J. Inst. Electrostat. Jpn.

# 論 文

## 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

## 宮下 皓高\*.1, 江原 由泰\*

(2018年9月13日受付;2018年12月4日受理)

# Analysis of Ionic Wind and Particle Behavior in Hole-type Electrostatic Precipitator Hirotaka MIYASHITA<sup>\*,1</sup> and Yoshiyasu EHARA<sup>\*</sup>

(Received September 13, 2018; Accepted December 4, 2018)

Electrostatic precipitator (ESP) is used to collect particulate matter (PM). The low resistive diesel engine particles are detached from the collection electrode, which causes particle re-entrainment, resulting in poor collection efficiency. To solve this problem, a new hole-type ESP was developed to overcome the re-entrainment in the ESP. The authors believed that the performance evaluation and design of hole-type ESP is important. Therefore, the electrical field, fluid, and particle behavior with respect to the hole-type ESP were analyzed. In the electrical field analysis, it is observed that field is strong at the edge of the hole. It was considered that the electrical field is increased by the edge effect and the particles are likely to flow into the hole. In the fluid flow analysis, it was confirmed that wind flowed from the tip of the needle and vortices were formed around the needle owing to the ionic wind analysis. In the particle behavior analysis, substantial amount of particles flowed into the hole at the small flow velocity.

### 1. はじめに

環境浄化に関心が高まる近年、排ガス洗浄装置として 電気集塵装置(ESP)が着目されている. ESP は電気的 な力を利用して排ガス中の粒子状物質(PM)を捕集す る装置である. ESP は空間内の電界強度や流体が集塵率 に影響を与える. そのため, ESP 内の電界や流体, 粒子 挙動のシミュレーション解析が重要視されている. 村井 氏らは、サブミクロン粒子における EHD 数の影響を調 べるために、シミュレーション解析を行った<sup>1,2)</sup>. EHD 数とは、イオン風の相対的強さを表すものである。解析 手法は有限要素法を用い、ポアソン方程式、電流連続式、 Navier-Stokes 方程式を連成し解析計算した. その結果, イオン風によってガスの流線が湾曲することを示した. 大久保氏らは、線対平行平板電極形 ESP 内の流れ場を、 Navier-Stokes 方程式に基づき渦度と流れ関数を用いて ADI 法により数値解析を行った<sup>3)</sup>. ESP 内の速度分布は, うずが発生していない場合、放電線電極近傍で速度が大 きく,うずが発生している場合,うずの周りで速度が大 きいことを示した. また, EHD 数が2以上のとき, 放 電線電極直下の平板電極でうずが発生することも示し

**キーワード**:有限要素法,イオン風,コロナ放電,電磁 流体力学,電気集塵装置

\* 東京都市大学

Tokyo City University, 1-28-1, Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo, 158-8557, Japan

た. Nikas らは, ESP 内部で起こる捕集メカニズムと現 象を観測するために使用できるシミュレーション技法を 提案した<sup>4)</sup>. ESP 内部の風の流動や速度の解析を行い, 実験値との比較を行った. イオン風による主流体の失速 によって集塵率に良い影響を及ぼすことや, 粒子の速度 推移が実験値と概ね一致したことを示した. Famoosh ら は,有限体積法とフラックス修正法のハイブリッド法を 用いて,平行平板流路内の粒子挙動予測を行った. 主流 体が 0 m/s では, 4 つの対照的なカルマン渦が放電電極 の周りに発生することを示している<sup>5)</sup>. Yamamoto らは, ESP 内の EHD 現象を 3 次元で解析しており, 主流体と イオン風の相互作用を明らかにしている<sup>6)</sup>.

ESP は圧力損失が小さいことや小粒径粒子の集塵率が 高いことが利点である.しかし,ESP では再飛散現象と いう異常現象が発生し,集塵率が低下してしまう<sup>70</sup>.こ れは,船舶用ディーゼルから発生する高濃度かつ低抵抗 率の PM を捕集する際に生じる現象である.そこで,著 者らは再飛散現象を抑制する装置として,ホール型 ESP を開発した<sup>80</sup>.この装置は,電界がゼロの空間に粒子を 誘導することで,再飛散を抑制することができる.粒子 の誘導にはクーロン力とイオン風を用いるため,針対ホ ール電極におけるイオン風の特性を調べた<sup>90</sup>.イオン風 は電流値の増加に伴い速くなることを報告している. また,ホール型 ESP を用いることで,再飛散現象を抑 制し,集塵率が向上することについても報告している<sup>80</sup>. ホール型 ESP の解析においては,基礎研究として,PIV

