

電気集塵装置のモデル構築と考察（その 1） —放電・帯電・集塵モデルの検討—

Study for Numerical Model for Electrostatic Precipitator (Part I) - Electrical Discharge, Particle Charge and Collection Model -

川田 吉弘, 瑞慶覧 章朝, 清水 洋隆

Yoshihiro Kawada, Akinori Zukeran and Hirotaka Shimizu

Electric precipitators have used widely for industrial use. Some designs are built around empirical formulas from some experimental results of past researchers, and there is enough data to calculate the discharge current, charging, and dust collection processes. In this study, we made an electric precipitator on a desk and operated it on numerical calculation software, and examined whether the performance could be evaluated. The performance evaluation for transient operation will be discussed in the next report. In this report, while comparing the calculation process and the problems of the electrostatic precipitator, it was compared with the experimental results. The numerical calculation software used MATLAB / Simulink, however it is also possible to use Excel to perform with steady-state operation.

Keywords: Electrostatic Precipitator, Corona Discharge, Particle Collection, Numerical Model

1. はじめに

電気集塵装置は、原理が発明されてから 100 年以上の歴史を持つ。その間に、様々な大気環境汚染に対し適用され、進化を遂げてきた。

1970 年代の日本、高度経済成長期においては、工場や発電所からは黒や茶色、灰色といった煙が排出され、工業地帯の空は曇った状態であった。これらに対し電気集塵装置が適用されて、周辺大気は改善された。現在の工場から排出される煙は、水蒸気が白く見えることが多い。石炭火力発電やセメント工場では、電気抵抗が高いダストに対応した進化を遂げ、また硫酸ミストなどには電極を樹脂に変えるなどで進化している。一方、道路トンネルの地下化や長尺トンネルに対しては、道路トンネル用電気集塵装置が用いられている。こちらはディーゼル排出ガス中の微粒子が対象粒子の主成分であり、炭素粒子、つまり低電気抵抗粒子が対象となっている。また対象とするガスは、装置容積に対し非常に大きい。そこで、2 段式電気集塵装置を用いることや、水洗浄による電極浄化などが技術として用いられている[1-3]。

上述の産業応用だけでなく、家庭用エアコンディショナに対しても、PM2.5 など微小粒子を高い効率で捕集できることなどを理由に、電気集塵装置は用いられている。不織布など繊維フィルタ式に比べ、電気集塵装置は通気抵抗が小さいことからファンの動力が抑えられ、かつ大

空間を浄化できる。また浮遊粒子を帯電し捕集するといったプロセスから微小粒径粒子の低減に秀でている。粒子が粗大化し、人の目に見えるサイズになって出てくることなど、不織布フィルタでは起きない問題もあるが、人体に影響を与える PM2.5 等の微小浮遊粒子の除去には効果的であり広く利用されている[4]。

本研究では、家庭用電気集塵装置を対象に、空気浄化を理論式や実験式をもとにモデルを構築し、シミュレーションを行った。模擬的な空間に対し適用した場合における空気の浄化効果、オゾン濃度や消費電力を評価することを目的とした。これまでに歴史のある電気集塵装置では、数多くの研究や書籍、解説記事がある[5-9]。コロナ放電の電圧電流特性、粒子の帯電、帯電粒子の移動と集塵、流速に対するファン電力やオゾン発生など相互に作用する内容をまとめ、一つのモデルを構築し評価した。モデルは MATLAB/Simulink 上で作成した。なお第 3 章までは、Excel を使っても算出することができる。さらにオープンソースの数値計算ソフト Scilab・Xcos などにも置き換えることができ、これらのモデルは製作実習などにも応用ができる。

2. 電気集塵装置モデルと実験装置

2.1. 電気集塵装置概略

電気集塵装置の電極構成を図 1 に示す[10-11]。本装置

はモデル上で作ると同時に、実際の実験装置を作り、結果比較にも使用した。二段式電気集塵装置として、帯電部と集塵部から構成される。帯電部は、通過する粒子を帯電させることを目的としているが、クーロン力により集塵もなされる。2枚の接地平板電極（ステンレス製 0.1mm厚）を16mm間隔で平行に配置し、中央に高電圧印加線電極（ステンレス製、直径0.28mm）を配置した。集塵部は、帯電部で集塵した粒子をクーロン力により捕集することを目的としている。3枚の平板電極（ステンレス製、厚さ0.3mm）を平板間7.5mmとなるよう配置した。中央の平板電極には、直流正極性の高電圧を印加し、それ以外の平板電極は接地電極とした。

電気集塵装置のモデルを図2に示す。実際の実験装置においては、ファン（山洋電気製 San Ace 80, 9GA0824P1S61 低消費電力ファン）を電気集塵装置後方に配置し、吸引した。ただし、整風板としてパンチングメタル板（φ3, 5P, 開口率32.6%, 厚さ1mmのアルミニウム板）を集塵部とファンの間に配置したため、最適化をすれば圧力損失は低減できると考えられる。

