

電気集塵装置のモデル構築と考察（その2） —電気集塵装置 稼働モデルの検討—

Study for Numerical Model for Electrostatic Precipitator (Part II) - Plant Model with Electrostatic Precipitator -

川田 吉弘, 瑞慶覧 章朝, 清水 洋隆

Yoshihiro Kawada, Akinori Zukeran and Hirotaka Shimizu

Aim of using an electrostatic precipitator, there is reducing the generation emission under emission standard for industrial using. On the other hand, an air cleaner in home use, it is required to lower the concentration in the closed space with low power. Corona discharge is used in the pre-charger of the electrostatic precipitator, and the ozone is emitted. The increase in ozone concentration must also be required in the enclosed space. In this study, the reduction of the particle concentration when the electric precipitator was applied to the open and the closed spaces with calculated using MATLAB/Simulink. The differential equations were modeled and calculated. It is considered that this model can be developed to a model-based control of the electrostatic precipitator in the future.

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

1. はじめに

電気集塵装置に対する数値計算モデル検討においては、装置そのものの設計に使用される場合が多く、なかでも内部のガス流れ、放電電極形状に関する計算例が多い。一方、制御に関する研究は比較的少ない。制御の例としては、帯電効率の向上、消費電力抑制のためのパルス荷電を代表とする電圧波形の制御、スパーク検知による電圧低下の制御、また家庭用空気清浄装置におけるガス流量の制御などが挙げられる[1-3]。

前論文において、電気集塵装置を数値計算モデルとして構築した。その内容は、コロナ放電モデル、粒子帯電モデル（拡散帯電と電界帯電）、帯電粒子の移動（集塵モデル）の3つのパートから構成される。これをもとに、例えば多数あるパラメータから入力としてガス流速、コロナ放電の印加電圧を、出力として集塵率、オゾン濃度を選び一つのブロックとすることで、電気集塵装置をパソコン上で稼働させる。そのモデルの周囲において、使用方法に合わせたモデル（プラントモデル）を構築することで、性能や消費電力などをコンピュータ上で検討できる。本報では開放系と閉鎖系に着目し、それぞれモデルを組み評価した。開放系では主に追従性や排出量の低減について、閉鎖系では、最も集塵量の高い運転点の導出と、オゾン抑制を施した運転に対する考察を行った。いずれも特別なプログラム知識を多く必要としない Simulink による構築である。テストサイクルを走らせる

方法や、微分方程式からモデルを構築し解く手法について参考になるような具体例の報告である。

2. 開放系における空気浄化

2.1. モデル構築

開放系として、発生源に集塵装置を付加した場合における検討を行う。イメージを図1に示す。本モデルは、小型ボイラーや内燃機関など、過渡状態の発生源に電気集塵装置を付加した場合を想定する。排気エネルギーを用いて電気集塵装置を通過させることにより、ファンは設けない。ガス流速を変化させた場合、目標集塵率にどのように追従するかについて、モデルから検討する。ただし本モデルでは処理ガスの密度（温度、圧力）や水分量は考慮できていない。これらはさらに先の解析を行う

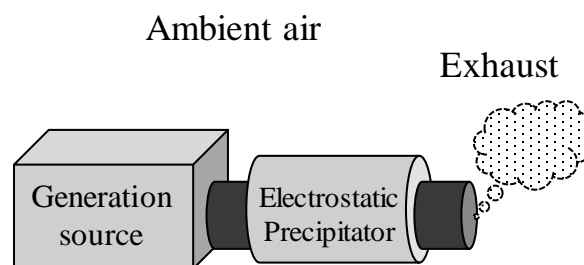


図1 発生源に電気集塵装置を付加した場合のモデルイメージ

場合では考慮すべき, 影響ある因子と考えられる。

モデルのフロー図を図 2 に示す。電気集塵装置モデル (ESP モデル) は前報のモデルである。帯電印加電圧を調整して目標集塵率に近づける。電気集塵モデルの出力からサンプル時間 0.01 秒の Transport Delay を通過し, 目標集塵率と比較する。Relay では ± 0.01 をしきい値として, $+0.01$ より高い値では 0.01 を, -0.01 より低い値では -0.01 を排出する。Unit Delay は 0.01 秒のサンプル時間を有す。Saturation では上限 10kV, 下限 5kV となるよう制限を行った。目標集塵率とその時のガス流速を 1 秒ごとの時系列データを入力し, 電気集塵装置モデルを動かした。また実際の対象粒子は粒径数 nm~数十 μm 以上に分布しているが, 本報においては帯電量や帯電粒子の移動速度を計算するために粒子径 $1\mu\text{m}$ と仮定した。いずれの条件においても, 集塵部の印加電圧は 6kV 一定とした。