<sup>(〒158-8557</sup> 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> g1691302@tcu.ac.jp

解析を用いて線対平板型 ESP 内の粒子挙動を可視化し, コロナ放電によって帯電された粒子の特性について検討を 行っている<sup>100</sup>.ここでは、帯電した粒子がクーロン力とイ オン風の影響によって集塵電極に誘導される挙動や、粒子 の比誘電率や粒子径によって粒子の移動速度に変化が生 じることを報告している.また、実際にホール型 ESP を用 いて粒子挙動を可視化した報告もある<sup>110</sup>.この報告では、 ホールに流入する粒子の移動速度や移動方向について検 討を行っている.このことから、ホール型 ESP の研究は進 んでいるが、高風速かつ高濃度で低抵抗率の PM を排出 する船舶ディーゼル機関に適応できるホール型 ESP の設 計が現状の課題として挙げられている.そのため、ホール 型 ESP のモデルにおける電界解析、流体解析、粒子挙動 解析を行うことで、ホール型 ESP の性能評価や集塵に最 適なホール型 ESP の設計が可能と考えた.

本研究では、ホール型 ESP の基礎研究として ESP 内 の静電場中における流体解析と粒子挙動解析を行った. 流体解析では、主流体速度と流体の関係について検討を 行い、粒子挙動解析では、粒子径とホール流入率の関係 について検討を行った.

### 2. 実験方法

本研究では、シミュレーション解析に有限要素法 (COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>)を用いた.まず始めに、電位 V[V]を変数とし、ポアソン方程式を解く.ポアソン 方程式は式(1)で表される.

 $-\nabla \cdot \varepsilon_r \varepsilon_0 \nabla V = \rho \tag{1}$ 

このとき、 $\varepsilon_0$  は真空の誘電率、 $\varepsilon_r$  は空気の比誘電率である.また、空気中の空間電荷密度 $\rho$  [C/m<sup>3</sup>]は、後述する正イオン数密度 $N_p$  [m<sup>3</sup>]と電気素量 e [C]を用いて、式(2)で得られる.

 $\rho = eN_p$ 

本解析では、電子の電離領域はイオンに比べ非常に小 さいこと、また、正極電圧印加時の負イオンは針先にの み発生すると考えられることから、計算の簡略化のため に電子および負イオンの影響を考慮しなかった.そのた め、正イオン連続式のみで計算を行った.正イオン連続 式は式(3)で表される.

$$\frac{\partial N_p}{\partial t} + \nabla \cdot \left( -D_p \,\nabla N_p + \mu_p E N_p \right) = 0 \tag{3}$$

t[s]は時間,  $D_p[m^2/s]$ は正イオンの拡散定数,  $\mu_p[m^2(V \cdot s)]$ は正イオンの移動度, E[V/m]は電界強度,  $N_n[m^3]$ は大気中の中性粒子数密度,  $\alpha[m^3/s]$ は電離係数,  $r_e[m^3/s]$ は正イオンと負イオンの再結合定数である. 流体解析には, Navier-Stokes 方程式を用いた. また, イオン風の駆動力は荷電粒子に働くクーロン力となる<sup>12)</sup>. そこで,式(4)に示すクーロン力を Navier-Stokes 方程式 の外力項に代入してイオン風の計算を行う<sup>13)</sup>.

$$F = \rho E \tag{4}$$

電界強度 E は式(5)より得られる.

$$E = -\nabla V \tag{5}$$

Navier-Stokes 方程式を式(6)に示す.

$$\rho_{g} \frac{\partial U}{\partial t} + \rho_{g} (U \cdot \nabla) U = -\nabla P + \eta_{g} \nabla^{2} U + F$$
(6)

U[m/s]は流速, P[Pa]は圧力,  $\rho_s[kg/m^3]$ は空気 密度,  $\eta_s[Pa\cdot s]$ は空気の粘性係数である.

