論 文

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

伊藤 航平*,森 悠真*,瑞慶覧 章朝*.¹,川田 吉弘**, 田岡 智浩***,柴田 憲司***

(2018年9月13日受付;2018年11月27日受理)

Simulation and Measurement of Ionic Flow in a Wire-to-plate type Electrostatic Precipitator

Kohei ITO^{*}, Yuma MORI^{*}, Akinori ZUKERAN^{*,1}, Yoshihiro KAWADA^{**},

Tomohiro TAOKA*** and Kenji SHIBATA***

(Received September 13, 2018; Accepted November 27, 2018)

The purpose of this study is to show the validity of the analysis result for ionic flow in a wire-to-plate type electrostatic precipitator. The gas flow distribution in the ESP, with the ionic flow considered, was calculated using the simulation software COMSOL Multiphysics[®](Ver.5.3a). The analyzed corona current was fitted to the experimental value, whereby the negative ion density on the surface of the wire electrode as the boundary condition was determined. The current density on the surface of the grounded plate electrode was measured, and the gas flow distribution was also measured using particle image velocimetry (PIV). As a result, it was shown that the analysis result of the current density distribution on the surface of the grounded plate electrode agreed with the experimental result. The analyzed gas flow velocity in the ESP increased and eddies were generated between the wire electrode and the grounded plate electrode as the applied voltage increased. This result also agreed with the experimental result. Therefore, these results show the validity of the simulation in this study.

1. はじめに

大気汚染を防止するため、電気集塵装置(Electrostatic Precipitator: ESP)を用いて排ガス中の粒子状物質が除 去されている. ESP は圧力損失が低く、集塵性能が高い ことから、火力発電所や各種工場など幅広い分野で利用 されている.近年では、排出煤塵量のさらなる削減が求 められるようになり、集塵性能やエネルギー効率の向上 が課題となっている.また、高抵抗ダストによる逆電離 現象、低抵抗ダストによる再飛散現象などの課題も挙げ られる¹¹. これらの課題を解消すべく、様々な構造の ESP が開発・設計されている.

キーワード:電気集塵装置,イオン風,シミュレーション,粒子画像流速測定法,電流密度 * 神奈川工科大学

(〒243-0292 神奈川県厚木市下荻野 1030)
 Kanagawa Institute of Technology, 1030, Shimo-ogino,
 Atsugi-shi, Kanagawa 243-0292, Japan
 *** 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, 2-32-1, Ogawanishimachi, Kodaira-shi, Tokyo 187-0035, Japan

- *** 住重プラントエンジニアリング株式会社 (〒141-0031 東京都品川区西五反田 7-25-9) Sumiju Plant Engineering Co.,Ltd., 7-25-9, Nishigotanda, Shinagawa-ku, Tokyo 141-0031, Japan
 - ¹ zukeran-akinori@ele.kanagawa-it.ac.jp

しかし,現在の ESP の開発・設計は,経験則や実験 によるアプローチが主流と思われ,大規模な実験設備が 必要となる.このため,多くの時間とコストが必要とな っている.そこで,効率的に開発・設計する手段として, パラメータの変更が容易であり,複雑な構造物でも解析 可能であるシミュレーションに注目が集まっている.

ESP 内の巨視的なガス流れに関するシミュレーションに ついては、開発や設計で利用されている.しかし、さらな る性能向上の要求に応えるためには計算精度を上げる必 要がある.そのため、例えば Mudry らは、従来の圧力差 に加え、整流板の穴径や板厚など幾何学的構造を細部ま でモデル化し、実験結果と比較している²⁰.今後は帯電粒 子の軌道やイオン風などを考慮し、さらに精度を上げてい く必要があると思われる.このことは、集塵電極上におけ る粒子の捕集分布や堆積量の把握にもつながり、将来的に は逆電離現象や再飛散現象の防止に役立つであろう.

