

気流と静電気力を組み合わせ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 -

五十嵐 駿亮*, 川田 吉弘*¹

(2024年2月29日受付; 2024年5月23日受理)

Feasibility Study of Electrostatic Precipitator with Electrostatics and Flow Separation

- Effect of Suction Flow-rate on Particle Penetration -

Shunsuke IGARASHI* and Yoshihiro KAWADA*¹

(Received February 29, 2024; Accepted May 23, 2024)

It is important to design for an electrostatic precipitator the relationship between electric-field and gas-flow distributions. In collecting section of an electrostatic precipitator, gas-flow is against to the migration of collecting charged particles. Further, particle re-entrainment phenomena are caused with gas-flow. An aim of this study, for the electrostatic precipitation, collection electrode without collected particles are designed. Therefore, the collected particles are cleaned without stopping the system. This present version electrostatic precipitator is consisted of precharger and particle removal section. A positive corona discharge was used as precharger for particle charging. The particle density near the high voltage electrode is increased with electric field in particle removal section. This high particle density gas is suctioned with induced pump, and then exhaust. Particle number density of main flow is decreased, the cleaned gas exhausted though passed through this system. In this paper, it is tested the suction flow-rate in particle removal section. A positive corona discharge was used as precharger for particle charging. It was assumed that the particle density near the high voltage electrode is increased with electric field in particle removal section. It is thought that if this gas-flow of high particle density is suctioned with induced pump, in main flow, particle number density will be decreased and then the cleaned gas will exhaust. Actually, the collection efficiency was increased with increased suction flow-rate. However, the particle concentration in the suction gas was very low.

1. はじめに

電気集塵装置ではコロナ放電による帯電、静電界による集塵のシンプルな機能により、通過する浮遊粒子を低減できる。電極間距離が広ければ圧力損失も低く、装置の大きさに対し大容量のガスを処理することができる。そのため一般家庭の空気清浄機から、道路トンネルなど換気・周辺環境対策用の浄化装置、産業用ボイラの煙道ガスを対象とした浄化装置など幅広く使用されている¹⁾。

電気集塵装置は、帯電した粒子を集塵電極表面に付着させることで、浮遊粒子を集める。つまり稼働を続けると電極表面に粒子が堆積する。ある程度稼働したところで、電極の洗浄が必要となる。道路トンネル用の電気集塵装置では、圧縮空気や水による洗浄が²⁾、ボイラで使用される電気集塵装置では、槌打ちによる捕集粒子の剥離³⁾、移動電極ブラシによる捕集粒子除去⁴⁾が用いられている。また放電

の衝撃で粒子を剥離する研究なども行われていた⁵⁾。ただし、いずれも電極を洗浄するには装置をいったん停止する必要がある、その際には流路の切り替えや運用を停止する。また洗浄のための補機も必要となる。例えば水洗浄では、汚水から固定分を抽出するための装置などが設置される。

本研究では、静電界と気流を組み合わせた装置を考えた。他の研究例としては、電気集塵装置で凝集・飛散した粒子をサイクロンで分離除去するシステム⁶⁾、船用ディーゼルエンジンの排ガスにおける粒子状物質のサンプリングを目的とした装置⁷⁾、ホール型電気集塵装置⁸⁾等がある。本研究では粒子を電極上に捕集するのではなく粒子を連続的に分離・排出することで、電極浄化のための停止時間を減らすことが目的である。前述した従来の電気集塵装置の洗浄方法と比較し、よりシンプルな粒子除去機構を持つものとした。

本論文では二段式電気集塵装置とし、かつ集塵部にあたる場所を除塵部とした。除塵部は、接地した円筒の中心に高電圧電極を配置し、帯電粒子を中心電極近傍に集めた。中心電極近傍のガスを害のないところに放出する、もしくは高粒子濃度、低ガス流量化によりフィルタ処理が容易となるはずであった。本研究において、吸引ガス（以降、副流と表記する）中の粒子濃度は高濃度とならず、一方ガス吸引流量の増加に対し、粒子低減率は向上した。この実験

キーワード：電気集塵, コロナ放電, 集塵電極, 不平等電界

* 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)