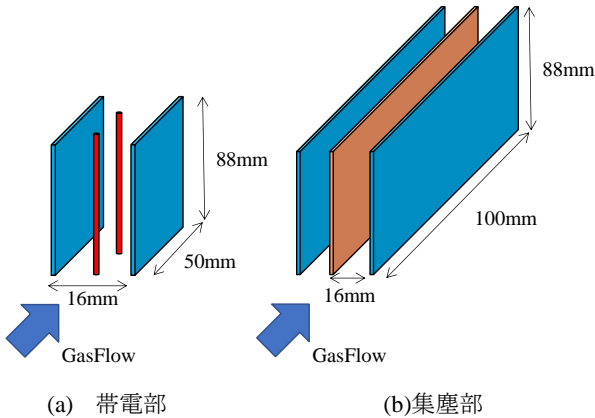


図1 電気集塵装置の電極構成

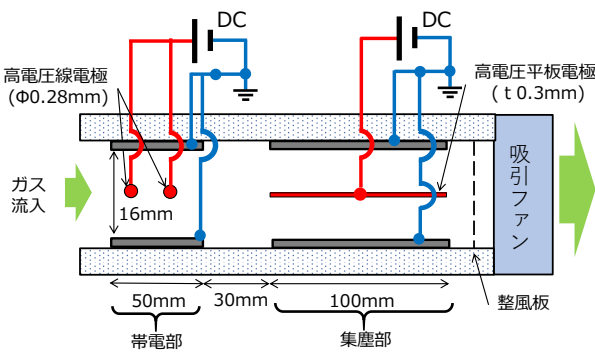


図2 電気集塵装置概略図

2.2. 実験装置概略

実験装置の概略図を図3に示す[10-11]. 灯油ランプの燃焼によって炭素粒子を発生させた。炭素粒子を含んだ空気は、ダクトを通してボックスA, B, Cの順番で流れた。各ボックスはアクリル製で、一辺500mmの立方体を3つつなげた構造とした。炎の揺らぎにより灯油ランプの炭素粒子発生量に変動があるため、ボックスAにおい

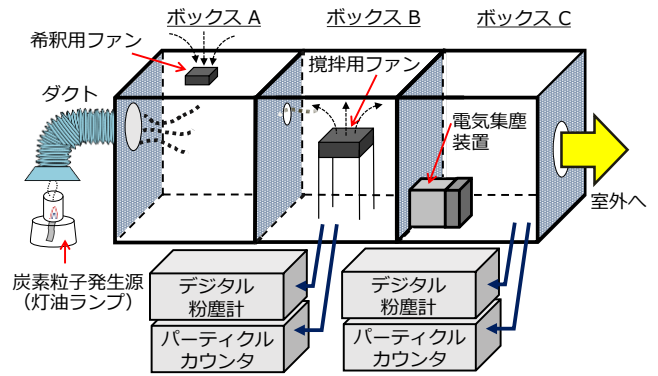


図3 実験装置概略図

て浮遊粒子を含むガスをいったん滞留させた。希釈ファンにより希釈させると同時にボックスBにガスを一定流量で送り出した。ボックスBにおける攪拌用ファンにより、ボックス内の空気の粒子濃度を均等にし、電気集塵装置へ取り込んだ。電気集塵装置にはファンを設け、通過し処理された空気はボックスCに移る、ボックスCから溢れた集塵後の空気は、吸引ファンにより室外へ排出される。粒子濃度はデジタル粉塵計（柴田科学製 LD-5R）とパーティクルカウンタ（RION 製 EC-01E, 稀釈器 KD-01）により計測した。デジタル粉塵計は1m³あたりの粒子質量に比例した値を、パーティクルカウンタは1Lあたりの粒径別の粒子の個数を測定する。集塵前の粒子濃度 N_{in} についてはボックスB内の大気を測定、集塵後の粒子濃度 N_{out} についてはボックスC内の大気を測定した。集塵前の粒子濃度に対する、電極に捕集された粒子濃度の割合として、式(1)より集塵率 η を算出した。

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

3. 数値計算モデルと検討

本モデルについては旧版の静電気ハンドブック [5] を主として参考にしており、さらに文献 [2,6-9] を参考としている。電気集塵のプロセスに沿って、コロナ放電（電流電圧特性）、粒子の帯電（拡散帯電と電界帯電）、帯電粒子の移動と捕集の順で検討した。またこれらのモデルから算出できる放電電流およびガス流速から、オゾン発生量と濃度、放電電力、ファン駆動電力の予測を行えるよう、実験値の2次近似式を参考にモデルを構築した。