Navier-Stokes 方程式によって得られた電気流体力学場 に荷電粒子を流入した際の粒子トレーシング式を式(7) に示す.

$$\frac{d(m_p v)}{dt} = m_p g \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} + \frac{1}{\tau_p} m_p (u - v) + eZE$$
(7)

右辺は流体に作用する力であり、重力、抗力、電気力 である. $m_p$ [kg]は粒子の質量、(u-v)[m/s]は流体と 粒子の相対速度を表している.抗力における式には、式 (8)を代入した<sup>14)</sup>.また、電気力における荷電数Zには 式(9)に示す飽和帯電量の式を用いた<sup>12)</sup>.d[ $\mu$ m]は粒径、  $\varepsilon_s$ は粒子の比誘電率である.また、本解析では、帯電粒 子の動きを運動量保存式に考慮していない、電界中の粒 子に働くグラディエント力は、クーロン力に比べて著し く小さいことが報告されているため<sup>15)</sup>、グラディエント 力を考慮せず、電気力はクーロン力のみで解析を行った.

$$\frac{1}{\tau_p} = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \tag{8} \qquad Z = \frac{3\pi\varepsilon_0 \varepsilon_s d^2 E}{e(\varepsilon_s + 2)} \tag{9}$$

ホール型 ESP の解析モデルを図1に示す.本研究では, 流体解析の妥当性確認のため,粒子可視化実験<sup>11)</sup>との比 較検討を行った.そのため,解析モデルは粒子可視化実 験で用いた装置を二次元モデルで形成している.ホール 中心の位置は,最もイオン風が強く吹く<sup>9)</sup>針電極の中心 直下に設置した.針先には正極性7kVを印加した.電極 間距離と孔径は20mm,ホール型電極およびその下部の 平板電極を接地とし,電極表面はV=0kVとした.モデ ル内の材質は,空間を空気,各電極を鉄として設定した. また,モデル内の要素サイズは空間を最大 0.676 mm,最



図1 シミュレーションモデル

Fig.1 Simulation model.

(2)

小 0.0078 mm, 電極を最大 13.4 mm, 最小 0.06 mm, 境界 面を最大 0.338 mm, 最小 0.0078 mm とした. 正イオンは 針電極の先端に与え, 接地電極の境界における電荷密度 はゼロとした.また、流体解析における初期条件は、U=0 m/s, P=0 Paとした. また, 電極表面ではすべりなしとした. ESP 内の主流体速度は 0.15, 0.3, 0.5, 1.0 m/s とした. 粒子 は図1のポイント電極から集塵電極までをベルシェイプ 状に描いた破線上に配置した。本研究では、シミュレー ションの簡略化のために、荷電粒子が多いと考えられる 電気力線が最も強い線上に, 粒子が飽和帯電した状態を 模擬した.入口から粒子が流入し、徐々に帯電しながら 捕集されるシミュレーションについては、今後の課題で ある. 400 cc の 4 サイクルディーゼルエンジンから排出さ れる排ガス中の粒径 5 µm 以上の粒子個数密度は、およそ 1000個/cm<sup>3</sup>である、この粒子密度から勘案し、粒子軌跡 を追うのに十分な個数である 150 個の粒子を一様に並べ た. 粒子条件は、粒子可視化実験で用いた水酸化マグネ シウムとケイ酸塩からなるタルク粒子に設定した. 比誘 電率は2, 粒径は1,3,6.24 µm で解析を行った. 6.24 µm は粒子可視化実験で使用したタルク粒子の粒径である.

#### 3. 結果及び考察

電界分布を図2に示す.図中の濃淡は最小値を黒色, 最大を白色とした.電界は針先が最も強いことが確認で きた.また,ホールのエッジ付近の電界が強くなるエッ ジ効果が確認された.ホール型 ESP はエッジ効果によ り粒子はホール内に誘導されやすくなると考えられるた め,従来の針対平板型 ESP とホール型 ESP の電界強度 を比較した.図3に電界の比較を示す.横軸は測定点を 示しており,0mmをホールの中心とした.ホール径は 20mmのため,-10と10mmがホールのエッジ付近とな る.また,従来型 ESP ではその測定点に相当する接地 電極面の鉛直方向の電界分布を示している.従来型 ESP に比べて,ホール型 ESP のエッジ部分の電界強度は3倍 以上に強まることが確認できた.このことから,帯電粒 子に働くクーロン力は非常に高いと考えられる.

