

高電界を利用した超省エネルギー型電気集じん装置の開発

神奈川工科大学 工学部 電気電子情報工学科

瑞慶覧 章朝

1. はじめに

空気汚染の原因物質の一つである浮遊粒子状物質を除去する装置として、コロナ放電を利用した電気集じん装置 (Electrostatic Precipitator: ESP) があげられる。ESP は、微粒子に対して高い集じん性能をもち、圧力損失が低く、メンテナンスも容易なため、火力発電所、高速道路トンネルや室内など、さまざまな用途に広く利用されている。一方、SDGs やカーボンニュートラルの観点から、ESP にも省エネルギー化が必要と考えられる。

これまでに省エネ化を目的として、コロナ放電を利用しない高電界 ESP を開発してきた¹⁻³⁾。しかし、従来の構造では、電極のエッジ効果による火花放電を抑制するため、電極間隔以上の電極板厚が必要となり、装置断面積が大きくなる課題があった。

本研究では、電極を絶縁シートで被覆した構造を提案し、従来レベルの装置断面積で、かつエネルギーをほとんど消費しない、風速 3.8 m/s、集じん率 80% の ESP を実現することを目的に理論検討および実験を行った⁴⁻⁶⁾。

2. シミュレーションおよび解析

電極端部の電界強度に対する絶縁シートの効果をシミュレーションにより検討した。解析ソフトは COMSOL Multiphysics (Ver 5.6) を使用した。解析モデルを図 1 に示す。解析モデルは 2 次元で、高電圧印加電極と接地電極で構成した。それぞれの電極は絶縁シートで被覆した。電極板厚は 0.8 mm、絶縁シート厚は 0.05~1.0 mm、電極間隔は 1 mm または 5 mm、電極端部の絶縁シート長は 0.5~5 mm とした。また、絶縁シートの比誘電率 ϵ_r を 3.5、空間は空気、図中の AB は対称境界とした。印加電圧は DC+3~15 kV として、絶縁被覆端部 (●)、電極端部表面 (■)、電極間中央 (▲) における電界強度を解析した。

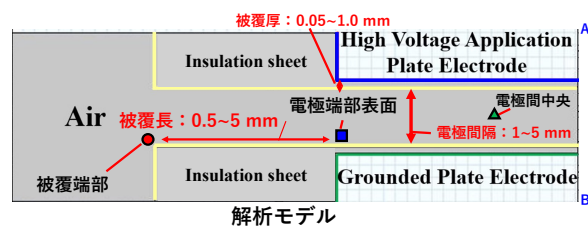


図 1. 解析モデル

3. 実験装置および方法

3.1 火花放電抑制効果

火花電圧測定装置の概略を図 2 に示す。実験装置は ESP を模擬した電極部で構成した。電極部は高電圧印加用電極と接地用電極の平行平板電極構造とした。電極は板厚 0.8 mm のステンレス板を絶縁シートで被覆をした構造とした。電極長は 100 mm、電極端部の絶縁シートの被覆長は 1~5 mm、絶縁シートの被覆厚は 0.25 mm、電極間隔は 1 または 5 mm とした。また、絶縁シートはポリイミドまたはポリエチレンテレフタレート (PET) を用いた。電極間に最大 18 kV の直流正極性電圧を印加し、火花電圧を測定した。

3.2 集じん性能の検討

実験システムの概略を図3に示す。実験装置はディーゼルエンジン、混合槽、ダクト、高電界 ESP、シロッコファンで構成されている。ディーゼルエンジンから排出されたガスを混合槽へ送り、大気で希釈した後高電界 ESP へ風速 0.6 m/s から 3.8 m/s（電極間風速）で流入した。高電界 ESP は高電圧印加用電極と接地用電極から成る平行平板電極構造となっている。電極構造は図4に示すように、板厚 0.4 mm のステンレス電極を絶縁材料 PET（東レ、ルミラー、厚さ 0.25 mm）で被覆した構造とし、電極間隔は 2 mm または 5 mm、電極長は 165 mm～660 mm とした。電極間に負極性直流電圧(DC) 3～10 kV または矩形波交流電圧(RAC) ±4 kV または ±10 kV（周波数 0.1 Hz）を印加し高電界を形成した。高電界 ESP の上流および下流側ダクトから流通ガスの一部を吸引し、パーティクルカウンタ（リオン製、KC-01E）を用いて粒子個数濃度を測定した。粒子個数濃度から(1)式で集じん率を算出した。なお、本実験では、いずれの条件においても放電電流は検出されておらず、ほとんど電力を消費していない。

