

## 二段式電気集塵装置の集塵部における 不均一な電界と気流で構成した集塵プロセスの検討

五十嵐 駿亮<sup>\*, \*\*</sup>, 黒水 将史<sup>\*, 1</sup>, 川田 吉弘<sup>\*</sup>

(2025年3月3日受付; 2025年6月25日受理)

### Effect of Asymmetric Electric Field and Local Gas Flow on Electrostatic Precipitation in a Collector of a Two-stage Type Electrostatic Precipitator

Syunsuke IGARASHI<sup>\*, \*\*</sup>, Masafumi KUROMIZU<sup>\*, 1</sup> and Yoshihiro KAWADA<sup>\*</sup>

(Received March 3, 2025; Accepted June 25, 2025)

Electrostatic precipitators often use flat electrodes to capture more particles. Microscopically, the gas flow near the electrodes slows down due to viscosity. On the other hand, in parts of the electrostatic precipitator where the gas flow is fast, the number of particles passing through this space increases. In other words, the particle concentration per unit time increases. In this study, particle reduction efficiency is tried to improve with preferentially passing gas through an enhanced electric field. In electrostatic precipitators with multiple electrode units, non-uniform gasflow leads to a decrease in volumetric efficiency for the air purifier. The device targeted in this study is a small household air purifier. In an asymmetric electrode configuration, the particle reduction efficiency decreased due to the reduction in electrode area, however the decrease was small. In addition, the particle reduction efficiency was improved with strengthening the flow near the electrodes. A sufficient effect was obtained with a suction flow rate of 5 L/min, 13.5% of the total flow rate.

#### 1. はじめに

電気集塵装置は100年以上の歴史を持ち、これまで多くの派生モデルが提案してきた<sup>1)</sup>。しかし基本原理は変わらず、コロナ放電による帶電粒子を静電界で電極に捕集する。帶電粒子を静電界で捕集する際にはクーロン力が働き、ガス流れとクーロン力の和で粒子の移動方向は決定される。

電気集塵装置内のガス流れには、必ず流れに分布を持つ。例えば平行平板間に層流でガスを流したとしても、空気には粘性があることから壁面近傍におけるガス流速は遅くなり、電極間の中央付近のガス流速は早くなる<sup>2)</sup>。またガス流速が速いということは、時間あたりに通過する浮遊粒子数は増加する。電気集塵装置はガス流速の増加に対し集塵率は低下する。しかし集塵率の低下割合はガス流速の増加に比例しない。ガス流速が増加すると時間当たりの粒子捕集量は増加する<sup>3)</sup>。

**キーワード:** 電気集塵装置, 電界, 気流制御, 集塵電極, 集塵率

\* 職業能力開発総合大学校

(〒187-0035 東京都小平市小川西町2-32-1)

The Polytechnic University of Japan, 2-32-1, Ogawa-nishimachi, Kodaira-shi, Tokyo, 187-0035, Japan

\*\* 滋賀職業能力開発促進センター

(〒520-0856 滋賀県大津市光が丘町3-13)

Human Resources Development Promotion Centers, Shiga Center, 3-13, Hikarigaoka-cho, Otsu-shi, Shiga, 520-0856, Japan

<sup>1</sup> m-kuromizu@uitech.ac.jp

DOI: <https://doi.org/10.34342/iesj.2025.49.6.212>

ガス流れの不均一が粒子捕集量や捕集メカニズムに大きく影響することから、静電集塵部とサイクロン集塵部で構成される静電サイクロン方式集塵装置が提案されている<sup>4,5)</sup>。しかし、静電集塵部において、中心電極の電界強度が高くなる一方で、粒子が捕集される円筒電極近傍の電界は平均電界に比べ低くなる。つまり集塵空間は平均的な電界か、それ以下の電界である領域しか使っていない。

