交流電界による電気集じん装置の高性能化

安本　浩二（やすもと　こうじ）　瑞慶覧 章朝（ずけらん　あきのり）　河野　良宏（こうの　よしひろ）

1　まえがき

今後の都市部の高速道路は，環状道路などの整備によりトンネルとなることが多く，その延長も長くなる。このため，トンネル換気排出ガス中の浮遊粒子状物質（SPM：Suspended Particulate Matter）を除去する電気集じん装置（ESP：Electrostatic Precipitators）が採用される。換気所に設置されるESPには，高風速，低圧損，コンパクト化が求められている。換気所用ESPのシステム構成を図1，ESPの仕様を**表1**に示す。

これまで山岳部のバイパストンネル，海底トンネルの天井部，都市部の換気所などに数多くESPの納入実績があるが，集じん率，外形寸法を維持（コンパクト化）し，風速を13 m/s（高風速），圧力損失を350 Pa以下（低圧損）としたESPを開発した。さらに長年ESPの課題であった再飛散現象[1]を防止する交流電界形ESPの開発に成功した。再飛散を防止することにより，大粒径粒子の集じん率が維持され長時間の運転が可能となる。また，荷電した大粒径粒子の再飛散が少ないため壁面などへの付着が少なく環境に優しい。交流電界形ESPの開発テーマは，微粒子の集じん率向上と交流高電圧発生装置の開発であった。また，PM2.5（粒径2.5 μm以下の粒子）で評価される粒径粒子よりも生体系への影響が懸念されている粒径100 nm以下のナノ粒子の集じん率について評価を行った。これらの研究・開発で得られた結果を紹介する。

図1　換気所用ESPのシステム構成

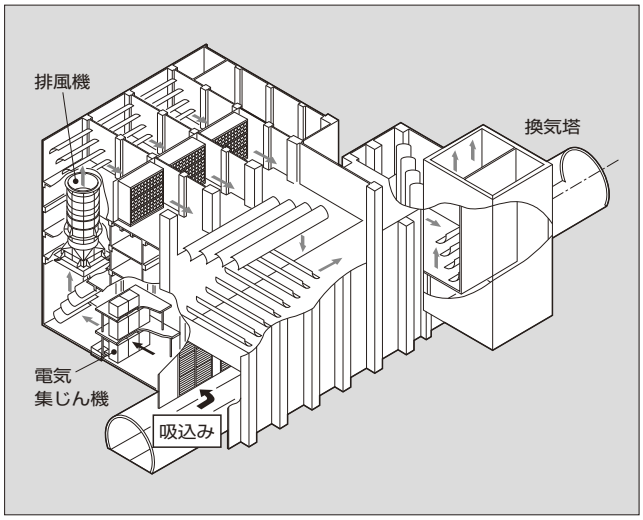


表1　ESPの仕様

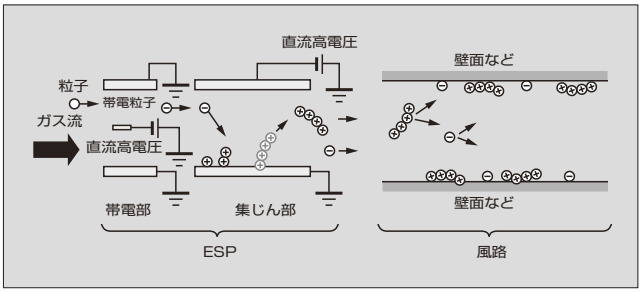
項　目		処理風速（m/s）			
		7	9	11	13
処理風量（m³/s）		31	40	48	57
集じん率（%）		80	90	80	80
圧力損失（Pa）		120	200	250	350
寸　法（8ユニットタイプ）	幅　（mm）	2,000			
	高さ（mm）	3,230			
	奥行（mm）	1,700			

2　交流方式による再飛散の防止[2]

2.1　目　的

従来の直流ESPの課題には，再飛散防止とESP下流壁面汚染の防止がある。直流ESPにおける再飛散発生と下流壁面への粒子付着のモデルを**図2**に示す。自動車排出ガス中の粒子は低抵抗率のカーボンが主成分であるため，帯電部で負極性に帯電した粒子が集じん部で集じんされる

図2　直流ESPにおける再飛散発生と下流壁面への粒子付着のモデル



安本　浩二

電気集じん装置に関する研究・開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社産業・交通システム本部交通・特機統括部道路・空港施設技術部マネージャー。