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

¹ kawada@uieac.jp

DOI : <https://doi.org/10.34342/iesj.2024.48.4.149>

結果と考察を報告する。

2. 実験方法及び装置概略

2.1 実験装置概略

実験装置概略図を図1に示す。線香（日本香堂 太陽 無香性 備長炭 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、除塵部を通過後、下流にプロアファンを設け系外へ排出させた。一方除塵部中央からはニードルバルブ付き流量センサ（CKD, FSM3）を通過後、ポンプ（安永エアポンプ YP-30VC, 40W）によりガスを排出した。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。式(1)による粒子低減率を用いて、装置を評価した。下流における粒径範囲 0.3-5.0 μm の粒子において濃度安定後、10分間の総粒子数とその時の流量との積を用いて低減率を算出した。

粒子低減率 $\eta =$

$$\left(1 - \frac{\text{流出粒子個数濃度} \times \text{流出流量}}{\text{流入粒子個数濃度} \times \text{流入流量}}\right) \times 100[\%] \quad (1)$$

副流中粒子濃度を測定する場合は、除塵部中央から流量計の間にポリカーボネート製容器（アズワン ガス洗浄瓶, 500 ml）を設け、容器内のガスを 0.5 L/min で吸引し、パーティクルカウンタにより粒子個数濃度を測定した。これを副流に含まれる粒子濃度とした。除塵部に流入する粒子濃度に対する副流に含まれる粒子濃度の比を、粒子濃度比として式(2)に示す。この実験では副流後方の流量計を操作し、副流全体の流量は 2 L/min, もしくは 10 L/min にした。実験に用いた処理対象ガスの粒子濃度分布を表1に示す。粒径 0.3-0.5 μm において線香煤煙により粒子数は室内大気の十倍にした。粒子数に変動はあるものの、1 Lあたりの粒子個数濃度 30万個を目標に調節し実験を行った。

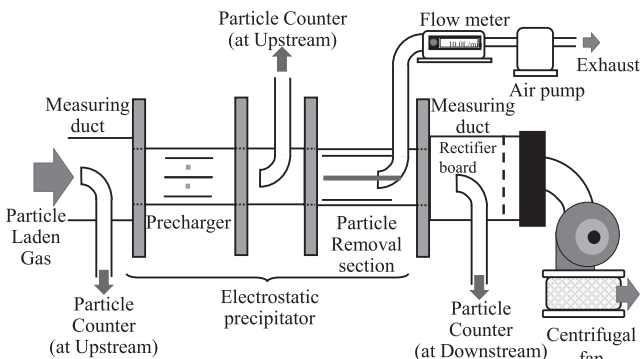


図1 実験装置概略図
Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

表1 対象ガスの粒子濃度分布
Table.1 Particle size distribution in room and target gases.

	Particle concentration [parts/L]		
	0.3-0.5 μm	0.5-1.0 μm	1.0-5.0 μm
Indoor gas	31791	3063	259
Target gas	334740	3519	283

$$\text{粒子濃度比} = \frac{\text{副流中粒子濃度}}{\text{除塵部流入粒子濃度}} \times 100 [\%] \quad (2)$$

2.2 電極構造

本電気集塵装置は帯電部と除塵部からなる。帯電部一辺 50 mm の正方形ダクト、除塵部は内径 50 mm の円筒ダクトである。粒子は正極性に帯電したのち、負極性に印加された電極に引き付けられることを想定している。

帯電部の電極構造を図2に示す。ワイヤ平板構造とし、接地平板間 25 mm の中央に、高電圧線電極（ステンレス製 φ0.28 mm）を配置し、正極性直流高電圧を印加することにより、正コロナ放電を発生させた。