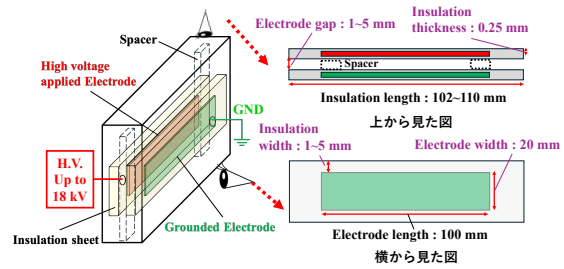


図2. 火花電圧測定装置の概略

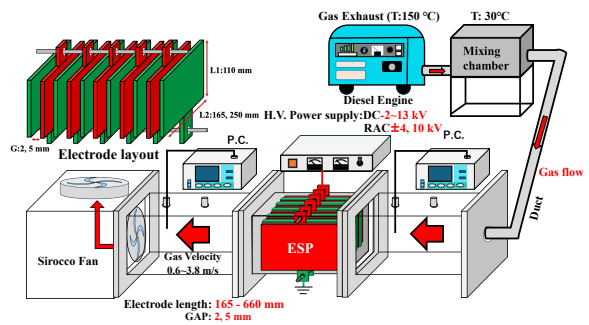


図3. 実験システムの概略

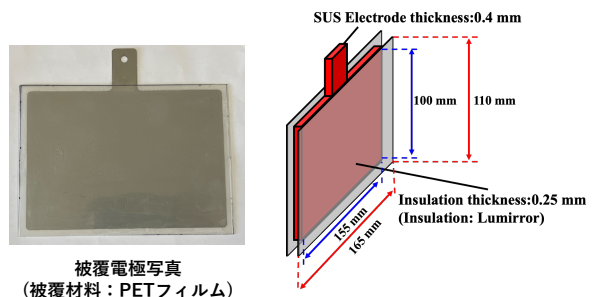


図4. 電極構造

$$\eta = \left(1 - \frac{N_{out}}{N_{in}}\right) \quad (1)$$

ただし、 N_{in} と N_{out} は高電界 ESP 上流と下流の粒子濃度[parts/m³]である。

4. 結果および検討

4.1 火花放電抑制効果

絶縁シートなしの場合の電界強度分布を図5に示す。ただし、電極間隔は 5 mm、印加電圧は DC15 kV である。電極間中央部分 (▲) の電界強度は 3000 V/mm であるが、電極端部 (■) では約 5300 V/mm となっている。このことから、絶縁シートなしの条件では、電極端部で空気の絶縁破壊強度を超え、電極間の電界強度を高くできないことがわかる。

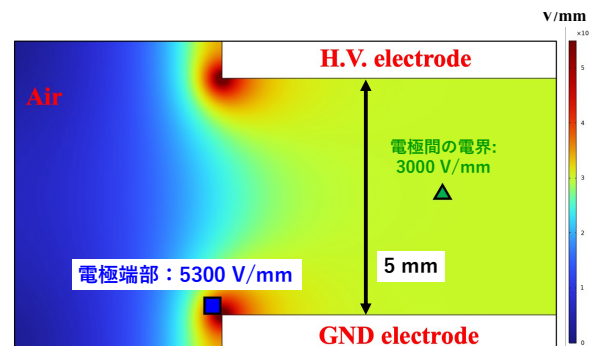


図5. 絶縁シートなしの電界強度分布

印加電圧 DC15 kV、被覆長 1 mm、電極間隔 5 mm における電界強度と被覆厚の関係を図 6 に示す。電極間の電界強度 (▲) は、いずれの被覆厚においても 3000 V/mm 以下であった。被覆端部の電界強度 (●) は、被覆厚が 0.05 mm のとき 3750 V/mm であるが、被覆厚が厚くなるほど低下し、1.0 mm のとき 3000 V/mm となった。また、電極端部表面の電界強度 (■) も、被覆厚が厚いほど低下し、1.0 mm で 2930 V/mm となった。