瑞慶覧 章朝

電気集じん装置に関する研究・開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社産業・交通システム本部交通・特機統括部道路・空港施設技術部。博士（工学）。電気学会会員，IEEE会員。

河野　良宏

電気集じん装置の研究・開発，集じん装置の企画・設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社発電プラント本部川崎工場特機部。

と，直ちに正極性に誘導帯電する。このため集じん粒子の近傍は電界が強くなり，数珠状の凝集粒子を形成する。集じん粒子は凝集肥大化するとともに風速などの影響を受けて再飛散するため，大粒径粒子の集じん率が著しく低下する。また，再飛散粒子は，静電誘導により帯電しているため ESP 下流壁面などに付着し汚染する。

再飛散の防止による集じん率向上を目的として誘電体被覆型，水分の噴霧，正弦波交流電界の研究を行ってきたが，集じん部に正弦波交流電界を印加することで再飛散が著しく防止されることが明らかとなった[(2)]。交流電界形 ESP における効果のモデルを**図 3** に示す。交流電圧を印加することで，極板凝集粒子の形状は数珠状から球状となり，極板との接触面積が増えるとともに風速などの影響も受けにくくなる。このため再飛散が防止される。しかし，平均印加電圧（電界）が小さくなるため，微粒子の集じん率は低下する。そこで，直流電界時と同等の集じん率を得るため，集じん部に矩形（くけい）波交流電圧を採用することで，集じん率を向上できると考えた。

2.2　実験装置および方法

実験装置の概略を**図 4** に示す。トンネル内の浮遊粒子状物質を模擬するため，ディーゼル自動車排出ガスを大気で混合希釈しサンプルガスとした。サンプルガスはブースタファンによりダクト内へ送り込まれ，ESP を通過し吸引ファンによりダクト外へ排出される。また，ダクト内の平均風速は 7 m/s とした。ESP は帯電部と集じん部から構成されている。電極構造を**図 5** に示す。帯電部は接地平板電極と放電線電極から構成されている。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が交互に並んだ構造となっている。帯電部の電極間に DC−11 kV を印加し

図 3　交流電界形 ESP における効果のモデル

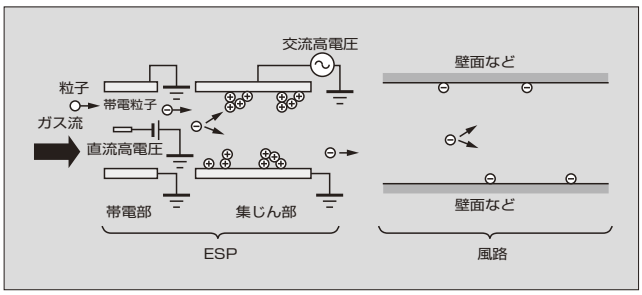
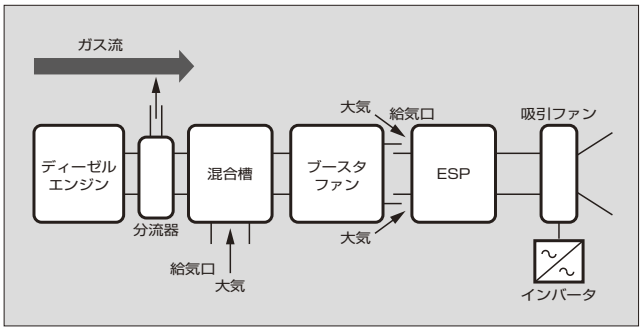


図 4　実験装置の概略



コロナ放電を発生させた。一方，集じん部の電極間に DC −7.5 kVまたは矩形波交流 7.5 kVを印加し静電界を形成した。粒子濃度はパーティクルカウンタ（リオン株式会社製，KC−01）を用いて粒径別に測定した。

2.3　測定結果

直流印加時における集じん率の時間特性を**図 6** に示す。粒径 0.3 ～ 0.5 μm の集じん率は，80 % 程度を維持している。しかし，粒径 2 ～ 5 μm では負の集じん率となっており，ESP 上流よりも下流の粒子濃度が増加している。この大粒径粒子の集じん率低下は稼動約 5 分後から始まっており，これはこれまでの研究結果により再飛散が原因であることが分かっている。

