

論 文

電気集じん装置における EHD 場の解析と実験

藤島 英勝^{*,1}, 上田 泰稔^{**}, 富松 一隆^{***}

(2003 年 10 月 2 日受付; 2004 年 6 月 25 日受理)

Numerical and Experimental Investigation of Electrohydrodynamics
In Electrostatic PrecipitatorHidekatsu FUJISHIMA^{*,1}, Yasutoshi UEDA^{**} and Kazutaka TOMIMATSU^{***}

(Received October 2, 2003; Accepted June 25, 2004)

The particle collection process is very complicated and affected by electrostatic field together with electrohydrodynamic (EHD) field and charged particles in electrostatic precipitator (ESP). For designing ESP collection efficiency, it is essential to predict electrical characteristics and to understand EHD flow distribution. A two-dimensional EHD simulation for the wire-plate electrode was first carried out and then, the experimental study and operational results on voltage-current characteristics were investigated. Next, three-dimensional EHD simulation was investigated, together with gas flow velocities measured in the model ESP by the laser doppler velocimeter, to provide flow distribution for the spiked-discharge electrode ESP.

1. 緒 言

電気集塵装置 (ESP) の合理的な設計を行うには性能と密接な関係のある荷電特性を定量的に把握し、予測することは重要である。また、ESP 内における粒子の挙動は荷電特性のみならず、ガス流れ分布とも密接に関係している。ESP における静電流体 (EHD : Electrohydrodynamic) 場の解析は、これまで二次元及び三次元の主に線対平板型の電極形状に対して実施されている⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾。代表イオン風速度と主ガス流速の比である EHD 数が大きくなると、イオン風の影響が大きくなることや、EHD 数が同じであれば相似な流れが得られることなどが判明している^{(1), (5)}。しかし、実機の ESP 電極形状は突起型放電極と凸凹型集塵極との組合せが多く、この場合には主流ガスに対して垂直な放電極、集塵極の上下方向にも流れが発生している。最近、山本らは三次元 EHD の解析に成功し、ガス流れ方向にスパイラル状リングフローがあると報告している⁽⁹⁾。本研究では実験と解析によって実機 ESP 荷電特性の予測手法と突起型電極に対し三次元 EHD 場の流れの大規模な把握を行った。

2. 数値解析

2.1 電場解析

電場を支配する基礎方程式は Poisson と電流保存の式である。

$$\nabla^2 V = -(\rho_i + \rho_d) / \epsilon_0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \rho_i (\mu_i \mathbf{E} + \mathbf{U}) \approx \rho_i \mu_i \mathbf{E} \quad (3)$$

但し V : 電圧 (V), ρ_i : イオン密度 (C/m^3), ρ_d : ダスト電荷密度 (C/m^3), ϵ_0 : 真空の誘電率 (F/m), \mathbf{J} : 電流密度ベクトル (A/m^2), \mathbf{E} : 電界ベクトル (V/m), μ_i : イオンの移動度 ($m^2/V/s$), \mathbf{U} : ガス流速ベクトル (m/s)

なお、イオン速度はガス速度より 2 枝も大きい ($\mu_i \mathbf{E} \gg \mathbf{U}$) ので、式 (3) において \mathbf{U} の項は省かれる。解析空間は電極形状によって相違し、線対平板電極では放電極を中心にガス通路の半分は対称とした。突起型対凸凹電極では放電極が中心の対称でないため通路全体空間とした。図 1a) に線対平板電極、図 1b) に突起型対凸凹電極 ESP の座標と解析領域を示す。計算は集塵板上の最大電流密度の初期値 J_p を与え、Lawless 等⁽¹⁰⁾ が提案した J_p と V_0 との関係式 (4)-(9) から印加電圧 V_0 を求める。その初期値 J_p に対する放電極近傍での生成イオン密度 ρ を求め、式 (2) から集塵空間のイオン密度分布を、さらに式 (1) から電圧分布を求める。そして、電界強度分布を計算し、式 (3) を用いて集塵板上の最大電流密度 J_p が求まる。その J_p と初期 J_p との差が 0.1% 以下になるまで、上述の生成イオン密度を調整しながら、計算を繰り返し行う。

$$V_0 = V_c + Ec r_w \sqrt{1+B} - I - In ((I + \sqrt{1+B})/2) \quad (4)$$

$$B = J_p D^3 / (\epsilon_0 \mu_i (Ec r_w \pi/2)^2) \quad (5)$$

但し V_c : コロナ開始電圧 (V), Ec : コロナ開始電界強度 (V/m)

