

ホール型電気集塵装置における
再飛散抑制と高効率化に関する研究

平成 30 年

宮 下 皓 高

- 目次 -

第1章 序論

1-1 研究背景	1
1-2 研究現状	5
1-3 ホール型 ESP における帯電粒子の捕集モデル	15
1-4 研究目的	20
1-5 研究概要	20
参考文献	22

第2章 ホール型 ESP 内の流体・粒子挙動解析

2-1 緒言	26
2-2 解析方法	27
2-2-1 支配方程式	27
2-2-2 解析条件	30
2-3 電界解析	30
2-4 空間電荷密度解析	32
2-5 流体解析	36
2-6 粒子挙動解析	42
2-7 結言	47
参考文献	48

第3章 ホール型 ESP における粒子挙動の可視化

3-1 緒言	49
3-2 集塵実験	50
3-3 画像解析	51
3-3-1 実験システム	51
3-3-2 PIV 解析	53
3-4 ホール型 ESP 内の粒子挙動	53
3-5 粒子移動速度	62
3-5-1 各測定領域における粒子移動速度と放電電流値の関係	62
3-5-2 各トレーサ粒子における最大粒子移動速度の主流体速度特性	67
3-6 粒子の移動角度	69
3-6-1 粒子移動角度の放電電流特性	69
3-6-2 各トレーサ粒子における粒子移動角度の主流体速度特性	70
3-6-3 電界方向への粒子移動速度	71

3-7	ホール流入率	73
3-8	結言	75
	参考文献	75
第4章 ホール型 ESP を用いたディーゼル微粒子の捕集		
4-1	緒言	76
4-2	実験方法	78
4-2-1	実験システム	78
4-2-2	微粒子の測定方法	79
4-2-3	集塵率算出法	81
4-3	ホール型 ESP におけるディーゼル微粒子の捕集	82
4-3-1	ホール径の検討	82
4-3-2	電極構成	87
4-3-3	ホール型 ESP と従来型 ESP における集塵率の粒径特性	88
4-3-4	各粒径における集塵率と放電電流値の関係	89
4-3-5	集塵率と排ガス温度の関係	90
4-4	ホール型 ESP における理論集塵率の算出	91
4-5	結言	94
	参考文献	95
第5章 再飛散抑制に最適な電極構成の検討		
5-1	緒言	96
5-2	シミュレーション解析と粒子可視化実験の比較	97
5-3	粒子捕集モデル A の検討	99
5-4	帯電粒子のホール流入角度	100
5-5	ホール流入率と針電極位置の関係	103
5-6	ホール型 ESP における再飛散抑制に最適な電極構成	105
5-7	結言	110
	参考文献	110
第6章 結論		
		111
謝辞		
		113
研究歴		
		1114

第1章 序論

1-1 研究背景

近年、世界中で環境汚染が問題となっており、地球を綺麗にする浄化装置の開発が必要不可欠とされている。環境問題は総人口の増加による経済活動の拡大によってもたらされており⁽¹⁾、地球温暖化⁽²⁾、大気汚染、砂漠化⁽³⁾、越境汚染⁽⁴⁾などが挙げられる。この中でも、大気汚染による影響は人体への悪影響だけではなく、北極海の氷の融解促進や酸性雨など、様々な影響を与えることが知られている⁽⁵⁾。大気汚染に寄与する物質は、窒素酸化物(NO_x)、硫黄酸化物(SO_x)、揮発性有機化合物(VOC)、粒子状物質(PM: Particle Matter)などがある。これら大気汚染物質の排出源は自然発生源と人為発生源に分けられる。自然発生源は、火山活動や森林火災、海塩や砂塵の飛散などである。日本は島国であるため、海塩粒子が海風に乗って運ばれてくる⁽⁶⁾。近年問題視されているのは人為発生源による大気汚染物質である。人為発生源は固定発生源と移動発生源に分けられ、固定発生源は火力発電所、製鉄所やごみ焼却場、移動発生源は自動車や船舶のディーゼルエンジンがある⁽⁷⁾。大気汚染物質は一次粒子と二次粒子の二種類に分類される。一次粒子は発生源で直接生成され排出されるものである。一方、二次粒子は大気中で粒子化したものであり、光化学スモッグが代表例として挙げられる。大気汚染物質の中でも、NO_xとSO_xは雲や霧と反応すると強い酸性を帯び、酸性雨となって地表に降り注ぐことが知られており、森林の枯死、地下水の酸性化などをもたらす⁽⁸⁾。VOCは光化学スモッグの原因物質とされており、健康被害としてめまい、吐き気、頭痛などのシックハウス症候群が問題視されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。PMは人の呼吸により体内に取り込まれ、気管支炎や喘息などを引き起こすことが知られており、特に粒子の大きさが50nm以下のナノ粒子は、人体の肺胞にまで到達し、肺胞から血流に取り込まれ、各臓器へ転移する。血流に取り込まれたPMは、呼吸器系のみならず、発癌や自閉症などの原因になると言われている⁽¹¹⁾。

固定発生源や移動発生源から発生するPMは、浮遊粒子状物質(SPM)の主要な構成要素の一つである。日本の法律では、環境基本法によって環境基準が設定されており、「SPMの環境基準は1時間値の1日平均値が0.10mg/m³及び1時間値が0.20mg/m³以下であること」としている。また、PM_{2.5}は「1年平均値が15μg/m³以下かつ1日平均値が35μg/m³以下」と定められている⁽¹²⁾。この環境基本法により、固定発生源である火力発電所などから発生するPMの量は減少している。一方、移動発生源である船舶用ディーゼルエンジンは硫黄分が多い重油を燃料としており、高濃度のPMを排出することが問題視されている。

世界的な海洋汚染の防止は、国際海事機関(IMO)が中心となって取り組んでいる。IMOは1958年の創設以降、船舶に関する世界統一基準を定めており、その中の海洋環境保護委員会(MEPC)においては、海洋汚染防止条約(MARPOL 73/78条約)や船舶バラスト水規制

管理条約等を採用するなど、船舶に関する環境基準の審議を行っている。この IMO には日本も 1983 年 3 月に加盟している。MALPOL 73/78 条約附属書 VI は 2005 年に発効され、400 総トン以上の全ての船舶から排出される大気汚染物質に適応され、船舶から排出される NO_x, SO_x, PM 排出規制を想定している⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

(1) NO_x 規制

NO_x 規制は 2000 年 1 月 1 日以降に建造した船舶に搭載され、定格出力が 130 kW を超えるディーゼル機関に対して NO_x 排出量が規定されたものである。2008 年の MEPC58 で採択された附属書 VI では、図 1-1 のとおり改正前に適用されていた規制を 1 次規制とし、2 次規制、3 次規制と段階的な規制強化が行われることとなった⁽¹⁵⁾。

● 1 次規制

対象ディーゼル機関 : 2000 年以降, 2011 年より建造される船舶に搭載されたディーゼル機関。

規制値 : 機関の定格回転数 n に応じて, 下記の規制値が適用される。
 $n < 130$ [rpm] 17.0 [g/kWh]
 $n \geq 2000$ [rpm] 9.8 [g/kWh]

● 2 次規制

対象ディーゼル機関 : 2011 年以降に建造された船舶に搭載されるディーゼル機関。

規制値 : 1 次規制値から 15.5%~21.8%の削減。

● 3 次規制

対象ディーゼル機関 : 2016 年以降に建造され, 排出規制海域を航行する船舶に搭載されるディーゼル機関。

規制値 : 指定海域運行時に, 1 次規制値から 80%削減。なお, 指定海域外運行時には 2 次規制値が適用される。

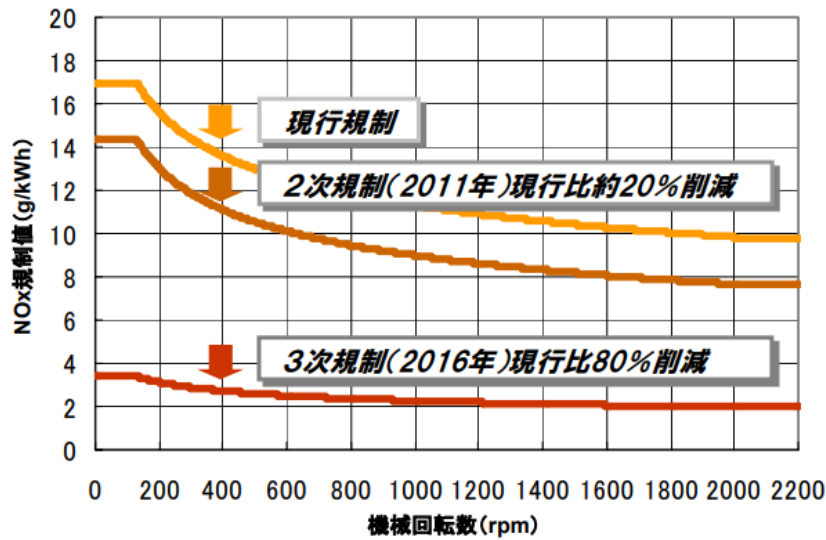


図 1-1. NO_x 規制の概要

(2) SO_x・PM 規制

図 1-2 に MALPOL 条約の SO_x・PM 規制の概要を示す⁽¹⁶⁾。排ガスに含まれる SO_x の量は、燃料油に含まれる硫黄分濃度に依存し、海洋汚染防止条約で燃料油の硫黄分濃度を規制している。この規制は段階的に強化することになっており、厳しい規制が適用される指定海域(北米・米国カリブ海および北海・バルト海)では、2010 年の硫黄分濃度 1.5%以下から、近年では 0.1%以下まで規制が強化されている。それ以外の全ての海域では、現状では 3.5%以下の硫黄分濃度の燃料を使用している。さらに、一般海域では 2020 年 1 月 1 日以降に 0.5%以下とする条約改正が 2008 年 10 月に採択され、2010 年 6 月に発効している。

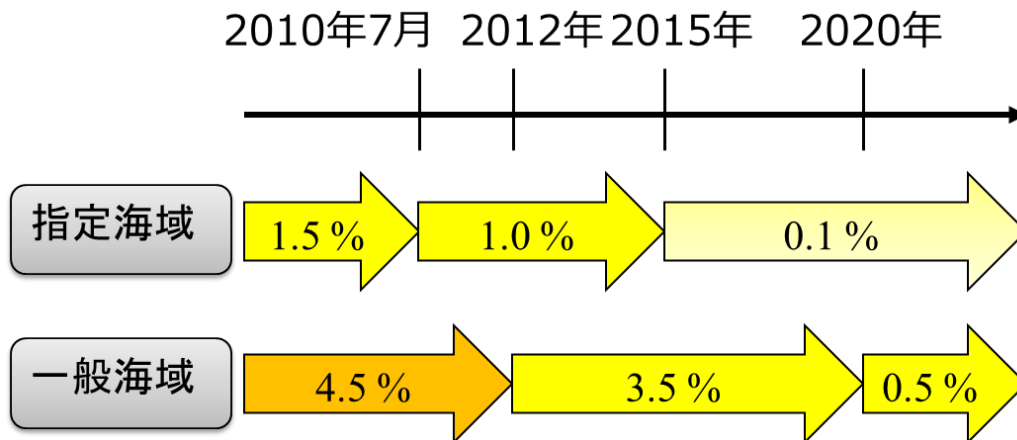


図 1-2. SO_x・PM 規制

MALPOL 条約では、2020 年 1 月 1 日からの一般海域 0.5%規制については、低硫黄燃料油の需給状況に関するレビューを 2018 年までに完了し、2020 年からの実施が不可能と判断された場合、2025 年 1 月 1 日に開始することが規定されていた。これを受け、2016 年 10 月の第 70 回海洋環境保護委員会(MEPC70)において、IMO 事務局より、2020 年の需要に見合う燃料油の供給が可能であるという報告があり、審議の結果、2020 年からの開始が決定された。

(3) CO₂ 規制

IMO における CO₂ 規制は日本が議論を主導し、5 年以上にわたる国際交渉の結果、MARPOL 条約の改正が 2011 年 7 月に採択され、2013 年 1 月に発効している。規制値には EEDI(Energy Efficiency Design Index)が用いられている。EEDI とは、1 トンの貨物を 1 海里運ぶ際に排出される CO₂ の量を示す値である⁽¹⁷⁾。2013 年以降から段階的に規制が強化され、2015 年では削減率は 10%、フェーズ 3 の 2025 年には削減率は 30%と定められた。

(4) BC 規制

BC(Black Carbon)は昇温効果を持つことが懸念されており、北極海の氷に BC が付着することによる氷の融解促進について、調査が進められている⁽¹⁸⁾。BC の定義については 2015 年 1 月に行われた Pollution Prevention and Response 2nd (PPR2)で、熱的に安定しており、可視光を非常に強く吸収する微小球状の炭素粒子の集合体と決定し、Marine Environment Protection Committee 68 (MEPC68) において合意された⁽¹⁹⁾。BC の測定方法や規制については現在も議論が行われている。

これらの規制から、排ガス浄化装置の需要が高まっている。排ガス浄化装置はフィルタ集塵やサイクロン集塵⁽²⁰⁾⁽²¹⁾、スクラバ⁽²²⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾、電気集塵装置(Electrostatic Precipitator: ESP)などがある⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。ディーゼルエンジン車に搭載して DEP の捕集に用いられるものは、ディーゼル微粒子フィルタが主である⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。軽油を燃料とする自動車用ディーゼルエンジンに対し、重油を燃料とする船舶用ディーゼルエンジンは非常に濃度の高い PM を排出する。このため、自動車に設置されているフィルタ装置では目詰まりが生じてしまい適応が難しい。そこで、船舶用ディーゼルエンジンからの PM 捕集に、ESP が検討されている。ESP は従来から、高速道路トンネル内の PM 除去を目的として設置されている。日本では 1970 年頃から ESP の導入を目指して実験が開始され、これまでに多くのトンネルに ESP が導入されてきた⁽²⁹⁾。船舶用 ESP では、限られた空間内に設置するための小型化が求められている⁽³⁰⁾。また、高濃度かつ高温の PM を処理するため、再飛散現象といった異常現象が発生してしまう。そのため、再飛散現象の抑制および高性能化を達成することが船舶用 ESP の重要な課題である。

1-2 研究現状

ESP の概念は古い昔からあり、西暦 600 年ごろにはギリシャ人たちは琥珀を摩擦すると静電気が発生して、小さな粒子や繊維をひきつけることを知っていた。この静電気の力を 18 世紀の後半に、クーロン(Coulomb)が実験的に求め、現在の静電気学の基礎であるクーロンの法則を確立した⁽³¹⁾。この作用が ESP の発端となっており、1824 年に電気集塵の現象をホールフェルド(Hohlfeld)が発表した。実用化としては、コットレル(Cottrell)が機械整流器と高圧変圧器を組み合わせた直流高電圧発生装置を用いて ESP を製作し、成功している。ESP は当初、精錬所と農園の排ガス問題を解決するために開発された。その後時代が進むにつれて火力発電所や製鉄所、高速道路トンネルなどに ESP は展開されていった。また、ESP は非常に小さい微粒子を完全に除去することができるため、工場や家庭の空気清浄機としても広く用いられつつある。例えば、鋳造工場、めっき工場などの作業環境の改善あるいは病院や製薬工場における細菌除去用として用いられている。

● 集塵原理と帯電メカニズム

ESP の集塵メカニズムを図 1-3 に示す。ESP は高電圧印加用針電極と集塵電極で構成されている。近年まで、高電圧印加用電極には線電極が広く用いられてきたが、線電極は耐久性に難があるため、針電極や鋸歯電極を放電極に採用する ESP が増えてきている。ESP の集塵プロセスは、高圧電極に直流高電圧を印加することで、コロナ放電を発生させる。ESP 内の PM は、例えば負の高電圧印加の場合、コロナ放電領域に達すると負極性に帯電し、クーロン力とイオン風によって集じん電極に引き寄せられる。負極性コロナ放電は安定した放電を維持するため高い電圧を印加することができ、工業用 ESP に用いられることが多い。しかし、オゾンの発生量が正極性に比べて多いため⁽³²⁾、家庭用の空気清浄機としては不向きである。ここで、クーロン力の式を(1-1)式に示す⁽³³⁾。この式は強さ E の電界中で帯電量 q の粒子に働く力である。

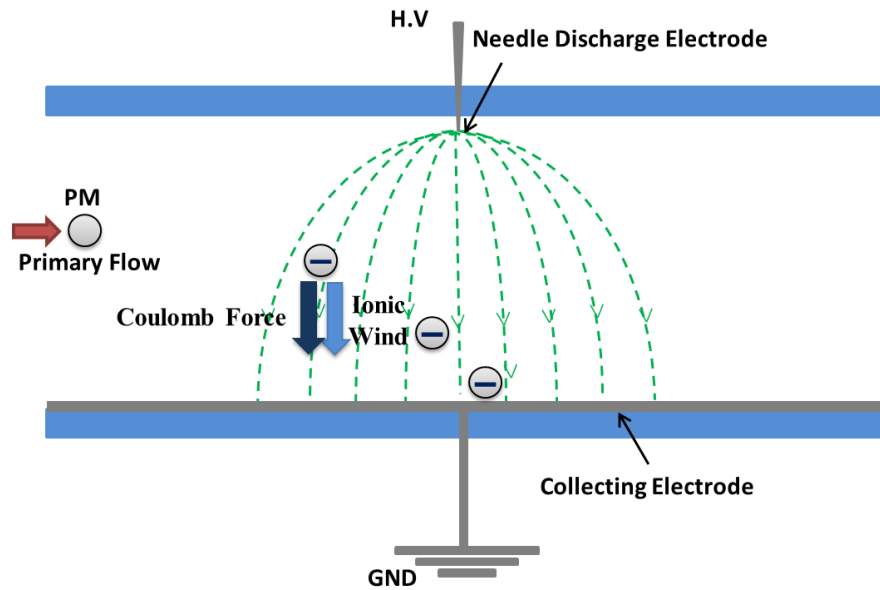


図 1-3. ESP の集塵メカニズム

$$F_c = qE \text{ [N]} \quad (1-1)$$

F_c : クーロン力 [N] q : 電荷量 [C] E : 電界強度 [V/m]

粒子はイオンの付着によって帯電する。イオンの付着方法は 2 種類あり、1つ目はイオンが熱拡散によって粒子に付着する拡散帯電, 2つ目は電界によって移動したイオンが粒子に付着する電界帯電である。粒子の帯電量 q は拡散帯電と電界帯電による帯電量の和として(1-2)式で表される⁽³⁴⁾。

$$q = q_d + q_f \quad (1-2)$$

拡散帯電による粒子の帯電量 q_d を(1-3)式~(1-5)式, 電界帯電量 q_f を(1-6)式~(1-8)式に示す。

$$q_d = q^* \ln \left(1 + \frac{t}{\tau_d} \right) \quad (1-3)$$

$$q^* = \frac{2\pi\epsilon_0 dkT}{e} \quad (1-4)$$

$$\tau_d = \frac{8\pi\epsilon_0 kT}{dC_i n_i e^2} = \frac{8\pi\epsilon_0 kT \mu_i E}{dC_i j_i e} \quad (1-5)$$

$$q_f = \frac{q_{fs} \left(\frac{t}{\tau_f} \right)}{1 + \left(\frac{t}{\tau_f} \right)} \quad (1-6)$$

$$q_{fs} = \frac{3\pi\epsilon_0\epsilon_s d^2 E}{\epsilon_s + 2} \quad (1-7)$$

$$\tau_f = \frac{4\epsilon_0}{\mu_i \rho_i} + \frac{4\epsilon_0 E}{J_i} \quad (1-8)$$

q^* : 拡散帯電定数 [C], t : 帯電時間 [s], τ_d : 拡散帯電時定数 [s], d : 粒子径 [μm], ϵ_0 : 真空の誘電率 8.85×10^{-12} [F/m], k : Boltzmann 定数 1.38×10^{-23} [J/K], T : 絶対温度 [K], C_i : イオンの平均熱運動速度 [m/s], n_i : イオン密度 [m^{-3}], μ_i : イオンの移動度 [m^2/Vs], J_i : イオン電流密度 [A/m^2], τ_f : 電界帯電時定数 [s], q_{fs} : 飽和電界帯電量 [C], ϵ_s : 粒子の比誘電率, ρ_i : 空間イオン電荷密度 [C/m^3]

拡散帯電量は時間 t とともに増加するが、時定数 τ_d は電流密度 J_i に反比例する。そのため、電流密度を高くすることで拡散帯電量を短時間で得ることができる。また、電界帯電量は電界強度 E , つまり電圧値 V とともに増加する。そのため、正極性ではなく、放電が安定している負極性コロナ放電を用いることで、粒子の帯電量を増加することができる。

帯電粒子はクーロン力により、集塵電極方向にガスの粘性抵抗力と釣り合った、(1-9)式で示す速度 W_{th} で移動する。 C_m はカニングガムの補正係数である⁽³⁵⁾。これは、粒径が小さくなり、気体の平均自由行程程度になると粒子はガスの流体抗力を受けにくくなる。そのため、小さな粒子は通常よりも早く移動する。およそ $1\mu\text{m}$ 以下の場合にこの現象が顕著となるため、粒子の移動速度にはこの範囲で補正を加える必要がある。これがカニングガムの補正係数である。ESP の理論集塵率の計算式として最も基本的なものは、(1-12)式に示した Deutsch の理論式がある⁽³⁶⁾。帯電粒子は W_{th} の速度で集塵電極に向かって移動し集塵される。そのため、 W_{th} に寄与する粒子の帯電量を増加することで、高集塵率を得ることができる。

$$W_{th} = \frac{qE}{6\pi\eta d} C_m \quad (1-9)$$

$$C_m = 1 + 2.54 \frac{\lambda}{2d} + 0.8 \frac{\lambda}{2d} \exp \left\{ -0.55 \left(\frac{2d}{\lambda} \right) \right\} \quad (1-10)$$

$$\lambda = 6.61 \times 10^{-8} \frac{T}{293} \times \frac{1}{P} \quad (1-11)$$

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{W_{th} \cdot l}{V_g \cdot g}\right) \times 100[\%] \quad (1-12)$$