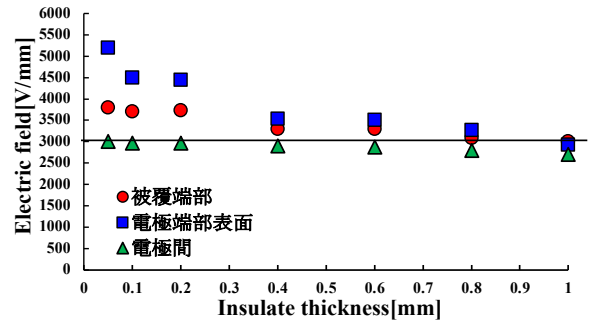


図 6. 電界強度と被覆厚の関係 (電圧 DC15 kV、被覆長 1 mm、電極間隔 5 mm)

印加電圧 15 kV、被覆厚 1 mm、電極間隔 5 mm における電界強度と被覆長の関係を図 7 に示す。いずれの被覆長においても電極間の電界強度 (▲) は 3000 V/mm 以下であった。被覆長が 0.5 mm のとき、被覆端部の電界強度 (●) は 3200 V/mm であるが、1 mm 以上で 3000 V/mm 以下となり、5 mm では 1200 V/mm となった。

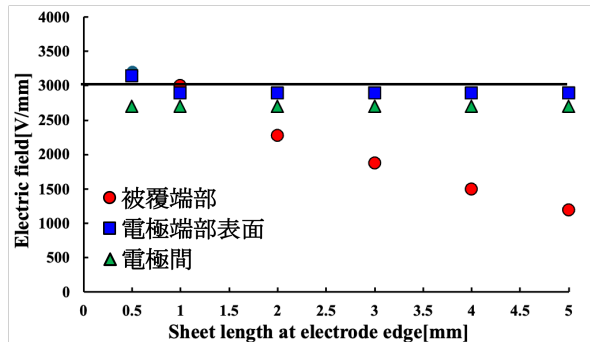


図 7. 電界強度と被覆長の関係 (電圧 DC15 kV、被覆厚 1 mm、電極間隔 5 mm)

以上のことから、被覆厚と被覆長を電極間隔の 1/5 以上とすることで電極端部と被覆端部における電界強度を抑え、電極間に空気の破壊強度 3000 V/mm 付近の電界を形成できるといえる。

そこで、電極間隔 5 mm、被覆厚 1 mm、被覆長 1 mm、印加電圧 DC+15 kV として、絶縁シートで被覆したときの電界強度分布を計算したのでその結果を図 8 示す。被覆端部 (●)、電極端部表面 (■)、そして電極間 (▲) のいずれにおいても、3000 V/mm 以下となっているのがわかる。

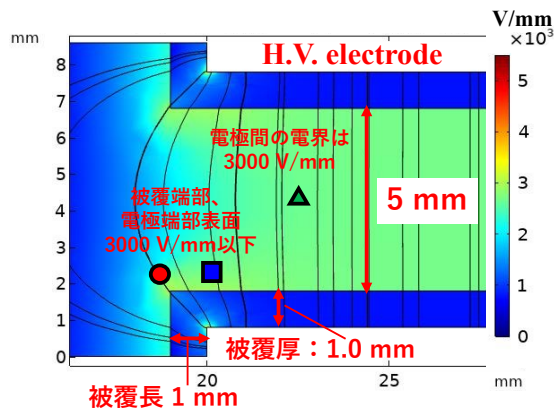


図 8. 絶縁シート被覆時の電界強度分布 (電圧 DC15 kV、電極間隔 5 mm、被覆長 1 mm、被覆厚 1 mm)