D : 放電極と集塵極の距離 (m), r_w : 放電極半径 (m)

キーワード : 電気集塵装置、荷電特性、3 次元 EHD 解析、イオン風、

* 神戸市兵庫区和田宮通 7-1 西菱エンジニアリング

** 高砂市荒井町 三菱重工業(株)高砂研究所

*** 神戸市兵庫区和田崎町 2-1 三菱重工業(株)神戸造船所

† hfujish@attglobal.net

また、コロナ開始電圧 V_c 及びコロナ開始電界強度 E_c は、それぞれ次式で表される⁽¹⁰⁾。

$$V_c = V_{ci} / \left[1 - \sum_{j \neq i} \frac{\ln \frac{\cosh(\pi C_j/2D) - \cos(\pi r_j/2D)}{\cosh(\pi C_i/2D) + \cos(\pi r_i/2D)}}{\ln \frac{1 - \cos(\pi r_i/2D)}{1 + \cos(\pi r_i/2D)}} \right] \quad (6)$$

$$V_{ci} = E_c r_w \ln(4D/\pi r_w) \quad (7)$$

$$E_c = (31.028 \times \delta + 9.54 \times \sqrt{100 \delta / r_w}) \times 10^5 \quad (8)$$

$$\delta = (273 + 25) / (273 + T) \times P / 1.013 \times 10^5 \quad (9)$$

但し r_j : j番目の放電極の半径 (m)

r_i : 電圧を求める放電極 (i番目) の半径 (m)

C_j : i番目とj番目の放電極との距離 (m)

δ : 相対ガス密度 (kg/m^3), T : ガス温度 ($^\circ\text{C}$)

P : 圧力 (Pa)

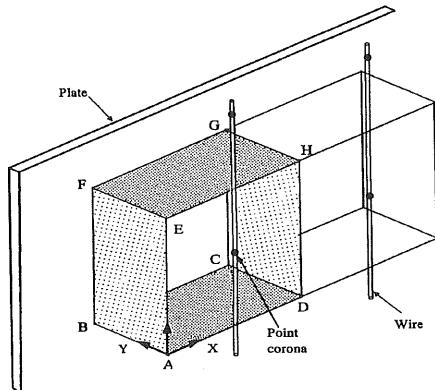


図 1 a) 線対平板電極解析空間
Fig. 1a) Analysis domain for the wire-plate electrode geometry.

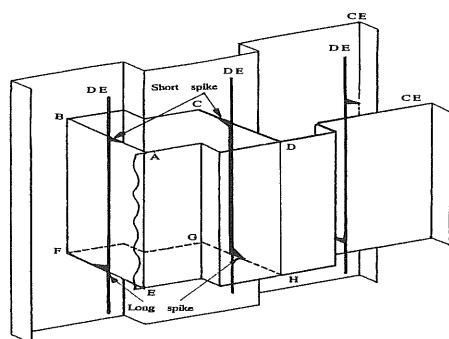


図 1 b) 突起型対凸凹電極解析空間
Fig. 1 b) Analysis domain for the spiked electrode vs. convexo-concave electrode geometry.

なお、境界条件は各対称面の電界強度 $E_x, E_y, E_z = 0$ とし、電圧 V は放電極上では V_0 、集塵極では $V = 0$ 、そして、イオン密度 ρ は放電起点では ρ_0 とした。しかし、凸凹電極の場合は図 1 b) に示す通り y 方向の電場の境界条件は、集塵極上の電位 $V=0$ となる。電場解析はまず、二次元の線対平板電極に対し実施した。

その結果を基に三次元の突起型対凸凹電極に対し展開した。

2.2 EHD 場解析

流れ場支配方程式は連続の式とナビエストークスの式である。

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = - \frac{1}{\rho_g} \nabla \cdot \mathbf{P} + \nu \nabla^2 \mathbf{U} + \frac{1}{\rho_g} \mathbf{f} \quad (11)$$

但し \mathbf{U} : 流速ベクトル (m/s), ρ_g : ガス密度 (kg/m^3), \mathbf{P} : 圧力 (Pa)

ν : 動粘性係数 (m^2/s), \mathbf{f} : 外力 (クーロン力密度) (N/m^3)

ナビエストークスの外力項 \mathbf{f} として電界強度とイオン空間電荷密度の積であるクーロン力密度を代入し、方程式を解いた。計算は乱流、アルゴリズムは差分法を用い、グリッド数は放電線 1 本あたり $20 \times 10 \times 10$ とした。境界条件は入口及び固体壁面は流速固定条件、その他の対称面はすべり壁とした。EHD 場解析は、まず二次元において線対平板電極に対し実施し妥当性を評価した。その二次元場結果を基に突起型対凸凹電極に対する三次元 EHD 場に展開した。