イオン風による ESP 内の流体を調べるため, 主流体速 度を 0 m/s として流体解析を行った. 図 4 にイオン風分布 を示す. 電圧印加後 2 秒間の解析を行い, その進展を示 している. (a) に 0.1 秒後のイオン風を示す. 針先近傍か ら発生したイオン風が, 接地電極に向かって吹いている. (b) に 0.5 秒後のイオン風を示す. イオン風はホール内に 流れ込む流れと, 接地電極上に渦を形成している. (a) では流れが左右対称だったが, (b) では非対称になり始 めている. ケーシングの出口に流出孔が設けられている



図3 各測定点における電界の比較 Fig.3 Comparison of electric field at each measurement point.



(c) 2.0 s 図 4 各時間におけるイオン風分布 Fig.4 Distribution of ionic wind at each time.

ため,流れ場が左右対象にならなかったと考えられる. また,流出孔の有無によってモデルの左端と右端に流体 抗力の差が生じる.流体は抵抗の少ない方向に流れるた め,流体は図中の左から右に流れたと考えられる.(c) に2秒後のイオン風を示す.形成されていた渦流が ESP 出口方向へと移動し,ホールへと流入する流体の流速も 増加している.その後のイオン風分布では,この渦が移 動する流れが何回も繰り返されることが確認された.

イオン風の解析に,主流体の条件を加えた流体解析を 行った.図5に各主流体速度における流体分布を示す. 全て電圧印加後2秒後の流体分布である.(a)に主流体



(d) 1.00 m/s

図 5 各主流体速度における流体分布 Fig.5 Distribution of fluid flow at each primary flow velocity.

速度 0.15 m/s の流体分布を示す. 主流体速度に比べてイ オン風が速いため,ホール電極上に渦が形成されている. また,ホールに流れ込む風速が速いため,ホール内から 逆流する流体の流れも速いことが確認できた. (b) に 主流体速度 0.3 m/s の流体分布を示す. 渦は形成されず に ESP 流出方向への流れが速くなった. また,ホール 内部への流れも安定しており,粒子がこの流体に誘導さ れ,ホール内部へ流入すると考えられる.

(c) に主流体速度 0.5 m/s の流体分布を示す. ESP 流 出方向への速度が増加しているため、ホールに流入する 流れが非常に少なくなっている.(d) に主流体速度 1.0 m/s の流体分布を示す. 1.0 m/s では、渦も形成すること なく出口方向へ流れている様子が確認できた.

ホール内に流入する流体の速度は、ホール型 ESP の性 能向上に重要な要素の一つである. そこで、流体のホール 流入速度を流体分布から測定した. 図6に流体のホール流 入速度を示す. 測定点はホールのエッジ直下である. 主流 体速度0 m/s や 0.15 m/s では、イオン風が主流体に遮られ ることなくホールに流入するため、速度は速くなった. 一方、 主流体速度 0.50 m/s や 1.00 m/s では、主流体速度の影響 によってイオン風が遮られ、ホールに流入する流体の速度 が遅くなっている. 帯電していない粒子の場合、主流体速 度 1.00 m/s では流体に流され ESP 流出方向へ排出されて しまうと考えられる. 一方、粒子は通常コロナ放電によっ て帯電される. そのため、粒子にクーロン力が働き、主流



図 6 流体のホール流入速度と主流体速度の関係 Fig.6 The inflow rate of fluid in the hole as a function of primary flow velocity.

体速度1.00 m/sにおいてもホールに流入すると考えられる. 流体分布の妥当性を検証するため、同サイズのモデルを 用いた粒子可視化実験<sup>11)</sup>と流体の比較を行った.図7に 主流体速度 0.15 m/s における流体分布および粒子挙動を示 す.(a)の流体解析の図中にある破線は、(b)と同じスケ ールの範囲を示している. 粒子可視化実験では、モデルの 上部からレーザーシートを照射し、ホール型 ESP 内の粒子 挙動を可視化した. 中央にある白い針が針電極, 白い線が ホール電極、白い斑点がトレーサ粒子である、電圧値は 5.6 kV. 主流体速度は 0.15 m/s である. 流体分布では. ホール の後段に渦が形成され、流体がホール内に流入しているこ とが確認できる. 粒子可視化実験では,帯電粒子が流体と クーロン力によって移動し<sup>10)</sup>,ホール内部へと流入してい る様子が確認できる. また, 後方電極上に粒子が少ないの は、流体分布で示されている強い渦によって粒子が後方電 極上に移動できていないためと考えられる、このことから、 流体分布は概ね実現象と一致していることが確認できた.