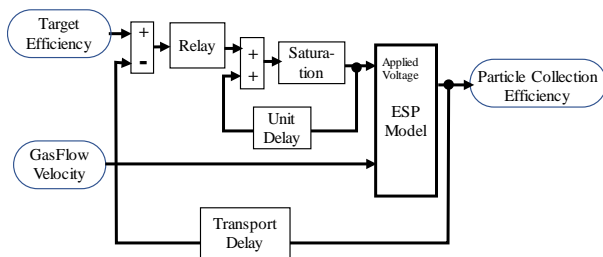


図 2 開放系におけるシミュレーションモデル

2.2. 計算結果および検討

稼働パターンを図 3 に示す。この計算条件に対し示された印加電圧を図 4 に, 出力された集塵率およびオゾン濃度を図 5 に示す。また発生源からの排出粒子濃度をガス流量に関係なく一定として想定した場合における, 排出粒子量と低減率について図 6 に示す。

この運転パターンは 3 つのパートに分かれる。

稼働時間 0-180 秒においては, 目標集塵率を 100%として, ガス流速を 0 から 5m/s まで 1m/s づつ上昇させた場合である。本条件では, 流速 2m/s までは集塵率は 100% 近傍であるが, それ以上の流速において集塵率は低下している。集塵率を 100%とすることで, 印加電圧は最大の 10kV となった。計算上の集塵率は 99.99...%となるが, 100%になることはないため, 印加電圧は常に最大の 10kV となる。またガス流速 0m/s では, オゾン濃度は無限大となる。ガスが停滞した空間で放電だけが続けば, オゾン濃度は高くなることを示している。

稼働 180-280 秒においては, 50 秒経過後 (稼働 230 秒) に目標集塵率を 50%から 80%へ向上させた。このときガス流速は 3m/s 一定とした。目標集塵率 50%の時には印加電圧 7.6kV 程度に, 80%の時には 9.3kV 程度に印加電圧は調整された。

280 秒以降においては, 目標集塵率を 80%として, ガス流速を 1 未満~5m/s と変更した場合である。ガス流速 4m/s 以上においては, 印加電圧は 10kV まで増加している。その結果, ガス流速が増加した時間で印加電圧が上昇し, 排出オゾン濃度も高くなっている。流速 5m/s にお