3. 実験装置と実験方法

3.1 モデル ESP での荷電特性試験

電場解析モデルの妥当性を確認するため線対平板電極モデル ESP の荷電特性を調査した。

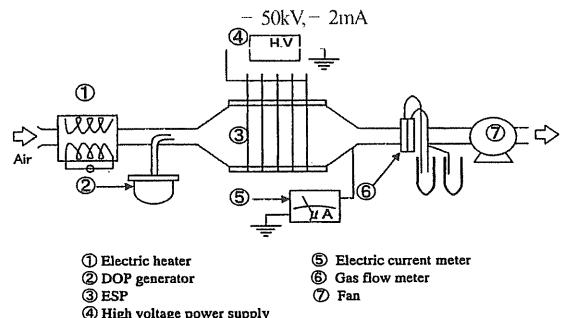


図 2 モデル ESP 荷電特性試験装置
Fig. 2 Experimental setup using model ESP.

図 2 に示す実験装置の構成は① 電気ヒータ、② DOP (dioctyl phthalate) 粒子発生器、③ モデル ESP、④ 高電圧電源装置、⑤ 電流計、⑥ ガス流量計、⑦ ファンである。モデル ESP はガス通路 1 組で放電線 (直径 0.2 mm) 5 本と平板集塵板 (高さ 100^H × 全長 400^L mm)、集塵板間隔は 80 mm、放電線間隔 50 mm、そして、高電圧電源装置 (定格 - 50kV, - 2mA) である。ファンで空気 (温度 34 °C) を吸込み、実機 ESP でのダストによる高空間電荷条件を模擬するため、ESP 前に DOP 粒子 (平均径 0.4 μm) を注入し ESP の電圧、電流値を測定した。なお、ESP 内流速は 0.69 m/s、DOP 濃度は 1.10, 3.25 g/m³N の 2 条件で計測した。さらに、集塵板上に 10 mm 幅の金属板電極 25 枚を貼り付け、各々のテープ電極の電流 (時間平均値) を電流計で計測した。

3.2 ESP 内流速分布計測実験

実際のESP内での流れに対する電場の影響把握、解析結果との検証のためESP内流速分布を高電圧下状態で計測した。図3に計測装置の概略を示す。テストESPは突起型放電極と凸凹型集塵極の組み合わせで、奥行長640 mm、高さ400 mmで、その集塵電極間隔は300 mm、放電極の本数は隣接放電極の影響を考慮に入れて3本とした。ファンで空気(温度10 °C)を上方から吸い込み、トレーサ粒子をESP前に注入してESP内流速をレーザ・ドップラーレーザー流速計で測定した。なお、トレーサ粒子としてはDOP粒子(平均径0.4 μm、誘電率5.1、比重0.89 g/cm³)を使用し、計測点をトラバースする場合に有効な後方散乱光を検知する方法を用いた。DOP粒子濃度は7.8 g/m³Nとした。

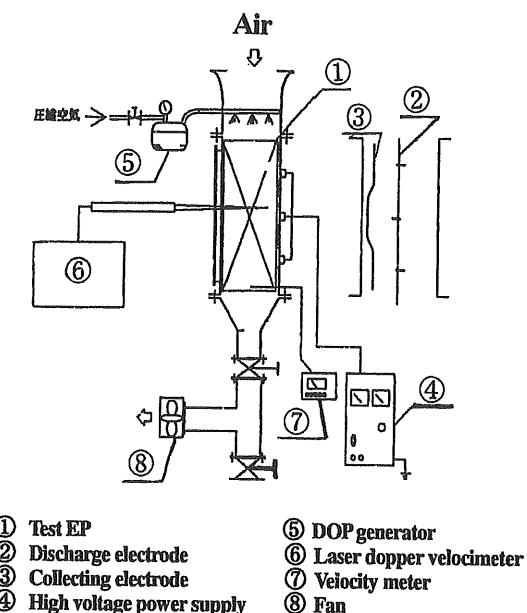


図3 ESP 内部流速分布計測実験装置
Fig. 3 Experimental setup of velocity measurement.