除塵部の電極構造を図3に示す。円筒中心は直径 6 mm の真鍮製ロッド電極とし、負極性直流高電圧を印加した。

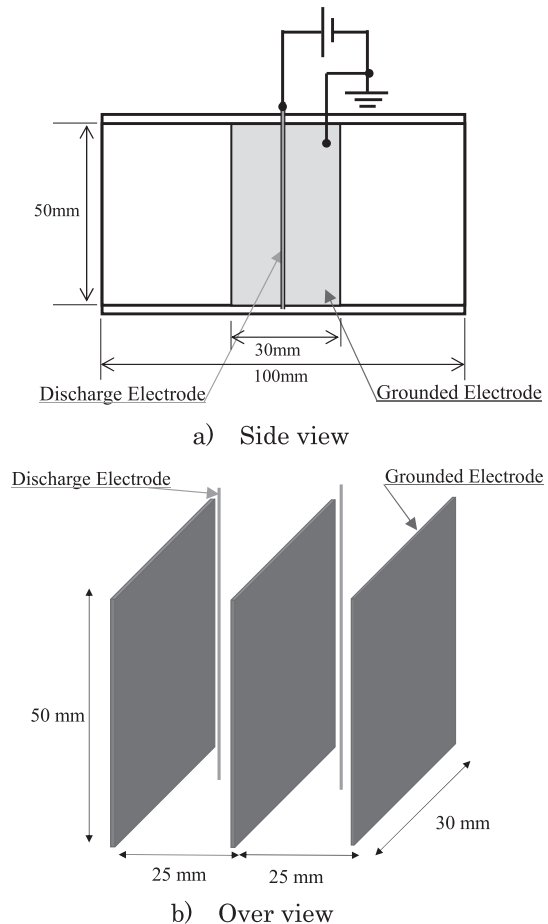


図2 帯電部電極構造概略
Fig.2 Electrode structure of precharger.

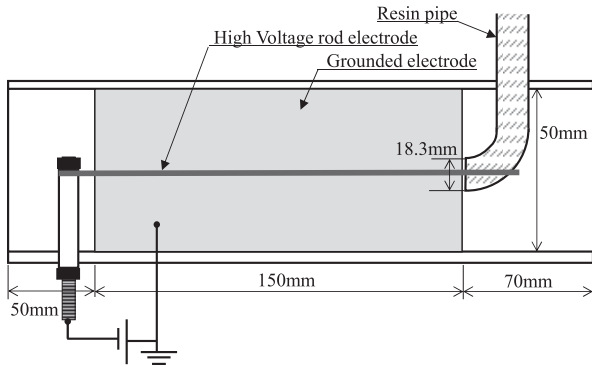


図3 除塵部電極構造概略
Fig.3 Electrode structure of removal section.

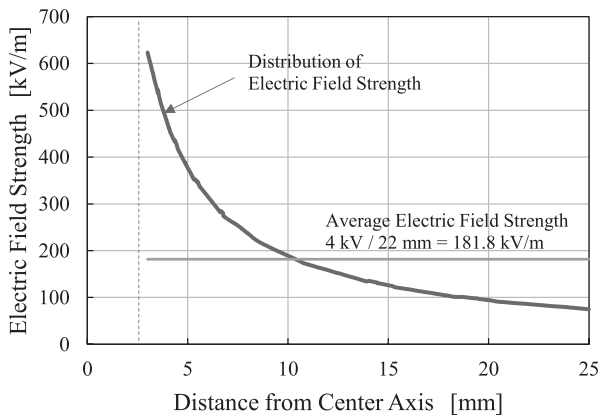


図4 数値計算による電界強度の分布と平均電界強度
Fig.4 Distribution of Electric Field Strength and Average Electric Field Strength (with numerical calculation).

ダクト円筒内部に貼った接地電極との間に生じる静電界により、ダクト中心付近に帯電粒子を集めた。中心電極に -4 kVを印加した場合における半径方向の電界分布(数値計算結果)を図4に示す。円筒内面にある接地電極近傍では電界が弱く帯電粒子に働くクーロン力も小さいが、中心電極近傍では電界が強くなりクーロン力も大きい。下流側には内径 18.3 mmの塩ビ製ダクト(厚さ 2.8 mm)を設け、そこからガスを吸引した。またそれ以外の部分を通じたガス(以降、主流と表記する)は下流の測定ダクトを通過し、ブローファンにより排出した。副流の吸引流量を増やすと、それに伴い内部流速も上昇する。副流吸引流量の調節時はブローファンの吸引量も調節し、除塵部入口の平均流速を 0.5 m/sとした。除塵部内のレイノルズ数は文献9)より 1653 と算出される。また、後述する除塵部の塩ビ製ダクトからの吸引実験における、ダクト入口のレイノルズ数は、 2 L/min吸引時に 157 、 5 L/min吸引時に 399 、 10 L/min吸引時に 786 、 13 L/min吸引時に 1028 である。いずれも内部は層流であると考えられる。しかし除塵部において吸引を行い、主流と副流の流速に差が生じることから、局所的に乱流であると考えられる。