η : ガスの粘性係数, C_m : カニンガムの補正係数, d : 粒径 [m], P : ガス圧力 [atm], λ : ガスの平均自由行程 [m] l : 電極長[m] , V_g : ガス流速[m/s], g : ギャップ [m]

● ESP 内の EHD 現象

コロナ放電下では、一次流の他に、電気流体力学(Electrohydrodynamicis : EHD)による二次流が発生することが知られている。この電気流体力学現象がイオン風であり、コロナ放電が発生するに伴い多量のイオンが生じ、このイオンにクーロン力が作用して対極に移動する。この場合に大気中の中性粒子と衝突を繰り返してイオン移動エネルギーを中性粒子に与えて、イオンおよび中性粒子はともに対極に向かって移動する。これらの移動現象が風であり、イオンに起因しているのでイオン風と呼ばれる⁽³³⁾⁽³⁷⁾。イオン風速は(1-13)式で表される⁽³⁸⁾。

$$U_{EHD} = \sqrt{\frac{J_p D}{\mu_i \rho_g}} \quad (1-13)$$

J_p : 電流密度, D : 電極間隔, μ_i : イオン移動度, ρ_g : ガス密度

イオン風は ESP 内部の粒子挙動に影響を与えることが知られている⁽³⁹⁾。電界強度が 6 kV/cm の場合、イオン風速は実験によると最大値は 8 m/s⁽⁴⁰⁾にもなると言われており、低風速処理の ESP 内の気流にイオン風が関与すると考えられる。イオン風に関してはいくつか報告がなされており、M. Robinson によってイオン風速度は印加電圧にほぼ比例することが示されている⁽⁴¹⁾。また、川崎氏らはシュリーレン法を用いて針直下方向にイオン風のコアが形成されることを示している⁽⁴²⁾。イオン風は EHD ポンプや EHD アクチュエーターなど、様々なコロナ放電応用機器に用いられており、ESP の性能向上に欠かせない要因である。

● ESP 内の異常現象

ESP は電氣的な力で PM を捕集する装置であり、構造がシンプル、圧力損失が低い、ナノ粒子の集じん率が高い、などの利点が挙げられる。一方、粒子の性状によっては ESP に問題が生じる。ESP において、集塵に適した電気抵抗率は $10^4 \sim 10^{10} \Omega \text{cm}$ とされている。 $10^{10} \Omega \text{cm}$ より高い場合は、集じん上に堆積したダスト層が絶縁性であるため、ダスト層内で高い電界が生じ、絶縁破壊を起こす。これを逆電離現象と呼び、逆電離による強い衝撃やダス

ト層から発生したイオンによって集じん率が著しく減少する⁽⁴³⁾⁽⁴⁴⁾。石炭火力発電所などから排出される粒子は、シリカとアルミナが主成分でフライアッシュと呼ばれ、電気抵抗率が高い。そのため、火力発電所用 ESP では、逆電離現象の抑制技術が開発されてきた。逆電離を抑制して集塵を行うためには、(1) ダスト層をなくす、(2) 粒子の電気抵抗率を下げる、(3) 放電電流値を下げる、などの対策が挙げられる⁽⁴⁵⁾。ダスト層をなくす方法としては、移動電極型電気集塵装置がある⁽⁴⁶⁾。移動電極型電気集塵装置とは、集塵電極をつねに清浄に保つことで、ダストの逆電離を抑制する方式の ESP である。この方式では、回転電極にスクレーパを取り付けたものや集塵極を移動可能にしたものがある。集塵電極で捕集したダストは集塵電極に付着したまま移動し、ガス流が存在しない非集塵域で回転ブラシによって完全にかき落とされ、逆電離を未然に防ぐ。粒子の電気抵抗率を下げる方法としては、水膜式電気集塵装置⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾や高温電気集塵装置⁽⁴⁹⁾⁽⁵⁰⁾などが挙げられる。水膜式電気集塵装置は集塵電極上に水分を付着させることで温度を下げ、堆積ダスト層の電気抵抗率を下げるものである。高温電気集塵装置は ESP の設置場所を 350°C 付近の高温箇所に設置することで、ダスト層の電気抵抗率が低い状態で ESP を稼働させ、逆電離を抑制する方式である。放電電流値を下げる方法としては、間欠荷電方式⁽⁵¹⁾やパルス荷電方式⁽⁵²⁾⁽⁵³⁾がある。間欠荷電方式とは、処理ガスやダスト層の条件に応じた最適の周期で電流の ON・OFF を切り替えることで逆電離を抑制する方式である。これは、ダスト表面層の電圧が逆電離開始電圧よりも高くなる前にコロナ放電電流を遮断し、ダスト層表面の電圧が低下した後、再びコロナ放電電流を流すということを繰り返すことで、高いピーク電圧で ESP を稼働させることができるものである。パルス荷電方式は直流高電圧ではなく、高電圧パルスで荷電する方式である。パルス荷電方式はフラッシュオーバー電圧が高く、低電流分布になるため逆電離を防止しつつ高い集塵効率を得ることができるものである。

集塵する粒子の電気抵抗率が $10^2 \sim 10^3 \Omega \text{cm}$ の場合、再飛散現象が生じて集塵率は低下する⁽⁵⁴⁾。近年問題視されているディーゼルエンジンの排ガス中の微粒子の主成分はカーボンであることが知られている。カーボン粒子はその電気抵抗率が約 $10^4 \Omega \text{cm}$ 以下の低抵抗粒子であり、再飛散現象が生じる。ESP の再飛散現象のモデルを図 1-4 に示す。粒子は、集塵電極に捕集されると直ちに負の電荷を失い誘導帯電により正極性となる。さらに、新たに集塵された粒子と誘導帯電した粒子は集塵電極上で凝集肥大し、電界によって数珠状凝集粒子となる。凝集肥大化が進むに伴い、ESP 内の主流体やクーロン力等の剥離力が強くなり、剥離力が付着力より大きくなったとき再飛散する。このことから、一度集塵された粒子が ESP から排出されるため、集塵率の減少を引き起こすのである。ESP で処理前後の粒径分布を図 1-5 に示す。PM はディーゼルエンジンから排出され、ESP に流入されるまでに空間凝集しており、粒径分布は 100 nm 前後の粒径が最も多くなっている。ESP の稼働後、粒径 1,000 nm 以下の粒子数が減少している。しかし、2,000~5,000 nm の大粒径の粒子が ESP 稼働前よりも増えている。これは、小粒径の粒子が凝集肥大し、大粒径となり再飛散しているためである。縦軸は対数のため、差は僅かに見えるが、1.3 倍ほど増えており、大粒

径の集じん率はマイナスを示す。

再飛散現象の抑制技術としては水噴霧型 ESP⁽⁵⁵⁾や交流電界型 ESP⁽⁵⁶⁾⁽⁵⁷⁾がある。水噴霧型 ESP では、処理ガス中へ界面活性剤水溶液の噴霧をすることで、大粒径粒子の集塵率が著しく向上し、再飛散現象を抑制するものである。交流電界型 ESP では、粒子が飛散する前に印加電圧が逆極性になることで、粒子が集塵電極にとどまる仕組みである。また、再飛散現象を抑制するのではなく、再飛散現象によって飛散した粒子を後段に設置したサイクロンによって捕集するシステムもある⁽⁵⁸⁾。

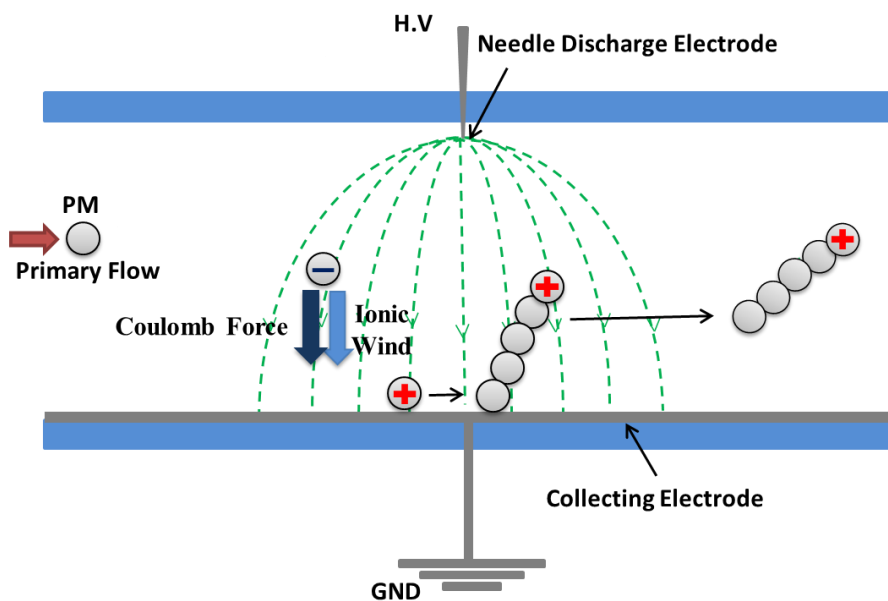


図 1-4. 再飛散現象モデル

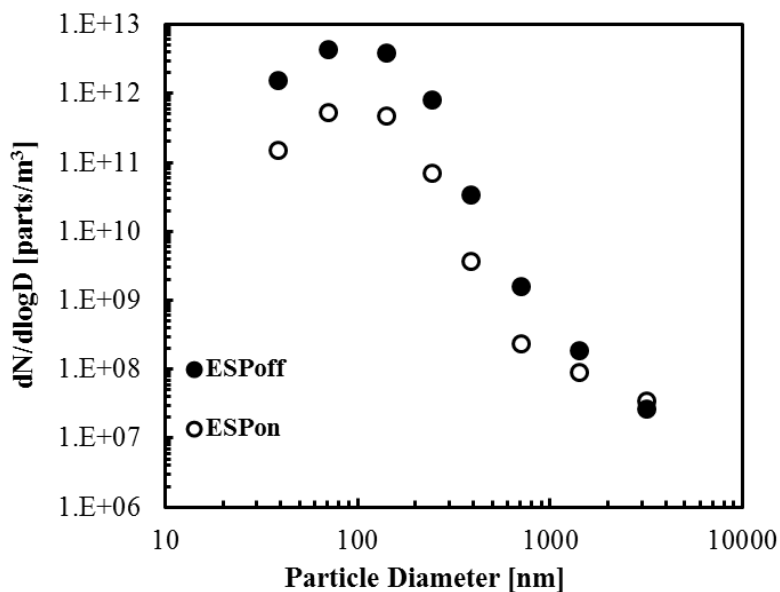


図 1-5. ESP 処理前後の粒径分布

- 次世代型 ESP の開発

著者らは過去に、針電極と孔の開けた接地ホール電極を用いた実験を行い、針電極近傍で発生したイオン風がホール電極の内部に流れ込む様子を確認した⁽⁵⁹⁾。これらの結果から、著者らは捕集する粒子をイオン風により、接地電極に設けたホール内に効果的に誘導できると考えホール型 ESP の開発に至った。ホール型 ESP は、船舶用ディーゼルエンジン排ガスの浄化目的のために開発された。船舶では重油を燃料とするため粒子濃度が高く、従来型の ESP では再飛散のため集塵率の低下が問題となる。ホール型 ESP の集塵モデルを図 1-6 に示す。この装置は放電用針電極と集じん電極に孔を設けたホール電極及びケーシングから構成される。ホール型 ESP では、粒子をイオン風及びクーロン力によって、ホールの内部のケーシングに誘導する。ケーシング内部の捕集空間は主流体の影響を受けにくく、電界がゼロの領域であるため、再飛散の原因である剥離力を受けない。また、ESP 内の帯電領域とケーシング内では圧力差が生じるため、気流はケーシング内へと流れ込む。さらに、粒子は ESP の帯電領域によって帯電するため、クーロン力によってホール電極へと引き寄せられケーシング内に流入すると考えられる。

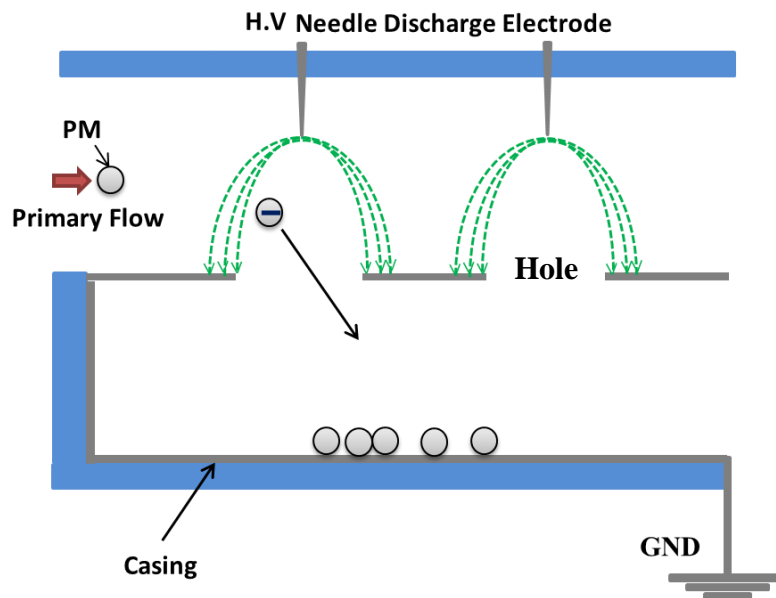


図 1-6. ホール型 ESP の集塵モデル

- ESP 内のシミュレーション解析

ESP は電気的な力を利用して排ガス中の粒子を捕集する装置であるため、空間内の電界強度や粒子の帯電量、イオン風など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について研究が行われている。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⁽⁶⁰⁾。解析

手法は有限要素法(Finite Element Method : FEM)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。また、流線は EHD 数に依存することも示した。EHD 数の式を(1-14)式に示す。

$$N_{EHD}=U_{EHD}/U_0 \quad (1-14)$$

U_{EHD} [m/s]はイオン風速、 U_0 [m/s]はガス流速である。イオン風は電流に依存しているため、ESP 内のガス流は電流によって変化することも示された。イオン風によるガス流線の湾曲はサブミクロン粒子の集塵率を大幅に低下させるため、ESP の性能解析には EHD 流れ場の考慮が必要と結論付けている。

大久保氏は、線対平行平板電極形 ESP 内の流れ場を、Navier-Stokes 方程式と連続の式を渦度と流れ関数の式の連立偏微分方程式に変形して⁽⁶¹⁾、ADI 法により数値解析を行った⁽⁶²⁾。ADI 法は LSOR 法と呼ばれる格子点(分割数を N とすると内部の格子点 $N-1$ 個)だけを連立して、 $(N-1)$ 元の連立方程式として一行全部を同時に解く方法を、 x 方向及び y 方向を交互に解く方法である⁽⁶³⁾。ADI 法は差分法で用いられる陽解法に比べて安定して短時間で計算できると言われている。解析結果として、クーロン力密度分布は、放電線から離れるに従って急激に減少し、一定距離以上離れるとほとんどゼロになることを示した。流れ場解析では、流線は上流側で、放電線方向に引き寄せられ、下流側で平板方向に戻されることや、EHD 数が 2 以上になるとイオン風の効果が大きくなり、放電線直下の平板電極近傍にうずが発生することを示した。うずが発生していない場合、放電線近傍のガス速度が速くなるが、うずが発生している場合、うずの周辺のガス速度が速くなることも示してゐる。

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⁽⁶⁴⁾。Nikas はポアソン方程式、電流連続式、Navier-Stokes 方程式の連成計算によって ESP 内部のガス流動やガス速度の解析を行った。解析結果から、イオン風による主流体の失速により、集塵率に良い影響を及ぼすことや、村井氏らと同様にイオン風は多様に流線方向を変え、二次流れを引き起こすことを示している。また、実験値との比較を行い、粒子の速度推移が概ね一致したことを示した。

Yamaoto らは、円筒型 ESP における一次流れと二次流れとの間の相互作用を検討するため、三次元解析を行った⁽⁶⁵⁾。コロナ放電の数学的なモデリングは Cooperman⁽⁶⁶⁾の二次元解析を解いた。また、解析には差分法である SOR 法を用いてポアソン方程式、電流連続式を連成させ解析を行った。解析結果から、高い EHD 数では、より大きな相互作用が生じることを示した。電圧の増加に伴ってタフト間隔は減少するか、もしくはポイントコロナが減少すると、流れ場は二次元に近づくことも示している。循環渦は各コロナワイヤ電極の直下に形成されるため、集塵に影響を与えられ考えられる。

ESP 内の粒子挙動解析としては、瑞慶覧氏らが帯電粒子の三次元シミュレーションを行

っている⁽⁶⁷⁾。Navier-Stokes 方程式の外力項にクーロン力を代入し、粒子挙動解析を行った。解析結果では、平均流速が 30 m/s の空間内においても、粒子は捕集空間に誘導される様子が示された。また、粒子速度は風速と電界の影響を受け、速度が変化していることも報告している。

これらの報告から、ESP 内のシミュレーション解析にはポアソン方程式、電流連続式、Navier-Stokes 方程式の連成が重要であることがわかっている。また、シミュレーション解析では、高風速下や新型 ESP モデルにおける解析を行うこともできるため、更なる研究が求められている。

● ESP 内の流体および粒子挙動の可視化

ESP 内のシミュレーション解析では、電界強度や流体、粒子挙動を求めることができる。しかし、流体や粒子挙動を求める異なるアプローチとして、可視化技術が存在する。シミュレーションは解析であり、妥当性の検証のためには実挙動の可視化が不可欠なためである。可視化手法は多種多様にわたっているが、大きくは実験的可視化法とコンピュータ利用可視化法の 2 種類に分類される⁽⁶⁸⁾。実験的可視化法は 6 種類、コンピュータ利用可視化法は 3 種類に分類される。これらの中でも、ESP の可視化技術としては古くから実験的可視化法の 1 つであるシュリーレン法が用いられることが多い。シュリーレンとは、透明な媒質の中で場所により屈折率が違うとき、屈折率の変化を明暗の差として表すことで、その部分に縞模様や霧状の影が見える現象である。屈折率の差が大きければ肉眼でも観測できるため、このシュリーレン現象を利用した流体の光学的観測法をシュリーレン法と呼ぶ⁽⁶⁹⁾⁽⁷⁰⁾シュリーレン装置の構造を図 1-7 に示す。光源から発せられる光を凹面鏡や凸レンズで平行光束とし、被検物を透過する光を集光させ、焦点位置に配置されたナイフエッジを通して観測する。そうすると、ナイフエッジに近づく方向に屈折された部分は暗く、遠ざかる方向に屈折された部分は明るくなる。これにより、被検物の密度分布が明暗として観測される。

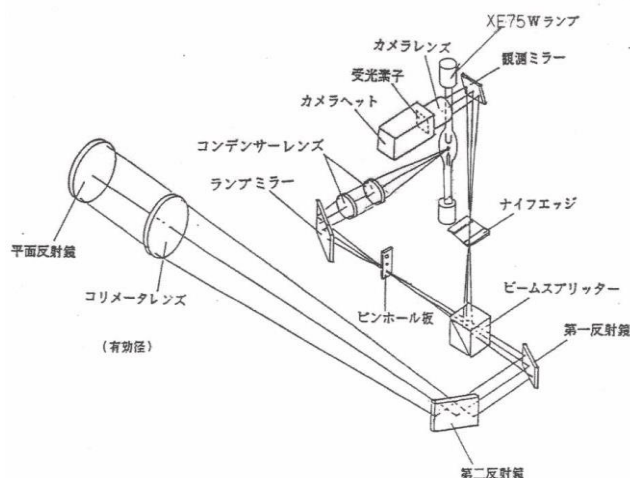


図 1-7. シュリーレン装置

足立氏はシュリーレン法を用いて電気集塵装置内のイオン風の可視化および観測を行った⁽³⁷⁾。イオン風はコロナ輝点から直接的に進展しており、その中間域に小さなうず流が複雑に発生していることを示した。また、イオン風分布は放電極の直下が最も速く、直下から離れるに従ってイオン風速度が減衰することも示している。イオン風の挙動は正極性イオン風と負極性イオン風どちらにおいてもほとんど同一であることを報告している。

藤島氏はシュリーレン法を用いて、イオン風がスパイク電極のエッジ領域で発生することを示している⁽³⁹⁾。また、イオン風が接地電極上へと吹き付ける様子を観測している。

大山氏らは、注入トレーサ法を用いてコロナ放電場における EHD 現象の可視化を行っている⁽⁷¹⁾。針対平板電極系をアクリル製容器の内部に構成し、容器内に可視化に用いたシリコンオイルの煙霧を充満させ電圧を印加することで EHD 現象を観測した。その結果、針対平板電極系では、イオン風によって形成される渦が左右対称に生じることが報告されている。

近年では、コンピュータ利用可視化法の可視化画像解析法が用いられることも多くなってきている。中でも非接触計測が可能であり、個々のトレーサ粒子を追跡し、異なる時刻でのトレーサ粒子の分布パターンから流速を算出できる粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry : PIV)⁽⁶⁸⁾が ESP 内の粒子挙動の可視化に適していると言われている。PIV のシステムはレーザー光源、ハイスピードカメラ、PC、トレーサ粒子で構成されている。流れに微細なトレーサ粒子を混入させ、レーザー光源をシート状に照射することでトレーサ粒子を可視化することができる。照射は流れの面内で少なくとも2時刻(時刻 t_0 と t_1)で行われる。連続する2時刻の画面上のトレーサ粒子像から、その画像上の移動量を求め、移動量と画像入力の間隔から粒子の速度と方向を求めることができる手法が PIV 解析である。

Mizeraczy らは図 1-8 の PIV システムを用いて ESP 内で電氣的に発生した乱流の観測を行った⁽⁷²⁾。イオン風の発生によって ESP 内の流れ場が攪拌されることを確認し、粒子濃度の変化によって粒子挙動に変化が生じることや高压電極から接地電極方向へイオン風が吹く現象を報告している。このような結果から、PIV 法が ESP 内の流れ場特性を調べるのに適していることを報告している。

