図中縦線は放電開始電圧を示す。また、上流のコロナ放電ユニットで集じんされることから、本図におけるサンプルガス中の粒子濃度は図3、5と比較して5分の1以下であり、粒径 0.3μm 以上の粒子を 1m³ あたり 10⁸ 個程度とした。粒子濃度が低いことから全体的に集じん率は低いと考えられる。印加電圧 9kV において、粒子が帯電しているときの集じん率は 60%以上である。一方、粒子が帯電していないときは、放電開始直前まで集じん率がほぼ 0%であることから、この電極構造において粒子が捕集できるのは、電極間の電界と粒子の帯電が支配的であると言える。つまり、無声放電がおきている空間では、帯電と集じんが同時に行われている、いわゆる一段式の電気集じん装置のような効果が期待

できることが分かった。

無声放電により粒子が捕集される要因として粒子の帯電が主であることが示された。また、集じん率が高い要因として、通常の集じん装置の集じん部電界より高い電界が形成されていることがあげられる。一般にトンネル用電気集じん装置の集じん部電界⁽¹⁾⁽¹⁶⁾が 1.0kV/mm 程度である。これに対し、本装置では放電時において、放電開始電圧程度の電界、つまり実効値で 2.0kV/mm(AC11.5kV 印加時)程度と高い電界が形成されている。

また、直流コロナ型電気集じん装置において、直流を印加した集じん電極の表面を誘電体で覆うことにより、粒子に帯電した電荷が放出されにくいことから再飛散現象の発生を遅らせ⁽¹³⁾、また印加電圧を高くしてもスパークの発生を抑えることから、高い電界が集じん率を向上させる⁽¹⁷⁾。しかし、この方法では、再飛散の長時間抑制(12 時間)は困難であった。これに対し、本実験では、装置稼動後、長時間(12 時間)再飛散が抑制されている。この理由として、集じん電極の極性変化が考えられる。具体的には、印加電圧の周波数 50Hz であることから、電極上において、10msec ごとに異なる極性に帯電した粒子が電極に付着することになる。これにより、電極上で電荷は中和され、粒子への電界の影響は小さくなる。その結果として、極板上における静電凝集は抑制される。

一方、粒子の電荷中和機構により粒子と電極間の付着力の低下が考えられる。しかし、交番電界中において粒子が電極上に捕集されることから、クーロン力以外の力、たとえばファンデルワールス力や水分、もしくは未燃燃料、オイル等による液架橋力により、電極上の粒子は付着し続けるものといえる。

図 6 帯電した粒子の集じん率に関する印加電圧特性
Fig.6 Collection efficiency for charged particles
as a function of Applied Voltage

図 7 無声放電電極上の粒子堆積分布
Fig.7 Particle distribution on barrier discharge electrode

図 8 コロナ放電ユニット接地電極上の粒子堆積分布

Fig.8 Particle distribution on the grounded electrode
in corona discharge unit

図 9 各ユニットの電極上に捕集された粒子密度
Fig.9 Number density of collected particles
on electrodes of each units

無声放電電極表面

0.2mm

コロナ放電接地電極表面

0.2mm

図 10 各電極上の光学顕微鏡写真(80 倍)
Fig.10 Optical microscope photographs (80x)
of each electrode surfaces

<3・3> 電極表面に堆積した凝集粒子の特徴 コロナ放電を用いた集じん装置では、一般的に粒子の跳躍現象や凝集・再飛散現象により大粒径粒子の集じん率が低下する。これは低流速でも起こる現象である⁽¹⁴⁾。しかし、無声放電による粒子捕集では、大粒径粒子の集じん率が高い。つまり無声放電ユニットでは、電極上において、粒子が凝集、再飛散しにくい。この原因について、電極上の粒子捕集状態に着目し、以下のように考察した。

実験時間 240 分の無声放電ユニットの電極に捕集された粒子の堆積した層の厚さ分布を図 7 に示す。また、実験時間 180 分の比較用コロナ放電ユニットの接地電極に堆積した捕集粒子の厚さ分布を図 8 に示す。図 7、8 において、横軸は電極の上流先端からの距離であり、縦軸は電極上に堆積した粒子層の厚さである。また、空間粒子濃度から算出した、電極板上における捕集された粒子の個数密度を図 9 に示す。無声放電ユニットにより処理した粒子の密度は、粒径によって差はあるが、コロナ放電ユニットの 1.5~2 倍である。しかし、図 7、8 から明らかなであるが、粒子の厚さは、コロナ放電ユニットの接地電極が平均 0.45mm であるのに対し、無声放電電極が平均 0.09mm である。無声放電

ユニットでは、粒子が垂直方向に密に捕集され、凝集粒子が粗大化しにくいことを示している。

以上のように堆積厚さや堆積状態がユニットの形態によって大きく変化する原因として、無声放電型電気集じん装置による極板凝集抑制効果が考えられる。つまり、直流電界では粒子が付着した場所が局部的に電界が高くなり、そこに帯電した粒子が付着し、これを繰り返すことによってパールチェーン状の細長い凝集粒子が形成される⁽¹⁴⁾⁽¹⁸⁾。この凝集粒子は、電極上に不安定に付着し、静電的に、また風力により再飛散する⁽¹⁵⁾。図 10 に各ユニットの電極中央付近における光学顕微鏡写真を示す。いずれの写真も黒い部分が DEP を示し、明るい部分は電極である。コロナ放電ユニットの電極では大きな凝集粒子が存在し、粗密の差が明らかである。これに対し、無声放電電極では細かい粒子が電極に沿って密に捕集されている。また、無声放電電極において、粒子がさらに多く付着すると、電極表面を粒子が均一に覆われることを確認した。以上の結果から、無声放電では電極上において、垂直、水平いずれの方向においても粒子は密に凝集し、捕集されることが明らかなである。