3. 実験結果および検討

3.1 帯電部諸特性

今回使用した帯電部の放電電流の印加電圧特性を図5に示す。計算上の放電開始電圧は 6.4 kV¹⁰⁾、実測の放電開始電圧は 7.5 kVであった。帯電部における粒子低減率特性を図6に示す。下流の除塵部を評価するため、帯電部は安定した帯電量、粒子数で、粒子を通過させる必要がある。よって、帯電部印加電圧 8.5 kVを3.2節以降の実験において使用した。印加電圧 8.5 kV、放電電流 0.03 mA時、帯電部における粒子低減率の時間変化を図7に示す。粒径範囲 0.3 - 5.0 μm の粒子により粒子低減率を算出した。装置稼働20分から低減率が安定した。このことより、3.2節以降の実験では、装置稼働後20分から測定を始めた。帯電部、除塵部ともに実験終了時に電極を清掃し、実験ごとに電極の状態に大きな差異がないようにした。

3.2 帯電部+除塵部の粒子低減効果

帯電部と除塵部、装置全体を通過した際の粒子低減率について検討する。除塵部印加電圧をa) 0 kV、b) -4 kV、c) -8 kVとした場合における、粒子低減率の吸引流量特性を図8に示す。以降、百分率の増減を「-ポイント」で示す。吸引流量は、除塵部中央付近から吸引したガスの流量を示す。除塵部印加電圧 0 kVにおける粒子低減率が図6の電部印加電圧 -8.5 kVより低い値である理由は、本実験における粒子濃度が3割程度、低かったためと考えられる。

除塵部印加電圧が 0 kVにおいては、吸引流量を増加させても粒子低減率は一定であった。一方、除塵部印加電圧 -4 kV、 -8 kVにおいては、吸引流量の増加に対し、僅かではあるが粒子低減率は増加した。吸引流量を 0 L/minから 13 L/minまで増加させた際に、除塵部印加電圧 -4 kV印加時では 8.0 ポイント、除塵部印加電圧 -8 kV印加時では 5.4 ポイント、粒子低減率は増加した。

上記現象は、帯電粒子がクーロン力によりダクト中央部の電極に引き付けられ、電極に捕集、もしくは吸引ポンプにより排出されたと考えられる。ただしこの結果では帯電部における粒子低減効果を含む。吸引の効果を確認するため、除塵部通過前後における粒子濃度変化を、次節3.3で評価した。

3.3 除塵部における粒子低減効果

除塵部を通過した際の粒子低減率について検討する。塵部印加電圧をa) 0 kV、b) -4 kV、c) -8 kVとした場合における、除塵部における粒子低減率の吸引流量特性を図9に示す。除塵部印加電圧 0 kVにおける粒子低減率は負の値であった。これは、パーティクルカウンタの粒径範囲は粒径 0.3 μm 以上であり、それ以下の粒子が帯電部で帯電し、かつ除塵部の壁面等で凝集、飛散したためと考えた。これを踏まえ

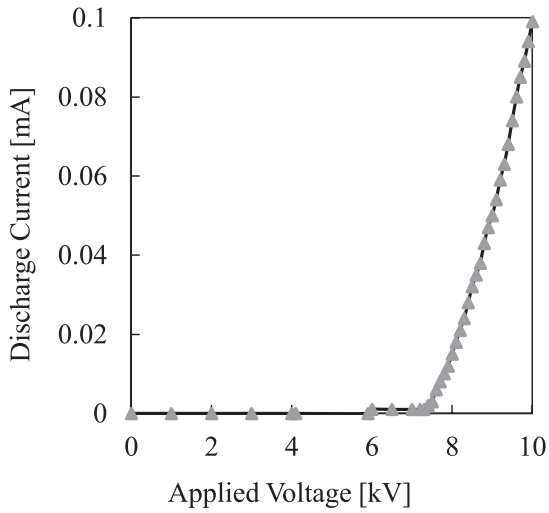
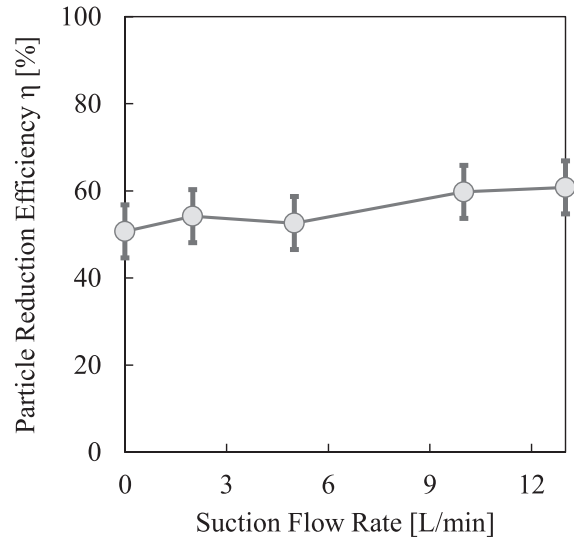