交流印加時における集じん率の時間特性を**図 7** に示す。0.3 ～ 0.5 μm および 2 ～ 5 μm のいずれの粒径においても集じん率は 80 % 程度を示し，300 min 以上においても著しい低下は見られず，再飛散現象が効果的に抑制されているのが明らかである。

以上の結果から，集じん部に矩形波交流電界を形成することで，微粒子である 0.3 ～ 0.5 μm の集じん率は直流電界時と同等に維持される。また，再飛散が効果的に防止されるため粒径の大きい 2 ～ 5 μm の粒子も高い集じん率が維持される。

図 5　電極構造

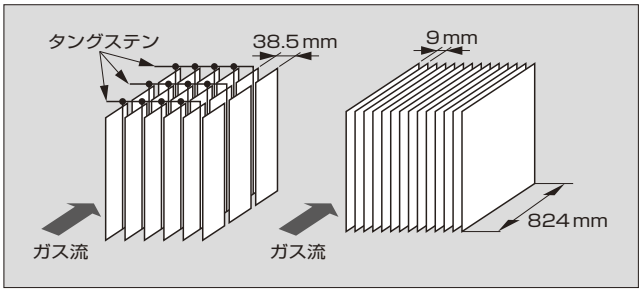


図 6　直流印加時における集じん率の時間特性

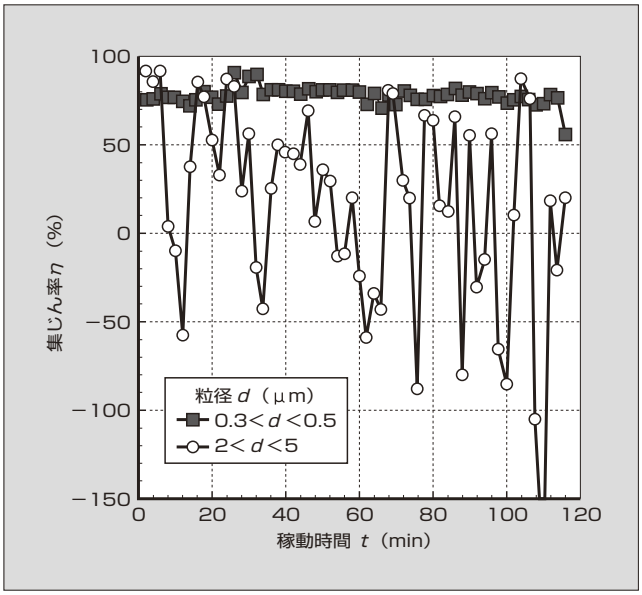


図7　交流印加時における集じん率の時間特性

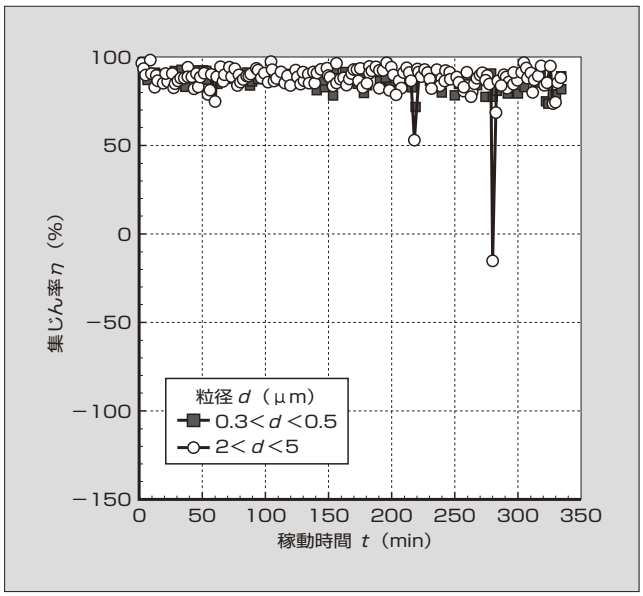


表2　集じん部の電源仕様

項　目	帯電部	集じん部
整　流　方　式	商用周波倍電圧整流	高周波インバータ および昇圧整流回路
変圧器入力周波数	商用周波数	20kHz
定　格　電　圧	−9.5kV	±8kV
定 電 圧 精 度	±3%以下	±5%以下
定 電 流 精 度	±3%以下	±5%以下
リ プ ル 電 圧	±5%$_{rms}$以下	±5%$_{rms}$以下