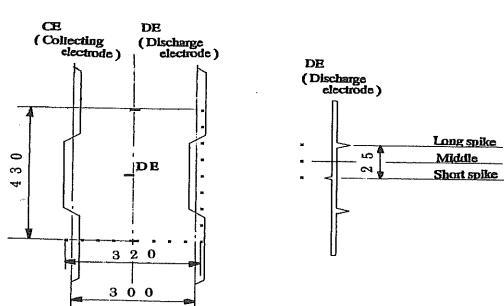


図4 ESP 内部流速分布計測点
Fig. 4 Velocity measurement point.

テストESP内での流速の計測点を図4に示す。電極高さ方向は突起を除けば対称となるので長い突起と短い突起とその中間位置の3ヶ所のx-y面に対し、各面毎にガス流れ方向と集塵電極間方向に9×9の計81点であったが、実際には集塵電極の凸凹部及び放電極自身のある位置を除くので計67点とした。なお、短い突起は集塵板の凸部に、長い突起は凹部に面する配置にな

っている。計測においてはトレーサ粒子が帶電するためにその挙動がクーロン力の影響を受けるが、電極間隔0.15 m、電圧-40kV、平均電流密度-0.35 mA/m²の条件におけるクーロン力に起因するDOP粒子の速度成分は約5 cm/sと計算され、測定される流速が0.5 m/s以上ありクーロン力の影響は計測誤差範囲内にとどまるといえる。

4 結果と考察

4.1 ESP 荷電特性

1) モデルESPでの結果

図5は線対平板電極モデルESPの電圧、電流の実測値とモデルESP全体の電場解析結果により求められた特性曲線を示す。解析はまず、空気負荷(DOP粒子無)時の荷電特性(電圧、電流)が実測値と一致するように放電線の等価相当径などのパラメータを決め、その後、同じパラメータを用いてDOP粒子負荷時の荷電特性を計算した。解析結果は実測値とよく一致しており、本解析法により、ダスト空間電荷の荷電への影響を実用レベルで評価できると考える。

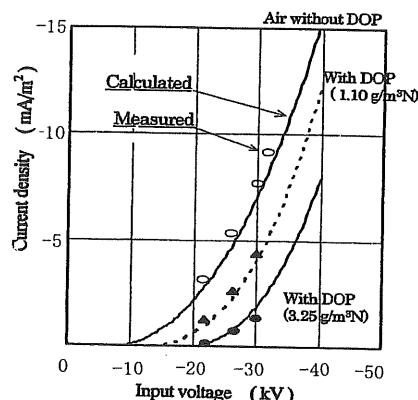


図5 モデルESPの荷電特性曲線
Fig. 5 V-I characteristics of model ESP.

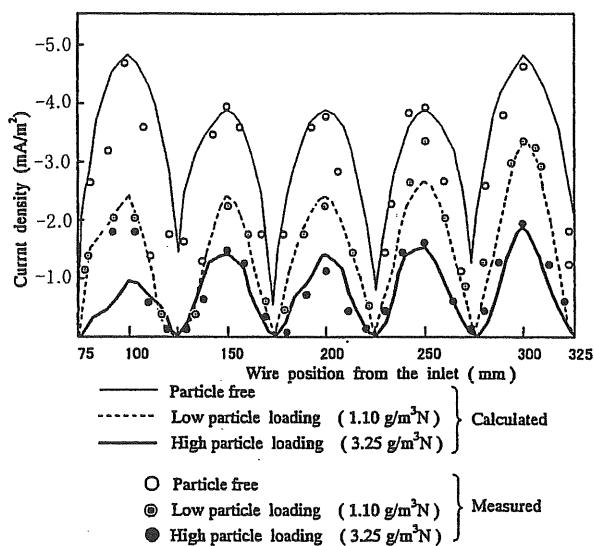


図6 モデルESP集塵板上の電流密度分布
Fig. 6 Current density distribution on the collecting electrode.

また、集塵板上の電流密度分布の実測結果を図6に示す。空気負荷時は、5本の放電線直下の電流密度は1本目と5本目が若干大きくなっている。これは1本目と5本目の境界条件が他の放電線と特に異なり、隣に放電線のない方側からの放電抑制がないためである。一方、DOP粒子負荷があるときの電流密度分布は1本目が小さく、下流側になるほど増加しているのはDOP粒子による空間電荷効果の影響によるものである。解析で求められた電流密度分布曲線は、空気負荷時およびDOP粒子負荷時ともに実測結果と約10%程度の誤差範囲で合致している。