図5 帯電部放電電流特性
Fig.5 Discharge current as a function of applied voltage in precharger.



a) Applied voltage at removal section 0 kV

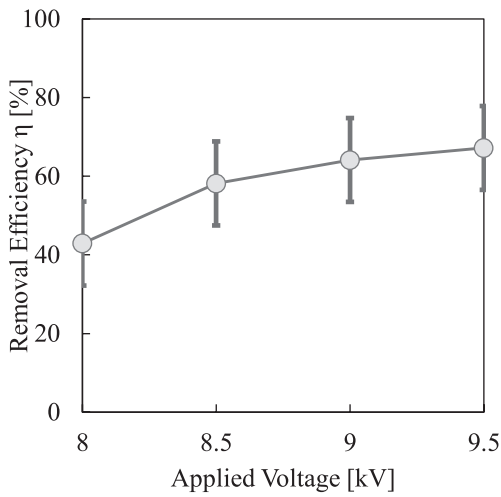
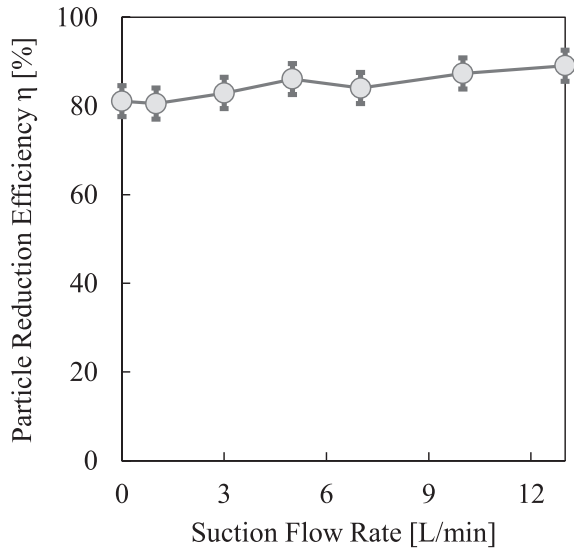


図6 帯電部粒子低減特性
Fig.6 Particle collection efficiency as a function of applied voltage in precharger.