ESP 内の帯電粒子の軌道については,Skodras らが解析 ソフト FLUENT CFD を用いてガス流れ場における電界分 布を考慮し計算している.微粒子の集塵性能が比較的低 いこと,入力電圧を高く,風速を低くすることで集塵性 能が向上することを予測している³⁾. Ahmadi らも解析ソ フト COMSOL を用い解析し集塵性能を予測している⁴⁾. しかし,いずれもイオン風については考慮していない.

イオン風に関しては, 竹内が針対平板電極構造にて

COMSOLを用いて解析を行っている⁵⁾. 大久保らも線 対平板電極構造の ESP において,ポイントコロナ放電 を考慮したイオン風分布および EHD 数と流線の関係を 3次元的に示している^{6,7}.

イオン風場における帯電粒子の軌道に関しては,Dastoori らが COMSOL を用いて同軸円筒型 ESP 構造[®],川上ら は解析ソフト Star CD を用いて再飛散粒子の再捕集を目 的とした二重シリンダ型 ESP[®],Baoyu らは解析ソフト Ansys を用いて 2段式 ESP^{1®} に関し,パラメータを変化 させ解析し集塵性能を予測している.

以上のように、ESP内におけるイオン風と帯電粒子の 軌道が解析されているが、実験結果と比較し解析結果の 妥当性を示した報告はほとんど見かけない. Zhao らは FLUENTを用いて針対平板電極構造におけるイオン風を 解析し実験値と比較している¹¹⁾が、平板電極表面の風 速のみであり空間全体の風速分布については比較してい ない. 江原らはホール型 ESP内における粒子の挙動を 粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry: PIV) を用いて測定している¹²⁾が、解析結果との詳細比較は 行っていない. ESPの開発・設計を合理化・効率化する 手段としてシミュレーションを利用するには、解析結果 の妥当性を示すことが必要不可欠である.

そこで, ESP の基本構造といえる線対平板電極において, イオン風を解析し実験結果と比較することで,解析手法 の妥当性を示すことを本研究の目的とした.境界条件の 設定方法として,線電極表面における負イオン数密度を 放電電流の実験値と解析値が一致するよう合わせ込む手 法を採用した.そして,接地平板電極表面の電流密度分 布および二次元的なイオン風の流速分布を測定し解析結 果と比較したので報告する.なお,解析には COMSOL Multiphysics[®] (Ver.5.3a)を使用した.

2. 実験方法

2.1 電流密度測定方法

ESP の構造と電流密度分布測定の概要を図1に示す. 本実験の ESP は、一般的によく用いられ最も単純な構造である2枚の接地平板電極(幅40 mm,長さ240 mm,厚さ0.8 mm)と1本の線電極(ϕ =0.26 mm,タングステン)から成る線対平板電極構造であり、線電極と接地平板電極の間隔は15 mmとした.線電極に負極性高電圧電源(Spellman,SL20N300)を接続し-10 kV~-13 kVを印加することでコロナ放電を発生させた.接地平板電極の一方はアルミニウム製、もう一方は電流密度分布を測定するため、同一厚さのアクリル板にアルミ箔を貼りつけた構造とした.アクリル板には幅4 mm 長さ240 mm



図1 ESPの構造と接地平板電極表面の電流密度測定

Fig.1 ESP configuration and measurement of discharge current density on the surface of grounded plate electrode.

のアルミ箔1枚,幅5mm長さ240mmのアルミ箔6枚 を1.0mmの間隔で貼っている。各アルミ箔電極に流れ る電流を電流計(Agilent 社製,型式 U1232A)で計測し, (1)式から電流密度を算出した¹³⁾.

$$J = \frac{A}{S_a} \tag{1}$$

ただし,*J*は電流密度[A/m²],*A*は計測された電流値[A], *S*。はアルミ箔電極の面積[m²]である.本装置では,風 速 0~2 m/s の範囲において,電流密度分布が変化しな いことを予備実験で確認している.したがって,電流密 度測定は無風速で行った.