3.1. コロナ放電

線電極に高電圧を印加することで、線電極周辺の空気が電離し、コロナ放電が発生する。このコロナ放電の開始電界 E_0 について、正コロナ放電を式(2)に、負コロナ放電を式(3)に示す。本論文では正コロナ放電を用いていることから、 $E_0 = E_{0+}$ とした。

$$E_{0+} = \left(33.7\delta + 0.813 \sqrt{\frac{\delta}{r_0}}\right) \times 10^5 \text{ [V/m]} \quad (2)$$

$$E_{0-} = \left(31.028\delta + 0.954 \sqrt{\frac{\delta}{r_0}} \right) \times 10^5 [\text{V/m}] \quad (3)$$

ここで, r_0 は線電極半径[m], δ :1013[hPa], 25°Cの空気密度を 1 とした場合の相対空気密度であり, p [hPa], 温度が T [K]のときは, 次で示す.

$$\delta = \frac{p}{1013} \times \frac{298}{T} \quad (4)$$

一方, 線電極周辺の電界は式(5)で示されることから, 放電開始電圧 V_0 は算出できる.

$$E_0 = \frac{V_0}{r_0 \ln(R/r_0)} \quad (5)$$

ここで r_0 は線電極半径[m], R は線電極-接地電極間の距離[m]である. ただしこの式は, 円筒の接地電極に対し同軸上に線電極を配置した場合の式からの引用である. 線対平板電極構造においては静電界の遮蔽が不十分となり, 放電開始電圧は上昇することが考えられる.

印加電圧を放電開始電圧以上に印加した場合, 放電電流が流れる. この際の接地平板電極上の放電電流密度は下記で与えられる. b は放電線と接地編板電極との間隔[m]を表す. イオン移動度 μ_i [m²/V・s]は 20°C, 1013hPa の空気中としランジュバンの式を用いて算出した[5].

$$i = \frac{9}{8} \frac{\epsilon_0 \mu_i}{b^3} (V - V_0)^2 \quad [\text{A/m}^2] \quad (6)$$

これにより, 印加電圧, 放電電流特性を得ることができる. この電流密度は接地平板電極上の電流密度を表しており, 接地平板電極の面積をかけることで放電電流を得ることができる.

計算値との比較を図 4 に示す. 放電開始電圧は計算値で 6.1kV であり, 実験値では 6.5kV であった. 一方, 放電電流は, 傾向は似ているものの, 計算値に比べ実験値については 25%程度高い値となった.

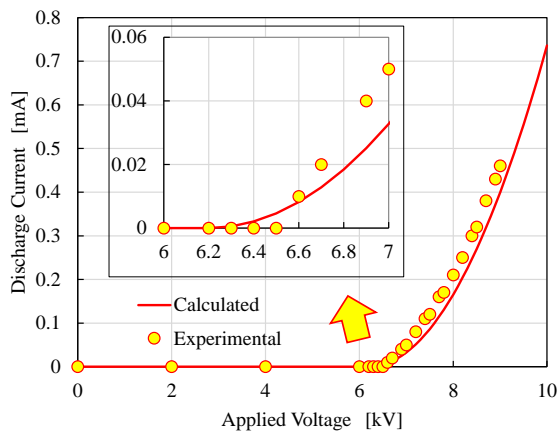


図 4 放電電流の印加電圧特性
(実験値と計算値の比較)

3.2. 粒子の帯電 (拡散帯電, 電界帯電)

粒子の帯電現象においては, イオンが電界より加速し粒子と衝突することで帯電する電界帯電と, イオンが熱運動によって粒子表面に衝突し帯電する拡散帯電がある. 条件にもよるが, 粒径 0.1μm 以下では電界帯電が, それ以上の粒径では拡散帯電が優勢である. 粒子の総帯電量 q は電界帯電による帯電量 q_f と拡散帯電による帯電量 q_{th} の和となる.

$$q = q_f + q_{th} \quad (7)$$

電界帯電 q_f は式(8)により示され, 式(9)の飽和電荷量に対し, 式(10)の荷電時定数により帯電しやすさが決まる. q_∞ は飽和電荷量[C], τ_i は荷電時定数[s]を示す.

$$q_f = q_\infty \frac{t/\tau_i}{1+t/\tau_i} \quad (8)$$

$$q_\infty = 4\pi\epsilon_0 \frac{3\epsilon_0}{\epsilon_0+2} a^2 E_0 \quad (9)$$

$$\tau_i = \frac{4\epsilon_0}{\mu\rho_i} = \frac{4\epsilon_0 E_i}{i_c} \quad (10)$$

a は粒子半径[m], E_0 は放電開始電界[V/m], i_c はイオン電流密度[A/m²]である.