本研究では、(1) 電界強度が高い空間を作る、(2) 対象ガスを優先的に(1)の空間に流す。この2点により電気集塵装置の集塵部における粒子捕集は高効率化できると考えた<sup>5,7)</sup>。今回は粒子捕集後に再度飛散しない線香の煙を対象粒子とし、家庭用の空気清浄機をモデルとして実験を行った。気流を不均一にすることで流れによどみが生じ、容積効率の観点で性能が低下する。しかし一対の高電圧-接地電極で構成されるような小型の電気集塵装置では、流れのよどみが容積効率に与える影響は少ないと考えた。二段式電気集塵装置の集塵部は同軸円筒電極形状とした。また同軸円筒の中心電極近傍の電界強度は高い空間となり、中心電極への粒子捕集を試みた。ただし今回の実験装置における電極面積は、円筒内側に比べ18%程度である。粒子捕集には不利な条件となった。この電極形状において、対象ガスを電極近傍に流すために、電極近傍のガスを局所的に排気した。室内の浄化において汚染空気を外へ排気することは十分考えられる。一方、排気したガスを戻すことも設計上考えられることから、排気中の粒子も考慮した評価も行った。

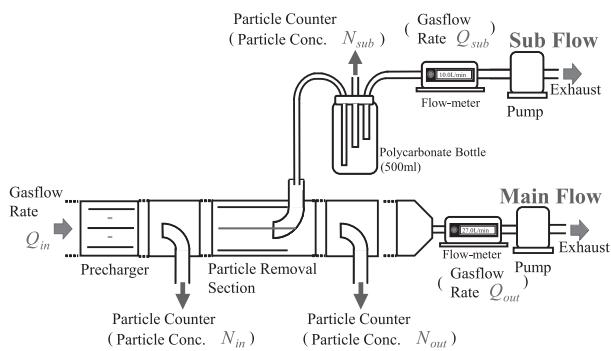


図 1 実験装置概略

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

## 2. 実験方法

実験装置概略図を図 1 に示す。試験用集塵装置は、帯電部と集塵部から成る二段式電気集塵装置とした。線香（日本香堂、太陽、無香性、長寸）の粒子を混合槽により室内大気と混ぜたのち、装置へ流入させた。帯電部上流側で 10 万個/L 程度（粒径：0.3  $\mu\text{m}$ ～0.5  $\mu\text{m}$ ）とした<sup>8)</sup>。帯電部、集塵部を通過後、下流の流量センサ（CKD, FSM3）およびポンプ（安永エアポンプ、YP-70VC, 79W）を介しガスを排出した。また集塵部中央からも流量センサとポンプを介しガスを排出した。装置通過前後には測定ダクトを設け、パーティクルカウンタ（リオン KC-01E、希釈器 MP-M8B、希釈率 20 倍）により粒子個数濃度を測定した。全ガス流量は 37 L/min 一定とし、集塵部入口における平均流速は約 0.3 m/s であった。下流測定ダクト及びポリカーボネイト製ボトルにおける粒子サンプリングでは水平等速吸引ができないことから、本パーティクルカウンタの全粒径範囲 0.3  $\mu\text{m}$ ～5.0  $\mu\text{m}$  の粒子濃度を用い粒子低減率を算出した。

帯電部は図 2 に示す。3 枚の接地電極の間に放電電極を通した線対平板電極構造とし、高電圧電源（松定プレシジョン、HAR-10R3）により直流正極性 8.5 kV を印加した。放電電流は 0.04 mA であった。帯電部の条件を一定とし、集塵部に流入する粒子の濃度や帯電量が安定するよう配慮した。

集塵部において、粒子が同軸円筒の内側、および中心電極へ移動する際の電界の効果を比較するために、図 3 に示す集

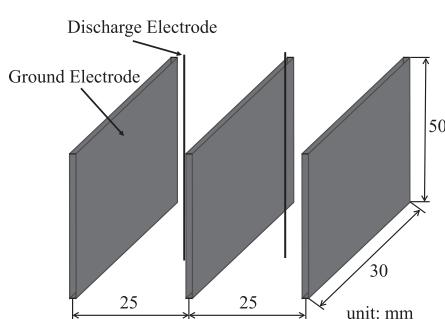


図 2 帯電部構造（線対平板電極構造）

Fig.2 Electrode structure of wire-plate type pre-charger.