2.2 PIVによるイオン風の測定

PIVによるイオン風測定システムの概要を図2に示す. 本実験システムは、ESP、ファン、PIVから構成されて いる.ガス中にトレーサ粒子を投入し、ガスの流入方向 からレーザー(FLOWTECH RESEARCH 製、CW 2 W、 532 nm)を接地平板電極に対し垂直に照射することでガ スの流れを可視化した.トレーサ粒子をハイスピードカ メラ(Photron 社製、FASTCAM Mini AX50)を用いて撮 影し、撮影画像を解析ソフト(FLOWTECH RESEARCH 製、FtrPIV Ver 3.2)を用いて PIV 解析した.印加電圧は -10 kV~-13 kV、風速は 0 又は 1 m/s とした.撮影速度 は 4000 fps、トレーサ粒子はオイルミスト(FLOWTECH RESEARCH 製、FtrOMG、公称粒径 1 µm)とした.



図 2 PIV によるイオン風の測定システム Fig.2 Measurement system for ionic flow by PIV.

3. シミュレーション解析方法

3.1 電流密度およびイオン風解析モデル

電流密度およびイオン風解析に用いたモデルを図3 に示す. 解析モデルの寸法は図1に示した ESP 構造を 模擬したものとなっている. 解析時間の短縮化を図るた め、解析領域は図1に示した一点鎖線の範囲で空間のみ とし、軸対称境界を設定した. COMSOL Multiphysics[®] では解析を行う際、解析領域内を要素(メッシュ)で分 割する. したがって、線電極と接地平板電極の両端を結 んだ三角形状の領域を作成し、分割する要素と同様の形 状とすることで解析結果の乱れを抑制した. 空間の負イ オン数密度および電界、電流密度分布は定常解析、イオ ン風は時間依存解析とした.本解析の解析条件は表1に 示した通りである。印加電圧と負イオン数密度の値を線 電極表面全体に境界条件として与え解析を行った. ただ し、線電極表面に与えた負イオン数密度は放電電流の実 験値と解析値が一致するよう合わせ込んだ値であり、こ れが空間全体の負イオン数密度の最大値となる.

3.2 負イオン数密度分布および放電電流解析

解析領域内の電位・電界および負イオン数密度は、ポ アソン方程式と電流連続の式を連成させ解析した. ポア ソン方程式は(2)式. 電流連続の式は(4)式で表される.

$$-\nabla \cdot \varepsilon_r \varepsilon_0 \nabla V = \rho \tag{2}$$

$$\rho = e N_n$$



図3 電流密度およびイオン風の解析モデル

表1 解析パラメータ

Fig.3 Analysis model for current density and ionic flow.

Table 1 A	Analysis parameters.		
Applied voltage to wire electrode		-10 kV	
Negative ion density on the surface of the wire electrode		$4.804 \times 10^{15} 1/m^3$	

$$\frac{\partial N_n}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_n \nabla N_n - \mu_n E N_n) = 0 \tag{4}$$

ここで, V は電位 [V], ρ は空間電荷密度 [C/m³], N_n は 負イオン数密度 [1/m³], Eは電界 [V/m] である. これ らの式を反復計算することで負イオン数密度分布、また その分布を考慮した電位・電界分布の解析が可能となる.

解析した結果から放電電流値と接地平板電極表面の電 流密度分布を算出し実験結果と比較した. 放電電流は(5) 式. 電流密度は(6)式から求めた.

$$I = JS = N_n e \mu_n ES \tag{5}$$

$$J = N_n e \mu_n E \tag{6}$$

ここで, J は電流密度 [A/m²], I は放電電流 [A], S は線電極の表面積(1.96×10⁴[m²])である.

3.3 イオン風解析

イオン風の解析には、乱流などの旋回流れ解析に適し た乱流 k-ω モデルを用いた^{9,10}. 支配方程式は(7)式で表 される.

$$\rho_{\sigma}(U \cdot \nabla) U = \nabla \cdot [-Pl + (\mu_{air} + \mu_T)(\nabla U + (\nabla U)^T)] + F \qquad (7)$$

ここで, *ρ*^g は空気の密度 (1.205 [kg/m³]), *U* は流速 [m/s], P は圧力 [Pa], μ_{air} は空気の粘性係数(1.81×10⁵ [Ns/ m²]), µ_T は渦粘性 [Ns/m²], F は外力項である.