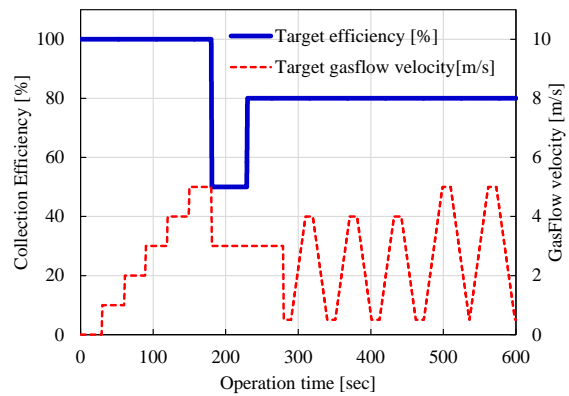


図 3 入力した運転パターン

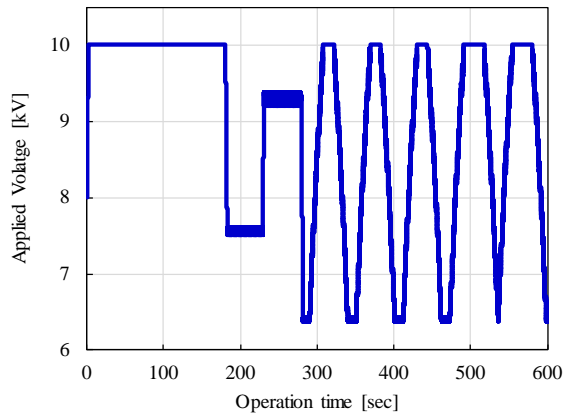


図 4 運転条件により制御された電気集塵装置の

印加電圧

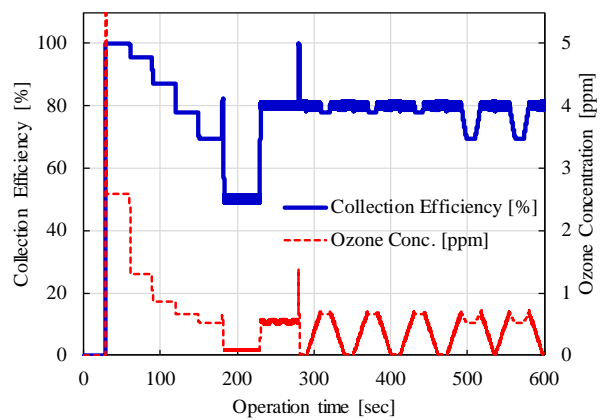


図 5 出力された集塵率とオゾン濃度

いては 10kV で印加電圧が上限となることから, オゾン濃度は増加するものの, 4m/s に比べ低い値となる。

ガス流速およびガス流量により, 集塵率は変化する。システムとして考えた場合, ある運転パターンにおいて, 総排出量をどれだけ低減させたか検討する必要がある。ガス流量によらず発生源の粒子濃度を一定と仮定した場合, 運転を通して発生源から排出されるガス流量の積分値は, 電気集塵装置に流入する粒子量に比例する。ガス流量と粒子の透過率[%] (=100-集塵率[%]) の積を時間積分した値については, 電気集塵装置から排出される粒子量に比例する。集塵装置への流入粒子量を 1 として規格化した場合における, 粒子量の低減効果を図 6 に示す。本計算条件においては 82.98%の低減となった。発生源に

ついて、例えば粒子濃度とガス流速の2次元テーブルを作ることで、より実機に近い詳細な検討ができる。

実際に内燃機関等の発生源に電気集塵装置を付加すると、碍子部分の短絡による放電不良、高温度下における運転では放電電流の増加による消費電力増加や帯電不良、水分の結露や対象粒子の電気抵抗率の変化による帯電不安定などの問題が知られている。対象が炭素粒子である場合に生じる、集塵後に凝集・肥大化する極板凝集、誘導帯電により飛散する再飛散現象があることも含め、制御以外にクリアしなければならない課題である。

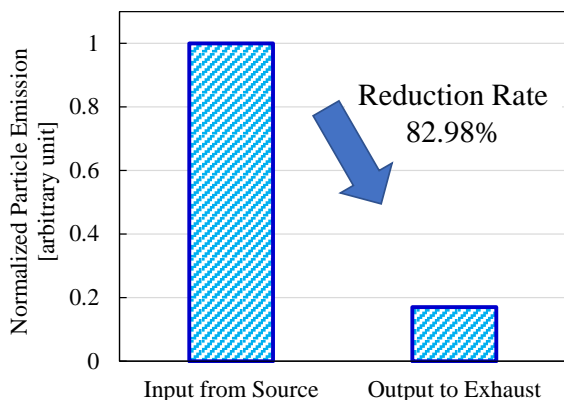


図6 本モデルにおける排出粒子量と低減率

3. 閉鎖系における空気浄化

3.1. モデル構築

閉鎖空間に電気集塵装置を適用する場合、消費電力を考えなければ、浮遊粒子を除去する量が最大となる運転条件が望まれる。電気集塵装置モデルについて、再考察を行う。

閉鎖的空間において、捕集粒子量が最大となる運転条件はおのずと決まってくる。この粒子捕集量が最大となる運転条件について検討する。ガス流速と集塵率の積は、電気集塵装置が捕集した粒子量に比例する。各帯電部印加電圧における、粒子捕集量のガス流速特性について図7に示す。ここで集塵率は百分率のままガス流速に乗じた。帯電部印加電圧が7.5kV未満では流速3~5m/s付近が最大となる。一方8kV以上においては、ガス流速が高いほど捕集できる粒子量が増加する。今回の運転条件では印加電圧10kV、ガス流速10m/sが最大となった。ただし印加電圧10kVになるとオゾン発生濃度も高くなる。そこで、図7に対し、発生オゾン濃度0.1ppm以下となる条件を求めた。オゾン発生濃度0.1ppmを上限とした場合における、粒子捕集量のガス流速特性について図8に示す。ガス流速10m/sにおいては、印加電圧8.6kVが最大となる。ガス流速0.5m/s~10m/sにおける、排出オゾン濃度が0.1ppm以下となるよう運転した時の帯電部印加電圧と集塵率を図9に示す。ガス流速10m/sにおいては、集塵率は27.3%程度となった。また前報で、電気集塵システムにおいては、放電電力よりファン電力のほうが大きい