流体解析結果に、粒子トレーシングの式を与え粒子挙 動解析を行った. 主流体速度は解析開始から設定値に到 達するまでに 0.5 秒要する. そのため, 電圧印加後 0.5 秒後に粒子を150個投入した.図8に各主流体速度にお ける粒子挙動分布を示す. 粒子のポイントは2.0秒後の 地点で、図中の黒線は粒子の1.5秒間の軌跡を表してい る. (a) の主流体速度 0.15 m/s では、イオン風の影響 が支配的なため、粒子が針の前方で渦を描いた後、ホー ルに流入していることが分かる. ESP 内の流れはイオン 風によって層流から乱流へと変化している、そのため、 粒子は針電極先端の上方を回る渦流に追従し、ホールに 流れ込んだと考えられる. また. 粒子はホールのエッジ 付近にも付着した、これは、エッジ効果によりホール付 近の電界が強まったため、粒子が付着したと考えられる. 粒子挙動解析により、ホール内に粒子が流入し捕集され る挙動が確認できた.(b)の主流体速度 1.00 m/s では,

1.0

0.6 0.4 0.2



(b) Particle behavior

図7 流体分布および粒子挙動画像(0.15 m/s)



0.15 m/s に比べて,ホールに流入する粒子の量が減少している.粒子の移動方向はイオン風,クーロン力,主流体速度のベクトル和に依存する.そのため,主流体速度を増加することでホールに流入する粒子の量が減少した.

図9に各粒径における粒子挙動分布を示す. 主流体速 度は 0.50 m/s とした.(a)の粒径 1.00 µm では、粒子が ホール手前のエッジおよびエッジ周辺の集塵電極上に付 着していることがわかる. 粒径が小さいと、粒子は主流 体やイオン風の影響を受けにくくなり、 電気的な力が支配 的となる、そのため粒子がクーロン力によってエッジや集 塵電極上に捕集され、ホール流入率が少なくなった.(b) の粒径 3.00 µm では、粒径が大きくなることで流体の影響 を受けやすくなり、少量の粒子がホール後方のエッジで 捕集されている.これは、粒子トレーシング式(7)の抗力 項における粒径 d<sub>μ</sub> [μm] が増加するためである. (c) の 粒径 6.24 µm では、更に粒径が大きくなることでホールに 流入する粒子の量が増加した.このことから,ホール型 ESP は小粒径粒子を電気的な力で捕集し、電極板上で凝 集肥大して再飛散する大粒径粒子をイオン風とクーロン 力を用いてホール内に流入できることが明らかとなった.

ホールに流入した量を定量的に評価するため、ホール



- 図8 粒子挙動と主流体速度の関係
- Fig.8 Relationship between particle behavior and primary flow velocity.



(c)  $6.24 \,\mu m$ 

図9 粒子挙動と粒径の関係

Fig.9 Relationship between particle behavior and particle diameter.

流入率を算出した.ホール流入率とは,元の粒子個数 150個に対して,どれだけの個数の粒子がホール内に流 入したかを表している.図10にホール流入率と主流体速 度の関係を示す.主流体速度が遅い場合,粒径が大きい とホール流入率は高い値を示した.これは,大粒径の方 が流体の影響を受けやすいためイオン風の影響を受け, ホール内に流入したと考えられる.一方,粒径が小さいと, 流体よりクーロン力の方が支配的となるため,ホールの エッジや集塵電極上に捕集される粒子が増えた.主流体 速度が増加すると,大粒径粒子に対する影響が強まるた め,粒子は後方へと流される.そのため,0.3 m/sでは手 前のホール電極で捕集されていた粒子が.0.5 m/sでは後 方に流されてホール内に流入するため,ホール流入率が微 増している.しかし,更に主流体速度を増加すると,粒子 はホールに流入せずにホール後方へと流された.また,小



図10 ホール流入率と主流体速度の関係

Fig.10 The influc rate of particle in the hole as a function of primary flow velocity.

粒径および中粒径は主流体の影響を受けにくいため、ホー ル流入率に大きな差は生じなかった.このことから、粒径 と主流体の条件によっては、ホールに流入する粒子が少な いことが判明した.また、粒子可視化実験のホール流入率 は主流体速度 0.15 m/s の時 80%、0.5 m/s の時 10%であっ た<sup>110</sup>.本解析では、粒子を一様に配置したが、実際の流れ 場では粒子数密度が場所により異なる.そのため、シミュ レーションと実験値に差が生じたと考えられる.