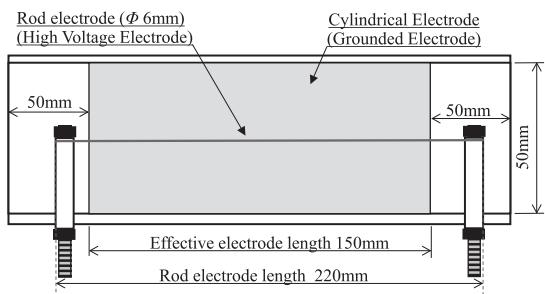


図 3 集塵部電極構造（電界の効果比較用）

Fig.3 Electrode structure of particle removal section for comparing the effect of the electric field.

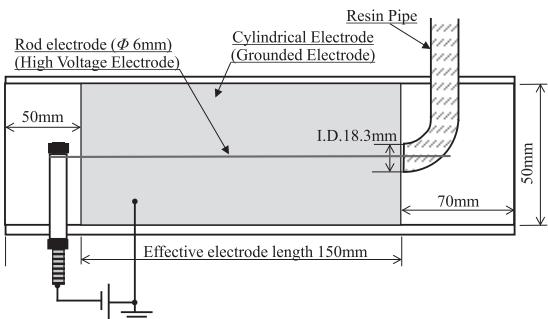


図 4 局所排気のノズルを設けた集塵部電極構造

Fig.4 Particle removal section attached local exhaust nozzle electrode structure.

塵部モデルを使用して実験を行った。内径 50 mm のアクリル円筒内側に長さ 150 mm のステンレス板を貼り、接地電極とした。中央にロッド電極（直径 6 mm、アルミニウム製）を配置し、負極性の高電圧電源（泉電気、HST-10K1N-100）および、正極性の高電圧電源（松定プレシジョン、HAR-20R15）を接続した。また、不均一な気流の効果について検証するため、捕集電極近傍に流れを設け、粒子低減率向上を試みた。局所排気のノズルを設けた電極構造を図 4 に示す。図 3 の実験装置と電極の配置は大きく変わらない。ただし中心電極下流側に局所排気を可能とする樹脂製ノズルを設けた。副流流量（図 1 における  $Q_{\text{sub}}$ ）は 0～18 L/min まで変化させ、このとき全ガス流量（図 1 における  $Q_{\text{in}}$ ）は 37 L/min 一定となるよう、主流のガス流量（図 1 における  $Q_{\text{out}}$ ）を調節した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 電界の効果

ここでは、図 3 で示した集塵部構造で電界が粒子の移動に与える効果について検討した。理論的に計算し<sup>1)</sup>、コロナ開始電圧は印加電圧 15.4 kV であった。集塵部は基本的に静電界のみとした。ただしエッジ部において電圧印加時に放電が生じた可能性はある。

帯電部で通過する粒子を正に帯電させていることから、集塵部における中心電極に正極性を印加すると円筒内側の電極へ粒子が捕集される。一方負極性を印加すると中心電極に粒

子は捕集される。正負印加電圧極性に対する粒子低減率について図5に示す。粒子低減率 $\eta$ は下記式(1)により算出した。

$$\eta = \left( 1 - \frac{Q_{\text{out}} N_{\text{out}}}{Q_{\text{in}} N_{\text{in}}} \right) \times 100 [\%] \quad (1)$$

ただし、ここでは流量が装置通過前後で変わらないことから、 $Q_{\text{in}} = Q_{\text{out}}$ とした。正極性印加時、すなわち帶電粒子を円筒方向に移動させ円筒電極へ捕集した際の粒子低減率の方が高い値となった。ただしこのことは電極面積が寄与していると考えられる。つまり円筒電極面積は $2.36 \times 10^{-2} [\text{m}^2]$ で、ロッド電極面積は電極保持部にかかる面積を含め $4.14 \times 10^{-3} [\text{m}^2]$ であり、ロッド電極の電極面積は円筒電極面積の18%程度であった。