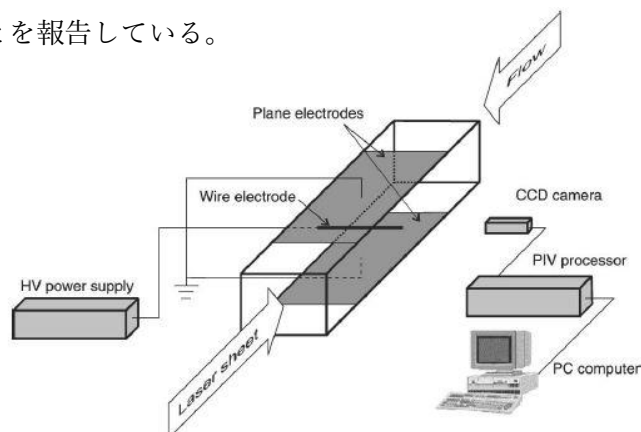


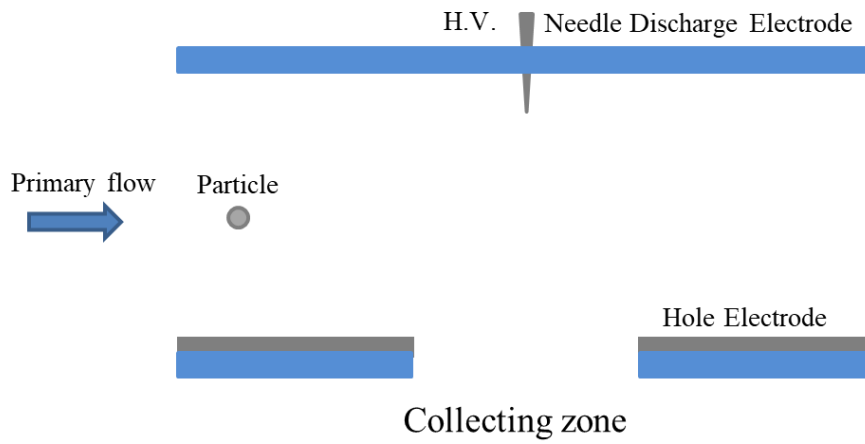
図 1-8. PIV システム

これらの報告から、シュリーレン法から始まり、可視化技術は急速な成長を遂げていることがわかる。しかし、シュリーレン法では粒子の正確な速度が測れず、PIV法では黒色のPMは可視化できない。そのため、PIV法の結果を単体で検討するのではなく、シミュレーションや実証実験とリンクさせる実験系がESPの性能向上に必要と考えている。

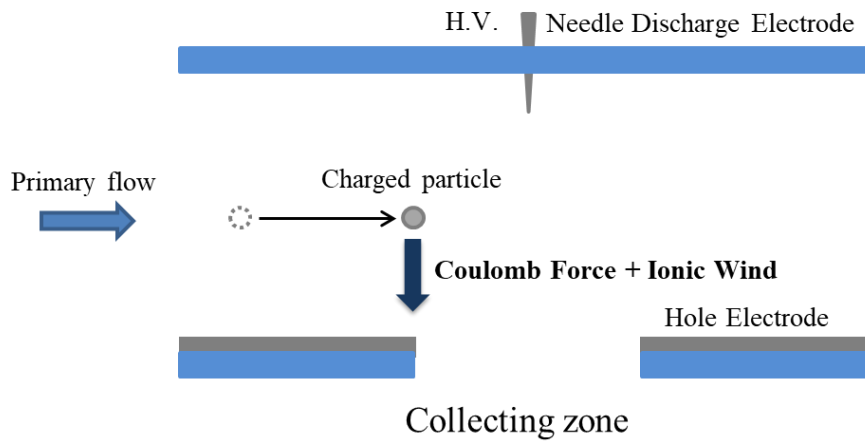
1-3 ホール型 ESP における帯電粒子の捕集モデル

ホール型 ESP は、帯電粒子をホール内へと流入することで再飛散を抑制する装置である。空間中の帯電粒子にはクーロン力、主流体、イオン風による力が加わり、これらの合成力によって移動方向が定まる。ここでは、帯電粒子の捕集モデルについて検討を行う。

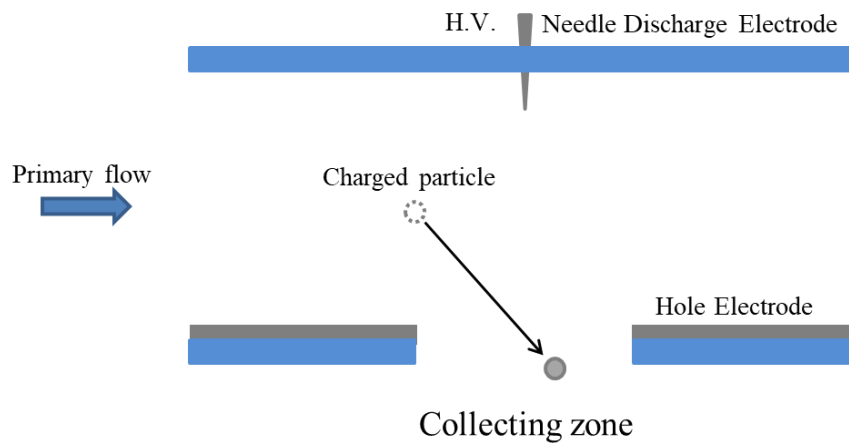
ホール型 ESP の捕集モデルとしては、2種類が考えられる。図 1-9 に捕集モデル A を示す。捕集モデル A は、コロナ放電によって帯電した粒子が、ホール内へと直接流入するものである。本来、粒子は ESP 内に一様に流入するが、ここでは、粒子が最も帯電されると考えられる領域に 1 つ配置して説明する。(a)の帯電前では、ESP 内に流入した粒子が主流体によってコロナ放電領域内へと誘導される。(b)において、粒子はコロナ放電によって帯電する。この時、粒子にはクーロン力とイオン風、主流体による作用が働く。(c)の帯電後では、帯電粒子はホール方向へと誘導され、捕集される。次に、捕集モデル B を図 1-10 に示す。捕集モデル B は、再飛散した粒子がコロナ放電によって再帯電され、ホールへと流入するモデルである。(a)で示すように、ESP では、低抵抗粒子を捕集した際、集塵電極上で凝集肥大化した粒子は剥離力の作用を受け、再び帯電空間へと飛散する。(b)では、飛散した粒子がコロナ放電によって再帯電される。この時、帯電粒子にはホール方向へのクーロン力が生じる。最後に、帯電粒子がクーロン力とイオン風によってホール方向へと誘導され、集塵される。これら 2 つのモデルの内、本研究では、粒子がホールに直接流入する捕集モデル A について着目した。



(a) 帯電前

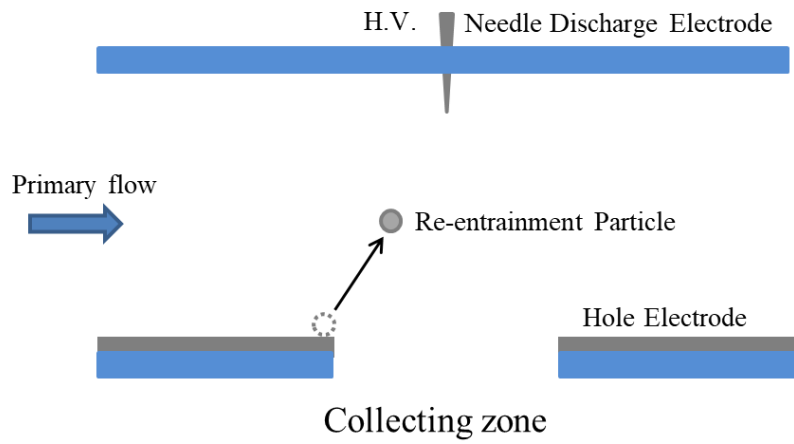


(b) 帯電時

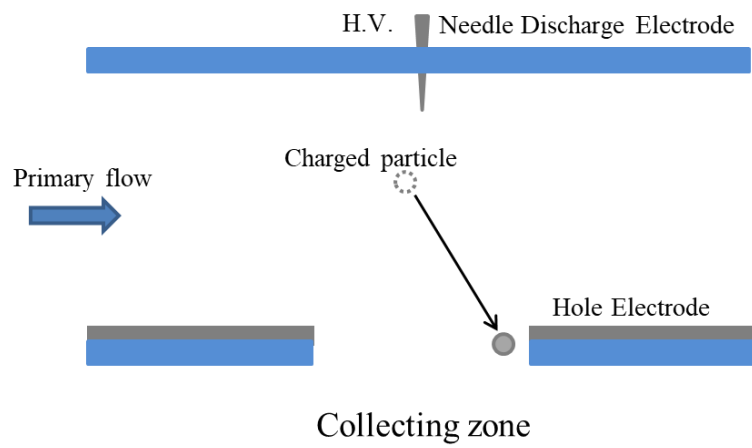


(c) 帯電後

図 1-9. 捕集モデル A



(a) 再飛散現象



(b) 再帯電

図 1-10. 捕集モデル B

図 1-11 に帯電粒子に働く力を示す。帯電粒子は主流体によって ESP 流出方向の力 $F_{\text{primary flow}}(F_P)$ を受けており、ホールに流入するためにはクーロン力 F_q およびイオン風 F_{EHD} による電界方向への作用 $F_{\text{electrical}}(F_e)$ が必要となる。 F_e の作用はホール電極のエッジ方向に働くものとする。ここで、粒子にかかる主流体による力 F_P を算出する。主流体による流体抗力の式を(1-15)式に示す。 C_d は抵抗係数、 d は粒径[m]、 ρ_w は空気密度(1.293 kg/m³)、 V は主流体速度[m/s]である。

$$F_P = C_d \frac{\pi}{8} d^2 \rho_w V^2 \text{ [N]} \quad (1-15)$$

$d=1 \mu\text{m}$ 、 $V=0.5 \text{ m/s}$ として計算すると、ストークス近似であるため、抵抗係数の算出式は(1-16)式となる⁽³⁴⁾。

$$C_d = \frac{24\nu}{Vd} \quad (1-16)$$

ν は動粘性係数($15 \times 10^{-6} \text{ [m}^2/\text{s]}$)である。したがって、抵抗係数 C_d は 720 となり、 F_P は $9.14 \times 10^{-11} \text{ N}$ となる。

帯電粒子がホールに流入するために必要な F_e について検討を行った。図 1-12 に粒子のホール流入条件を示す。ここでは一例として 2 種類の粒子配置条件におけるホール流入条件を示す。針直下に配置したものをパターン A、ホールのエッジから針電極方向へ 5 mm 移動した位置に配置したものをパターン B とした。

主流体による作用は 0° 、クーロン力、イオン風による作用は -90° の力として検討を行った。角度は、ESP 流出方向が 0° 、ホール電極方向が -90° である。また、電極構成は針電極とホール電極間のギャップが 20 mm、ホール径 20 mm である。粒子は F_P と F_e の合成、 F の作用を受け移動する。パターン A における粒子流入条件を(a)に示す。粒子が針直下の場合、粒子がホールに流入する角度は $-62.4^\circ \sim -116.6^\circ$ である。よって、粒子がホールに流入するのに必要な F_e は $10.2 \times 10^{-11} \text{ N}$ 以上となる。パターン B における粒子流入条件を(b)に示す。粒子がホールのエッジから 5 mm の距離にあるとき、粒子がホールに流入する角度は $-14^\circ \sim -90^\circ$ である。よって、粒子がホールに流入するのに必要な F_e は $2.28 \times 10^{-11} \text{ N}$ 以上となる。本研究ではホール型 ESP 内の F_e および F_P に着目し、捕集モデル A の妥当性の確認を行う。

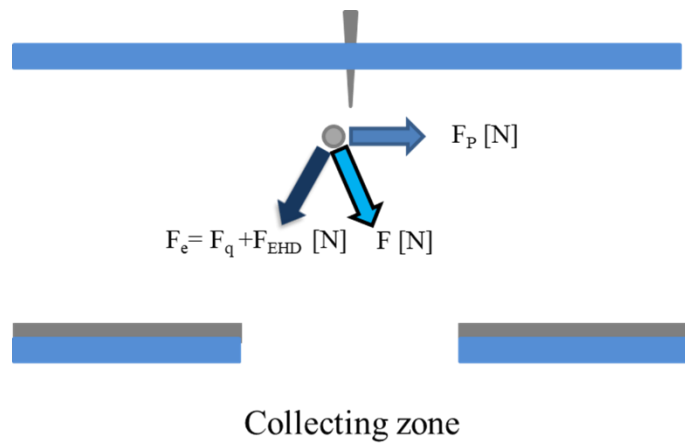
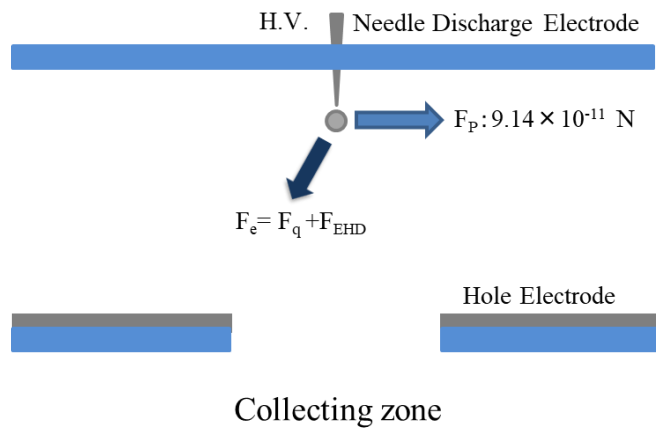
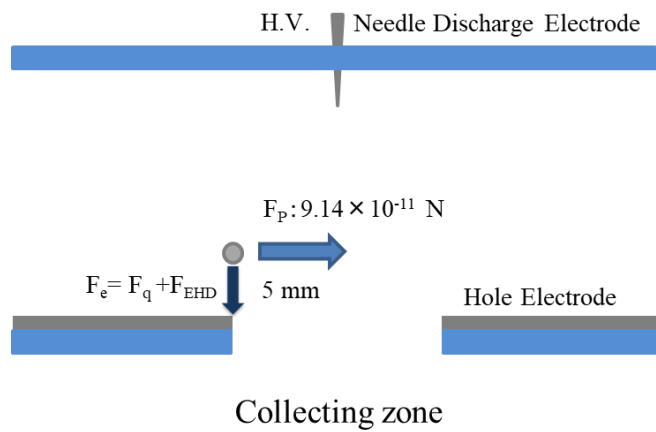


図 1-11. 帯電粒子に働く力



(a) パターン A



(b) パターン B

図 1-12. 粒子のホール流入条件

1-4 研究目的

大気汚染物質の規制が進む中、トンネル用と同時に船舶に適応した ESP の需要が高まっている。船舶用ディーゼル機関から排出される粒子濃度は、自動車から排出される粒子濃度に比べて高濃度であることが知られており、従来型の ESP だと高集塵率が望めない。そのため、画期的な次世代型 ESP の開発が求められている。そこで、再飛散現象の抑制および高集塵率を達成できる次世代型 ESP としてホール型 ESP が開発された。ホール型 ESP については未だに基礎研究が十分ではなく、ホール型 ESP 内の流体や粒子挙動を観察し、電極構成について検討することは装置の高性能化に必要不可欠である。

本研究では、ホール型 ESP を用いた再飛散現象の抑制および集塵率の高効率化を目的とした。船舶に適応した ESP の設計には、基礎特性の測定が必要不可欠である。そこで、ホール型 ESP のスモールモデルを作成し、ESP 内の流体および粒子挙動のシミュレーション解析を行うことで集塵に最適な条件について検討した。次に、シミュレーション解析と同サイズのホール型 ESP を製作し、粒子流速画像測定法を用いて粒子挙動の可視化を行った。可視化した粒子挙動からシミュレーション解析の妥当性の検証を行い、針とホール一対におけるホール型 ESP の性能評価をした。三つ目として、パイロットスケールのホール型 ESP を製作し、ディーゼルエンジンを用いて再飛散現象の抑制と高集塵率を達成できるか実証試験を実施した。最後に、2つの解析を用いて捕集モデル A の妥当性の確認を行い、再飛散現象の抑制に適している電極構成を提案し、製作および集塵実験を行った。

1-5 研究概要

従来型 ESP では再飛散現象が問題視されており、低圧力損失を保ったまま再飛散を抑制できる装置が求められてきた。そこで我々はホール型 ESP を開発し、ホール型 ESP における再飛散現象の抑制および集塵条件の最適化を目的として研究を行った。本論文は 6 つの章から構成されており、第 1 章では、序論として研究背景および ESP の原理、再飛散現象について述べた。また、再飛散現象を抑制する装置としてホール型 ESP を示し、研究現状およびホール型 ESP の必要性、課題について述べた。

第 2 章は、ホール型 ESP のモデルにおける電界解析、流体解析、粒子挙動解析を行った。ホール型 ESP は再飛散現象の抑制とともに、高風速下における高集塵率化が期待されている。これらの解析によって、ホール型 ESP の捕集モデルの証明および集塵に最適な電極構成が設計できると考えた。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について検討を行った。その結果、従来型 ESP に比べて、ホール型 ESP はエッジ効果によって電界強度が非常に高く、クーロン力による粒子の捕集がしやすいことが明らかとなった。また、粒子挙動解析によってホール内に捕集される粒子を確認することが示された。主流体速度特性では、主流体が遅い場合、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、主流体が遅いと粒子のほとんどがホールのエッジに捕集されることが示された。

第3章では、粒子流速画像測定法(PIV)によって可視化したホール型 ESP 内の粒子挙動について検討を行った。ホール型 ESP はイオン風およびクーロン力を用いてホール内に粒子を誘導する仕組みであるため、ホール型 ESP における粒子挙動の可視化が重要である。この解析によって、再飛散現象の抑制が可能なケーシング内へ流入する粒子挙動が確認できる。そこで、PIV 法を用いて粒子挙動の可視化を行い、ホールに粒子が流入する様子の確認と、粒子の移動速度、粒子の移動角度、ホール流入率の向上に適した放電電流値や主流体速度について検討を行った。その結果、粒子がイオン風およびクーロン力の作用を受け、ホール内部に流入する様子を確認できた。また、電流値の増加によって粒子移動速度やホール流入率が増加することも明らかにした。

第4章では、再飛散現象を抑制できるホール型 ESP を用いて、ディーゼルエンジンの排ガスを対象として集塵実験を行った。ホール型 ESP を実用化するには、再飛散現象の抑制効果の検証は必要不可欠である。また、再飛散現象の抑制と同時に、高集塵率な ESP の開発も求められている。そこで、ホール型 ESP による再飛散現象抑制の確認と集塵率の向上に最適な集塵条件について検討を行った。その結果、従来型 ESP とホール型 ESP の集塵率を比較し、ホール型 ESP における再飛散現象の抑制効果を確認した。集塵条件として、小粒径と中粒径では放電電流値の増加に伴い集塵率は高くなった。また、大粒径では放電電流値の増加に伴い集塵率は減少することを明らかにした。排ガスの温度は 140°C で集塵率が極小値を示し、排ガス温度が 100°C で極大値を示した。このことから、放電電流値 1mA、排ガス温度 100°C が集塵に最適な条件であることが明らかとなった。

第5章では、シミュレーション解析、PIV 解析、ホール型 ESP における集塵実験の結果から、再飛散現象抑制に最適な電極構成の検討を行った。シミュレーションと PIV 解析から、捕集モデルの妥当性について検討を行い、粒子はクーロン力とイオン風、主流体速度のベクトル和によって挙動が変化することを明らかにした。捕集モデルを用いて、帯電部の針電極を ESP 流入型へと移動する電極構成の提案を行った。PIV 解析で用いたモデルは針とホール型一対のため、ホール型 ESP における針電極位置の基礎特性を測定した。その結果、針を ESP 流入型に設置することで、集塵率が向上した。実証実験で使用するパイロットスケールのホール型 ESP においても針電極位置による実証実験を実施した。集塵率は針電極を流入側に設置することで、向上した。このことから、ホール型 ESP の高性能化が達成された。

第6章では、以上の各章を総括し、本論文の結論を纏めた。

参考文献

- (1) 秀平 重久：「エネルギーと大気汚染」環境技術, Vol. 11, No. 3, P. 153-158, (1982)
- (2) 飯塚 悟：「地球温暖化研究の概要」日本風工学会誌, Vol. 40, No. 4, P. 375-379, (2015)
- (3) 市川 正巳：「世界における砂漠化とその研究の現状」地理学評論 Ser. A, Vol. 61, No. 2, P. 89-103, (1988)
- (4) 坂内 俊暁, 村尾 直人, 山形 定, 山口 高志, 深澤 達矢：「札幌市のPM2.5濃度に対する都市・越境汚染の寄与評価」地球環境研究論文集, Vol. 71, No. 5, P. 227-233, (2015)
- (5) 黄 弘, 屈 克思：「中国におけるPM2.5の現状と研究動向」日本風工学会誌, Vol. 38, No. 4, P. 434-438, (2013)
- (6) 冨板 崇, 榎野 紀元, 高根 由充：「海塩粒子捕集量におよぼす気象因子の影響」日本建築学構造系論文報告集, Vol. 384, P. 34-41, (1988)
- (7) 森川 多津子：「広域大気質予測モデルにおける粒子状物質 (PM) 濃度予測のための発生源データ」エアロゾル研究, Vol. 23, No. 3, P. 181-186, (2008)
- (8) 坂本 和彦：「酸性雨と大気エアロゾル」エアロゾル研究, Vol. 6, No. 2, P. 129-136, (1991)
- (9) 勝亦 政幸：「揮発性有機化合物 (VOC) の排出抑制対策について」におい・かおり環境学会誌, Vol. 39, No. 6, P. 364-369, (2008)
- (10) 出雲 正矩：「VOC規制と排ガス処理技術」におい・かおり環境学会誌, Vol. 35, No. 3, P. 142-145, (2004)
- (11) 河端 美則, 宇田川 忠, 樋口 一枝, 山田 博之, 橋本 尚子, 岩井 和郎：「ディーゼル排ガス粒子の気管内注入による肺障害と発癌」大気汚染学会誌, Vol. 23, No. 1, P. 32-40, (1988)
- (12) 瑞慶覧章朝, 江原由泰, 伊藤泰朗：「空気浄化技術」養賢堂, (2011)
- (13) 平原 祐：「船舶からの排ガスに対する規制の強化について-MARPOL条約附属書VI改正の概要」マリンエンジニアリング, Vol. 43, No. 6, P. 830-832, (2008)
- (14) 高橋 千織, 益田 晶子：「IMO排ガス洗浄システム (EGCS)ガイドラインにおける排水規制とモニタリング」マリンエンジニアリング, Vol. 50, No. 3, P. 354-359, (2015)
- (15) 古賀 輝久, 久保 貴秋, 福屋 悟, 青坂 亮摩：「船用ディーゼル機関からのNOx排出規制対応技術」マリンエンジニアリング, Vol. 48, No. 1, P. 15-20, (2013)
- (16) 国土交通省ホームページ
- (17) 松本 友宏：「NOx, SOx, EEDIの段階的規制強化に関するIMO/MEPCの審議動向 - NOx3次規制開始時期が「2016年」で決着するまでの交渉過程を中心に」マリンエンジニアリング, Vol. 49, No. 6, P. 744-749, (2014)
- (18) T.C. Bond, S. J. Doherty : "Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment" Jouna; of Geophysical Research : Atmospheres, Vol. 118, No. 118, P. 5380-5552, (2013)
- (19) 高橋 千織：「国際海事機関におけるブラックカーボン規制に関する議論の動向」日本船舶海洋工学会誌, Vol. 66, P. 42-46, (2016)
- (20) 井伊谷 鋼一, 木村 典夫：「粉末粒度分布とサイクロン集塵器の効率」化学工学, Vol. 18, No. 4, P. 154-