4. まとめ

無声放電により粒子(DEP)が捕集される要因について検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 無声放電空間において、粒子は帯電し、交流電界の静電気力によって、電極に捕集される。
- 2) 電極上に粒子が密に捕集されるため、大粒径粒子の再飛散がほとんどなく、高い集じん率を長時間維持できる。
- 3) 極板上に粒子が密に捕集される原因として、極板凝集抑制効果が考えられる。

最後に、本研究の遂行にあたり、直接実験に携わり始終協力して下さった武蔵工業大学工学部平成 11 年度卒業の石崎明氏、小林秀則氏、佐野雄介氏、ならびに平成 12 年度卒業の安達未歩女史に心から感謝致します。

(平成 12 年 6 月 27 日受付, 平成 12 年 11 月 20 日再受付)

文 献

- (1) “道路トンネル用集じん便覧”, pp.3-5, pp.31-33, 建設電気技術協会 (1979)
- (2) 千坂文武, 綾信博 “トンネル等閉鎖空間の大気汚染浄化に関する基礎研究”, 平成 4 年度環境保全研究成果集, 環境庁編
- (3) H.Matzing “Chemical Kinetics of Flue Gas Cleaning by Irradiation With electrons”, Advances in chemical Physics Volume LXXX, pp.315-359 (1991)
- (4) Jen-Shih Chang, “The Role of H₂O and NH₃ on the Formation of NH₄NO₃ Aerosol Particles and De-NO_x Under the Corona Discharge Treatment of Combustion Flue Gases”, J. Aerosol Sci., Vol.20, No.8, pp1087-1090 (1989)

- (5) 小田哲治, “放電による大気環境改善技術”, 静電気学会誌, Vol.19, No.4, pp.238-288 (1995)
- (6) 水野彰, “放電による排ガス処理技術”, 静電気学会誌, Vol.19, No.4, pp.289-295 (1995)
- (7) 東學, 内田智至, 鈴木長利, 藤井寛一, “放電プラズマリによるディーゼルエンジン排ガス中のスス及び NOx 同時除去”, 電気学会論文誌 A, Vol.111, No.5, pp.467-473 (1991)
- (8) Y.Yoshioka, T.Yukitake, M.Nakai, K.Souma, K.Tuchiya, K.Annou, Y.Hori “Design and Testing of a Prototype De-NOx System for 100kVA Diesel Engine Generator using a Silent Discharge Reactor”, Combust. Sci. and Tech., Vol.133, pp.13-29 (1998)
- (9) 工藤昭一, 戸田憲二, 高木浩一, 加藤昭二, 藤原民也, “誘電体バリア放電によるディーゼル発電機の排ガス処理”, 電気学会論文誌 A, Vol.120, No.5, pp.553-559 (2000)
- (10) 松田考史, 村田雄司, “粉体の大気圧下プラズマ処理による帯電特性の向上”, 静電気学会誌, Vol.23, No.2, pp.91-92 (1999)
- (11) Azuchi Harano, Kouji Murata, Kazuhisa Takamizawa, Masayoshi Sadakata, “Oxidation of Carbonaceous Particles in Silent Discharge”, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol.31, No.5, pp.700-705 (1998)
- (12) 川田吉弘, 久保隆文, 江原由泰, 高橋武男, 伊藤泰郎, 瑞慶覧章朝, 高松武史, “無声放電を用いた煤煙と NOx の除去”, 電気学会論文誌 A, Vol.120, No.5 pp.547-552 (2000)
- (13) Takeo Takahashi, Yoshihiro Kawada, Akinori Zukeran, Yoshiyasu Ehara, Tario 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)
- (14) Akinori Zukeran, Yasushi Ikeda, Yoshiyasu Ehara, Minoru Matsuyama, Tairo Ito, Takeo Takahashi, Hitomi Kawakami, Takeshi Takamatsu “Two-Stage-Type Electrostatic Precipitator Re-entrainment Phenomena Under diesel Flue Gases”, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.35, No.2, pp.346-351 (1999)
- (15) 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 “二段式電気集じん装置における集じん部電極上の粒子堆積分布に対する再飛散現象の影響”, 電気学会論文誌 A, Vol.119, No.3, pp.254-260 (1999)
- (16) 長滝清敬, 天利健一, 田中賢勇, “道路トンネル用電気設備”, 富士時報, Vol.62, No.12, pp.777-786 (1989)
- (17) 電気学会編 “電気工学ハンドブック”, pp.1658 (1967)
- (18) 瑞慶覧章朝 博士論文(1999)

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。

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終了。同年4月富士電機(株)入社。現在, ESPによる有害ガス除去, ESPを用いた空調機の研究・開発に従事。現在, 情報システム事業部 ITS 推進室所属。98年電気設備学会論文賞受賞。博士(工学)。

高松 武史 (正員) 1956年8月24日生まれ。1979年3月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, 情報システム事業部 ITS 推進室所属。