次に粒子移動速度について、Deutschの式を用いて検討した。Deutschの式を以下に示す。

$$\eta = \left( 1 - e^{-\omega \frac{S}{Q}} \right) \times 100 [\%] \quad (2)$$

$$\omega = \frac{-l n(1 - \eta)}{S/Q} \quad (3)$$

ここで、 $\eta$ は集塵率(本研究では粒子低減率)、 $\omega$ は粒子の電極方向への移動速度 [ $\text{m/s}$ ]、 $S$ は集塵電極の全表面積 [ $\text{m}^2$ ]、 $Q$ はガス流量 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] である。本研究において $S$ は、中心電極に負極性直流電圧を印加した場合の中心電極面積であり、正極性直流電圧を印加した場合は円筒電極面積とした。正負印加電圧極性に対する移動速度 $\omega$ について図6に示す。印加電圧の増加とともに、移動速度も比例に近い直線で上昇した。正極性電圧印加時に対し、負極性電圧印加時においては5~20倍大きい移動速度であった。帶電粒子が電極方向へ移動する力は、電荷量と電界の積であるクーロン力による。負極性電圧印加時に帶電粒子が中心電極方向へ移動する際に、捕集される電極に近づくにつれ粒子濃度は高くなると考えられる。また捕集される電極近傍の電界強度

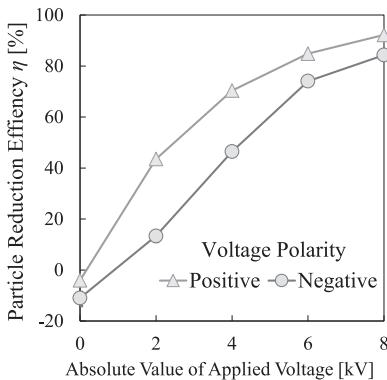


図5 正負印加電圧極性に対する粒子低減率の変化

Fig.5 Particle reduction efficiencies with positive or negative applied voltage polarity.

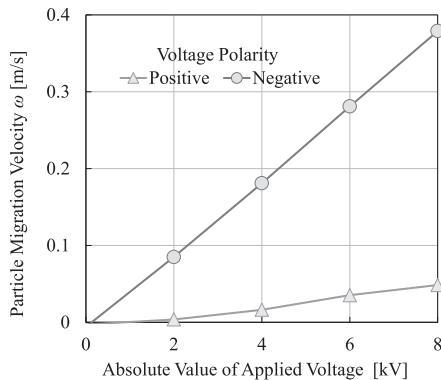


図6 正負印加電圧に対する粒子移動速度 $\omega$ の違い

Fig.6 Particle migration velocities with positive or negative applied voltage polarity.

が高い、つまり粒子移動速度も高くなり、低下した電極面積比にして高い粒子低減率が得られたと考えられる。ただし、この考察においては、電界やガス流れ、粒子の分布は考慮されていない(次節のような操作をしなくても)。円筒中心部のガス流れが速く、多くの粒子が通過していた可能性もある。

### 3.2 気流の効果

ここでは、図4で示した集塵部構造で不均一な気流が与える効果について検討した。粒子低減率を図7に示す。ここで粒子低減率は式(1)を用いた。印加電圧0 kV、副流流量2.5 L/min 時に異なる傾向の点があるが、全体的な傾向として、副流流量の増加に対し粒子低減率は増加した。0 kV印加時に副流流量2.5 L/minにおいて、粒子低減率が向上しているが、これは副流へのダクト部分に帶電粒子が付着することで見かけ上粒子低減率が向上しているものと考えられる。さらに吸引したガスは十分に粒子濃度が低いことから電気集塵装置下流に戻すことも考え、次式により粒子低減率 $\eta_a$ を算出した。ただし、パーティクルカウンタは2台しかなかったため、入れ換えて測定した。流量は変わらないが流入粒子濃度に差が生じたため、 $N'$ とした。ただし式中において、上流側粒子濃度により規格化される。

$$\eta_a = \left\{ \left( 1 - \frac{Q_{\text{out}} N_{\text{out}}}{Q_{\text{in}} N_{\text{in}}} \right) - \frac{Q_{\text{sub}} N'_{\text{sub}}}{Q_{\text{in}} N'_{\text{in}}} \right\} \times 100 [\%] \quad (4)$$