2) 実機ESPでの結果

モデルESPでの解析結果を踏まえ、実機ESPへの適用を試みた。検討した実機ESPの仕様は石炭焚きボイラー用3室形ESP（ガス通路数28、電極高9m、集塵極間隔300mm）で各室あたり放電線の本数は24本である。その運転条件はガス量150,000 m³/N/h、温度142°C、入口ダスト濃度8.6 g/m³N、ダスト平均粒径11.0 μm、ダスト電気抵抗率2.6×10¹¹ Ωcm、EP内流速は0.95 m/sであった。電極は突起型対凸凹電極が採用されているが、電場解析では突起型放電極はその突起から発生するイオン密度を模擬することは容易ではないので、簡便法として同等の荷電特性を有する等価相当線径と平板集塵極を採用した。ESP電圧、電流特性の解析結果は空気負荷時ではモデルESPと同様に実測値とよく一致したが、図7(a), (c)に示すようにダスト含む実ガス負荷時では大きな差が生じた。これは約1年間の運転経過によって、特に放電極のダスト付着による肥大と集塵極のダストによる汚れのため、荷電特性が変化したものと考え、その効果を放電線の等価相当径を大きくすることで計算に反映した結果は図7(b)に示す通りであり、実測値をほぼ再現できることがわかった。

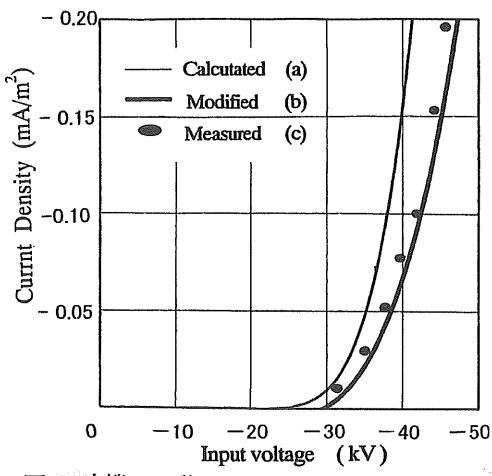


図7 実機ESP荷電特性曲線

Fig. 7 V - I characteristics for full-scaled ESP.

4.2 2次元EHD場解析結果

線対平板電極の2次元EHD解析を図8a)に示す印加電圧、平均電流密度に対して実施した。その結果が図8a)であるが、

代表イオン風速と主ガス流速との比であるEHD数(N_{EHD})が1.0以上では放電極直下の集塵極近傍に渦が発生する結果を得た。これは図8b)に示す同条件で実施した足立らの実験結果^[5]と流線がほぼ一致していることから解析の妥当性を得たと考えた。なお、 N_{EHD} は以下のように定義されている^[5]。

$$N_{EHD} = U_{EHD} / U_0 \quad (12)$$

$$U_{EHD} = \sqrt{\frac{J_p D}{\mu \rho_g}} \quad (13)$$

但し U_0 : 入口ガス流速 U_{EHD} : イオン風速,
 J_p : 集塵極上の最大電流密度 μ : イオン移動度,
 D : 放電極と集塵極の距離 ρ_g : ガス密度

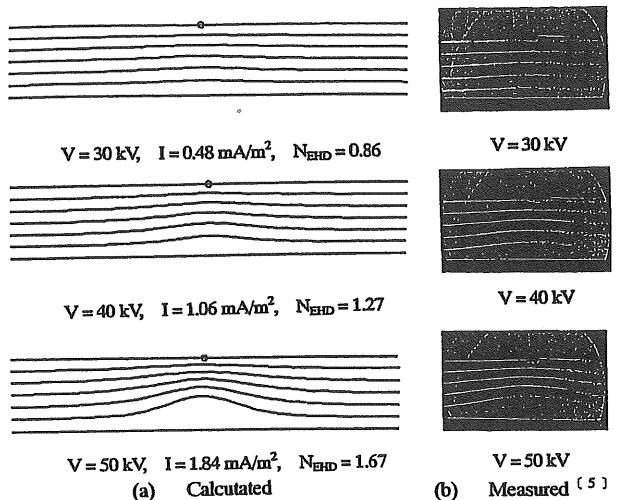


図8 流線の解析と実験との比較

Fig. 8 Streamlines for calculated and measured results.