3　高電圧発生装置の開発

高電圧発生装置は，帯電部と集じん部に個別に高電圧を印加するため2電源で構成されている。帯電部は負極性直流電源を得るため，従来技術のサイリスタ制御方式とした。集じん部は正極性と負極性の直流電源を得るため，高周波インバータによるPWM（Pulse Width Modulation）制御とした。

3.1　回路構成

集じん部の電源仕様を**表2**，概略回路構成を**図8**に示す。また，高電圧発生装置の外観を**図9**に示す。

回路構成は，正極性直流電源と負極性直流電源の一端を接続して出力端とし，それぞれの電源の出力端に設けたスイッチを介して共通の負荷に接続している。正極性直流電源および正極性直流電源側スイッチと負極性直流電源および負極性直流電源スイッチを交互に動作させることにより負荷に矩形波電圧を出力する。

正極性直流電源または負極性直流電源は，整流器，コンデンサ，IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor），減流リアクトル，昇圧変圧器，高圧整流回路で構成し，高速半導体デバイスであるIGBTをスイッチング素子とし

図8　集じん部の概略回路構成

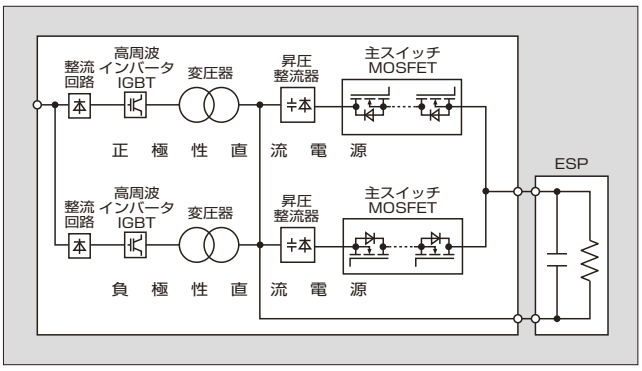


図9　高電圧発生装置の外観

たPWM制御高周波インバータを採用している。電源の出力端に設けたスイッチは，高速開閉が可能なMOSFET（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor）を採用し直列に接続している。スイッチに印加される電圧を均等に分担させるスナバ回路と過電圧抑制素子を並列に接続する。また，短絡保護の抵抗，ESPの電荷を放出させるダイオードにより構成する。

3.2　特　長

従来，正極性直流電源と負極性直流電源を直列に接続し，それぞれの出力端に設けたスイッチを交互に開閉するため，オフ状態のスイッチには2倍の電圧が印加され，2倍の耐電圧が必要であった。今回は，正極性直流電源および正極性直流電源側スイッチと，負極性直流電源および負極性直流電源スイッチとを交互に動作させるため従来に比べてスイッチの耐電圧が低く抑えられ経済的である。

直流電源の電圧および出力時間を任意に変更することが可能であり，ESPの集じん効率が最大となる条件に設定することが可能である。

4　ナノ粒子の集じん性能

近年，ディーゼル自動車排出ガスのクリーン化技術の進歩に伴って，ディーゼル自動車排出ガス中で質量濃度の大部分を占める粗大粒子は著しく減少している。一方で，質

図10　実験に用いているディーゼル自動車排出ガスの粒径分布

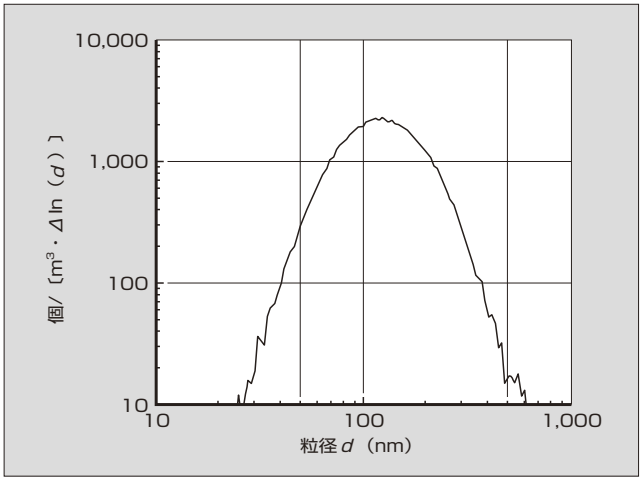
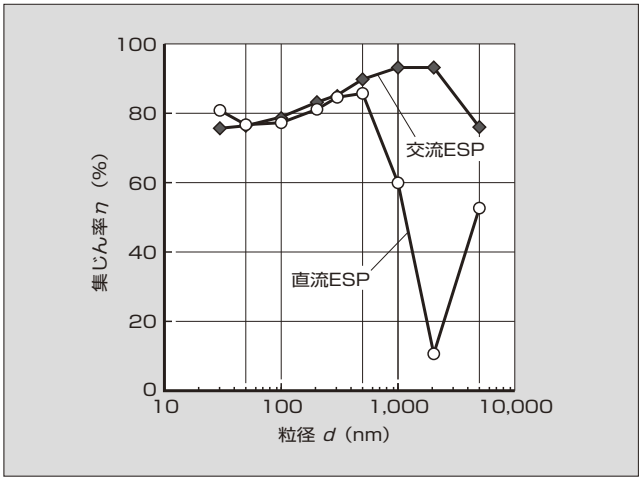