159, (1954)

(21) 井伊谷 鋼一：「サイクロン集じん器の圧力損失に関する理論」日本機械学会論文集, Vol. 19, No. 81, P. 90-95, (1953)

(22) 高山 敦好, 藤田 浩嗣, 原野 亘：「排ガス充電器と静電水スクラバによる排ガス低減技術—C重油を用いたスクラバ溶媒による特性—」環境技術, Vol. 42, No. 4, P. 228-234, (2013)

(23) 乾 貴誌, 田原 雅哉, 青木 幸男, 瑞慶覧 章朝：「排ガス浄化システム(SO_x スクラバ)の小型化技術」マリンエンジニアリング, Vol. 50, No. 3, P. 324-331, (2015)

(24) 乾 貴誌, 浅川 大輔, 豊角 浩之, 瑞慶覧 章朝, 澤井 淳, 當山 広幸, 中田 栄寿, 江原 由泰：「海水のアルカリ化に対するマグネシウム電極を用いた電解工程の省電力化」マリンエンジニアリング, Vol. 50, No. 1, P. 113-118, (2015)

(25) 水野 彰：「電気集塵および低温プラズマ化学反応によるディーゼル自動車排ガス処理」エアロゾル研究, Vol. 30, No. 2, P. 100-107, (2015)

(26) Toshiaki Yamamoto, Satoru Maeda, Yoshiyasu Ehara, Hitomi Kawakami："Development of EHD-Assisted Plasma Electrostatic Precipitator" IEEE Tran. on Industry Applications, Vol. 49, No. 2, P. 672-678, (2013)

(27) 横田 久司, 田原 茂樹, 上野 広行, 坂本 和彦：「連続再生式 DPF の排出ガス低減効果等について」エアロゾル研究, Vol. 18, No. 3, P. 185-194, (2003)

(28) 中島 徹, 佐々木 左字介, 河合 昭宏, 坂本 和彦：「ディーゼルパーティキュレートフィルタ (DPF) による排出ガス性状の改善」エアロゾル研究, Vol. 15, No. 4, P. 344-352, (2000)

(29) 社団法人建設電気技術協会：「道路トンネル用集じん便覧」(1979)

(30) 乾 貴誌, 吉田 将隆, 小泉 和裕, 川上 一美：「船用機関における電気集塵式 PM 低減技術 -実用性向上のための周辺技術」マリンエンジニアリング, Vol. 48, No. 4, P. 534-539, (2013)

(31) 橋本 清隆：「電気集塵装置の理論と実際」電気書院, (1965)

(32) 山口 英告, 村山 将, 細野 洋：「大規模道路トンネルにおける空気浄化での電気集塵・脱硝技術」Panasonic Technical Journal, Vol. 58, No. 2, P. 10-14, (2012)

(33) 静電気学会：「静電気ハンドブック」株式会社オーム社, (2006)

(34) ウィリアム C. ハインズ：「エアロゾルテクノロジー」井上書院, (1985)

(35) 宗像 健：「Cunningham の補正係数について」粉体工学会誌, Vol. 27, No. 2, P. 91-97, (1990)

(36) W. Deutsch："Bewegung und Ladung der Elektrizitätsträger im Zylinderkondensator" annalen der physic, Vol. 373, No. 12, P. 281-368, (1922)

(37) 足立宜良：「電気集じん器内のイオン風—シュリーレン法による実験的考察—」電気学会論文誌. B, Vol. 93, No. 7, P. 273-280, (1973)

(38) 村井 一弘, 川島 陽介, 坂田 亮彦, 村上 哲郎：「電気集塵装置の性能に及ぼす電気流体力学場の影響 (集塵効率に及ぼす EHD 数の影響)」エアロゾル研究, Vol. 11, No. 2, P. 129-136, (1996)

(39) 藤島 英勝, 上田 泰稔, 富松 一隆：「電気集じん装置における EHD 場の解析と実験」静電気学会誌, Vol. 28, No. 4, P. 218-223, (2004)

- (40) 足立宜良, 大久保 利一:「コロナ放電に伴って発生するイオン風」静電気学会誌, Vol. 11, No. 4, P. 246-254, (1987)
- (41) M. Robinson : "Movement of air in the electric wind of the corona discharge" Trans. Am. Inst. Electr. Eng., Vol. 80, No. 2, P. 143-150, (1961)
- (42) 川崎 元之, 赤崎 正則:「針対金網電極系におけるイオン風反動力の実験的検討」電気学会論文誌. A, Vol. 104, No. 8, P. 427-434, (1984)
- (43) 大野 長太郎:「除じん・集じんの理論と実際」株式会社オーム社, (1978)
- (44) 増田 閃一:「電気集じん器における逆電離現象」電気学会論文誌, Vol. 80, No. 865, P. 1482-1489, (1960)
- (45) 松本 陽一:「最近の新荷電方式電気集じん装置について」粉体と工業, Vol. 21, No. 6, P. 53-60, (1989)
- (46) 三坂 俊明, 大浦 忠, 有光 武雄:「移動電極型電気集塵装置におけるダスト層付着力と払落し」静電気学会誌, Vol. 30, No. 3, P. 128-132, (2006)
- (47) 増田 閃一:「電気集じん器の入口ガス調湿による集じん性能向上について」電気学会論文誌, Vol. 81, No. 873, P. 968-974, (1961)
- (48) 増田 閃一, 吾郷 俊二, 伊藤 孜, 斎藤 弘, 古谷 信夫:「乾式・湿式一体型(ハイブリッド形)電気集じん装置」電気学会論文誌 B, Vol. 96, No. 2, P. 90-96, (1976)
- (49) 鈴木 治朗, 永山 伝, 松田 広行, 渡辺 正敏, 佐藤 幹夫:「火力発電所のばいじん低減技術」燃料協会誌, Vol. 57, No. 10, P. 834-848, (1978)
- (50) 原 雅則, 末広 純也, 住吉谷 寛, 赤崎 正則:「高温空気中におけるコロナ放電のモードと特性」電気学会論文誌 A, Vol. 107, No. 8, P. 379-386, (1987)
- (51) 立花 直治:「フライアッシュの電気集塵における間欠荷電」静電気学会誌, Vol. 12, No. 6, P. 433-440, (1988)
- (52) 三坂 俊明, 大浦 忠, 山崎 稔:「パルス荷電固定電極部を組合わせた移動電極型電気集塵装置」静電気学会誌, Vol. 30, No. 5, P. 230-235, (2006)
- (53) 増田 閃一, 小畑 貞二, 平井 淳之:「電気集塵装置用パルス電源について(その 1)」静電気学会誌, Vol. 3, No. 4, P. 216-223, (1979)
- (54) J.D. Bassett, K Akutsu, S. Masuda : "A Preliminary Study of Re-entrainment in an Electrostatic Precipitator" Journal of Electrostatics, Vol. 3, No. 4, P. 311-325, (1977)
- (55) 瑞慶覧 章朝, 江原 由泰, 伊藤 泰郎:「電気集じん装置における再飛散現象に対する界面活性剤の効果」電気学会論文誌 A, Vol. 199, NO. 3, P. 262-272, (1999)
- (56) 安本 浩二, 瑞慶覧 章朝, 江原 由泰:「交流電界形電気集塵装置における再飛散防止と下流壁面への粒子付着防止」粉体工学会誌, Vol. 43, No. 3, P. 198-204, (2006)
- (57) 川上 一美, 瑞慶覧 章朝, 江原 由泰:「ディーゼル排ガス微粒子除去に対する交流電気集塵の効果」電気学会論文誌 A, Vol. 131, No. 3, P. 192-198, (2011)
- (58) 徐 芝徳, 古堅 宗勝, 牧野 義, 塚本 達郎:「船用ディーゼル機関の粒子状物質除去装置の開発 - 静電サイクロン方式 DPF の PM 捕集特性」マリンエンジニアリング, Vol. 44, No. 2, P. 304-309, (2009)

- (59) 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, Vol. 41, No. 2, P. 99-104, (2017)
- (60) 村井 一弘, 本田 逸郎, 玉置 修, 川島 陽介:「電気集塵装置の性能に関するシミュレーション」可視化情報学会誌, Vol. 19, No. 1, P. 133-136, (1999)
- (61) A. Yabe, Y. Mori : "EHD Study of the Corona Wind between Wire and Plate Electrodes" AIAA Journal, Vol. 16, No. 4, P. 340-345, (1978)
- (62) 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, Vol. 106, No. 8, P. 377-383, (1986)
- (63) 猪貝 光祥:「マルチグリッド法及び ADI 法における収束特性の検討」日本応用数理学会論文誌, Vol. 1, No. 4, P. 319-332, (1991)
- (64) K. S. P. Nikas, A. A. Varonos, G. C. Bergeles : "Numerical simulation of the flow and the collection mechanisms inside a laboratory scale electrostatic precipitator" Journal of Electrostatics, Vol. 63, No. 5, P. 423-443, (2005)
- (65) Toshiaki Yamamoto, Miyuki Okuda, Massaki Okubo : "Three-Dimensional Ionic Wind and Electrohydro-dynamics of Tuft/Point Corona Electrostatic Precipitator" IEEE Tran. on Industry Applications, VOL. 39, NO. 6, (2003)
- (66) T. Yamamoto and L. E. Sparks : "Numerical simulation of three-dimensional tuft corona and electrohydrodynamics," IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. IA-22, P. 880-885, (1986)
- (67) 瑞慶覧 章朝, 乾 貴誌, 川上 一美, 江原 由泰:「船舶用電気集塵装置における再飛散抑制と帯電粒子の挙動の 3次元シミュレーション」マリンエンジニアリング, Vol. 48, No. 4, P. 522-527, (2013)
- (68) 可視化情報学会編:「PIV ハンドブック」森北出版株式会社, (2002)
- (69) 日本流体力学会編:「流体力学ハンドブック」オーム社, (1998)
- (70) 浅沼 強:「流れの可視化ハンドブック」株式会社 朝倉書店, (1977)
- (71) 大山 龍一郎:「EHD 現象の可視化-コロナ放電場において誘起する EHD 流動」可視化情報学会誌, Vol. 27, No. 105, P. 98-102, (2007)
- (72) Jerzy Mizeraczyk, Marek Kocik, Jaroslaw Dekowski : "Measurements of the velocity field of the flue gas flow in an electrostatic precipitator model using PIV method" Journal of Electrostatics, Vol. 51-52, P. 272-277, (2001)
- (73) 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, Vol. 136, No. 12, P. 797-803, (2016)

第2章 ホール型 ESP 内の流体・粒子挙動解析

2-1 緒言

環境浄化に関心が高まる近年、排ガス浄化装置として電気集塵装置(ESP)が着目されている。ESP は電氣的な力であるクーロン力と機械的な力である流体を用いて粒子を捕集する装置である⁽¹⁾。そのため、捕集空間内の電界、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。解析手法としては、数理解析学が古くから用いられている⁽²⁾。数理解法とは、与えられた方程式をより扱いやすい近似的な方程式に置き換え、適切な数値計算法を用いて解く手法である。このような解法には差分法、有限要素法、境界要素法などがあり、最も歴史が古い差分法においては、解析空間および時間方向を有限な寸法の格子に分割し、格子点で定義される変数を用いて、これらの式の中に現れる微分演算を直接差分で近似するものである。有限要素法や境界要素法では、これらの式に等価な積分方程式を導出し、解析領域内、あるいは領域境界面を小さな多面体あるいは多角形に分割し、その節点において定義される変数を用いて積分方程式を近似的に評価する手法である⁽³⁾。差分法は、流体力学や熱伝導のような問題によく用いられてきたが、有限要素法は固体力学や構造力学において発展してきた数値解析手法であり、最近では、流体・熱・電磁場などあらゆる連続体力学分野へと応用が広がってきている⁽⁴⁾。差分法では、大久保氏らが線対平板型 ESP 内の流れ場を、運動量保存式に基づき渦度と流れ関数を用いて数値解析を行っている⁽⁵⁾。有限要素法では、村井氏らにおける ESP 内の解析報告がある⁽⁶⁾⁽⁷⁾。ここでは、電界解析と流体解析を行っており、イオン風がガス流に与える影響について検討している。海外においても ESP 内のシミュレーション解析が行われており、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、ESP 内に生じるカルマン渦について検討をしている⁽⁸⁾。しかし、粒子を電界および流体場に投入し、粒子が集塵される様子を観測した報告は少ない。また、著者らが着目しているホール型 ESP では、イオン風とクーロン力によって粒子を電界がゼロの空間に捕集することで再飛散現象の抑制が期待できる。そのため、ホール型 ESP における粒子の集塵過程の解明や、高風速に適応できるホール型 ESP の設計が課題として挙げられている。このことから、ホール型 ESP における電界、流体、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 の基礎研究としてホール型 ESP 内における電界解析と流体解析、粒子挙動解析を行った。電界解析では、従来の針対平板型 ESP と電界強度を比較し、ホール型 ESP の有用性の検討を行った。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。

2-2 解析方法

2-2-1 支配方程式

本研究では、シミュレーション解析に有限要素法 (COMSOL Multiphysics®) を用いた。COMSOL Multiphysics® は、スウェーデン・COMSOL AB により開発された、マルチフィジックス解析を前提として設計されている有限要素法 (FEM) ベースの汎用シミュレーションソフトウェアである。このシミュレーションソフトのマルチフィジックス機能はあらゆる物理現象の組み合わせに対応できるため、実工業現象に即した高精度モデリング・シミュレーションが可能である。コロナ放電の形成には、ポアソン方程式、電子および正負イオンの連続式を用いて計算を行う。大気圧空气中でプラズマを形成すると、 N_2^+ や O_2^+ をはじめ、さまざまな正イオンおよび負イオンが生成されるが、本研究では簡単化のため、正イオンおよび負イオンをそれぞれ一種類と仮定し、移動度などのパラメータには大気圧空气中における平均的な値を用いた⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。また、イオン風による荷電粒子の輸送速度は、電界によるドリフト速度に比べ小さいため、今回の計算では無視した。

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(2-1)式で表される。

$$-\nabla \cdot \varepsilon_r \varepsilon_0 \nabla V = \rho \quad (2-1)$$

このとき、 ε_0 は真空の誘電率、 ε_r は空気の比誘電率である。また、空气中的空間電荷密度 ρ [C/m³] は、後述する 3 つの係数形式の偏微分方程式で解く正イオン数密度 N_p [m⁻³]、負イオン数密度 N_n [m⁻³]、電子数密度 N_e [m⁻³] と電気素量 e [C] を用いて、(2-2)式で得られる。

$$\rho = e(-N_e + N_p - N_n) \quad (2-2)$$

正イオン数密度 N_p [m⁻³] を変数とした正イオン連続式を(2-3)式に示す。

$$\frac{\partial N_p}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_p \nabla N_p + \mu_p \mathbf{E} N_p) = \alpha N_N N_e - r_e N_n N_p \quad (2-3)$$

t [s] は時間、 D_p [m²/s] は正イオンの拡散定数、 μ_p [m²(V·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、 α [m³/s] は電離係数、 r_e [m³/s] は正イオンと負イオンの再結合定数である。

負イオン数密度 N_n [m⁻³] を変数とした負イオン連続式を(2-4)式に示す。

$$\frac{\partial N_n}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_n \nabla N_n + \mu_n \mathbf{E} N_n) = \eta N_N N_e - r_e N_n N_p \quad (2-4)$$

このとき、 D_n [m²/s]は負イオンの拡散定数、 μ_n [m²/(V・s)]は負イオンの移動度、 η [m³/s]は付着係数である。

電子数密度 N_e [m⁻³]を変数とした電子連続式を(2-5)式に示す。

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_e \nabla N_e + \mathbf{v}_e N_e) = (\alpha - \eta) N_N N_e \quad (2-5)$$

このとき、 D_e [m²/s]は電子の拡散定数、 \mathbf{v}_e [m/s]は電子のドリフト速度である。

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、ポアソン方程式と正イオン連続式により、コロナ放電の計算を行った。

ESP 内のコロナ放電下では、機械的な一次流の他に、電気流体力学(EHD)による二次流が発生する。EHD 現象はイオン風として知られており、イオン風の駆動力は荷電粒子に働くクーロン力となる⁽¹²⁾。そこで、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ため、(2-6)式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⁽¹³⁾。

$$\mathbf{F} = \rho \mathbf{E} \quad (2-6)$$

電界強度 \mathbf{E} は(2-7)式より得られる。

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (2-7)$$

Navier-Stokes 方程式を(2-8)式に示す。

$$\rho_g \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \rho_g (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\nabla P + \eta_g \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{F} \quad (2-8)$$

\mathbf{U} [m/s]は流速、 P [Pa]は圧力、 ρ_g [kg/m³]は空気密度、 η_g [Pa・s]は空気の動粘性係数である。

正イオン連続式には生成項が含まれていない。そのため、初期条件として針先表面に放電

開始直後の正イオン数密度を東京工業大学の竹内希氏の実験値から $0.0035/e \text{ [m}^{-3}\text{]}$ と与えた⁽¹³⁾。そして、拡散モデルによって、時間ごとの空間電荷密度分布を計算した。解析に用いたパラメータを表 2-1 に示す。

表 2-1. 解析パラメータ

N_p	0.0035/e	正イオン数密度の初期値 $[\text{m}^{-3}]$
N_n	0	負イオン数密度 $[\text{m}^{-3}]$
N_e	0	電子数密度 $[\text{m}^{-3}]$
N_N	2.95×10^{25}	中性子数密度 $[\text{m}^{-3}]$
ϵ_0	8.85×10^{-12}	真空の誘電率
ϵ_r	1.00	空気の比誘電率
e	1.60×10^{-19}	電子素量 [C]
D_p	3.12×10^{-6}	正イオンの拡散定数 $[\text{m}^2/\text{s}]$
μ_p	1.23×10^{-4}	正イオンの移動度 $[\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}]$
ρ_g	1.20	空気密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$
η_g	1.80×10^{-5}	空気の動粘性係数 $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$

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(2-9)式に示す。

$$\frac{d(m_p v)}{dt} = m_p \mathbf{g} \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} + \frac{1}{\tau_p} m_p (\mathbf{u} - \mathbf{v}) + eZ\mathbf{E} \quad (2-9)$$

右辺は流体に作用する力であり、重力、抗力、電気力である。 $m_p[\text{kg}]$ は粒子の質量、 $(\mathbf{u} - \mathbf{v})[\text{m}/\text{s}]$ 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、(2-10)式を代入した⁽¹⁴⁾。また、電気力における荷電数 Z には(2-11)式に示す飽和帯電量の式を用いた⁽¹²⁾。 $d[\mu\text{m}]$ は粒径、 ϵ_s は粒子の比誘電率である。

$$\frac{1}{\tau_p} = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (2-10)$$

$$Z = \frac{3\pi\epsilon_0\epsilon_s d^2 E}{e(\epsilon_s + 2)} \quad (2-11)$$

2-2-2 解析条件

ホール型 ESP の解析モデルを図 2-1 に示す。本研究では、シミュレーションの妥当性確認のため、第 3 章の粒子可視化実験と同様のモデルを用いて研究を行った。針先には正極性 7 kV を印加した。電極間距離と孔径は 20 mm，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 $V=0$ kV 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。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 2-1 の針電極先端から集塵電極までを釣鐘状に描いた破線上に 150 個配置した。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。粒子条件は，第 3 章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 は第 3 章で使用したタルク粒子の粒径である。本解析は二次元解析であるため，三次元で集塵する実際のホール型 ESP と挙動が異なる。本解析では，針直下における最もイオン風が強く吹く粒子の挙動解析を目的として解析を行った。

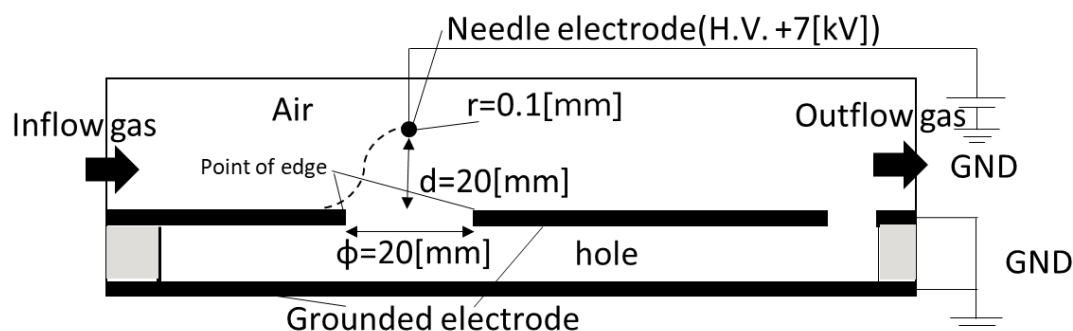


図 2-1. シミュレーションモデル

2-3 電界解析

ホール型 ESP は電氣的な力を用いて粒子を捕集する装置である。電氣的な力，とはクーロン力を示しており，粒子の帯電量と空間の電界によって決定される。そこで，支配方程式を用いてホール型 ESP における電界解析を行い，エッジ付近の電界が強まるエッジ効果を確認する。ホール型 ESP における電界分布を図 2-2 に示す。中心にある点が針電極先端である。印加電圧は 7 kV とした。図中の濃淡は最小値を黒色，最大を白色とした。針電極先端の電界値が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も確認された。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(従来型 ESP)とホール型 ESP の電界強度を比較し