シミュレーション結果の妥当性を確認するため、各条件における火花電圧を測定した。その結果、絶縁シートなしのとき、印加電圧 DC5 kV でコロナ放電開始、6.8 kV で火花放電が確認された。これに対し、絶縁シートをポリイミド、電極間隔 5 mm、被覆長 1 mm、被覆厚を 250 μm としたとき、印加電圧 DC16 kV まで放電電流は確認されなかった。また、電極間隔を 1 mm に変更した場合も印加電圧 3 kV まで放電電流は確認されなかった。絶縁シートを PET フィルム (東レ, ルミラー, 250 μm) に変更した場合も、同様の結果となった。

以上の結果から、電極を絶縁シートで被覆することで、電極間に空気の絶縁破壊に近い 3000 V/mm 付近の電界を形成できることが示された。従来の方式では、電極間隔 5 mm のとき

の必要電極板厚は 5 mm 以上であったのに対して、金属電極と絶縁シートの合計厚さは 1.3 mm であり、0.26 倍に薄くできることが明らかとなった。実用上、提案の方式では金属電極板厚はさらに薄くできる。

4.2 集じん性能の検討

4.1 の結果をもとに、金属電極を PET で被覆し、風速 0.6 m/s、電極間隔 5 mm、印加電圧種別 DC における集じん効果を検討した。集じん率の電圧特性に対する電極長依存性を図 9 に示す。ただし、粒径範囲は 0.3~0.5 μm である。いずれの電極長においても電圧が高いほど集じん率は高くなり、-10 kV 以上において飽和傾向を示した。これは電圧が高いほど粒子の実効移動速度が速くなるためである。また、電極長が長いほど、電極間における粒子の滞在時間が長くなるため集じん率は向上し、660 mm で最大 85% を達成した。粒径 0.5 から 5 μm の範囲においても同様な傾向が確認できている。

集じん率の時間特性に対する電極長依存性を図 10 に示す。ただし、粒径範囲は 0.3~0.5 μm 、印加電圧は DC-10 kV とした。電極長 165 mm の初期集じん率は約 65% であり、時間経過とともに低下し、120 分後には 22% となった。電極長が長くなるほど集じん率は向上するが、いずれも時間経過に対して低下する傾向を示した。電極長 660 mm における集じん率の初期値と 120 分後の値は、それぞれ 87% と 73% であった。これは、絶縁シート表面が帯電し電極間の電界強度が弱くなるためと考えられる。

そこで、矩形波交流電圧(RAC)の集じん率に対する効果を検討した。その結果を図 11 に示す。ただし、印加電圧は RAC \pm 10 kV、粒径範囲は 0.3~0.5 μm である。いずれの電極長においても時間経過による集じん率の低下は確認されなかった。電極長 165 mm のときの初期集じん率は 59% であり、120 分経過後も 72% であった。電極長が長くなるほど初期集じん率は向上し、660 mm のとき 90% となった。このときの 120 分後の集じん率も 87% を維持した。ディーゼル排気には正と負に帯電した粒子が存在していることがわかっている²⁾。矩形波交流電圧を加えることで電極表面に到達する粒子の極性が周期的に変わるため、電極間の電界強度が維持できたことが要因と考えられる。

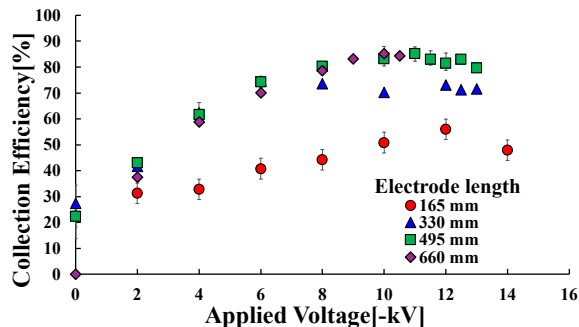


図 9 . 集じん率の電圧特性 (DC、風速 0.6 m/s、電極間隔 5 mm、粒径 0.3-0.5 μm)