式(4)を用いた、副流流量に対する粒子低減率の変化を図8に示す。ガス流量の増加とともに粒子低減率は増加した。副流流量5 L/minを境に、粒子低減率は飽和する傾向が見られた。つまり副流流量0~5 L/minの間においては、電極近傍に沿う流れにより粒子低減率は増加した。さらに高い副流流量10 L/min以上では、電極へ捕集される粒子の量は変わらないと考えられる。

### 3.3 粒子捕集プロセスの確認

吸引有無に対する粒子捕集の違いを検討するため、電極

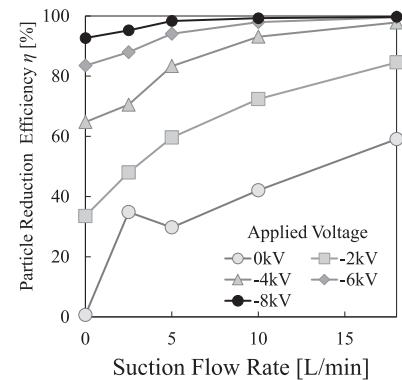


図7 副流流量に対する粒子低減率 $\eta$ の変化

Fig.7 Particle reduction efficiency  $\eta$  as a function of suction flow rate.

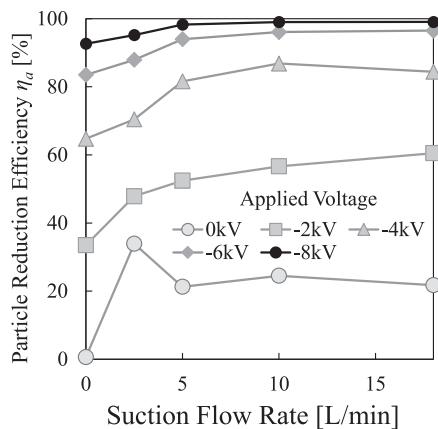


図8 副流流量に対する粒子低減率  $\eta_a$  の変化  
Fig.8 Particle reduction efficiency  $\eta_a$  as a function of suction flow rate.

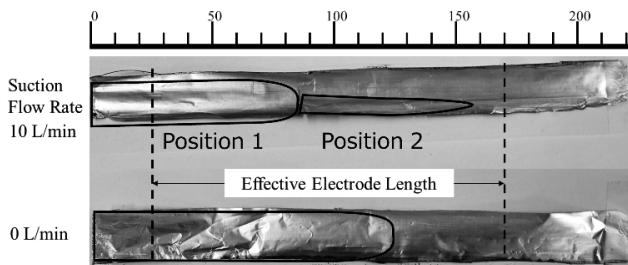


図9 2時間稼働後の電極表面写真  
Fig.9 Electrode surface images after 2 hours operation.

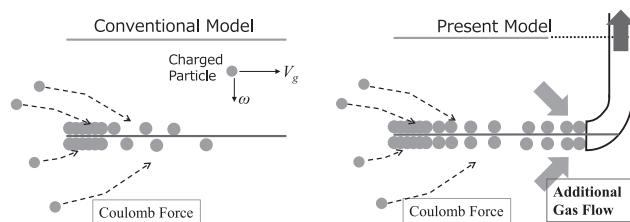


図10 集塵部における帶電粒子捕集モデル  
Fig.10 Model for collecting charged particles in the removal section.