た。図 2-3 に従来型 ESP における電界分布を示す。電界は針先が最も強く、等電界線は接地電極へ向け放射状となった。図 2-4 に電界の比較を示す。横軸は測定点を示しており、0 mm をホールを中心とした。ホール径は 20 mm のため、-10 と 10 mm 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 4 倍以上に強まることが確認できた。このことから、捕集モデル A において、帯電粒子に働く F_e が強くなるホール型 ESP が捕集に適していることが明らかとなった。

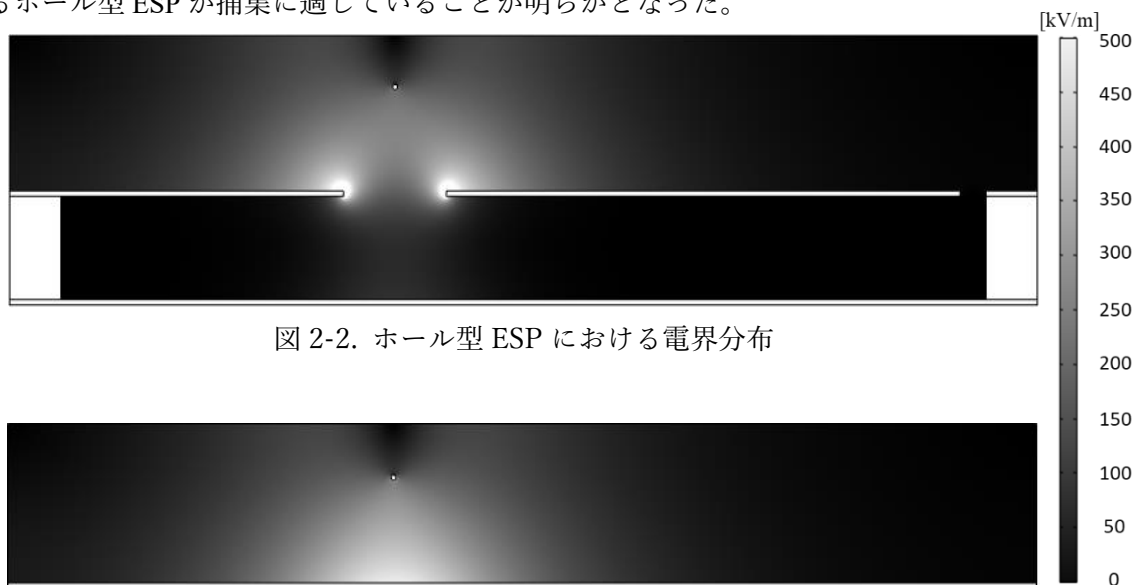


図 2-2. ホール型 ESP における電界分布



図 2-3. 従来型 ESP における電界分布

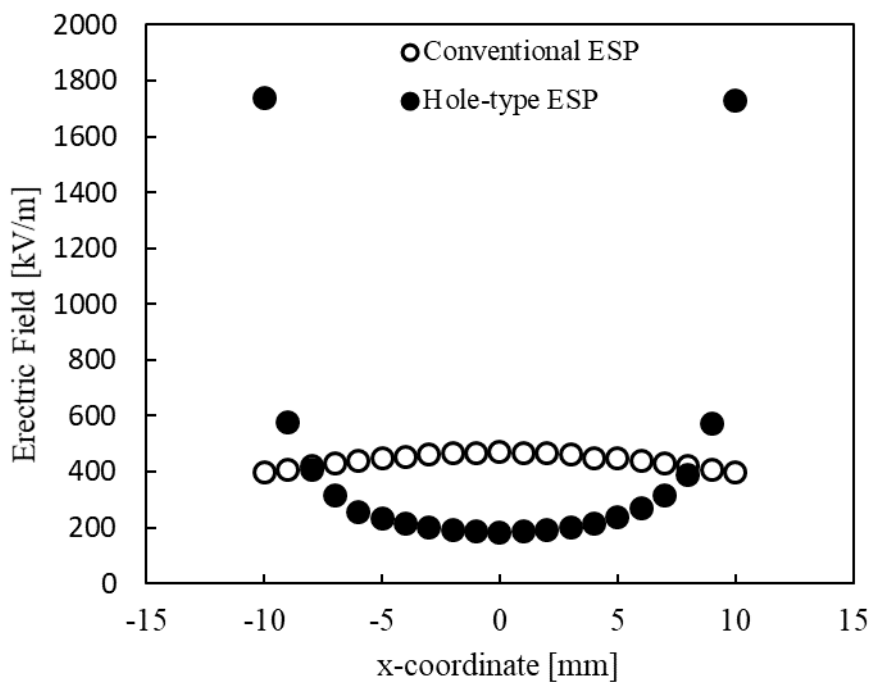
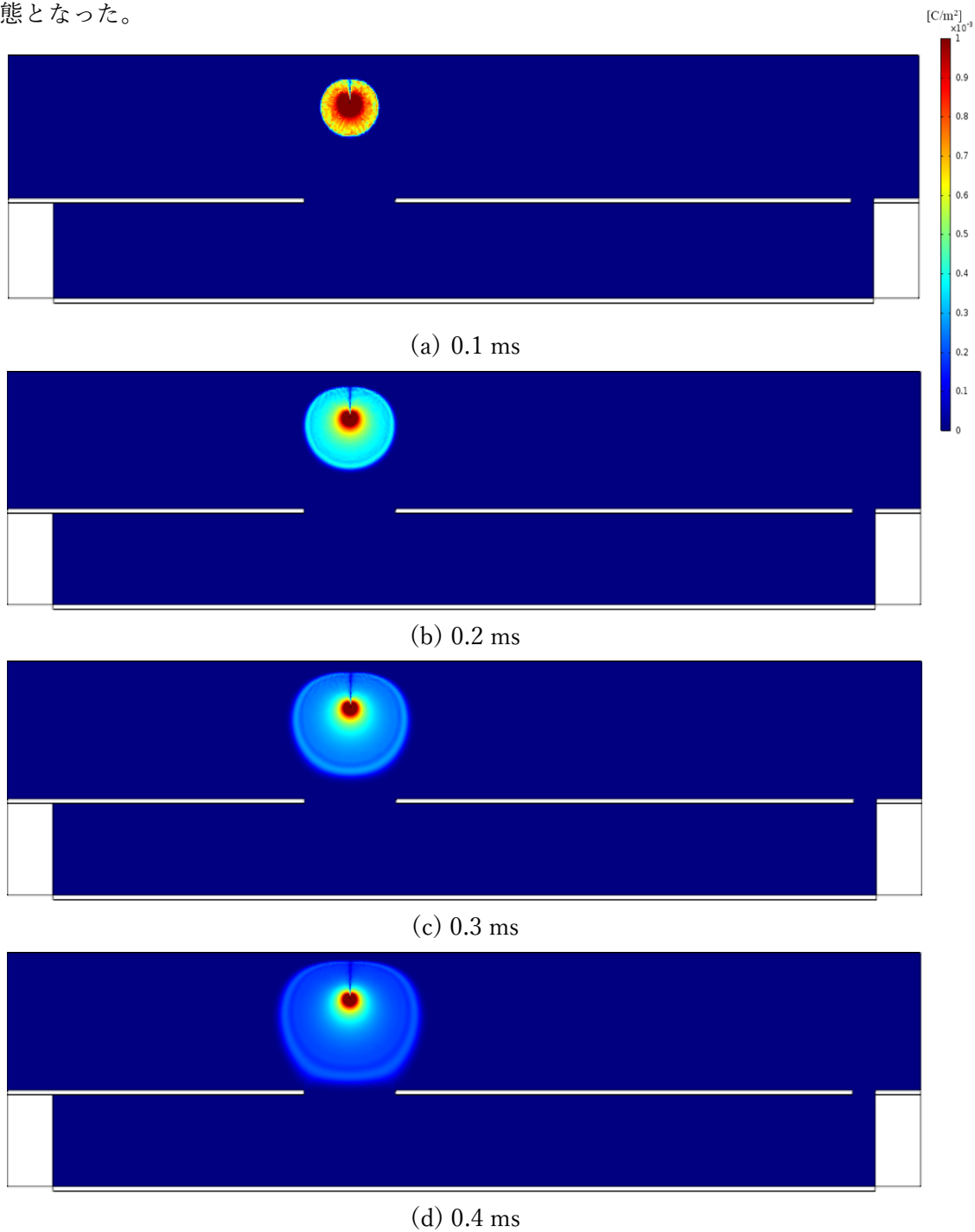
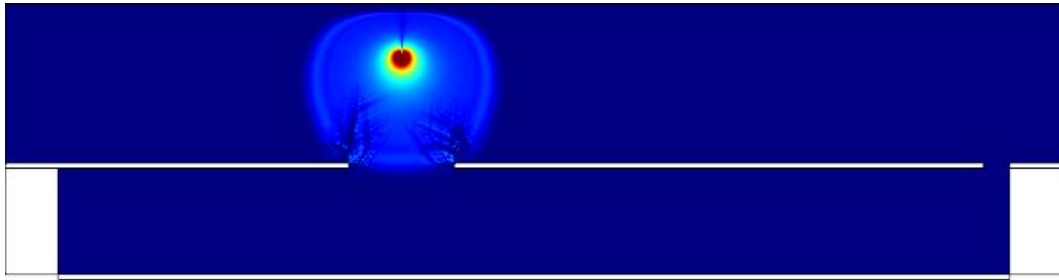


図 2-4. 各測定点における電界の比較

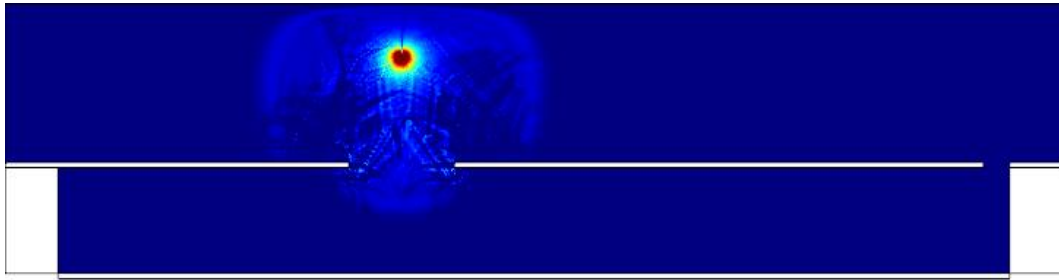
2-4 空間電荷密度解析

ホール型 ESP における空間電荷密度分布を図 2-5 に示す。図は 0.1~5.0 ms までの空間電荷密度の進展を示している。針先に発生した電荷が電界によりホール電極方向へ扇形に進展していく様子が確認できた。また、エッジ近傍では、電荷がエッジに引き寄せられており、0.5 ms でエッジに到達している。0.5 ms 以降は更に進展を続け、およそ 5.0 ms で定常状態となった。

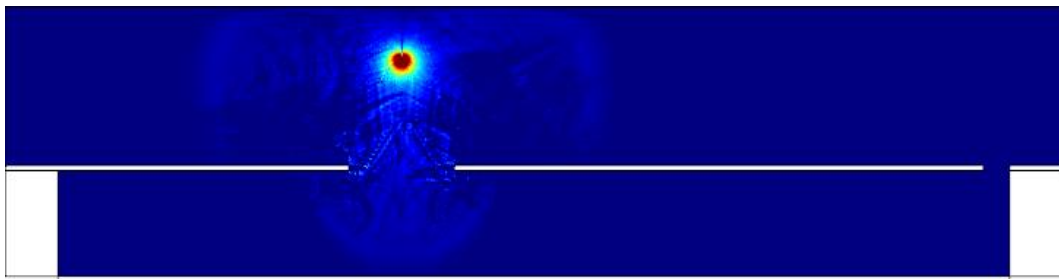




(e) 0.5 ms



(f) 1.0 ms



(g) 2.0 ms



(h) 5.0 ms

図 2-5. 空間電荷密度分布

図 2-6 に空間電荷密度の進展距離と時間の関係を示す。空間電荷密度 $0.2 \times 10^{-3} \text{ C/m}^3$ 以上の領域の端部と針電極先端との距離を縦軸とした。時間の増加に伴い、進展距離が伸びていることがわかる。また、進展の速度は時間によってほとんど変化しないことも確認できた。時間 0.5 ms で、進展距離が 20 mm に到達した。針電極先端からホール電極までは 20 mm である。このことから、空間電荷が 0.5 ms でホール電極に到達したことが定量的に確認できた。

図 2-7 にホールエッジにおける空間電荷密度と時間の関係を示す。縦軸は N_p の常用対数で表している。0.1 ms や 0.2 ms では、空間電荷は進展しておらず、低い値を示した。時間の経過によって図 2-6 のように空間電荷が進展していき、0.3 ms, 0.4 ms, 0.5 ms と空間電荷密度は増加していった。空間電荷密度の進展はイオン風解析において必要不可欠である。これらの結果から、ホール型 ESP における空間電荷密度の進展と値を求められることが確認できた。

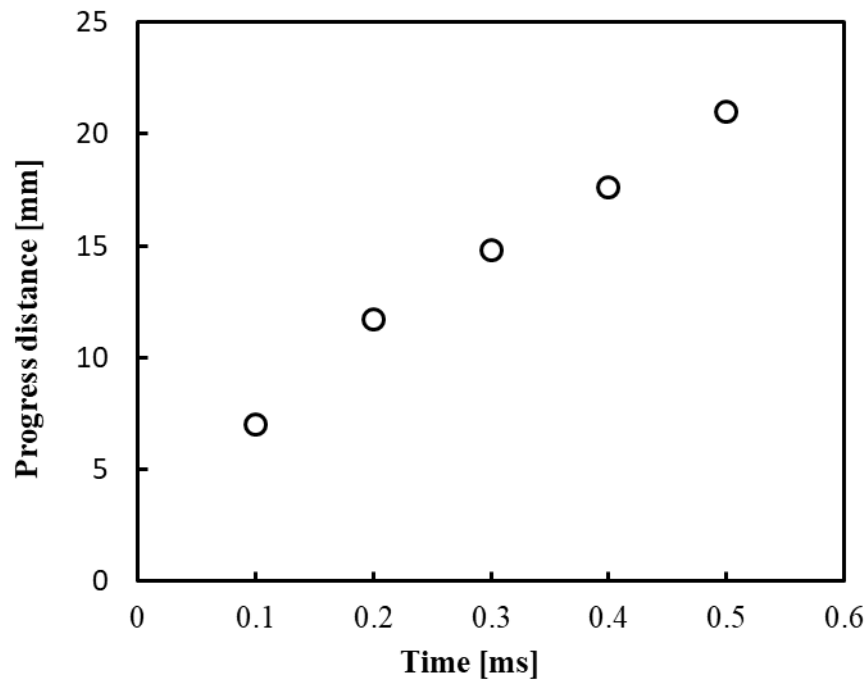


図 2-6. 空間電荷密度の進展距離と時間の関係

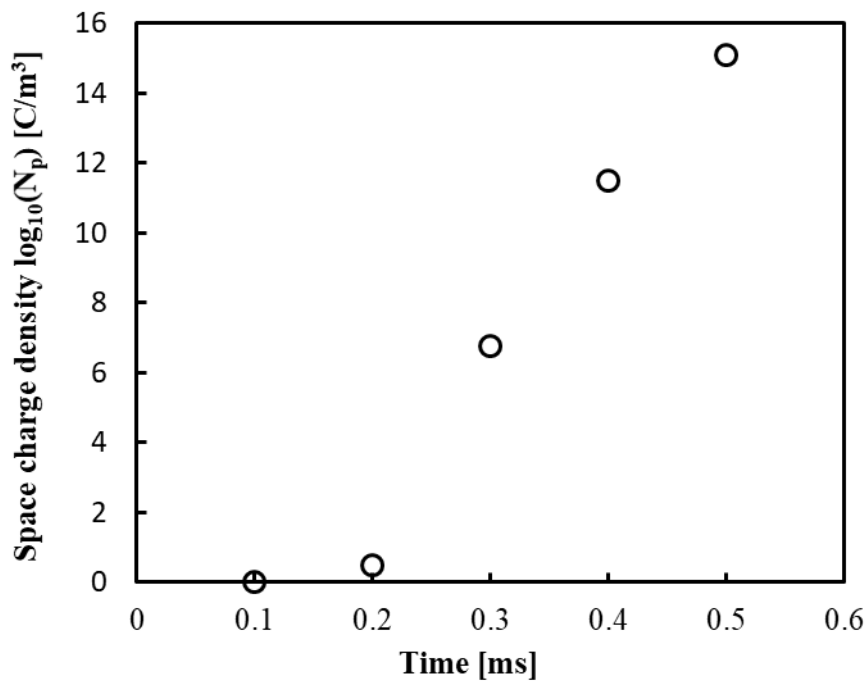
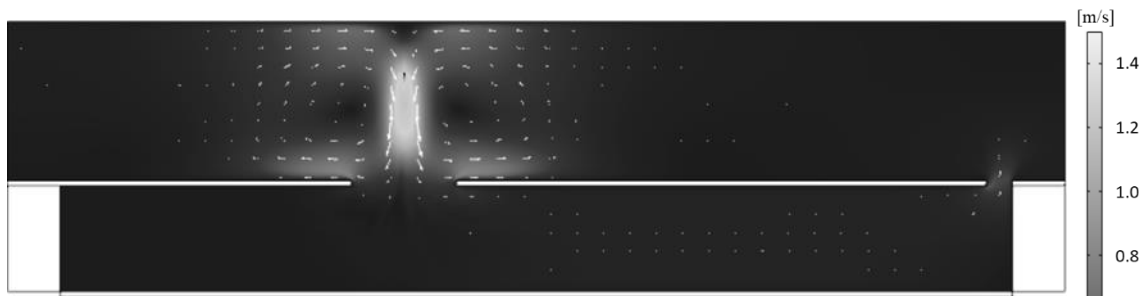


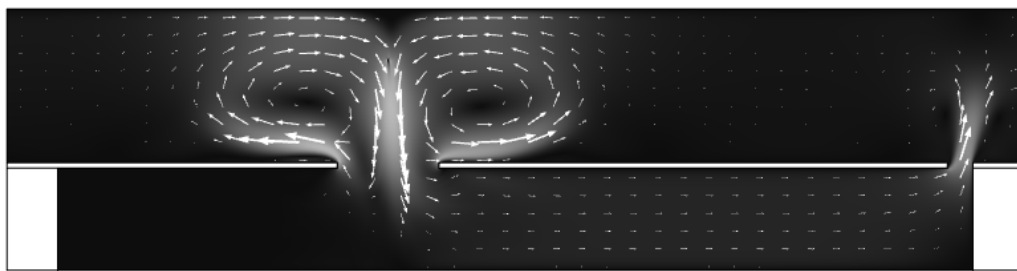
図 2-7. 空間電荷密度と時間の関係

2-5 流体解析

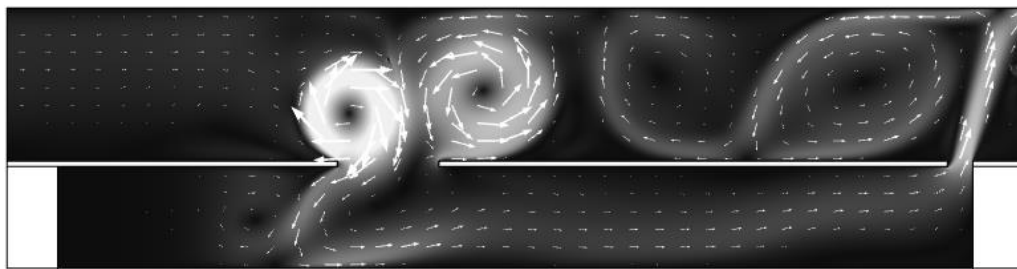
ESPにおけるイオン風は、粒子を集塵電極方向へと誘導する重要な役割を担っている。しかし、ホール型 ESP におけるイオン風分布は未だ解明されてなく、ホール内に流体が流入するかの確認が急務である。そこで、主流体速度を 0 m/s とした時の流体解析を行い、流体の挙動について検討する。図 2-8 にイオン風分布を示す。電圧印加後 2 秒間の解析を行い、その進展を示している。(a)に 0.04 秒後のイオン風を示す。針先端から発生したイオン風が、接地電極に向かって吹いている。しかし、風速が速いイオン風のコアの部分は、まだホールに到達していないことが確認できる。(b)に 0.1 秒後のイオン風を示す。0.1 秒では、イオン風がホールに到達し、流入している様子が確認できる。また、左右対称の流れが形成されている。(c)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。(b)では流れが左右対称だったが、(c)では非対称になり始めている。これは、ケーシングの出口に流出孔が設けられているため、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。(d)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。また、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できた。



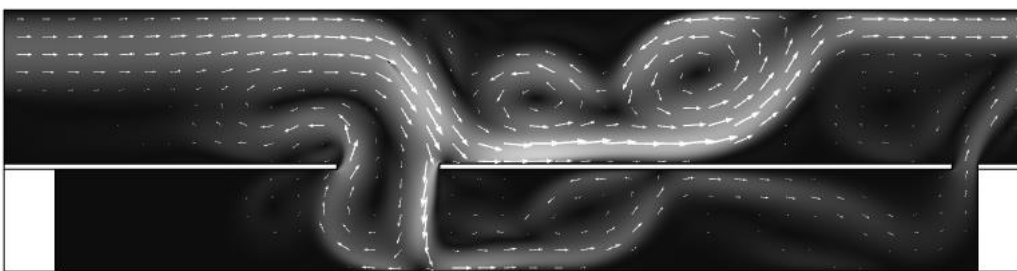
(a) 0.04 s



(b) 0.1 s



(c) 0.5 s



(d) 2s

図 2-8. イオン風分布 (0 m/s)