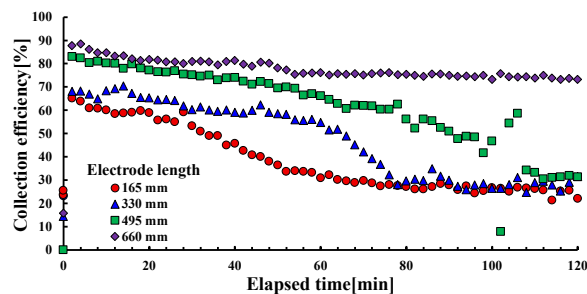


図 10 . 集じん率の時間特性に対する電極長依存性 (DC-10 kV、風速 0.6 m/s、電極間隔 5 mm、粒径 0.3-0.5 μm)

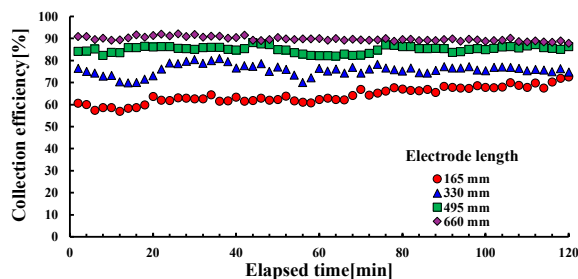


図 11 . 集じん率の時間特性に対する電極長依存性 (RAC \pm 10 kV、風速 0.6 m/s、電極間隔 5 mm、粒径 0.3-0.5 μm)

風速 0.6 m/s で 80%以上の集じん性能を達成したため、高風速化の検討を行った。その結果を図 1 2 に示す。ただし、粒径範囲は 0.3 ~0.5 μm 、印加電圧は RAC \pm 10 kV、電極長は 660 mm とした。いずれの風速においても、矩形波交流電圧の効果により、運転時間に対する集じん率の低下は見られなかったが、風速の増加にともない低下した。運転開始時と 120 分後の集じん率は、風速 0.6 m/s 時がそれぞれ 92%と 87%であるのに対して、3.8 m/s 時はそれぞれ 64%と 75%であった。

そこで、本研究の目標である風速 3.8 m/s で集じん率 80%を達成するため、電極間隔を 5 mm から 2 mm に短縮し、その効果を検討した。理論的には、同一電界強度(2 kV/mm)のとき、電極長 500 mm で集じん率 83%に達すると予測された。図 1 3 に、風速 3.8 m/s、電極間隔 2 mm、電極長 500 mm、粒径 0.3 から 0.5 μm における集じん率と運転時間の関係を示す。ただし、電圧は RAC \pm 4 kV である。集じん率の初期値は 83%であり、運転時間の経過に対して低下は見られず、120 分後も 88%を維持した。理論とほぼ同等の性能が得られ、目標を達成した。

5. まとめ

本研究では、電極を絶縁シートで被覆した構造を提案し、従来レベルの装置断面積で、かつエネルギーをほとんど消費しない、風速 3.8 m/s、集じん率 80%の ESP を実現することを目的とした。電極端部の電界強度に対する絶縁シートの効果、集じん率に対する矩形波交流電圧の効果を検討した。その結果、以下のことが示され、目的が達成された。

- 1) シミュレーションの結果、絶縁シートの被覆厚および被覆長を電極間隔長の 1/5 以上とすることで、電極端部表面と被覆端部の電界強度を抑制し、電極間に高電界を形成できることが示された。
- 2) 電極間隔 5 mm において、絶縁シートなしのとき、印加電圧 DC+5 kV で放電電流が流れた。一方、絶縁シートで被覆することにより、電圧 DC+16 kV においても放電電流が検出されなかった。また、電極間隔 1 mm では電圧 DC+3 kV でも放電は確認されなかった。
- 3) 本研究では、いずれの条件においても放電電流は検出されておらず、電力はほとんど消費されていないことが確認された。
- 4) 負極性直流電圧印加時、電圧および電極長が大きくなるほど集じん率が向上することを確認した。風速 0.6 m/s、電極間隔 5 mm、電界強度 2 kV/mm、電極長 660 mm において初期

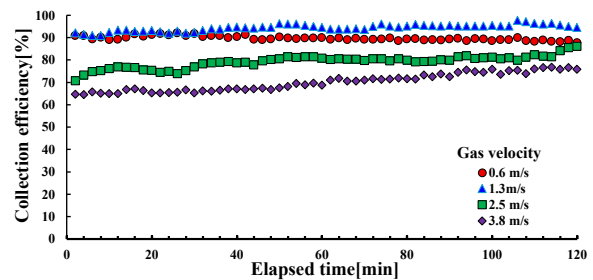


図 1 2 . 集じん率の時間特性に対する風速の影響 (RAC \pm 10 kV、電極長 660 mm、電極間隔 5 mm、粒径 0.3-0.5 μm)