一方, 拡散帯電 q_{th} については, 下記の通りである. q^* は電荷定数[C], τ_c' は荷電時定数[s]である.

$$q_{th} = q^* \ln\left(1 + \frac{t}{\tau_c'}\right) \quad (11)$$

$$q^* = \frac{4\pi\epsilon_0 a k T}{e} \quad (12)$$

$$\tau_c' = \frac{4\epsilon_0 k T}{a C_i n_i e^2} = \frac{4\epsilon_0 k T \mu_i E_i}{a C_i e i_c} \quad (13)$$

ここで, k はボルツマン定数, μ_i はイオン移動度, E_i は帯電電界, C_i はイオン熱運動速度の自乗平均[m/s]である. C_i については, 下記式で算出した. m_i はイオン質量[kg]である. 窒素 (分子量 28) 78%, 酸素 (分子量 32) 21%, アルゴン (原子量 40) 1% を空気分子 1mol の質量として, 28.96g を算出し, これをアボガドロ定数で除した値である.

$$C_i = \sqrt{\frac{3kT}{m_i}} \quad (14)$$

また帯電電界 E_i については, ポアソン電界で考える. この電界については印加電圧が直接影響するわけではなく, 放電電流に依存する. 空間電荷により形成される電界から, いくつかの近似式が知られている[5,9,12-13]. いずれの近似式においても帯電電界は電流の平方根に比例する.

$$E_i = \sqrt{\frac{2Ib}{\pi\epsilon_0\mu_i c}} \quad (15)$$

ここで, 式(15)は静電気ハンドブック[5]を参照し, I は線電極の単位長さ当たりの電流[A/m], c は線電極間距離[m]を示す.

帯電時定数について、電界帯電では粒子半径に依存しないが、拡散帯電では電界半径に反比例する。一方、電界帯電の飽和帯電量は粒径半径の二乗に比例し、拡散帯電は粒子半径に比例する。このことから、おおよそ粒子径 0.08~0.2μm より低い粒子径では拡散帯電が、大きい粒径では電界帯電が優勢となる。間となる粒径範囲においては両方の帯電プロセスが均衡するが他の粒径範囲に比べて粒子径に対する帯電量は低下する。これがのちに集塵率の低下に起因する。

3.3. 帯電粒子の集塵

帯電した粒子が電界より移動することで、流通空気から粒子が取り除かれる。帯電した粒子は電界によりクーロン力を受け加速される。最終的な移動速度 V_{∞} は式(16)の通りである。帯電部も集塵部も印加電圧は直流であり、電界に時間変化はないものと考え本式を適用した。粒子が気体分子の平均自由行程に近づくと、粘性係数 η が低下する。これを補正するために Cunningham 補正係数 C_m が用いられている。

$$V_{\infty} = \frac{C_m q E}{6\pi\eta a} \quad (16)$$

ここで、 E は外部電界[V/m]、 a は帯電した粒子の半径[m]である。Cunningham 補正係数は、実験式として、式(17)が知られている[5,7]。

$$C_m = 1 + 2.514 \frac{\lambda}{2a} + 0.80 \frac{\lambda}{2s} e^{-0.55(2a/\lambda)} \quad (17)$$

λ は気体の平均自由行程であり、常温常圧のもとでは λ はおおよそ 0.07μm である。

粒子の移動速度 ω 、ガス流速 V_g 、電極間距離 d とした場合、deutsch の式を用いて、集塵率を出すことができる。ここで deutsch は粒子重量濃度で式を構築したが、個数粒子濃度においても同様の式は、比較的近い値となることもわかっている。式(18)については、 C_i は初期粒子濃度であり、 C は距離 x 時点における粒子濃度である。 C と C_i の関係から、式(19)が導出できる。 η は式(1)同様、集塵率である。 f については比集塵面積 [s/m] であり、集塵電極の全面積[m²]をガス流量[m³/s]で除した値である。

$$C = C_i e^{-\omega x / V_g d} \quad (18)$$

$$\eta = \frac{C_i - C_0}{C_i} = 1 - e^{-\omega f} \quad (19)$$

集塵率の計算値について、ガス流速 1.5m/s 時を図 5 に、ガス流速 3m/s 時を図 6 に示す。また流速 1.5m/s、帯電部のみを集塵率に対して、パーティクルカウンタ、デジタル粉塵計による実験から得られた値を同時に図 7 に示す。光学式パーティクルカウンタによる粒径範囲別の個数粒子濃度から各粒径範囲における式(1)を用いて算出した値である。デジタル粉塵計はパーティクルカウンタ同様、光学的な粒子数をカウントするが、換算し重