イオン風分布から、粒子がイオン風の流れに乗り、ホール内へと流入すると考察した。しかし、実際の ESP 内にはガス流があるため、主流体を流体解析に加える必要がある。そこで、主流体の条件を加えた流体解析を行い、各主流体において粒子がホール内に流入するかを検討する。図 2-9 に各主流体速度における流体分布を示す。図 2-9 は全て電圧印加後 2 秒後の流体分布である。(a)に主流体速度 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。主流体速度が増加すると、 F_p が増加するため、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 1.0m/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。これらのことから、 F_p が増加することで、粒子がホール内に流入しにくくなることが確認できた。

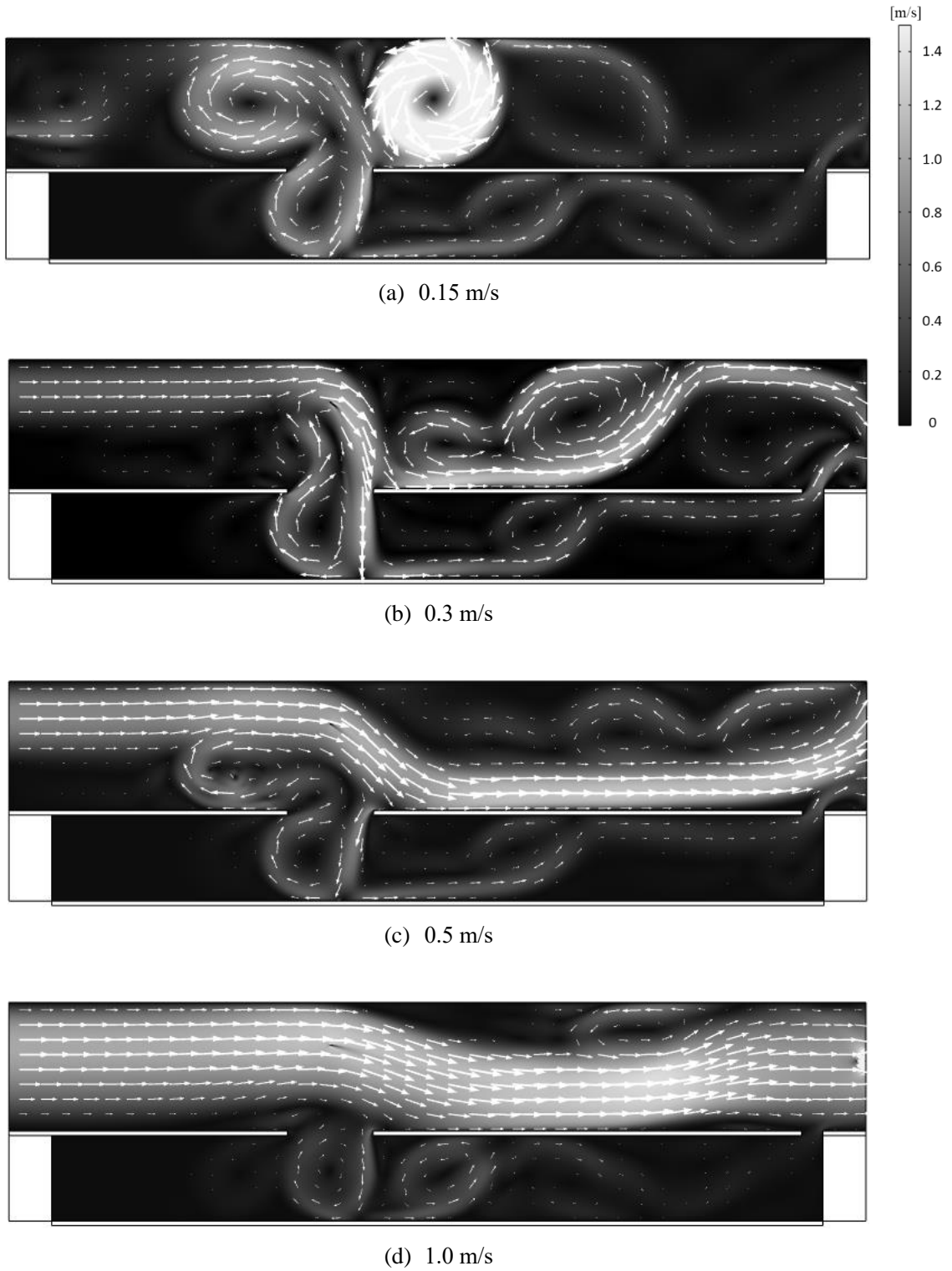


図 2-9. 各主流体速度における流体分布

ホール型 ESP は粒子をホールに誘導し再飛散現象を抑制する装置である。そのため、流体の移動する角度の検討を行った。図 2-10 に流体の移動角度と主流体速度の関係を示す。角度は ESP 流出方向を 0° ，電界方向を -90° とした。主流体速度 0.15 m/s や 0.3 m/s では、主流体速度による力 F_p に比べてイオン風による力 F_{EHD} が大きいため、主流体は -60° で移動している。一方、主流体速度が増加すると F_p が大きくなるため、 0.5 m/s で -40° 、 1.0 m/s で -20° と 0° に近づいた。ホール型 ESP では、 -90° に近づくと粒子はホールに流入する。そのため、電流値を増加して F_e の影響を強くする方法や管内を広げることで主流が通過する断面積を増やし、 F_p の影響を弱くすることで性能が向上できると考えられる。

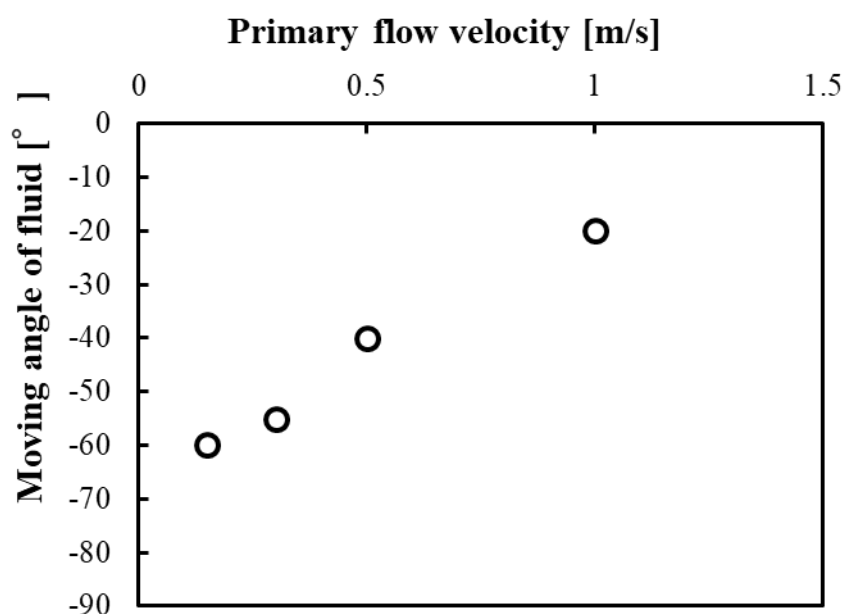


図 2-10. 流体の移動角度と主流体速度の関係

ホール内に流入する主流体の速度は、ホール型 ESP の性能向上に重要な要素の 1 つである。そこで、主流体のホール流入速度を流体分布から測定した。図 2-11 に主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、ホールに流入する主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。一方、粒子は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。

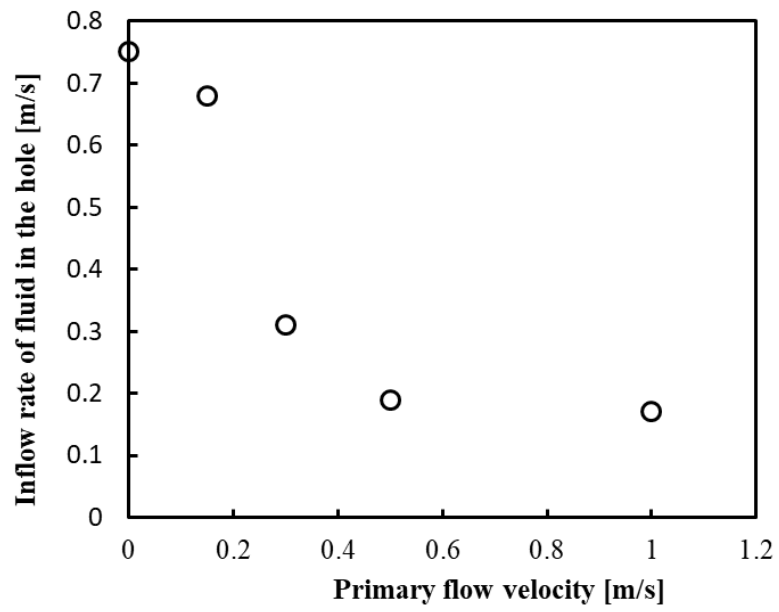
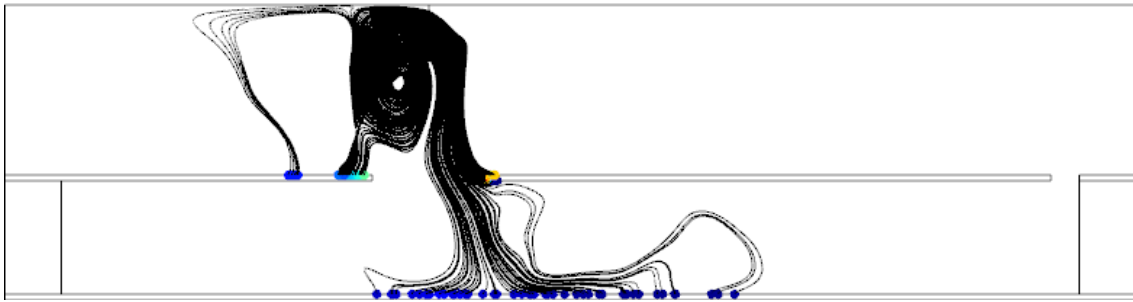


図 2-11. 主流体のホール流入速度

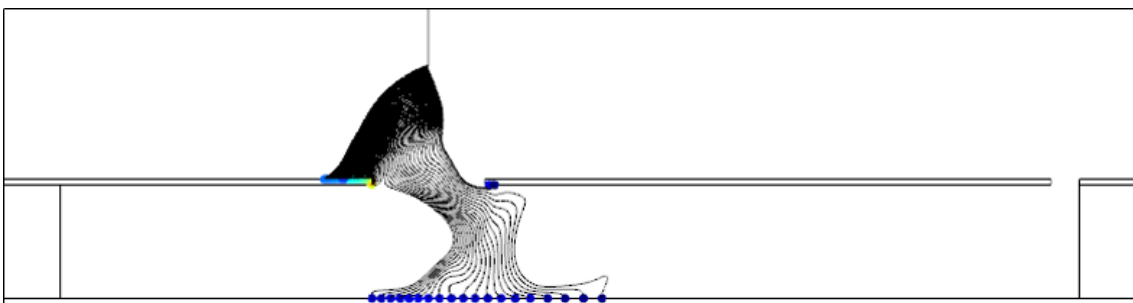
2-6 粒子挙動解析

流体分布から、主流体速度が 0.15 m/s や 0.3 m/s では、多くの粒子がホールに流入し、主流体速度が増加すると F_p が増加するため、ホールに流入する粒子の量が少ないと考察した。前述したように、粒子には流体とは別にクーロン力による力も加わるため、粒子挙動解析においてクーロン力を考慮することにより、ホール型 ESP における捕集モデル A をシミュレーションできると考えた。そこで、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い、帯電粒子の挙動について検討をする。

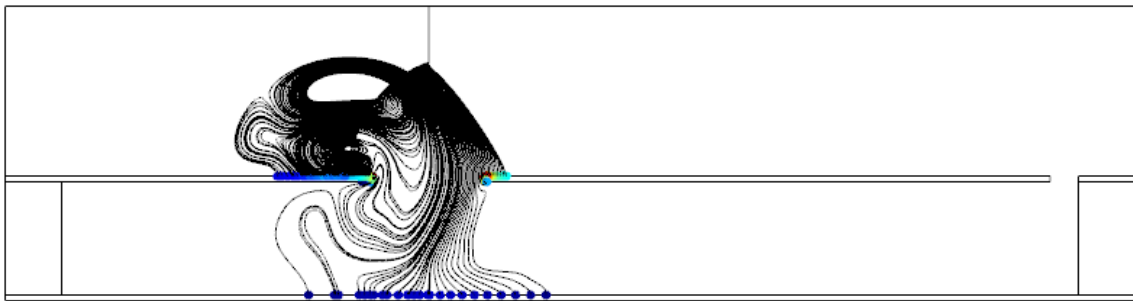
図 2-12 に各主流体速度における粒子挙動分布を示す。粒子のポイントは 2.0 秒後の地点で、図中の黒線は粒子の 1.5 秒間の軌跡を表している。(a)の主流体速度 0.15 m/s では、イオン風の影響が支配的なため、粒子が針の前方で渦を描いた後、ホールに流入していることが分かる。ESP 内の流れはイオン風によって層流から乱流へと変化している。そのため、粒子は針電極先端の上方を回る渦流に追従し、ホールに流れ込んだ。また、粒子はホールのエッジ付近にも付着した。これは、エッジ効果によりホール付近の電界が強まったため、粒子が付着した。粒子挙動解析により、ホール内に粒子が流入し捕集される挙動が確認できた。(b)の主流体速度 0.3 m/s では、0.15 m/s と同様に粒子がホールに流入した。(c)の主流体速度 0.5 m/s では、主流体の力が増加したため、渦が確認でき、粒子もその流れに沿って移動した。(d)の主流体速度 1.00 m/s では、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。



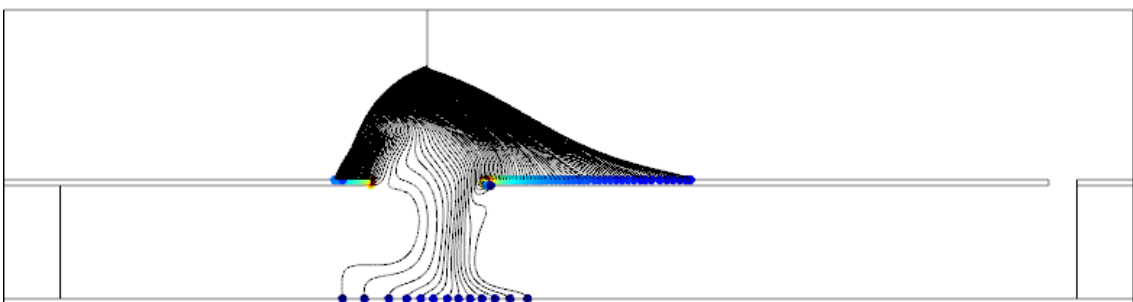
(a) 0.15 m/s



(b) 0.3 m/s



(c) 0.5 m/s

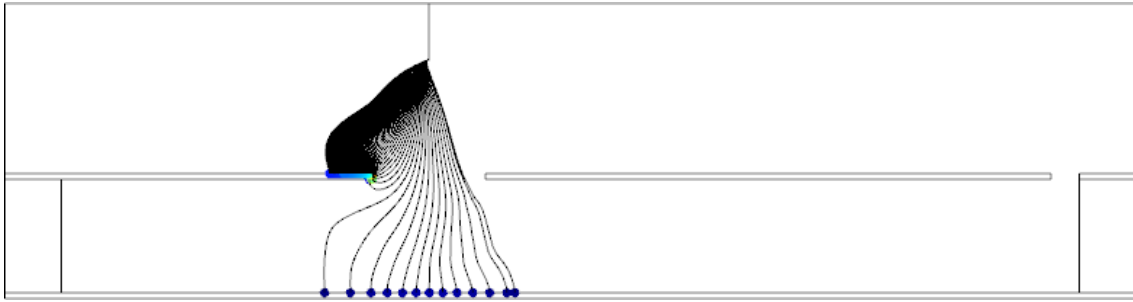


(d) 1.00 m/s

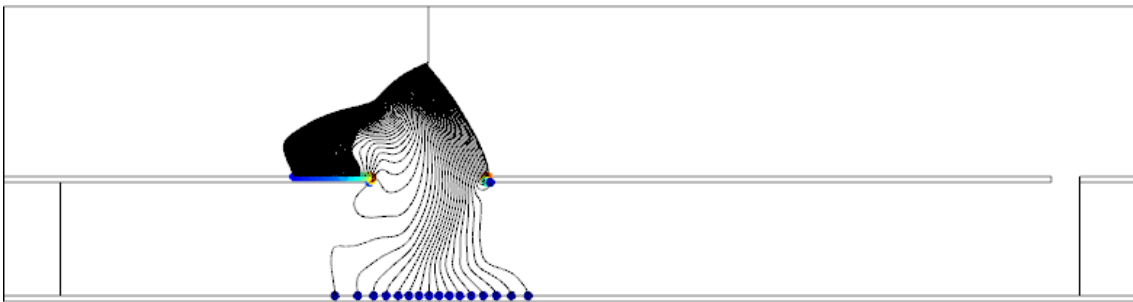
図 2-12. 各主流体速度における粒子挙動分布

図 2-13 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、電氣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(9)の抗力項における粒径 dp [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 は小粒径粒子を電氣的な力で捕集し、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。

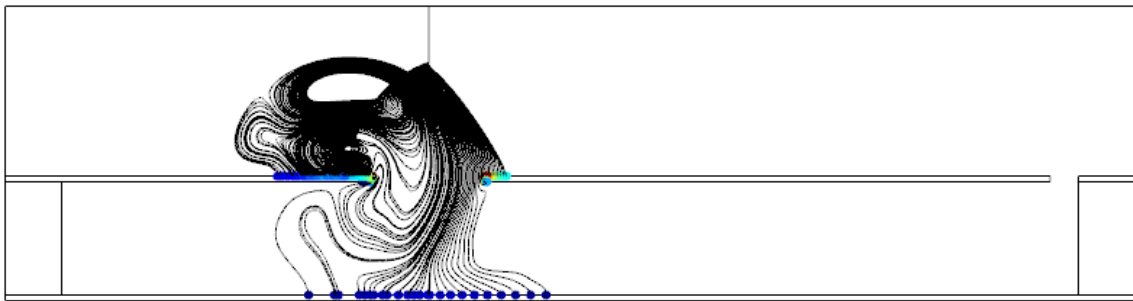
ホールに流入した量を定量的に評価するため、ホール流入率を算出した。ホール流入率とは、元の粒子個数 150 個に対して、どれだけの個数の粒子がホール内に流入したかを表している。図 2-14 にホール流入率と主流体速度の関係を示す。主流体速度が遅い場合、粒径が大きいとホール流入率は高い値を示した。大粒径の方が流体の影響を受けやすいためイオン風の影響を受け、ホール内に流入した。一方、粒径が小さいと、流体よりクーロン力の方が支配的となるため、ホールのエッジや集塵電極上に捕集される粒子が増えた。主流体速度が増加すると、大粒径粒子に対する影響が強まるため、粒子は後方へと流される。そのため、0.3 m/s 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。



(a) 1.00 μm



(b) 3.00 μm



(c) 6.24 μm

図 2-13. 各粒径における粒子挙動分布 (0.5 m/s)

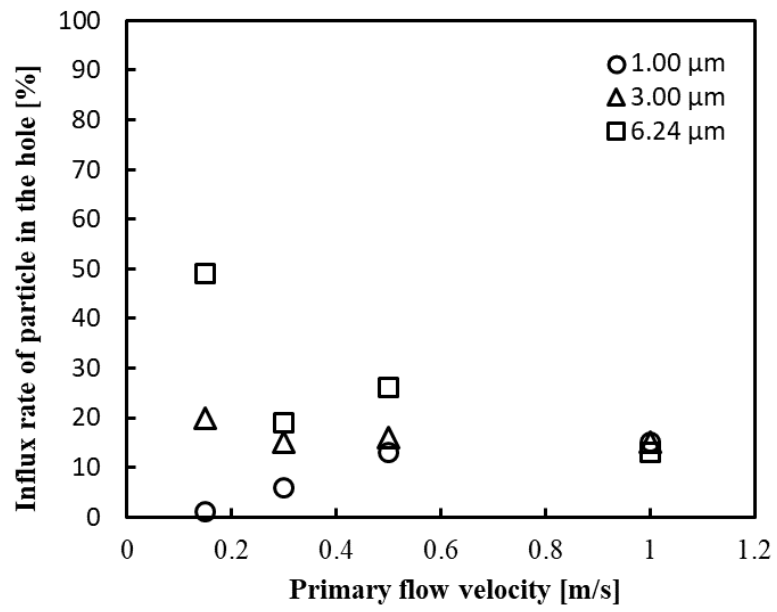


図 2-14. ホール流入率の主流体速度特性

2-7 結言

ホール型 ESP 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 の捕集モデル A の再現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 における基礎研究として，低風速下における電界解析，流体解析，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. ホール型 ESP は従来型 ESP に比べて電界強度が非常に高い。これは，エッジ効果によるものであり，ホール型 ESP はクーロン力による粒子の捕集がしやすくなる。
2. 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，主流体速度の増加によりホール内の流体速度は減少した。定常状態ではなく，同じ流れが繰り返される循環流を確認することができた。
3. 粒子挙動解析により，帯電粒子がホール内へと流入する様子が確認できた。
4. 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。

以上のことがホール型 ESP 内のシミュレーション解析で明らかになったことである。しかしながら，シミュレーションではいくつかの課題も確認できた。本解析では，空間電荷密度と電界計算の連成ができていないため，静電界中の粒子挙動として解析していることが課題として挙げられた。また，粒子を針電極付近に飽和帯電した状態で配置していることも課題の1つである。本来，粒子は ESP 入口から流入し，徐々に帯電しながらホールへ流入する。このような粒子挙動解析の実現を今後の課題としている。