コロナ放電の発生により、放電極周辺にはイオンが発生 し、電界によって接地平板電極へ向かう. その際、中性分 子と衝突が起こることによりイオンの運動エネルギーが中 性分子に伝達され、中性分子はイオンと同様に接地平板電 極に向かう.この移動がイオン風の要因となる¹⁾.したが って、単位体積当たりの空気に作用するクーロン力を、(3) 式で求めた空間電荷密度 ρを用いて(8)式のように表し、 (7)式の外力項に代入することでイオン風を解析できる.

$$F = \rho E$$

(8)

Applied voltage to wire electrode	-10 kV	-11 kV	-12 kV	-13 kV
Negative ion density on the surface of the wire electrode	$4.804 \times 10^{15} \ 1/m^3$	$1.075 imes 10^{16} 1/m^3$	$1.32 \times 10^{16} \ 1/m^3$	$1.93 imes 10^{16} \ 1/m^3$
Gas flow	0 m/s and 1.0 m/s			
Negative ion diffusion coefficient ¹⁴⁾ (Air)	$4.26 \times 10^{-6} \text{ m}^{2/s}$			
Mobility of negative ion ¹⁴⁾ (Air)	$1.69 imes 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{Vs})$			
Electronic charge	$1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$			
Dielectric constant of vacuum	8.854×10^{-12} F/m			
Relative permittivity	1			

(3)

4. 結果および検討

4.1 放電電流値の検討

電界強度分布の解析結果を図4に示す.電界強度は線 電極周辺が最も強く9.32×10°V/mであった.線電極から 約6mm離れた箇所で電界強度は最小となり,その後接地 平板電極に近づくに従い電界強度が増加する結果となっ た.このような分布になるのは空間電荷密度の影響である.

負イオン数密度分布の解析結果を図5に示す. 負イオン数密度は線電極周辺が最も高く,接地平板電極に近づ くに従い低くなっている.

以上の結果から、(5)式を用いて放電電流の実験値と解 析値をフィッティングさせた.線電極表面の負イオン数密 度は表1の値,電界強度は図4から線電極周辺の値を代 入した.放電電流の解析値と実験値の比較を表2に示す. -10kV印加時の放電電流解析値がI=0.24 mAとなった.同 電圧時の放電電流の実験値はI=0.21~0.25 mA であること から,解析値と実験値をフィッティングできている.また, 他電圧においても同様にフィッティングできている.

4.2 電流密度分布の検討

前節と同一条件で接地平板電極付近の電流密度分布の 解析値と実験値を比較した.印加電圧 -10 kV 時におけ



図4 電界強度分布の解析結果

Fig.4 Analysis result of Electric field distribution.



図5 負イオン数密度分布の解析結果

Fig.5 Analysis result of Negative ion number density distribution.

表2 放電電流の解析値と実験値

Table 2 Analysis result and experimental result for discharge current.

Applied Voltage	Analysis result	Experimental result	
-10 kV	0.24 mA	0.21~0.25 mA	
-11 kV	0.45 mA	0.43~0.46 mA	
-12 kV	0.60 mA	0.56~0.60 mA	
-13 kV	0.83 mA	0.77~0.82 mA	

る比較を図6に示す.線電極直下の値が最も高く,解析 値がJ=23.0 mA/m²,実験値がJ=22.9 mA/m²であることか ら同等の値を得ることができた.実験値のグラフが線電 極直下を中心に左右対称でないのは,装置の構造上,線 電極の配置精度が±0.87 mmであることが考えられる.

印加電圧と電流密度分布の関係を図7に示す. 解析結 果と実験結果ともに印加電圧が高くなるに従い電流密度 分布の値も高くなっている. -10 kV 以外の解析結果も実験 結果とほぼ同様の値と傾向が得られたが, -13 kV 印加時 において解析結果と実験結果の最大値の差が約10 mA/m² 生じていることが確認された. シミュレーション解析の更 なる精度向上が今後の検討項目として挙げられる.