#### 4. おわりに

ホール型 ESP のモデルにおける電界解析,流体解析, 粒子挙動解析を行うことで,高風速下におけるホール型 ESP の性能評価や集塵に最適なホール型 ESP の設計に 繋がる.本研究では,ホール型 ESP の基礎研究として, ESP 内の静電場中における流体解析と粒子挙動解析を行 った.本研究で明らかになったことを以下に述べる.

- 1. 従来型 ESP に比べて,ホール型 ESP は,エッジ効果 により電界強度が非常に高い.そのため,クーロン 力による粒子の捕集がしやすい.
- 流体解析により、ホール内へと流れ込む流体が確認 できた.また、主流体速度が増加すると、ホール内 の流体速度は減少した.
- 3. 流体解析と粒子可視化実験の結果を比較したところ, ESP内の流れに良い一致が見られた.
- 4. 粒子挙動解析により、ホール内に捕集される粒子を 確認できた。
- 主流体速度が遅い場合、粒径が大きいと、ホール流入率は高い値を示した。一方、粒径が小さいと、流体よりクーロン力の方が支配的となるため、ホールのエッジや集塵電極上に捕集される粒子が増えた。
- 6. ホール型 ESP の性能評価をシミュレーションで行えた.

今後は船舶ディーゼルから排出される高風速の主流体 速度で解析を行い,集塵に最適なホール径,針電極の本 数,針電極間隔を検討する必要があると考えている.

本研究の一部は, JSPS 科研費 JP16H04606 の助成を受けたものである.

#### 参考文献

- 村井一弘,川島陽介:電気集塵装置の性能に及ぼす電気 流体力学場の影響.エアロゾル研究,11[2](1996)129-136
- 2) 村井一弘,本田逸郎:電気集塵装置の性能に関するシミ ユレーション.可視化情報学会誌, 19 [1] (1999) 133-136
- 大久保利一,村上昭年,足立宜良:線対平行平板電極形 電気集じん装置における流れ場解析と実験.電気学会論 文誌 A, 106 [8] (1986) 377-383
- K. S. P. Nikas, A. A. Varonos and G. C. Bergeles:Numerical simulation of the flow and the collection mechanisms inside a laboratory scale electrostatic precipitator. Journal of Electrostatics, 63 [5] (2005) 423-443
- 5) N. Famoosh, K. Adamiak and G.S.P. Castle:3-D numerical analysis of EHD turbulent flow and mono-disperse charged particle transport and collection in a wire-plate ESP. Journal of Electrostatics, 68 [6] (2010) 513-522
- Toshiaki Yamamoto and Miyuki Okuda:Three-Dimensional Ionic Wind and Electrohydro-dynamics of Tuft/Point Corona Electrostatic Precipitator.IEEE Tran. on Industry Applications, 39 [6] (2003)
- J.D. Bassett, K Akutsu and S. Masuda: A Preliminary Study of Re-entrainment in an Electrostatic Precipitator. Journal of Electrostatics, 3 [4] (1977) 311-325
- 8) 宮下皓高,江原由泰,乾 貴誌:ホール型電気集塵装置 によるディーゼル微粒子除去.マリンエンジニアリング 学会誌, 52 [6] (2017) 788-793
- 9) 宮下皓高, 江原由泰, 榎本 譲, 乾 貴誌:ホール電極 におけるイオン風速度. 静電気学会誌, 41 [2] (2017) 99-104
- 10) 宮下皓高,江原由泰,角田知弘,榎本 譲,乾 貴誌: 電気集塵装置内における粒子挙動の PIV 解析.電気学会 論文誌 A, 136 [12] (2016) 797-803
- H. Miyashita, Y. Ehara, T. Inui and Y. Aoki:Particle behavior analysis in hole-type electrostatic precipitator using PIV. in Proc. IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meeting, (2017) 1-7
- 12)静電気学会:静電気ハンドブック,株式会社オーム社 (2006)
- N. Takeuchi: コロナ放電により発生するイオン風の COMSOL Multiphysics を用いたシミュレーション. 静電 気学会誌, 40 [4] (2016) 168-171
- ウィリアム C. ハインズ:エアロゾルテクノロジー,株 式会社井上書院 (2006)
- 15) S. Sakata, M. Inoue, S. Chirifu, T. Yoshida and T. Okada:Aerosol Deposition on Wafer Surface.Trans. SHASE Japan, 40 (1989) 47-55