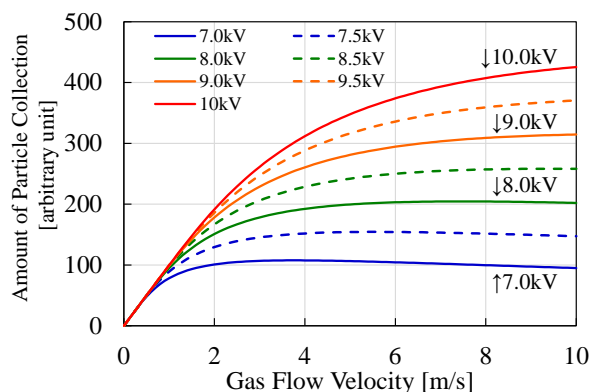


図7 印加電圧に対する粒子低減量ガス流速特性

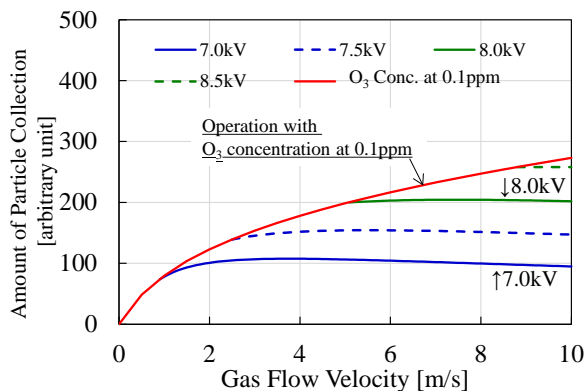


図8 排出オゾン濃度を0.1ppm以下とした場合における粒子低減量特性

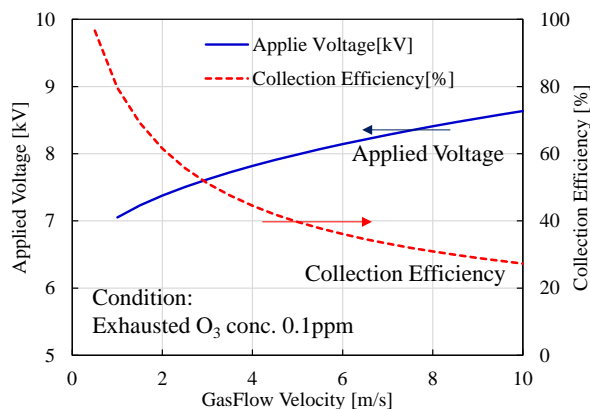


図9 排出オゾン濃度0.1ppmとした場合におけるガス流速に対する最大印加電圧と集塵率

ということ述べた。一方、放電条件一定において流速を低下させた場合、オゾン濃度は増加する。ファン電力を低下させるためには、図9の印加電圧曲線に沿って制御させることで、排出オゾン濃度を0.1ppmに抑えた制御が可能となる。

空間の粒子濃度の変動について考える[5-6]。図10に閉鎖空間のモデルを示す。短い時間 Δt について、①室内に流入する粒子量の差、②室内で増加、減少する粒子量について以下の式を定義する。ここで C_o は室外大気中の粒子濃度、 Q_s は換気量(吸気=排気とする)、 C は室内の粒子濃度、 η は空気清浄装置の集塵率、 Q_c は空気清浄装置の処理空気量、 M は室内発生粒子量とする。

$$\begin{aligned} \textcircled{1} & (C_o Q_s - C Q_s + M - \eta C Q_c) \Delta t \\ \textcircled{2} & R \Delta C \end{aligned}$$

ここで、①=②であることから、以下の式を導く。

$$C_o Q_s - C Q_s + M - \eta C Q_c = R \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

これをモデル化したのが図 11 である。粒子増減量の総和の時間変化を室内容積で割り、時間積分することで粒子濃度を算出できる。その粒子濃度を用いて、空気清浄機における低減や換気の影響をさらに計算する。これにより時間変化を算出できる。