b) Applied voltage at removal section -4 kV

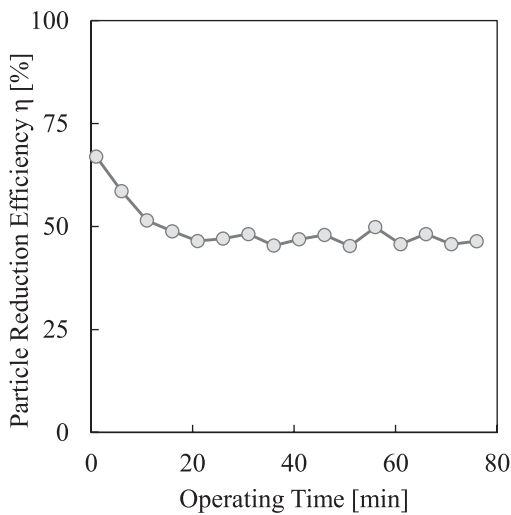
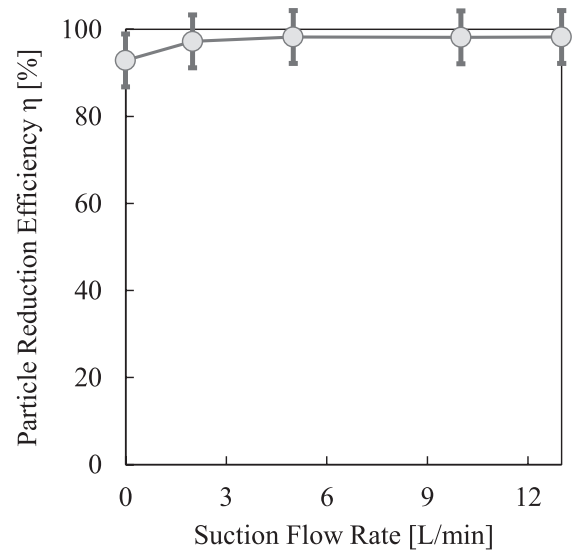
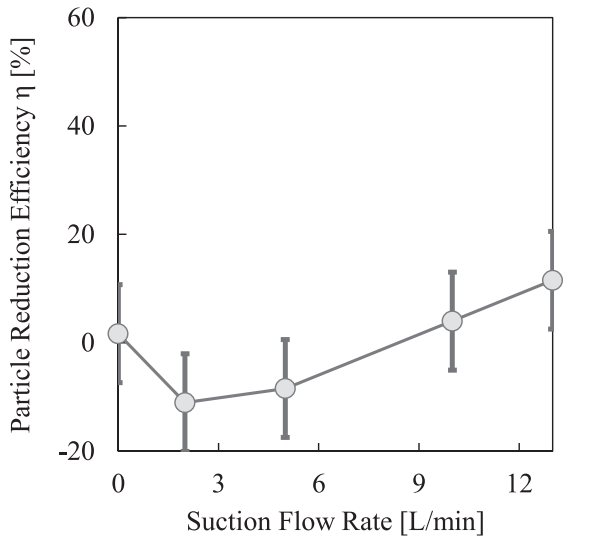


図7 帯電部粒子低減率の稼働時間特性
Fig.7 Time dependency of particle collection in precharger.

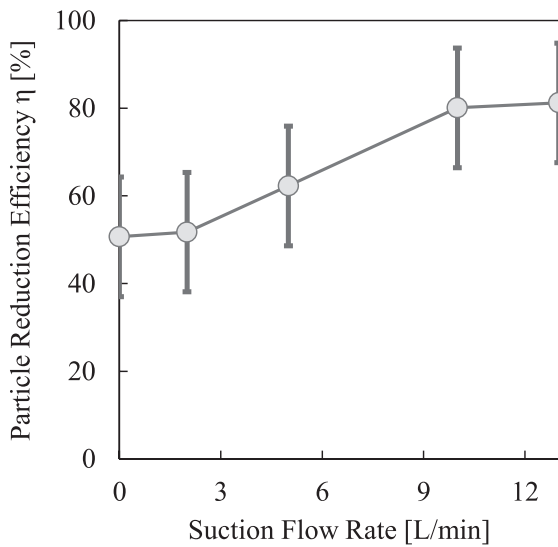


c) Applied voltage at removal section -8 kV

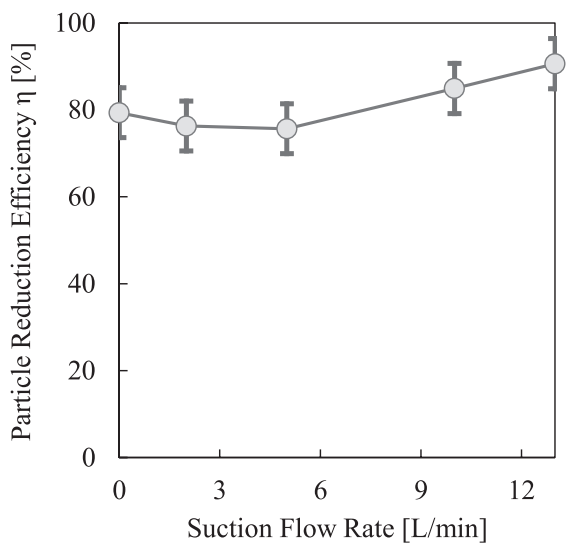
図8 装置通過時における粒子低減率の吸引流量特性
Fig.8 Particle reduction efficiencies as a function of suction flow rate.



a) Applied voltage at removal section 0 kV



b) Applied voltage at removal section -4 kV



c) Applied voltage at removal section -8 kV

図9 除塵部における粒子低減率の吸引流量特性
Fig.9 Particle reduction efficiencies as a function of suction flow rate.