4.3 流速分布の計測結果

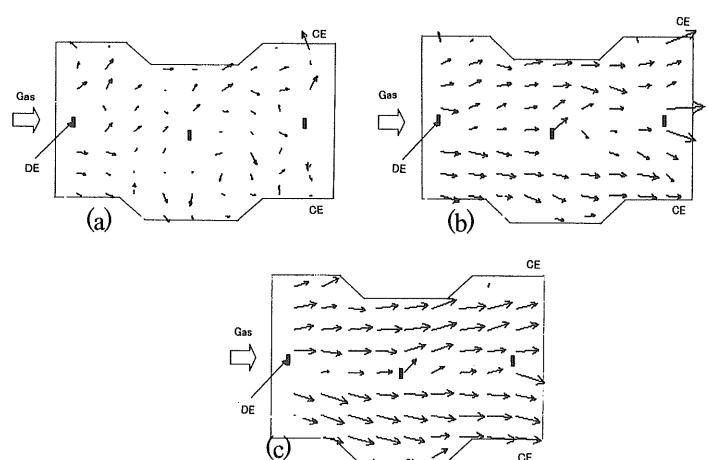


図9 X-Y面での流速分布計測結果

Fig. 9 Measured gas velocities for $V=-30$ kV, $I=-0.31$ mA/m².
(a) 0.1 m/s (b) 0.5 m/s (c) 1.0 m/s

計測条件は主ガス流速3条件(0.1 m/s, 0.5 m/s, 1.0 m/s)に対し印加電圧3条件(0 kV, -30 kV, -40 kV)でのESP内の流速分布を計測した。印加電圧0 kVではイオン風がない状態であり、

印加電圧が有りの場合との比較のために実施した。ここでは代表例として電圧 -30 kV , 電流密度 -0.31 mA/m^2 の荷電条件における各流速条件でのいずれも短い突起のある $x-y$ 面における結果 a) $N_{EHD} = 9.9$, b) $N_{EHD} = 1.98$, c) $N_{EHD} = 0.99$ を図 9 に示す。 N_{EHD} が小さい場合は主流が支配的となりイオン風による流体干渉は僅かであるが、 N_{EHD} が大きくなると図 9a) に示すように流体干渉が顕著となって放電線直下の部分では極めて乱れてい る。なお、電圧 -40 kV の場合も同様な傾向であった。

4.4 3次元 EHD 場解析結果

実機 ESP で採用されている突起型放電極と凹凸集塵極において、ESP の代表的空間における電場及び流れ場を把握するために放電線 1 本に着目した。さらに、放電線 3 本（集塵板 1 枚当たり）の場合で実施し、ESP 内流速の実測結果と比較した。

1) 放電線 1 本の場合

印加電圧 -38 kV , 平均電流密度 -0.4 mA/m^2 , 集塵極上の最大電流密度 -1.87 mA/m^2 , 主ガス流速 0.6 m/s の条件で実施した ($N_{EHD}=1.8$)。

(1) 電場特性

図 10 に集塵空間 $x-y$ 面における長い突起及び短い突起における電位分布及びイオン密度分布を示す。電位分布に関しては放電線の突起長さによる差は特に見られない。しかし、イオン密度分布は顕著な差がある。これはイオンが放電極の突起先端部からのみ発生するため突起の裏側には広がりにくく、また、突起の長い方側でイオンがより広い範囲に広がっている。

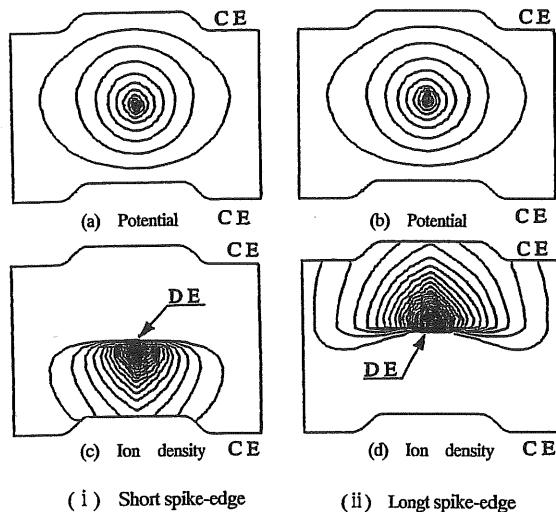


図 10 電位とイオン密度分布

Fig. 10 Potential and ion-density distributions for the one-wire spiked-electrode geometry.