参考文献

- (1) 集塵 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, P. 427-433, (2016)
- (2) 菊池 文雄:「有限要素法概説－理工学における基礎と応用－」サイエンス社, (1999)
- (3) 矢川 元基:「計算力学と CAE シリーズ 1 有限要素法」培風館, (1991)
- (4) 鷺津 久一郎:「有限要素法ハンドブック」培風館, (1981)
- (5) 大久保氏シミュ差分 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, Vol.106, No.8, P 377-383 (1986)
- (6) 村井シミュ有限 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, Vol.11, No.2, P 129-136 (1996)
- (7) 村井 一弘, 本田 逸郎:「電気集塵装置の性能に関するシミュレーション」可視化情報学会誌, Vol.19, No.1, P 133-136 (1999)
- (8) Famoosh シミュ N. Famoosh, K. Adamiak, 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, Vol.68, No.6, P 513-522 (2010)
- (9) 大気圧プラズマハンド 大久保雅章:「大気圧プラズマ反応工学ハンドブック～反応過程の基礎とシミュレーションの実際～」NTS, (2013)
- (10) 長門研吉:「空気中の放電で発生するイオン種と化学反応過程」静電気学会誌, Vol. 35, No. 3, P. 102, (2011)
- (11) 高橋幹二:「エアロゾル学の基礎」森北出版, (2003)
- (12) 静電気学会:「静電気ハンドブック」株式会社オーム社, (2006)
- (13) 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, Vol. 40, No. 4, P 168-171, (2016)
- (14) 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) 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, Vol. 136, No. 12, P. 797-803, (2016)

第3章 ホール型 ESP における粒子挙動の可視化

3-1 緒言

ESP は電氣的に粒子を捕集する装置であるため、電圧値や電流値を変化させることで、集塵率を向上させることができる⁽¹⁾。しかし、それらの電氣的要因は、全て集塵率に直接寄与しているのではなく、粒子挙動へと直結している。これは、帯電した粒子が集塵電極に捕集されるまでには、粒子の性状、電界、気流場によって挙動が多種多様に变化するためである⁽²⁾。また、条件によっては再飛散現象を伴い、急激な集塵率低下を引き起こすことも懸念されている⁽³⁾。これらのことから、ESP の集塵率向上には粒子の挙動の解析が重要視されている。しかし、ディーゼルエンジンから排出される粒子の粒径は大きいもので1 μm 、小さいものだと10 nm にもなる。そのため、人の目で見ることが難しく、可視化技術が必要とされている。

粒子の可視化技術には、大きく分けて実験的可視化法とコンピュータ利用可視化法の2種類存在する⁽⁴⁾。実験的可視化法は壁面トレース法、タフト法、注入トレーサ法、化学反応トレーサ法、電気制御トレーサ法、光学的可視化法があり、それぞれ特徴が異なる。この中でも光学的可視化法におけるシュリーレン法は、ディーゼルエンジンから排出される粒子の可視化に適しているとされ、研究報告が複数なされている⁽⁵⁾。しかし、シュリーレン法は流れの密度構造を評価するものであるため、ESP 内の粒子を直接評価するものではない。そのため、更に測定精度が高く、粒子に着目した可視化技術が求められている。

コンピュータ利用可視化法では、可視化画像解析法、数値データ可視化法、計測データ可視化法などがあり、この中でも可視化画像解析法の粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry : PIV)が排ガス粒子の可視化技術として着目されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。PIV は非接触計測が可能なことや、可視化したトレーサ自体の速度を評価するため測定精度が高く、平面内の速度分布が一度に取得可能なことが利点である。

ホール型 ESP はイオン風、クーロン力を用いて帯電粒子を捕集する排ガス浄化装置の1つである。作用力の1つであるイオン風は、ESP の放電電極から集塵電極方向へと吹き付けられることが知られているが⁽⁸⁾、イオン風が集塵過程および集塵効率に与える影響については十分に明らかにされていない。また、イオン風によってホール内に粒子を誘導するメカニズムも現時点では明らかにされていない。そのため、ホール型 ESP における粒子挙動の可視化と集塵効率の向上が期待されている。そこで、本研究では、PIV を用いてホール型 ESP 内の粒子挙動を可視化し、ホールに粒子が流入する様子の確認と粒子の移動速度、移動角度、ホール流入率の向上に適した放電電流値や主流体速度について検討を行った。

3-2 集塵実験

実験システムの概略を図 3-1 に示す。中央にある直方体が ESP である。ESP は長さ 350mm, 幅 45mm, 高さ 45mm の透明なアクリルでできている。直流高圧電源は負極性を用いた。印加電圧は 0~8 kV, 放電電流値は 0~3 μ A とした。主流体速度は風速計と PIV 解析の結果から求め、0~1.0 m/s とした。主流体速度の調整は ESP の後方にファンをダクトで繋ぎ、ファンの回転数を可変することで ESP 内部の風速を変えた。本研究で用いたトレーサ粒子はエチレングリコール粒子(EG), 水酸化マグネシウムとケイ酸塩からなるタルク(Talc), 銅粉(Cu)である。それぞれの代表粒径は EG:4 μ m, Talc:6.24 μ m, Cu:5 μ m であり, 比誘電率は EG:38.7, Talc:2, Cu:18.1 である。。EG はヘイズマシンによってエチレングリコール水溶液を気化させ ESP に噴霧した。タルクと銅粉はミキサーによって拡散させ ESP に流入した。

本実験で使用したホール型 ESP の概略を図 3-2 に示す。ESP は放電電極と接地電極で構成されている。放電電極はステンレス製の針電極(直径 2 mm, 曲率半径 0.25 mm, 角度 25 $^{\circ}$), 接地電極は平板の中心に Φ 20 mm の孔を開けたホール電極を使用した。本来, ESP は複数の放電電極と接地電極で構成されている。本研究では, 針一本における粒子挙動への影響を確認するため, 針電極と接地電極が一对のモデルで解析を行った。ホール電極の底部には捕集空間としてケーシングを設置した。ホール電極とケーシングは接地されている。針電極とホール電極の電極間距離およびケーシング高さは 20 mm とした。

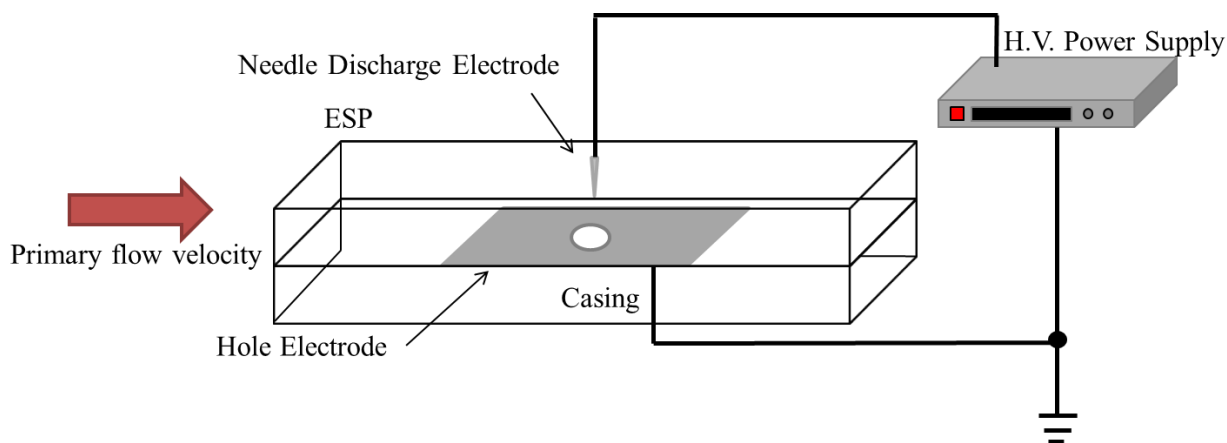


図 3-1 実験システム

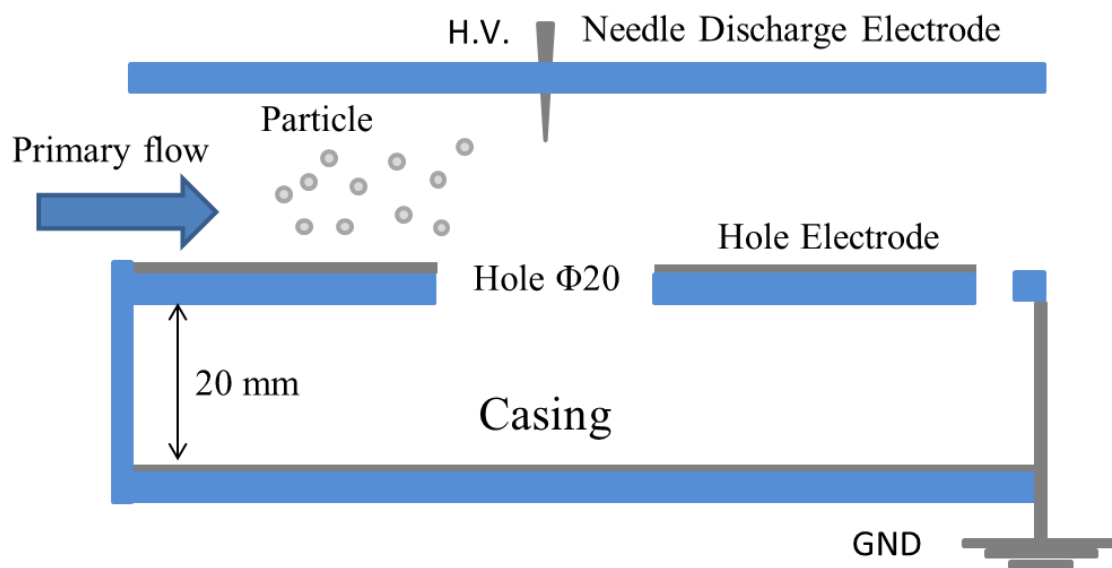


図 3-2 ホール型 ESP

3-3 画像解析

3-3-1 実験システム

ESP 内の画像解析には PIV 解析装置を用いた。PIV 解析装置の概略を図 3-3 に示す。装置は可視化レーザー(日本レーザー, DPGL-2W), ハイスピードカメラ(Photron FASTCAM SA4), PIV 解析ソフト(カトウ光研, Flow Expert)で構成されている。可視化レーザー($\lambda=532\text{nm}$)は ESP の上部に配置しており, ESP のガス流方向と平行にレーザーシート(1mm 厚)を照射している。ハイスピードカメラは ESP 側面に配置し撮影した。図 3-4 に ESP の撮影領域を示す。観測点は点線で囲んであるように, 針電極から流れの上部および下部に 21.1mm とした。カメラの解像度は $1024 \times 1024\text{pix}$ とした。

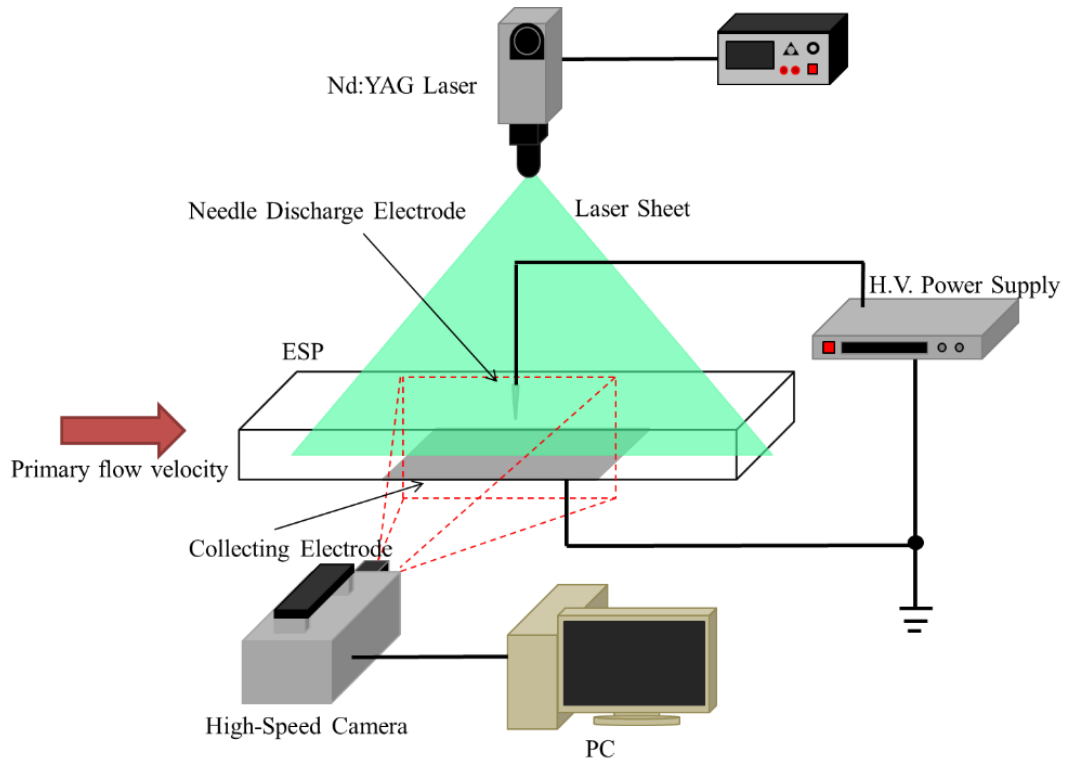


图 3-3 PIV 解析装置

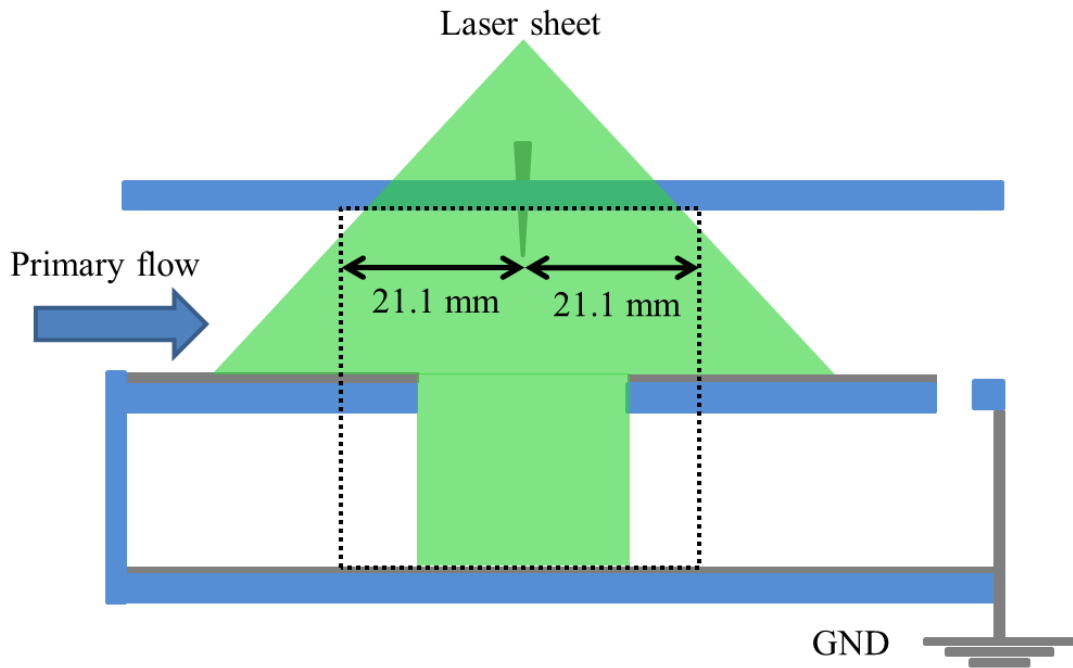


图 3-4 摄影领域

3-3-2 PIV 解析

本実験では、PIV 解析として画像相関法を用いた。画像相関法は 2 時刻の輝度関数を用いて、画面上における粒子パターンの変位を解析する手法である⁽⁴⁾。

画像相関法にはいくつか種類があるが、移動量を決定する手順の基本部分は全て同じである。以下に基本手順を示す。

- (1) 相関領域の設定：第 1 画面の計測位置に小領域を設定する。
- (2) 第 2 画面の中に探査領域を設定し、相関値を計算する。
- (3) 相関値が最大となる位置をピクセル精度の移動先とする。
- (4) 相関値が最大になる位置を推定して、サブピクセル精度の移動量を決定する。

本実験では画像相関法の 1 つである直接相互相関法を用いた。直接相互相関法は 2 枚の粒子画像から計測点を中心とする検査領域の画像を切り出し、その画像間の類似度を示す相互相関関数を求めて関数が最大になるような検査領域の位置の差を、その位置での粒子の平均移動量とする方法である。この手法は他の手法と比べて計算量が増大し、画像解析のパラメータも増えてしまうが、測定精度の点で優れている。

検査領域とは相関係数を求めるための領域であり、一般には検査領域中に 5 個以上のトレーサ粒子が記録されるように大きさを指定する。また、相関値を算出する範囲のことを探査領域と呼ぶ。探査領域は狭い方が速度分布を詳細に計測できるが、領域が小さすぎると輝度分布に特徴が無くなるため、輝度分布が一致する場所を 1 つに特定できなくなる。本実験では、検査領域は 30pix、探査領域は 25pix として解析を行った。

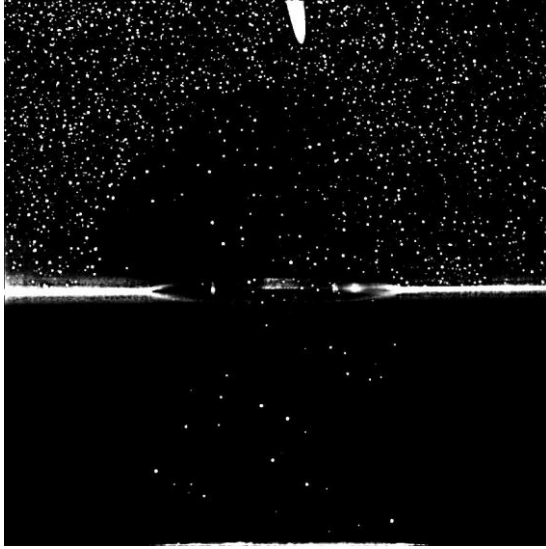
3-4 ホール型 ESP 内の粒子挙動

ホールに流入する粒子を観測するため、ハイスピードカメラを用いて粒子を撮影した。ハイスピードカメラによって撮影したトレーサ粒子 Talc の画像を図 3-5 に示す。図中の白いトゲが針電極、白い線が接地電極でその中心にホール、白い斑点がトレーサ粒子である。接地電極の直下はレーザーが遮蔽されるため、粒子は可視化されていない。放電電流値は 0~3 μA 、主流体速度は 0 m/s とした。(a)の電流値 0 μA では、クーロン力とイオン風が発生していないため、粒子は静止している。(b)の 0.5 μA では、粒子がホール内部に流入していることが確認できる。これは、粒子にクーロン力とイオン風による力 F_e が加わったためである。(c)の 3 μA では、0.5 μA と同様にホール内に粒子が流入している。また、ホール内へと流入していた粒子が、ホールのエッジへと向きを変え、引き寄せられる現象を観測した。これは、エッジ効果により電界が強まっているため、粒子がクーロン力によってエッジに引き寄せられたと考えられる。以上のことから、ホール型 ESP 内の粒子挙動の可視化に成功し

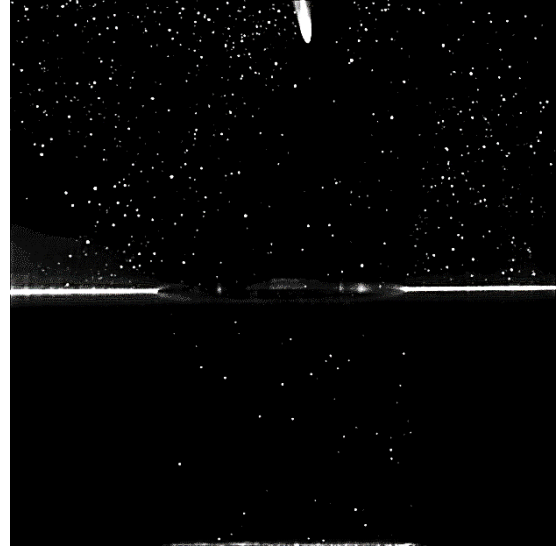
たと言える。

主流体速度による粒子挙動への影響を調べるため、主流体速度を 0.15 m/s に設定し実験を行った。主流体速度 0.15 m/s の粒子画像を図 3-6 に示す。(a)の $0 \mu\text{A}$ では、クーロン力とイオン風による影響がないため、粒子はほとんどホールに流入していない。微量の粒子が流入しているのは、ホールへと流れ込む流体が発生しているためである。これは、ケーシング内と針電極近傍の圧力差によって生じる。(b)の $0.5 \mu\text{A}$ では、粒子は斜めにホールに流入した。ESP 内には、ESP 出口方向の主流体による力と、ホール電極方向へのイオン風、クーロン力による力がある。粒子の移動方向はこれらのベクトル和によって定まる。そのため、電流値が $0.5 \mu\text{A}$ になることでイオン風とクーロン力による力 F_e が発生し、粒子は斜めに流入した。(c)の $3 \mu\text{A}$ では、ESP 入口側の粒子濃度が高いことが確認できる。これは、針電極近傍から発生する F_{EHD} が F_p に比べて高いため、ホール手前の電極に粒子が誘導された。また、ホール電極上では渦流が確認できた。

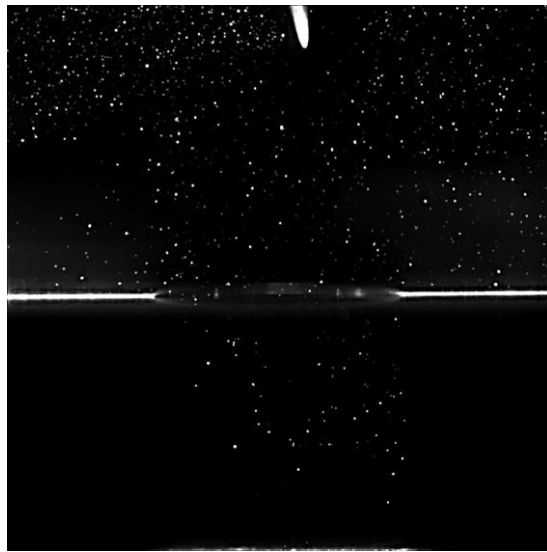
主流体速度 0.5 m/s の粒子画像を図 3-7 に示す。(a)の $0 \mu\text{A}$ では、ESP 内の粒子に動きは見られない。(b)の $0.5 \mu\text{A}$ では、電流値の増加によってホールに粒子は流入しているが、その数は主流体速度 0 m/s , 0.15 m/s と比べて少ない。これは、主流体速度による力 F_p が増加したためである。(c)の $3 \mu\text{A}$ においても、ホールに流入する粒子の個数が著しく少ない。このことから、ホールに流入する粒子の量はイオン風、クーロン力、主流体速度に依存していることが明らかとなった。また、他のトレーサ粒子においても同様の傾向が確認できた。