同様に、オゾンについて数式を考えると下記のとおりである。ここで、 C_{oz} は室内のオゾン濃度、 D_e はオゾン分解速度、 C_{coz} は電気集塵装置から流出するオゾン濃度である。

$$-Q_s C_{oz} + Q_c C_{coz} - D_e = R \frac{dC_{oz}}{dt} \quad (2)$$

式(2)をモデル化すると図 12 になる。オゾンの総量を算出し、室内容積で割ることで濃度の時間変化量とした。これを時間積分することでオゾン濃度を算出した。

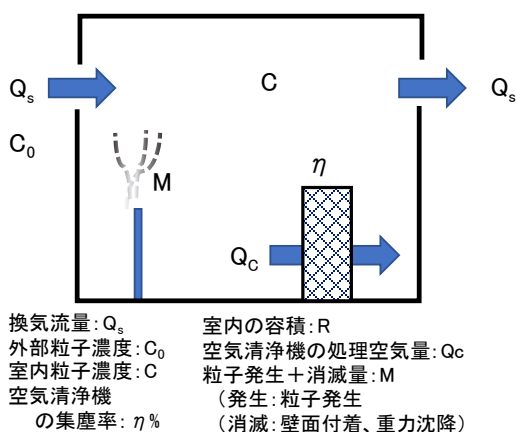


図 10 閉鎖空間モデル概略

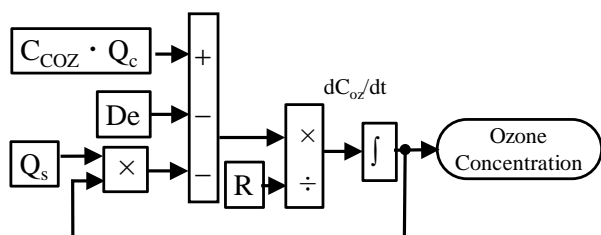
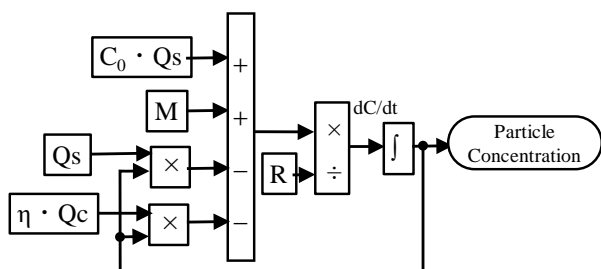


図 12 閉鎖系におけるオゾン濃度算出モデル

以上のモデルと電気集塵モデルを組み合わせると、7200 秒間 (120 分間) のシミュレーションを行った。今回想定した電気集塵装置があまりに小さいため、閉鎖空間の容積 R を 8m^3 とし、換気量 Q_s は $0.001\text{m}^3/\text{s}$ とした。閉鎖空間内の初期粒子濃度を 100, 外周大気粒子濃度を 30 とした。粒子濃度は質量濃度にも個数濃度にも対応できると考えられるが、ここでは単位なしの値を用いた。また粒子の発生 M , オゾンの分解, 壁面吸着 D_e を考慮していないが、式(1)や式(2)に組み込むことで、これらを含めた考察は可能となる。

3.2. 計算結果および検討

粒子濃度の時間変化を図 13 に示す。縦軸は粒子濃度を示すが、対数表示としている。この時のオゾン濃度特性を図 14 に示す。換気のみと比べ、電気集塵装置の使用が粒子低減速度を速めている。ただしオゾン濃度をフィードバックさせて帯電部印加電圧を制御する方法では、オゾン濃度の抑制とともに粒子濃度低下速度も低下する。そのため、オゾン濃度を抑制しつつ外部粒子濃度以下にするために、排出オゾン濃度を抑えた電気集塵装置の運転が必要となる。またここではファン消費電力を考慮し