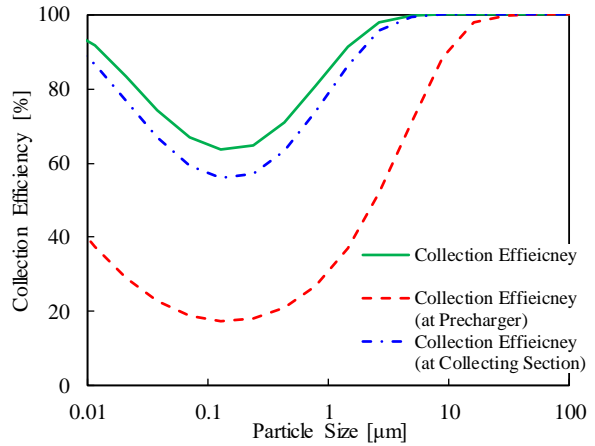


図 5 流速 1.5m/s における集塵率の粒径特性

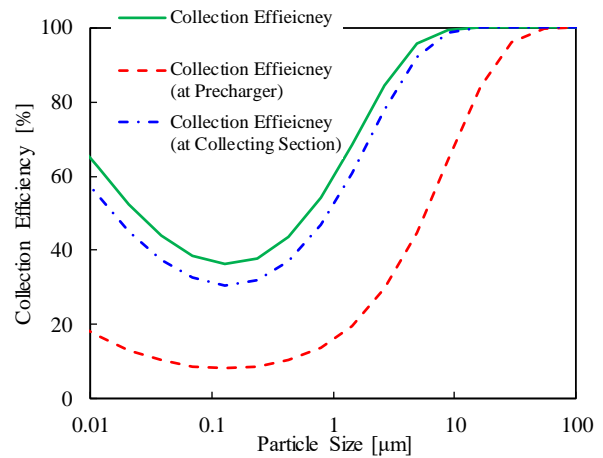


図 6 流速 3 m/s における集塵率の粒径特性

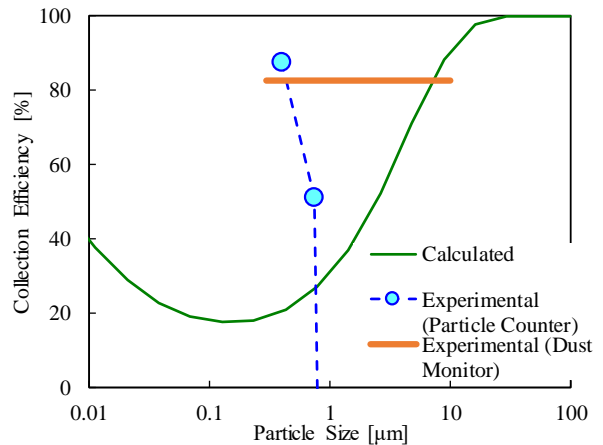


図 7 流速 1.5m/s 帯電部のみにおける

集塵率の比較 (計算値および実験結果)

量粒子濃度として表示される。粒径に対し測定感度が異なり、また粒径 10μm 以上の粗大粒子は慣性衝突により除去される仕組みである[14]。本実験では、灯油ランプから発生するドライスートを粒子発生源として用いた。そのため、電極上における凝集、および再飛散現象が生じることから、粒径が大きいものほど集塵率は低下する。いわゆる異常現象が発生した結果である。対象粒子をオ

イルミストなど飛散しない粒子で行えば、計算値に沿った結果が得られる可能性も考えられる。また今回の測定法では、集塵装置排出後の空間において粒子サンプリングを行っている。このことから帯電粒子が壁面へ付着することが考えられ、実際の集塵率より高い値が実験で得られている可能性もある。

3.4. 帯電部適用時における電界分布、電荷分布の影響に対する考察

図 7 の考察で、異常現象により計算値と実験値の乖離が見られた。このように計算では考量できない現象がある。上記手順で粒子の帯電量から集塵率を算出した場合に、電気集塵装置の中で生じている下記分布については、考慮されていない。帯電部では、電界分布、空間電荷分布とガス流速分布を均一と仮定して、集塵部でガス流速分布を均一として考える。

- (1) 電界分布
- (2) 空間電荷分布
- (3) ガス流速分布
- (4) 粒子濃度

例えば、放電空間を通過する荷電時間は、接地電極長に依存するが、実際には分布があり、ワイヤ直下では電荷密度は高い。高電圧電極と接地電極の間隔の 3 倍程度を接地電極の長さ（有効電極長）が超えると電荷密度は低下する[15-16]。そのため、効率が良い電極長は 3 倍とする例が多い。一方、放電空間への滞在時間だけを考えると、接地電極長が長ければ長いほど荷電性能が良いことになり、実験値との乖離は大きくなる。

これまで、産業用電気集塵装置など、大型、複数、多段などの条件で検討に用いられてきたこれらの式は、実機に合わせたところもあり、多くが活用されてきた。しかし、家庭用の空気清浄装置に電気集塵方式が用いられ、それが広く普及してきた近年、これらの式は実際の物理現象と合わせて評価されるべきと考えられる。なぜなら家庭用に用いられている電気集塵装置は、小型、低消費電力であり、電極の組み合わせも単数、もしくは数組となることから、電界や電荷の分布の影響は大きいと考えられる。分布を考慮した検討を行う研究例も多い。