4.3 イオン風の検討

負イオン数密度分布と電界強度分布の解析結果の妥当 性が示されたので、同一解析条件におけるイオン風の解 析を試みた. 無風速時におけるイオン風の解析結果を図 8 に示す. (a) は印加電圧 -10 kV 時, (b) は印加電圧 -13 kV 時である. 両解析とも線電極と接地平板電極の間 で渦状の流れが生じていることがわかる. (a) では、最 大で約 0.80 m/s の流れが生じており、解析空間内の平均 値は約 0.40 m/s であった. (b) では、最大で約 1.50 m/s



図6 電流密度分布の解析値と実験値比較(-10kV)

Fig.6 Comparison between analyzed current density distribution and experimental result (-10 kV).



図7 印加電圧と電流密度分布の関係

Fig.7 Relationship between applied voltage and current density distribution.



図8 主流体0m/s時におけるイオン風の解析結果 Fig.8 Analysis result of ionic flow at main gas flow of 0m/s.

の流れが生じており,解析空間内の平均値は約0.82 m/s であった.印加電圧が高くなることで発生するイオン風 の流速が速くなることがわかる.これは,印加電圧が高 くなることで,電界強度と負イオン数密度が高くなり(8) 式のクーロン力が強くなるためである.

無風速時における PIV による実験結果を図9に示す.
(a) は印加電圧 -10 kV 時,(b) は印加電圧 -13 kV 時である. 両測定結果とも線電極と接地平板電極の間で渦状の流れが発生していることがわかる.(a) では,最大で約0.75 m/sの流れが生じており,測定空間内の平均値は約0.43 m/s であった.(b) では,最大で約1.36 m/sの流れが生じており,測定空間内の平均値は約0.81 m/s であった.

以上の結果から, 無風速時におけるイオン風解析の流 速および流れの傾向は実験結果とほぼ同等であることが 明らかである.

主流体速度 1.0 m/s 時におけるイオン風解析の結果を図 10 に示す. 主流体は左から右に流れている. (a) は印加 電圧 -10 kV 時, (b) は印加電圧 -13 kV 時である. (a) では,線電極周辺で最大約 1.37 m/s の流れが生じ,解析 空間内の平均値は約 1.02 m/s であった. イオン風による 渦流れは確認できなかった. これは,イオン風よりも主流 体流れの方が速く影響を受けにくいためである. (b)では, 線電極周辺で最大約 2.0 m/s の流れが生じ,解析空間内の 平均値は約 1.04 m/s であった. このとき,接地平板電極 上に渦流れが確認された. これは,印加電圧が高いため,



Grounded Plate Electrode (a) -10 kV



Grounded Plate Electrode

(b) -13 kV

図9 主流体0m/s時におけるイオン風の実験結果 Fig.9 Experimental result of ionic flow at main gas flow of 0m/s.



図 10 主流体 1 m/s 時におけるイオン風の解析結果 Fig.10 Analysis result of gas flow interaction at main gas flow of 1 m/s.

発生したイオン風と主流体の流速の差が小さくなったためである.

主流体速度 1.0 m/s 時における PIV による実験結果を図 11 に示す. 主流体は左から右に流れている. (a) は印加



Grounded Plate Electrode

(a) -10 kV



Grounded Plate Electrode

(b) -13 kV

- 図 11 主流体 1 m/s 時におけるイオン風の実験結果
- Fig.11 Experimental result of gas flow interaction at main gas flow of 1 m/s.

電圧 -10 kV 時,(b)は印加電圧 -13 kV 時である.(a) で は、線電極周辺で最大約 1.60 m/s の流れが生じ、測定空 間内の平均値は約 0.86 m/s であった.図 11(a)の解析結果 と同様に実験結果においてもイオン風による渦流れは確認 できなかった.(b)では、線電極周辺で最大約 1.90 m/s の流れが生じ、測定空間内の平均値は約 0.93 m/s であり、 イオン風による渦流れが接地平板電極上に確認された.