(2) EHD 場

集塵空間 $x-y$ 面で長い突起のある位置での流速ベクトル分布解析結果を図 11a) に示す。入口付近では電界が弱く、イオン密度も低いことから電気力は弱く、イオン風による流体干渉が

少ない。しかし、電気力が強い放電極の近傍では放電極から集塵極方向に流体干渉が発生しており、図中の矢印のような流れとなっている。しかし、突起の裏側では上述のようにイオン密度が低いため、イオン風による流れの干渉は殆どないが、放電線のある位置より下流では突起のある方に引き寄せられている。一方、図 11b) は $y-z$ 面の結果である。放電線の突起は図中の上端と下端にあるが、その突起位置からイオン風が吹き出し集塵板に向かい、そして集塵板で反転下降、または上昇する矢印のような循環的な流れが見られる。なお、この $y-z$ 面は上下の突起間隔が 25 mm と小さいため電極高さ方向を 9 倍に拡大した図になっている。

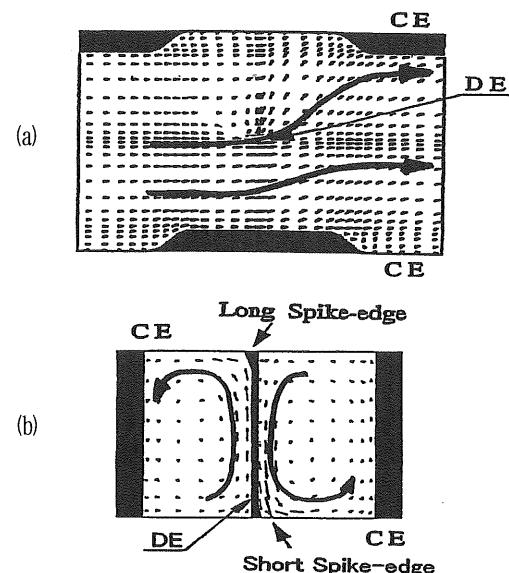


図 11 3 次元 EHD 場流速ベクトル図（放電線 1 本の場合）
Fig. 11 Velocity plots for the one-wire spiked-electrode geometry.
(a) at the long spike $x-y$ plane, (b) at the short spike $y-z$ plane

2) 放電線 3 本の場合の計測と解析結果

上述の ESP 内流速計測と同条件で EHD 解析を実施した。代表例として実機 ESP で一般的な主ガス流速 1.0 m/s における印加電圧 -40 kV , 平均電流密度 -0.7 mA/m^2 , 最大電流密度 -3.27 mA/m^2 の場合について述べる ($N_{EHD}=1.43$)。図 12 は集塵空間 $x-y$ 面での長い突起点、短い突起点、その中間点の 3 箇所における結果である。図 12 a), b), c) が各点での解析結果、図 12 e) は解析結果の三次元立体図である。そして図 12 d), f) が流速の実測結果である。

(1) 計測結果との比較

図 12 a) と図 12 d) は放電極の短い突起のある断面における前者が解析結果、後者が実測結果である。図 12 c) と図 12 f) は長い突起のある断面での結果である。解析結果ではいずれの突起の断面でも 3 本の放電極近傍から集塵極へのイオン風の影響で流れの干渉が見られる。図中には全体の流れを分かりやすくするために矢印で流れの傾向示している。一方、実測結果の図か

らも突起点からのイオン風の影響で主流が曲げられている様子がわかり、両者を比較すれば全体の流れの傾向はほぼ一致していると考える。しかし、細部の流れには差があり、解析結果の方が全体にイオン風の効果が強く出る傾向にある。原因として考えられることは、① 電場解析における集塵空間のクーロン力密度の計算精度が検証できていない、② 式(4), (5)の誤差のため放電極でのイオン生成量が実際よりも多くなっている、などが考えられ、追加検討の余地があるといえる。