3.5. オゾン発生特性

空気清浄機に用いられるコロナ放電では、オゾンが生じる。ただし空間全体に放電が広がる誘電体バリア放電と異なり、電離空間が部分的であるコロナ放電はオゾン発生量も少なく、オゾン発生特性に関する研究例も誘電体バリア放電に比べ少ない。コロナ放電電力、ガス流量比に対するオゾン発生濃度について、電気集塵装置のオゾン発生について研究された片谷氏の論文[17]から数式化し用いた。グラフを数式化することで、オゾン発生量も放電電流、ガス流速から算出できるようモデルに組み込んだ。集塵率、オゾン発生濃度に対するコロナ放電印加電圧特性を図 8 に示す。ガス流速は 1.5m/s 一定とした。印加電圧の増加に対し、集塵部も含めた装置全体の

集塵率は増加しながら飽和する傾向であるが、図 4 に示した放電電流と同様に、オゾン濃度は放電開始後の印加電圧に対し指数関数的に増加することが示された。

3.6. 消費電力特性

実験装置におけるガス流速、ファン電力特性(実験値)を図 9 に示す。本試験において、ファンのコントロール信号の PWM デューティサイクルを 0~100%で変化させた。その際ガス流速は 1.3~4.5m/s で変化した。整流板を設けていることから、本装置の圧力損失およびファン消費電力は、再設計すれば低減でき、ファン消費電力の最適化は今後の課題としたい[17]。実験値から二次の近似曲線を算出し、これをモデルに組み込むことで、放電電力およびファン電力を算出することとした。

集塵率と消費電力のガス流速特性を図 10 に示す。本計算は集塵率 80%になるよう印加電圧をフィードバック制御し、安定した際の印加電圧と消費電力である。放電電力との比について考察する。例えば、10kVにおいて放電電力は 7.8W である。高電圧電源の効率を 75%と仮定した場合、最大 11.7W である。一方、圧力損失がない状態であれば、本装置に用いたファンのカタログ値は 11.3W (ダクト断面積より算出したガス流速 30.8m/s)、1.44W (同 8.8m/s) である[12]。本実験において、ガス

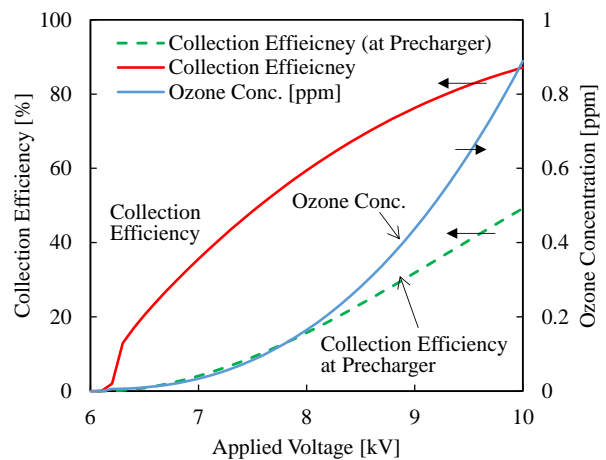


図 8 集塵率、オゾン濃度に対する
コロナ放電印加電圧特性

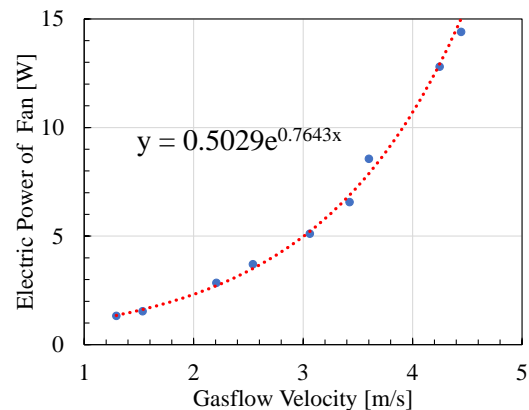


図 9 本装置におけるファン消費電力の流速特性

流速 4m/s 時に、ファン消費電力 10.7W、放電電力 5.7W であった。いずれにせよ放電電力よりファン消費電力は大きく、低消費電力のシステムを実現するためには、低圧力損失、最適流れ設計も重要となる。