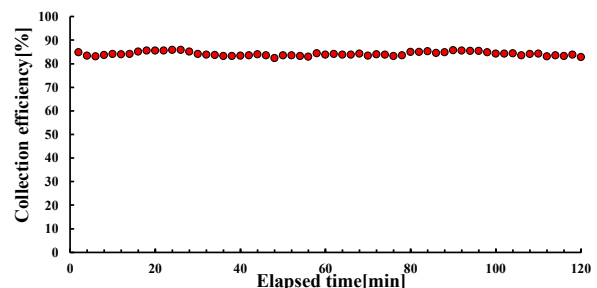


図 1 3 . 集じん率の時間特性 (風速 3.8 m/s、RAC \pm 4 kV、電極長 500 mm、電極間隔 2 mm、粒径 0.3-0.5 μm)

集じん率 87%を達成した。しかし、運転時間経過とともに集じん率が低下し、120 分後に 73%となった。

- 5) 矩形波交流電圧を印加することで、風速 0.6 m/s、電極間隔 5 mm、電界強度 2 kV/mm、電極長 660 mm において初期集じん率 92%を達成した。さらに時間経過に対して集じん率は維持され、120 分後も 87%であった。しかし、風速が速くなるほど集じん率は低下し、3.8 m/s における初期と 120 分後の値は、それぞれ 64%と 75%であった。
- 6) 矩形波交流電圧印加、風速 3.8 m/s、電極長 500 mm、電極間隔を 2 mm、電界強度 2 kV/mm のときの初期と稼動後 120 分の集じん率は、それぞれ 83%と 88%であり、目標値を達成した。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多大なご支援を頂きました（公益財団法人）天野工業技術研究所に謝意を示します。

参考文献

- 1) Akinori Zukeran, Shogo Inoue, Daiki Ishizuka, Kohei Ito, Takayuki Kaneko, Energy saving effect of high electric field on an electrostatic precipitator for air borne particle, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 56, No. 6, pp.6990-6996, 2020
- 2) Akinori Zukeran, Keisuke Ito, Daiki Ishizuka, Yuki Tanahashi, Risei Wada, Keisuke Yamashiro, Yoshihiro, Takayuki Kaneko, Effect of Electrode Length and Gas Velocity on the Collection of Diesel Exhaust Particle in an Electrostatic Precipitator with a High Electric Field, *Lecture Notes in Electrical Engineering, Proceedings of the 16th International Conference on Electrostatic Precipitation*, Vol. 1052, pp. 134-143, 2023
- 3) Hayato Ito, Tatsumi Hasegawa, Masaki Tanahashi, Kesuke Ito, Takumi Kojima, Hiroyuki Shinozaki, Koji Yasumoto, Akinori Zukeran, High-gas-velocity operation and enhanced collection efficiency in a high-electric-field electrostatic precipitator for diesel exhaust particles, *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*, Vol. 20, No.2, e02002 (9pp), 2026
- 4) 小島拓海、瑞慶覧章朝、北林功一、水野彰、高電界電気集じん装置における電極端部の電界強度に対する絶縁シートの効果、静電気学会全国大会、第 49 回静電気学会全国大会、11pC-7, 2025
- 5) 小島 拓海、瑞慶覧 章朝、北林 功一、水野 彰、絶縁シート電極を用いた高電界電気集じん装置の集じん率に対する矩形波交流電圧の効果、2026 年静電気学会春期講演会
- 6) Takumi Kojima, Akinori Zukeran, Koichi Kitabayashi, Akira Mizuno, Development of a high electric field type electrostatic precipitator with insulation-coated electrodes, 10th East Asia Joint Symposium on Plasma and Electrostatic Technologies for Environmental Application (EAPETEA-10), 3-5 December 2025, Kumamoto, Japan