でも、傾向として、除塵部印加電圧 0 kV では、除塵部通過に際し、吸引流量を増加させても粒子低減率は向上しない。

一方、吸引流量 0 L/min において、除塵部印加電圧 -4 kV を印加することで 50%、-8 kV を印加することで 80% 程度の粒子低減率を得ることができた。吸引流量を 0 から 13 L/min まで増加することにより、除塵部印加電圧 -4 kV 時は 30 ポイント、-8 kV 印加時は 11 ポイント、粒子低減率の向上がみられた。3.2 節と同じ傾向であり、かつ粒子吸引による効果が明確となった。中心電極はロッド電極で表面積は小さいが、中心電極へ捕集される粒子もあると予測される。捕集される粒子と、吸引される粒子を検討するため副流中の粒子濃度を、次節 3.4 で評価した。また 10 L/min 吸引以上の領域では、-4 kV 印加と -8 kV 印加で粒子低減率に大きな違いはなく、また電圧の大きさに対し粒子低減率が逆転する結果も得られている。更なる実験及び検討を今後行う。

3.4 副流中の粒子濃度

副流中の粒子濃度について検討する。各帯電部印加電圧、除塵部印加電圧条件に対する、吸引流量 2 L/min と 10 L/min における粒子濃度比を図 10 に示す。副流に含まれる粒子濃度の測定においては、ポリカーボネート製容器内は水平等速吸引ではなく、また容器内壁への付着も考えられる。帯電部印加電圧 0 kV、除塵部印加電圧 0kV の場合、除塵部流入ガス中粒子濃度と副流中粒子濃度が同程度ならば、式(2)は 100% に近い値となる。吸引流量 10 L/min ではほぼ 100% であったが、吸引流量が低い 2 L/min では 83% 程度であった。さらに帯電部だけに電圧印加した場合、帯電粒子が付着する影響が考えられる。粒子濃度比は低下した。さらに除塵部にも電圧を印加した場合においては、副流中の粒子濃度はさらに低い値となった。上述より次のことが仮定できる。吸引流量により粒子が受ける影響のイメージを図 11 に示す。帯電粒子は電極へ捕集されることから、

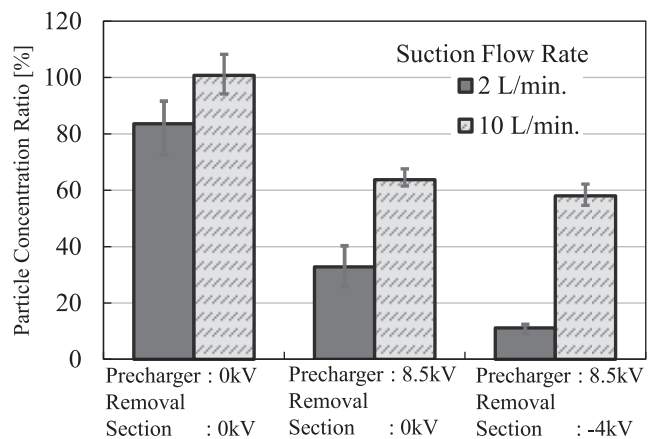


図 10 電圧印加条件、吸引流量に対する粒子濃度比
Fig.10 Particle concentration ratio as a function of voltage applied conditions and suction gas-flow rate.