上の粒子捕集位置について観察した。中心電極表面に導電性グリスを塗布し、厚さ 11  $\mu\text{m}$  のアルミニウム箔を貼り付けた。中心電極に -8 kV を印加し、2 時間稼働した。副流流量は 0 L/min と 10 L/min とした。電極表面写真を図 9 に示す。上が副流流量 10 L/min、下が副流 0 L/min 時であり、左が上流側である。実験時の粒子濃度に差があり、また金属光沢があるため、色合いの濃さについては言及せず、捕集位置について考察した。副流流量 0 L/min の場合、電極先端から 120 mm まで、粒子捕集が見られた。一方、副流流量 10 L/min の場合では、80 mm 付近により下流に電極片側だけ多く付着している領域 (Position2) が見られた。

上記について考察する。考えられる粒子捕集モデルを図 10 に示す。静電気力が一様に生じる場合、上流端が最も粒子濃度が高い。そのため上流端から粒子が多くつき、下

流にいくに従い電極上の捕集粒子数は低下する<sup>9)</sup>。そこで局所的な吸引を設けた本構造においては、中心電極へ流れがある構造では、下流側に部分的に粒子が捕集された形跡が生じたと考えた。

#### 4. おわりに

二段式電気集塵装置の集塵部について、検討を行った。具体的には、非対称の電極構成において、電界強度の高い領域に優先的にガスを通することで粒子低減率の向上を試みた。非対称の電極構成であることから、電界強度の高い領域を使うと、電極面積は低減する。そのため粒子低減率は低下した。ただし面積比を考えるとその以下の幅は小さいものであった。一方、粒子捕集電極近傍のガス流れを大きくし、時間当たりの通過粒子数を増加させることで粒子低減率は向上した。副流流量が 5 L/min、すなわち全流量の 13.5% 程度の吸引で十分な効果が得られた。

本研究において不足している点として、円筒電極に粒子を捕集しつつ吸引を行うと粒子低減率はどのように変化するか確認することや、強制排気をせず、気流の変化だけでも性能向上につながるか確認する。また局所排気する口径や電極構成の与える影響についての理論的な考察も進める。また本実験における処理流速 0.3 m/s と非常に遅いため、層流を維持しつつ高流速化への対応も考える。

#### 参考文献

- 1) 静電気学会：静電気ハンドブック, pp.506-507, オーム社 (1980)
- 2) 森下悦生：Excel で学ぶ流体力学, pp.30-36, 丸善 (2000)
- 3) Harry J. White: Industrial Electrostatic Precipitation, pp. 169-173, Addison-Wesley Pub., America (1963)
- 4) 佐々木秀次, 古堅宗勝, 牧野 義, 塚本達郎：静電サイクロン方式 DPF による船用ディーゼル機関の排気エミッション低減. Journal of the JIME, **51** [3] (2016) 294-299
- 5) 佐々木秀次, 塚本達郎, 近藤啓明, 廣瀬 優：静電集塵技術を用いた船用ディーゼル排ガスの PM 低減. Journal of the JIME, **57** [3] (2022) 298-304
- 6) 五十嵐駿亮, 川田吉弘：流速分布と不平等電界を利用した電気集塵装置の評価. 静電気学会講演論文集 2024, pp.59-62, 北九州, 日本 (2024)
- 7) 五十嵐駿亮, 川田吉弘：気流と静電気力を用いた電気集塵装置の実現可能性—吸引流量が粒子通過に及ぼす影響—. 静電気学会誌, **48** [4] (2024) 149-154
- 8) S. Igarashi and Y. Kawada: Effect of Applied Voltage on an Electrostatic Precipitator with Airflow and Electrostatic Force. International Journal of Plasma Environmental Science and Technology, **19** [2] (2025) e02009 (9pp)
- 9) 川田吉弘, 瑞慶覧章朝, 河野良宏, 安本浩二, 加藤慎太郎, 江原由泰, 高橋武男, 伊藤泰郎：電気集じん機における稼働時間に対する集じん部電極上捕集粒子状態の変化. 電気学会論文誌 A, **124** [11] (2004) 939-944