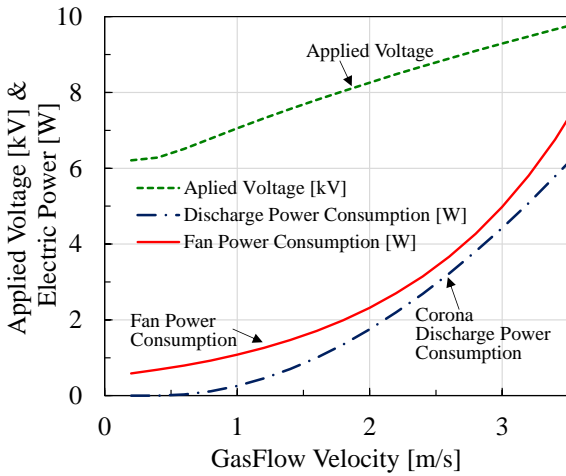


図 10 集塵率 80%時の印加電圧，消費電力のガス流速特性

4. ステップ入力に対する応答

外部より要求集塵率を入力した場合における集塵率の追従について検討する。モデルを図 11 に示す。電気集塵モデル (ESP model) に対し、集塵率をフィードバックした。ソルバーは ode5 を用い、固定ステップ、サンプル時間は 0.01 秒とした。Delay についてもいずれも 0.01 秒とした。計算で算出された集塵率と目標集塵率の差を±0.001 の範囲をもってしきい値とし、それ以上では 0.01kV、それ以下では -0.01kV を前状態の印加電圧に足す。また Saturation を設け、印加電圧の変化は 5kV から 10kV までとした。目標集塵率へ電圧で追従させた場合における集塵率の変化を図 12 に、印加電圧、放電電流を図 13 に、消費電力、オゾン濃度を図 14 に示す。計算条件について、ガス流速は 3m/s 一定、印加電圧の初期値は 8kV とした。計算は、計算時間 10 秒のうち 5 秒目において、50%から 80%に目標集塵率を増加させ、電圧の上昇により追従させた。おおよそ 1 秒で目標集塵率に追従した。また消費電力、オゾン濃度も含め算出できていることが分かった。

5. おわりに

コロナ放電モデル、粒子の帯電モデル (拡散帯電と電界帯電)、帯電粒子の移動と集塵 (deutsch の式)、オゾン濃度予測、消費電力予測を付与して、電気集塵装置モデルを数値計算ソフト MATLAB/Simulink 上に構築した。主だった部分については Simulink で構築していることからプログラムの専門的な知識を有さなくても構築することができる。また定常状態の評価ならば Excel でも可能である。物理現象の数式化、および実験データと照らし

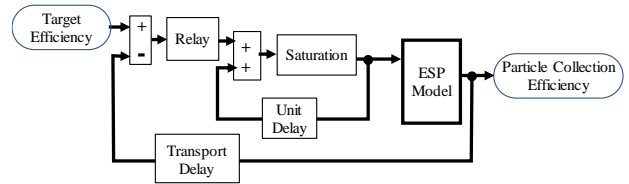


図 11 電気集塵装置のフィードバックおよびステップ入力に対する応答評価モデル

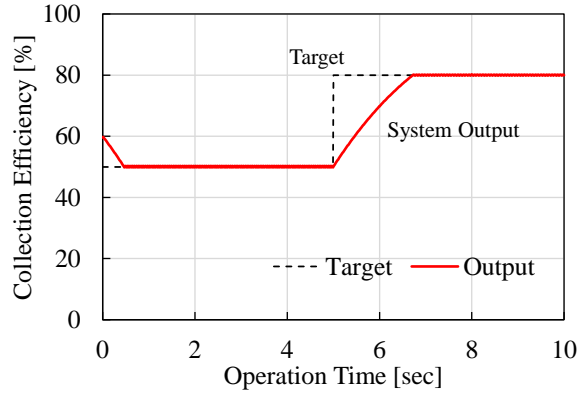


図 12 集塵率の追従特性

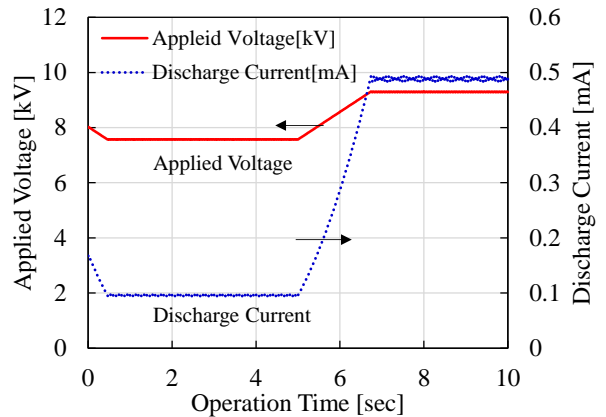


図 13 印加電圧，放電電流特性

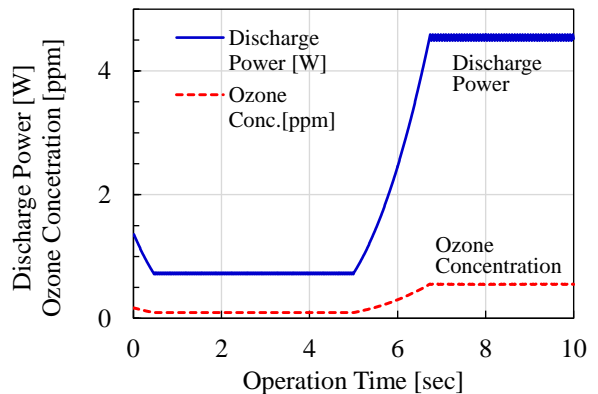


図 14 消費電力およびオゾン排出濃度

合わせて理解を進める手助けになればと考える。

本モデルを用いて、発生源に装着した場合 (開放系)、および部屋の中で使用した場合 (閉鎖系) を想定した各数値計算モデルの構築と検討については、次報で述べる。

註

本報で数値計算に用いた数値, および出典を表 1 に示す.