以上の結果から,主流体考慮時においても解析結果と 実験結果が概ね一致することが示された.

5. まとめ

線対平板型 ESP における電流密度分布およびイオン 風を解析し,実験結果と比較検討した結果,以下のこと が示された.

- ①放電電流の解析値と実測値をフィッティングさせることにより、接地平板電極表面付近の電流密度分布の解析値を実験値と一致させることができた。
- ②主流体の流速を無風又は1m/sとしてイオン風解析結 果とPIV 測定結果を比較したところ,流速および流 れの傾向がほぼ一致した.以上の結果から,本シミュ レーションの妥当性が示された.

よって, 放電電流の解析値と実測値をフィッティング させ, 線電極表面の電荷密度を境界条件として設定する ことで, ESP 内のイオン風を概ね正しく解析できること が明らかとなった.今後は,本結果を用いて粒子挙動解 析を行い,集塵性能,粒子堆積量,堆積位置を高精度に 予測し,ESPの研究開発を推進していく予定である.

本研究の一部は JSPS 科研費 18H01647 の助成を受け たものである.

参考文献

- 静電気学会編:静電気ハンドブック, pp.474-475, p.304, オーム社 (1981)
- A. Banka1, B. Dumont1, Dr. J. Franklin1, G. Klemm2 and R. Mudry: Improved Methodology for Accurate CFD and Physical Modeling of ESPs. Proceeding of XV International Conference on Electrostatic Precipitation, 9 (2018)
- G. Skodras, S.P. Kaldis, D. Sofialidis, O. Faltsi, P. Grammelis and G.P. Sakellaropoulos: Particulate removal via electrostatic precipitators — CFD simulation, Fuel Processing Technology, 87 (2006) 623-631
- 4) M. Ahmadil, A.P. Berkhoffl and A. de Boer: Computational Fluid Dynamics Approach to Evaluate Electrostatic Precipitator Performance. Excerpt from the Proceedings of the 2017 COMSOL Conference in Rotterdam.
- 5) 竹内 希: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) 162-167
- M. Okubo and H. Fujishima: Fluid dynamic analysis of twophase ionic flows in electrostatic precipitators, Proceeding of XV International Conference on Electrostatic Precipitation, 7 (2018)
- Toshiaki Yamamoto, Miyuki Okubo and Masaaki Okubo: Three-Dimensional Ionic Wind and Electrohydrodynamics of Tuft/Point Corona Electrostatic Precipitator. IEEE TRANSACTION ON INDUSTRY APPLICATIONS, **39** [6] NOVEMBER/DECEMBER (2003) 1602-1607
- K. Dastoori, B. Makin, M. Kolhe, M. Des-Roseaux and M. Conneely: CFD modelling of flue gas particulates in a biomass fired stove with electrostatic precipitation. Journal of Electrostatics, **71** (2013) 351-356
- 川上一美,瑞慶覧章朝,安本浩二,乾 貴誌,榎並義晶, 江原由泰,山本俊昭:二重シリンダ型電気集塵装置にお ける再飛散粒子の軌道シミュレーション. Journal of the JIME, 46 [5] (2011) 111-118
- Baoyu Guo, Aibing Yu and Jun Guo: Numerical Modelling of ESP for Design Optimization. Procedia Engineering, 102 (2015) 1366-1372
- L. Zhao and K. Adamiak: EHD flow in air produced by electric corona discharge in pin-plate configuration. Journal of Electrostatics, 63 (2005) 337-350
- 12) 江原由泰:イオン風を利用した電気集じん装置の研究. 静電気学会誌, 40 [4] (2016) 156-161
- 13)川田吉弘,清水洋隆,大井 悟,瑞慶覧章朝:電気集塵 装置の集塵率と荷電部接地電極長の関係.静電気学会誌, 39 [6] (2015) 263-268
- 14) 高橋幹二:エアロゾル学の基礎, p.97, 森北出版株式会社 (2003)