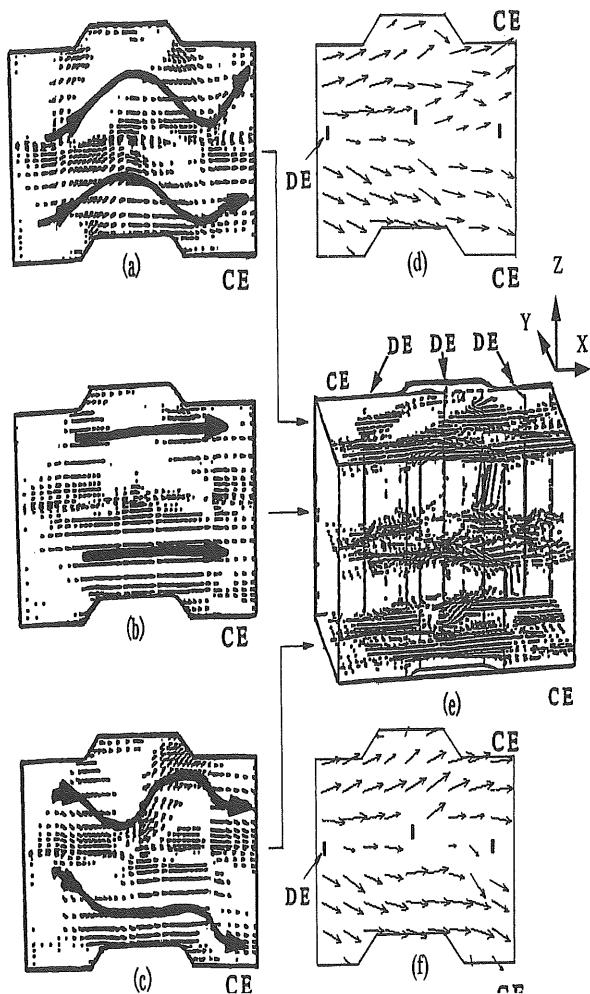


図 12 三次元 EHD 流速ベクトル図 (放電線 3 本の場合)
Fig. 12 Velocity plots for the three-wire spiked-electrode geometry.
(a) Calculated at the short spike, (b) Calculated at the middle,
(c) Calculated at the long spike x - y plane, (e) Three-wire calculated
dimensional view, (d) Measured at the short spike (f) Measured at the
long spike x - y plane.

(2) 三次元 EHD 場の流れ

図 12 e) は長、短の突起間領域の三次元流速ベクトルの解析結果であるが、長、短の突起点の間隔が 25 mm と小さいため電極高さ方向を 15 倍に拡大した図になっている。この図 12 a) - f) と図 11 b) の結果から EHD 場流れは次のようなものと考える。その流れは放電極で突起がある領域近傍でイオン風による流体干渉が起こり、流れが曲げられ集塵極の方に向かい、さらに次

の放電極で同様な挙動している。それはガス流れ方向に向かうジグザグ状の流れである。そして、EHD 数が 1.0 以上になると図 11 b) に示す循環流の影響が大きくなり、放電極と集塵極間にガス流れ方向に緩やかな渦流が発生している。

5. まとめ

ESP 性能と密接な関係のある荷電特性や粒子挙動に関する EHD 流れの大局的な把握のため実験と解析を行い、下記の主要な結果を得た。

- 1) 線対平板電極に対する二次元の電場と EHD 場の解析を実施した。ESP 荷電特性曲線の解析結果はモデル ESP 及び実機 ESP の実測結果を模擬できた。
- 2) 三次元場に拡大し、突起型対凸凹電極に対し EHD 解析を実施した。その結果、EHD 場は突起型放電極近傍でイオン風による流体干渉が発生し、放電極と集塵電極間にガス流れ方向にジグザグ状の流れを形成している。また、ガス流れ直角断面には放電極の突起を起点に放電、集塵電極に沿った上下方向の流れも発生している。そして、 N_{EHD} が 1.0 より大きくなると、放電極と集塵極間にガス流方向に緩やかな渦流が発生している。
- 3) DOP 粒子などのサブミクロン粒子を用いると、電場が存在する ESP 内部でも流速分布を十分に計測できることが分かった。

参考文献

- 1) T. Yamamoto and H.R. Velkoff : J. Fluid Mech. **108** (1981) 1
- 2) M. Mazumder : Proceedings of third Symposium on the Transfer and Utilization of Particulate Control Technology Vol. II , EPA-600/9-82-005b pp. 169 -178 (1982)
- 3) P.S. Larsen and S.K. Sorrensen : Atmospheric Environment, **14** (1984) 1289
- 4) T. Yamamoto and L.E. Sparks : IEEE Transactions on Industry Applications, IA-22, Sept / Oct (1986) 880
- 5) 足立宣良, 大久保利一 : 静電気学会誌 **18** (1987) 246
- 6) T. Yamamoto : J. Electrostat., **22** (1989) 11
- 7) W. J. Liang and T. H. Lin : Aerosol Science Technology, **20** (1994) 330
- 8) J. Milielewicz, M. Kocik and J. Miezeraczyk : Proceeding of the Second Polish-Japanese Hakone Group Symposium on Non-thermal Plasma Processing, July 22-23, pp. 37-42 (2001)
- 9) T. Yamamoto, M. Okuda and M. Okubo : IEEE Trans. Nov/Dec (2003) 1602
- 10) P. A. Lawless and L. E. Sparks : An Interactive Computer Model for Calculating V-I curves in Electrostatic Precipitators, Version 2, Research Triangle Institute Report, North Carolina, (1987)