表 1 本報告で計算に使用した値

記号	内容	本報における 入力値	参考 文献
T	温度	293 K (20°C)	
r ₀	線電極半径	0.14 × 10 ⁻³ m	
R	電極間距離	7.9 × 10 ⁻³ m	
B	線電極間距離	24 × 10 ⁻³ m	
E	真空の誘電率	8.85 × 10 ⁻¹² F/m	[7]
μ _i	イオン移動度	1.432 × 10 ⁻⁴ m ² /Vs	[5]
A	対象となる 粒子半径	0.5 μm (粒子径特性以外)	
C _i	イオン熱運動速 度の自乗平均値	502.872 m/s	[5]
K	ボルツマン定数	1.38 × 10 ⁻²³ J/K	[7]
m _i	イオン質量	4.81 × 10 ⁻²⁶ kg	[5]
η	20°Cにおける 空気の粘性係数	1.81 × 10 ⁻⁵ Ns/m ²	[5]
E	電気素量	1.6 × 10 ⁻¹⁹ C	[7]

参考文献

[1] 大野長太郎:「除じん・集じんの理論と実際」, オーム社, 東京, pp.29-130 (1978)

[2] 瑞慶覧章朝, 江原由泰, 伊藤泰郎:「空気浄化技術」, 養賢堂, 東京, (2011)

[3] 静電気学会誌:「特集:電気集塵の温故知新」, 特集解説 9 本, Vol.34, No.2 (2010)

[4] 日本空気清浄協会編:「室内空気清浄便覧」, オーム社, 東京, pp.184 (2000)

[5] 静電気学会編:「静電気ハンドブック」, オーム社, 東京, pp.267-273, pp.485-491 (1981)

[6] Harry J.White:「Industrial Electrostatic Precipitation」Addison-Wesley Publishing Company, Inc., pp.74-195, (1963)

[7] Jen-Shih Chang, Arnodl J.Kelly, Joseph M.Crowley ed.:「Handbook of Electrostatic Processes」, Marcel Dekker Inc., pp.441-507 (1995)

[8] K.R.Parker edited:「Applied Electrostatic Precipitation」Blackie Academic & Professional, pp.25-88, (1997)

[9] 公害対策電気技術専門委員会報告, 電気学会技術報告 (II 部), 第 45 号, pp.2-21 (1976)

[10] Yoshihiro Kawada, Hirota Shimizu, Masahiro Ohkawa, Shigeki Mori, Kazuhiko Kakishita:「Effect of Woodceramics Grounded Electrode on Electrostatic Precipitation with Positive Corona Discharge」, Trans. Mat. Res. Soc Japan, Vol.43, No.3,

pp.187-190, (2018)

[11] 中澤智志:「二段式電気集塵装置における低電気抵抗粒子の再飛散現象再現と改善」平成 30 年度 職業能力開発総合大学校 電気専攻 卒業論文 (2018)

[12] 杉田直記:「コロナ放電による空気清浄技術」静電気学会誌, Vol.17, No.3, pp.168-178 (1993)

[13] 日本空気清浄協会編:「室内空気清浄便覧」, オーム社, 東京, pp.216-217 (2000)

[14] 日本空気清浄協会編:「室内空気清浄便覧」, オーム社, 東京, pp.106-107 (2000)

[15] Y.Kawada, A.Zukeran, H.Shimizu:「Numerical Study of the Suitable Pre-Charger Grounded Electrode Length in Two-Stage-Type Electrostatic Precipitators」, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.55, No.1, pp.833-839,(2019)

[16] 伊藤航平, 森悠真, 瑞慶覧章朝, 川田吉弘, 田岡智浩, 柴田憲司:「線対平板型電気集塵装置におけるイオン風の解析と測定」, 静電気学会誌, Vol.43, No.1, pp.25-30, (2019)

[17] 片谷篤史:「電気集塵装置におけるオゾン・窒素酸化物の抑制技術とイオン風の有効利用に関する研究」博士論文, 豊橋技術科学大学 (2010)

[18] 山洋電気:「DC ファン San Ace 80 カタログ」, 9GA0824SP1S61, (2016)

(原稿受付 2020/07/13, 受理 2020/08/27)

*川田 吉弘, 博士 (工学)
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 email:kawada@uitech.ac.jp
Yoshihiro Kawada, Polytechnic University, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035

*瑞慶覧 章朝, 博士 (工学)
神奈川工科大学, 〒243-0292 神奈川県厚木市下荻野 1030 Akinori Zukeran, Kanagawa Institute of Technology, Japan 1030, Shimo-ogino, Atsugi, Kanagawa 243-0292

*清水 洋隆, 博士 (工学)
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 email:shimizu@uitech.ac.jp
Hirota Shimizu, Polytechnic University, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035