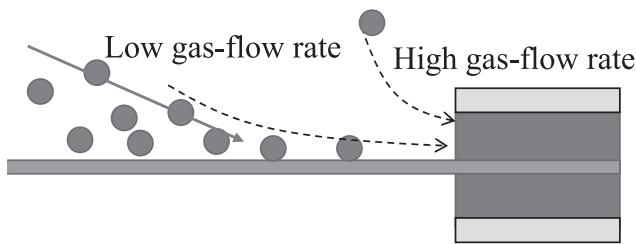


図11 吸引流量により粒子が受ける影響のイメージ
Fig.11 Image of the effect of suction flow on particles

高電圧印加電極周辺の粒子濃度は低い。そのため粒子濃度が低く、浄化されたガスを吸引している。吸引流量を上げ、高電圧電極近傍だけでなく電極間中央付近の粒子も吸引したことにより、粒子低減率は向上したと考えられる。ところで除塵部の平均流速を 0.5 m/s としたことから、開口部の断面（吸引ダクト（エルボ）内径 18.3 mm、高電圧電極 $\Phi 6$ mm を考慮）は、吸引流量 7.04 L/min 時に水平等速吸引となる。また吸引ダクト外径 24 mm の断面（高電圧電極を考慮）を吸引する場合は、吸引流量 12.7 L/min が等速の条件となる。つまり吸引流量 10 L/min 時は、ほぼ吸引ダクトと同程度の断面積をほぼ等速で吸引した条件である。吸引流量 10 L/min においても、流れを乱さず電極周辺のガスを吸引したと考えられる。

図 9-b) では、吸引することで粒子低減率が増加した。図 9-b) と図 10 とを相応して比較した場合、吸引流量 2 L/min 時では主流における下流粒子濃度より副流中の粒子濃度は低い値に、吸引流量 10 L/min 時では高い値になった。つまり吸引流量 2 L/min 時は除塵電極に粒子は捕集され、浄化されたガスを吸引していた、吸引流量 10 L/min 時は粒子濃度が高いガスを吸引していた。このことから、図 9-b) において除塵率は向上したと考えられる。ただし本考察では、副流中の粒子濃度と除塵部通過後の粒子濃度の同時測定はできておらず、また帯電粒子の管路等への付着の影響もあると考えられる。

副流中の粒子濃度を高くすることで、更なる吸引の効果を発揮できると考えられる。そこで吸引流量の増加に加え、副流中粒子濃度が高濃度になる条件について今後検討する。具体的には①有効電極長を短くする、②印加電圧を下げて評価する予定である。

4. おわりに

電気集塵装置における集塵電極近傍のガスを吸引することにより、集塵電極の洗浄を不要とした装置の検討を行っ

た。本報では、帯電部と除塵部から装置を組み、除塵部は同軸円筒型とした。高電圧印加電極近傍であるダクト中央部付近の帯電粒子濃度を高め、その中央部付近のガスを吸引することで空気浄化の高性能化を目指した。

除塵部は印加電圧 0 kV では通過粒子濃度に変化はなかった。これは電界のない条件で電極近傍のガスを吸引しても粒子濃度に変化はないことを示す。除塵部の印加電圧を -4 kV もしくは -8 kV とすることで粒子が捕集され、さらに高電圧電極近傍のガスの吸引流量（副流）を増加させることで、粒子低減率は向上した。また吸引流量の増加に対し、副流中の粒子濃度も増加した。

今後は集塵されたい条件における検討を進める。本稿で対象としたタール状粒子ではなく、捕集粒子が再飛散現象を起こす、低電気抵抗粒子の捕集に効果を発揮する可能性があり、実験を考える。

参考文献

- 1) 静電気学会：静電気ハンドブック上巻, p.66 (1998)
- 2) 例えば、電気集塵カタログ、トンネル環境浄化システム、パナソニック環境エンジニアリング株式会社、2019年10月刊行
- 3) Harry.J.White : Industrial Electrostatic Precipitation, p.346 (1963)
- 4) 三坂俊明：日立における電気集塵の技術史. 静電気学会誌, **34** [2] (2010) 65
- 5) J.S. Chang, K. Urashima, S. Kosaric, and R. Kanipayar: Electrical characteristics of pulsed arc electrohydraulic discharge electrostatic precipitator dust rapping/electrode cleaning system. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (2002) 224
- 6) 諫早典夫：静電凝集 - 遠心集塵方式 (PC-MC) の開発研究. 日立論評, **49** [11] (1974) 77
- 7) 塚本達郎, 佐々木秀次, 工藤康平：ディーゼル排ガスの静電集塵プロセスに関する研究 - 船用ディーゼル機関の粒子状物質の状態と電気抵抗率. 日本マリンエンジニアリング学会誌, **55** [5] (2020) 651
- 8) 宮下皓高, 江原由泰：ホール型電気集塵装置におけるイオン風と粒子挙動の解析. 静電気学会誌, **43** [1] (2019) 31
- 9) ウィリアム C ハイน์ズ：エアロゾルテクノロジー, 株式会社井上書院, p.23 (1985)
- 10) 静電気学会：静電気ハンドブック, p.486 (1981)