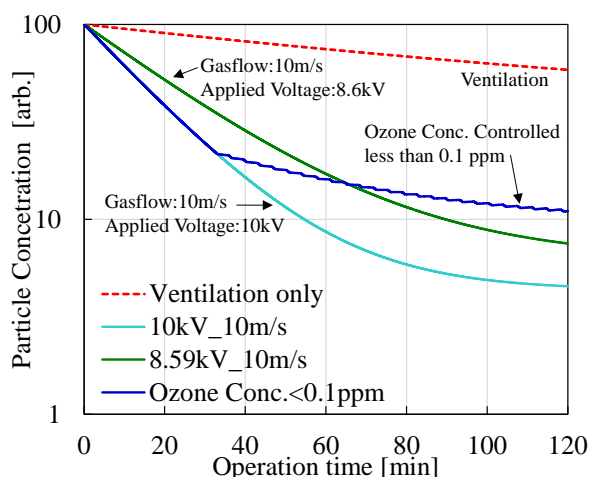


図 13 閉鎖空間における粒子濃度の時間変化

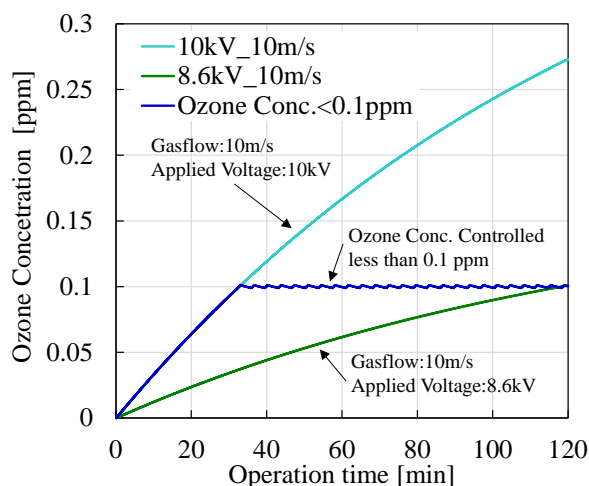


図 14 閉鎖空間におけるオゾン濃度の時間変化

ていない。システムの消費電力においては、放電電力よりファン消費電力が大きいことを前報でも報告している。今回は排出オゾン濃度 0.1ppm として計算したが、電気集塵装置への流入ガスにオゾンが含まれれば、排出オゾン濃度は高くなる。一方、部屋の内部オゾン濃度を 0.1ppm にするための制御についても、現在は帯電電圧がほとんど ON/OFF の制御となっている。印加電圧変化を図 15 に示す。5kV では放電停止であり、10kV ではこのシステムで最大の印加電圧としている。今回の制御方法よりも最適な制御がある可能性はある。

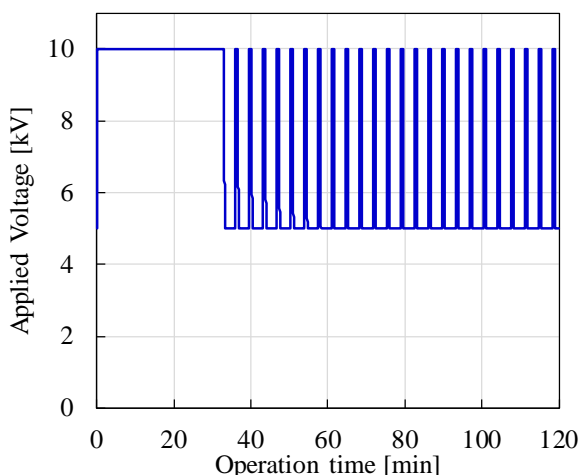


図 15 オゾン濃度 0.1ppm 以下制御時における電気集塵装置の帯電電圧制御

4. おわりに

電気集塵装置の数値計算モデルを負荷に適用した、プラントモデルを構築した。発生源付加によるモデル、閉鎖空間におけるモデルともに評価すべき性能（排出量や空間濃度）、およびその際の消費電力やオゾン濃度を算出することができた。これは電気集塵装置の設計（電極や電圧など物理的なパラメータのほか、ファンの能力など）に役立つと考えられる。さらに大型の産業プラントなど負荷変動の少ない場所から、小型のプラント、家庭用など短時間に、きめ細かい制御が必要とされる状況において、シミュレーションを実行しながら実デバイスへ制御を加える、いわゆる”モデルベース制御”を構築することができる可能性を示すことができた。ただし実用に沿った制御においては、前報に報告の通り、異常現象や分布（粒子濃度、電荷密度、電界等）の考慮は必要であり、今後の課題として考える。

参考文献

[1] Senichi Masuda, Shunsuke Hosokawa : 「Pulse Energization System of Electrostatic Precipitator for Retrofitting Application」, IEEE Trans.IAS, Vol.24, pp.708-716 (1988)
 [2] Jen-Shih Chang, Arnold J.Kelly, Joseph M.Crowley ed.: 「Handbook of Electrostatic Processes」, Marcel Dekker Inc.,

pp.458 (1995)

[3] 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)
 [4] 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)
 [5] 川田吉弘, 清水洋隆: 「電気集塵装置による閉鎖空間浮遊粒子の低減」, 電気学会論文誌 A, Vol.136, No.7, pp.427-433, (2016)
 [6] 社団法人日本空気清浄協会編 “室内空気清浄便覧”, pp.123-147 オーム社(2000).

(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-Nishimachi, 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
 Hiroataka Shimizu, Polytechnic University, 2-32-1 Ogawa-Nishimachi, Kodaira, Tokyo 187-0035