図11　交流電界形 ESP のナノ粒子に対する集じん率



量濃度は少ないが個数濃度が圧倒的に多いナノ粒子の生体に対する影響が問題視されている。ナノ粒子は大粒径粒子に比べ粒径が小さいため肺の細胞をすり抜けて血管に入り込むなど人体に悪影響を与えることが懸念されている[(4)]。このため，今後のトンネル換気排出ガスにおいては，ナノ粒子の高効率の除去が望まれる。

ディーゼル自動車排出ガスの粒子濃度は，20 ～ 500 nm のナノ粒子の計測が可能で，荷電粒子の電気移動度を利用した Scannig Mobility Particle Sizer（SMPS，TSI 社製，MODEL3080）を用いて測定した。実験に用いているディーゼル自動車排出ガスの粒径分布を**図10**に示す。粒径分布は，約 100 nm を最頻値としており，サブミクロンおよびナノ粒子が多く存在しているのが分かる。一方，ESP の集じん率は帯電理論上，粒径 100 ～ 300 nm が極小値となる。以上のことから，個数濃度が多い粒径 100 nm 以下のナノ粒子の集じん率向上が重要であるといえる[(3)]。そこで，ESP におけるナノ粒子の集じん率を測定しその性能を評価した。

実験装置および方法は **2. 2** 節と同様であるが，ダクト内風速 5 m/s，帯電部の電圧は DC−10 kV，集じん部の電圧は DC−8 kV または矩形波交流 8 kV とした。また，粒子濃度は，SMPS およびパーティクルカウンタ（300 nm 以上）を用いて測定した。

交流電界形 ESP のナノ粒子に対する集じん率を**図11**に示す。直流印加時において，粒径約 500 nm までは，粒径が大きくなるに従い，集じん率が向上する傾向を示す。しかしながら，粒径 500 nm 以上においては，著しく集じん率が低下している。これは再飛散の影響である。一方，交流印加時においては再飛散の抑制効果によって，直流印加時に比べ粒径 500 nm 以上の大粒径粒子の集じん率が飛躍的に向上している。この結果，サブミクロンやナノ粒子の集じん率は相対的に低い値となっている。

ナノ粒子の集じん率向上のためには，電極形状，電極構造，電極配置，印加電源波形などの最適化を図る必要がある。

5　あとがき

交流電界形 ESP の開発に成功し，長い間未解決であった再飛散を防止することが可能となった。今後，特に都市部トンネル換気塔からの排出ガスの SPM 除去用として活躍が期待されている。さらにナノ粒子の集じん率向上やその他環境汚染物質の低減の開発を進めていく所存である。

この研究は武蔵工業大学との共同研究による成果であり，ご指導いただいた伊藤泰郎名誉教授，高橋武男教授，江原由泰助教授，大学院博士課程高木康裕氏ならびに関係各位に感謝する次第である。

参考文献

(1)　瑞慶覧章朝ほか．環境対策用電気集じん装置に関する最近の技術動向．富士時報．vol.75, no.2, 2002, p.129−134.

(2)　Zukeran, A. et al. Performance of electrostatic precipitator applied rectangular AC electric field for prevention of re-entrainment phenomene. SAFETY IN ROAD AND RAIL TUNNELS. 2003, p.307−315.

(3)　Parker, K. R. Applied electrostatic precipitation. Blackie Academic & Professional. 1997, p.65.

(4)　大聖泰弘ほか．自動車排出ナノ粒子および DEP の測定と生体影響評価．第 3 編　生体影響．株式会社エヌ・ティー・エス．2005, p.159−164.

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。