(a) $0\mu\text{A}$



(b) $0.5\mu\text{A}$

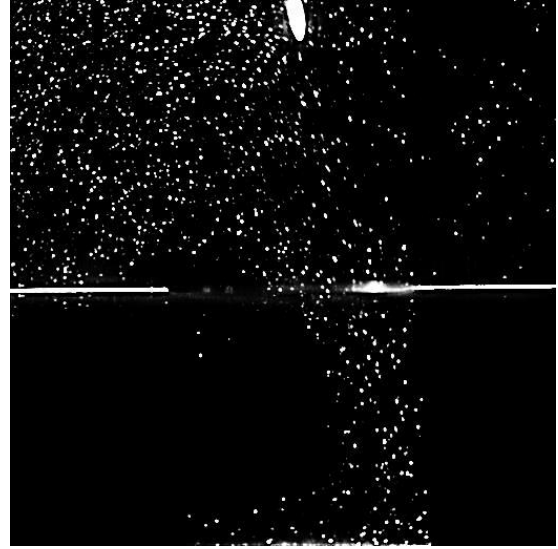


(c) $3\mu\text{A}$

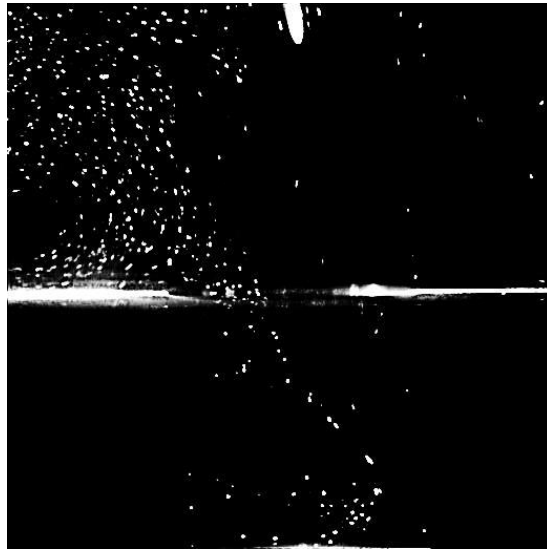
图 3-5 粒子画像
(Talc, 0m/s)



(a) $0\mu\text{A}$

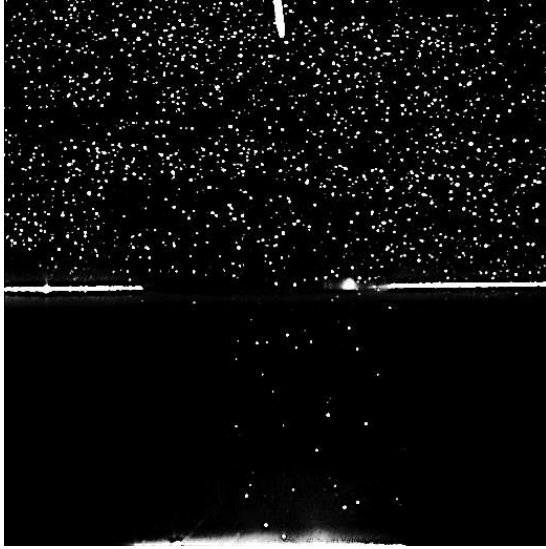


(b) $0.5\mu\text{A}$

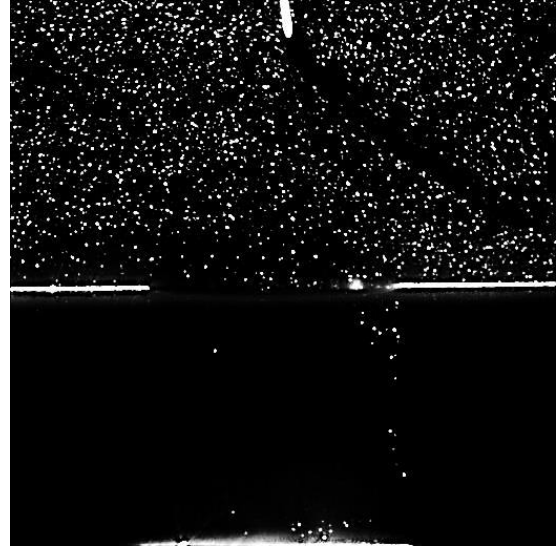


(c) $3\mu\text{A}$

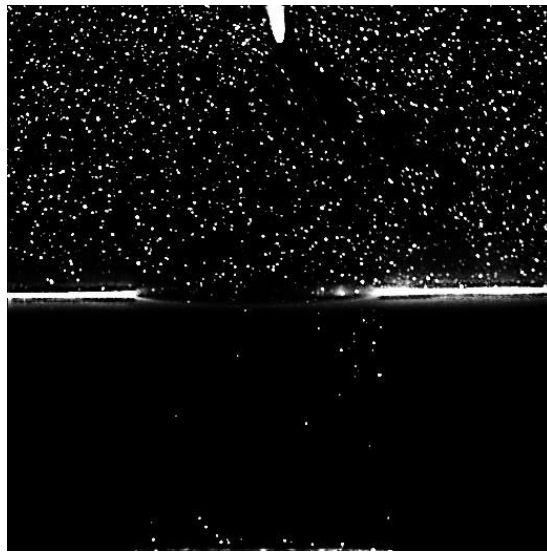
图 3-6 粒子画像
(Talc, 0.15m/s)



(a) $0\mu\text{A}$



(b) $0.5\mu\text{A}$



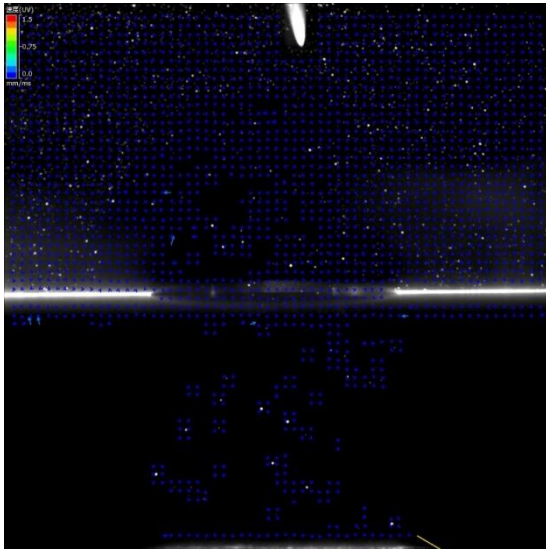
(c) $3\mu\text{A}$

図 3-7 粒子画像
(Talc, 0.5m/s)

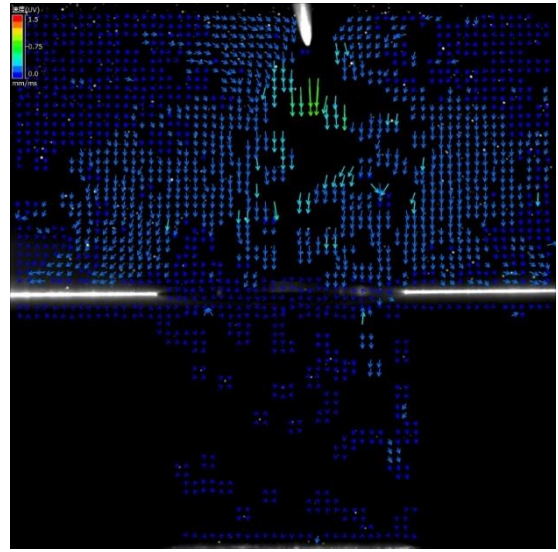
粒子の速度や移動方向を求めるため、撮影した粒子画像を基に、PIV解析ソフトを用いて解析を行った。トレーサ粒子 Talc の PIV 解析画像を図 3-8 に示す。解析画像の矢印は移動方向を表しており、矢印の長さは移動速度を表している。矢印は長いほど粒子速度が速い。放電電流値は 0~3 μA 主流体速度は 0 m/s とした。(a)の放電電流値 0 μA では、粒子は浮遊している状態である。また、粒子速度が 0 m/s に近いいため、矢印が短いことが確認できる。(b)の 0.5 μA ではイオン風、クーロン力による力 F_E が加わるため、粒子はホール方向へ向かって移動している。(c)の 3 μA では、更に粒子の移動速度が増加していることが確認できる。これは、電流値の増加によって、 F_e が増加したためである。また、針電極の直下における粒子移動速度が速いことがわかる。電界が最も強いのが針電極の直下であるため、イオン風とクーロン力が増加し、粒子移動速度が速くなったと考えられる。主流体速度が 0 m/s であるため、針電極の上流と下流の流れは概ね一致した。

主流体速度 0.15 m/s の PIV 解析画像を図 3-9 に示す。(a)の 0 μA では、粒子は主流の流れに沿い、ESP 出口方向へと移動している。(b)の 0.5 μA では、粒子がホールへと流入する流れが確認できる。また、主流体速度 0 m/s では針の直下だった速い流れが、主流体の影響によって ESP 出口方向へと移動していることが確認できる。また、これらのことから、主流体速度 0.15 m/s では、粒子はホール内へと流入すると考えられる。(c)の 3 μA では、ホール電極上で渦流が確認できる。また、主流体とは逆の方向にもベクトルが伸びていることから、イオン風による力が主流体速度を越えていることが確認できた。

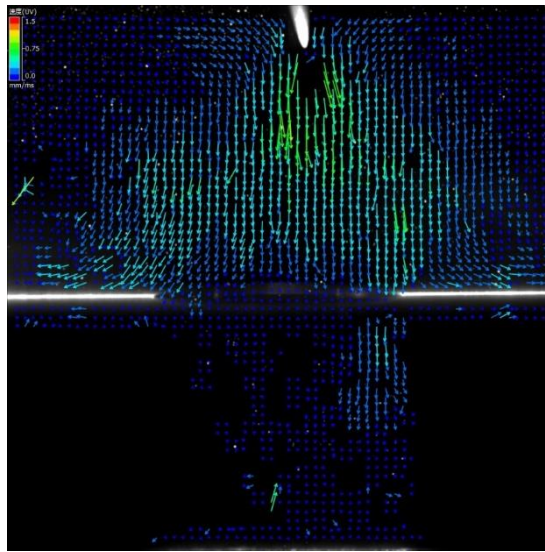
主流体速度 0.5 m/s の PIV 解析画像を図 3-10 に示す。(a)の 0 μA では、 F_e が生じないため、粒子は ESP 出口方向へと移動している。(b)の 0.5 μA では、ベクトルはホール内ではなく、ホール電極上へと向かっていることが確認できる。これは、 F_e に比べて F_p が強いためである。そのため、粒子はホール内へとほとんど流入しなかった。(c)の 3 μA においても同様の傾向が確認できる。また、粒子の移動速度は 0.5 μA に比べて速くなった。以上のことから、粒子の移動速度は F_e, F_p に依存していることが明らかとなった。また、これらの傾向は他のトレーサ粒子においても確認できた。



(a) $0\mu\text{A}$

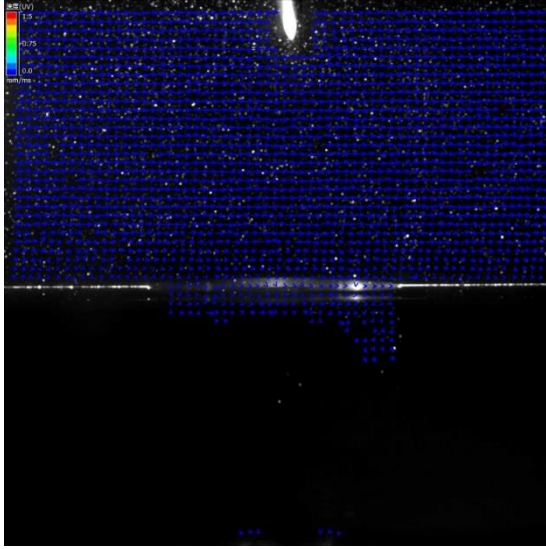


(b) $0.5\mu\text{A}$

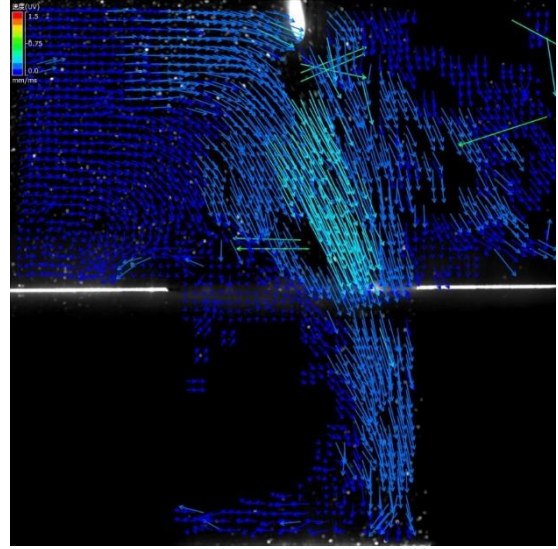


(c) $3\mu\text{A}$

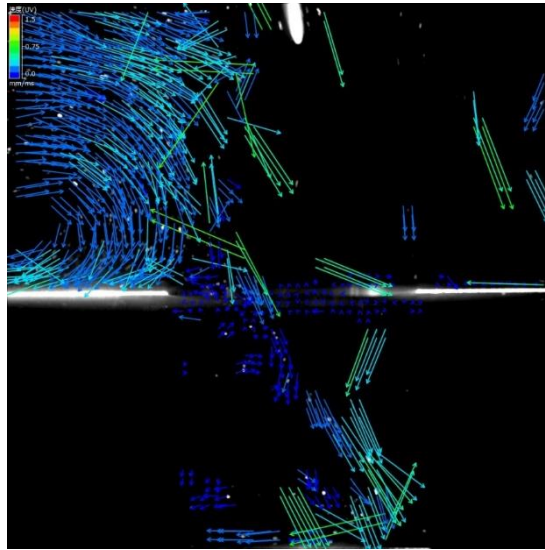
図 3-8 PIV 解析画像
(Talc, 0m/s)



(a) $0\mu\text{A}$



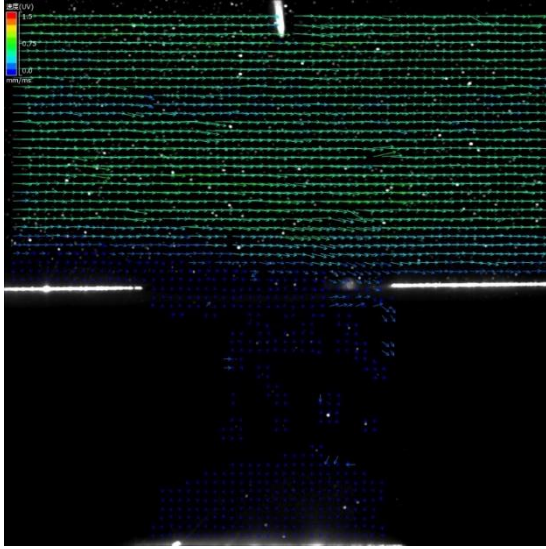
(b) $0.5\mu\text{A}$



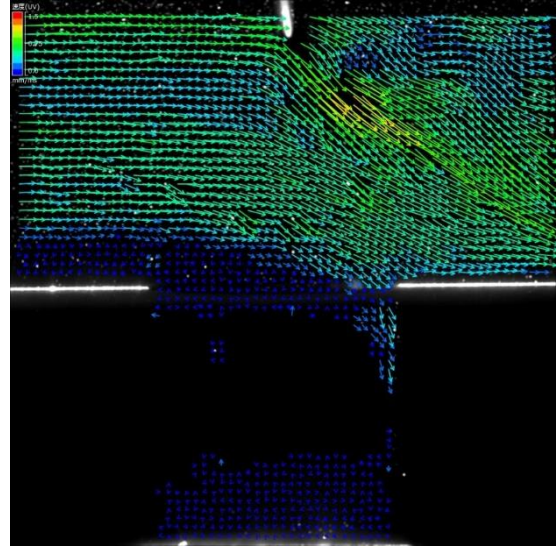
(c) $3\mu\text{A}$

図 3-9 PIV 解析画像

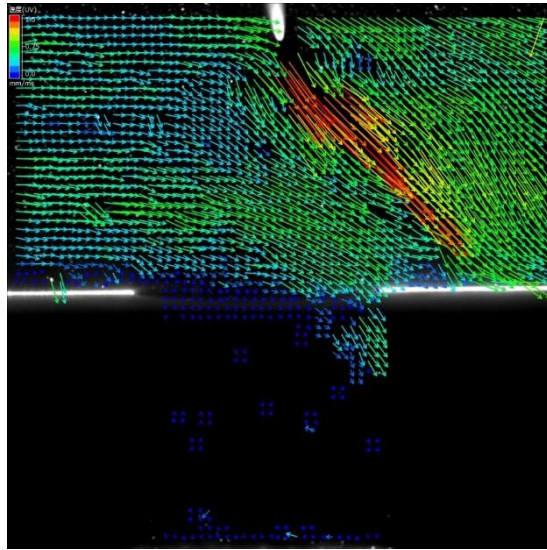
(Talc, 0.15m/s)



(a) $0\mu\text{A}$



(b) $0.5\mu\text{A}$



(c) $3\mu\text{A}$

图 3-10 PIV 解析画像
(Talc, 0.5m/s)

3-5 粒子の移動速度

3-5-1 各測定領域における粒子移動速度と放電電流値の関係

PIV の解析画像から、放電領域内の粒子位置による粒子移動速度の違いについて定量的な評価を行った。図 3-11 に計測領域を示す。画像を 6 つの領域に区切り、それぞれについて解析した。領域 E, F はケーシング内の捕集空間である。

図 3-12 に計測領域におけるトレーサ粒子 Talc の粒子移動速度を示す。放電電流値は 0~3 μA 、主流体速度は 0m/s とした。粒子速度はレーザーシート上で移動する粒子において、全方向速度の絶対値である。放電電流値を増加させると、B と C 領域の粒子移動速度は増加した。これは、 F_{EHD} および F_q により粒子の移動速度が増加したためである。A と D 領域では、イオン風が最も速い放電電極直下から離れているためイオン風の影響が少なく、電流の増加による粒子移動速度の増加は少量であった。E と F 領域では粒子移動速度は遅くなった。 F_{EHD} はホールエッジに向かって生じるため、ホール内部の粒子に加わる力が減少するためである。主流体速度が 0 m/s では、粒子挙動は針電極を中心として同じ速度及び挙動になると考えられる。A と D 領域, B と C 領域, E と F 領域の粒子移動速度は多少の誤差はあるが、ほぼ同じ傾向であった。

主流体速度の影響を検討するため、主流体速度 0.15 m/s の粒子移動速度を図 3-13 に示す。

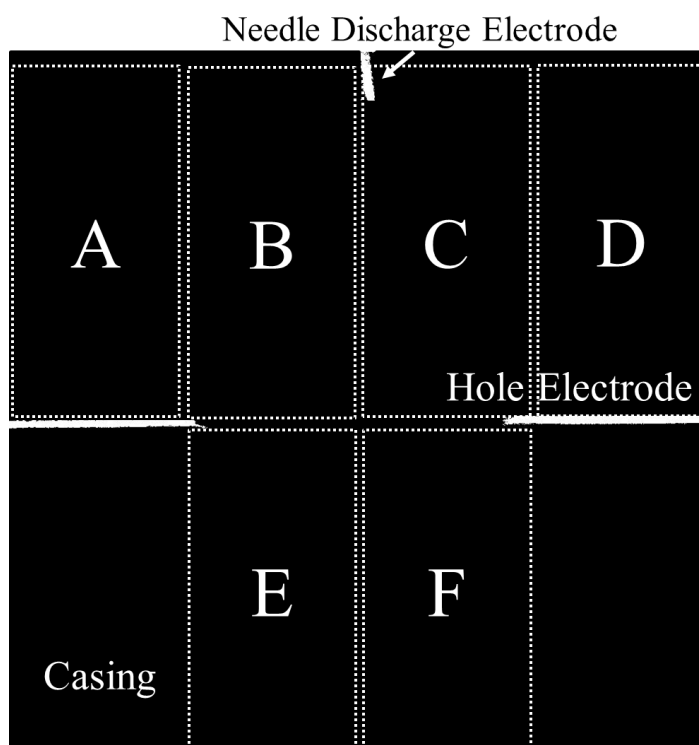


図 3-11. 計測領域

主流体速度を増加しても、主流体速度 0 m/s と同様に電流の増加に伴い粒子移動速度が増加した。また、C 領域の粒子移動速度が最も速くなった。F_e と F_p の合成が最も強くなるのが C 領域になるため、粒子移動速度が速くなる。B 領域は主流体とイオン風が逆方向になる場合もあるため、C 領域より粒子速度が遅くなったと考えられる。この関係はケーシング内の E, F 領域においても確認でき、E 領域は粒子移動速度 0.1 m/s 以下だが、F 領域の粒子移動速度は 0.1 m/s 以上である。3 μA 時の C 領域の粒子移動速度は 0.49 m/s であり、主流体速度 0 m/s の結果に比べて 0.11 m/s 速い。以上のことから、A 領域から B,C 領域に近づくにつれて、粒子にクーロン力 F_q およびイオン風の力 F_{EHD} が加わっていることが明らかとなった。

図 3-14 に主流体速度 0.5 m/s の粒子移動速度を示す。主流体速度を 0.5 m/s に増加すると、領域 F,E の粒子移動速度と領域 A,B,C,D の粒子移動速度で著しい差が生じていることがわかる。主流体速度の増加によって F_p が強まったため、ESP 内の主流体がホール内部に流入しなくなり、この差が生じたと考えられる。

図 3-15 に主流体速度 1m/s の粒子移動速度を示す。主流体速度 1m/s においては、主流体速度 0.15 m/s,0.5 m/s に比べて A~D 領域の粒子移動速度が速い。F_p が 0.15, 0.5 m/s に比べて強くなるため、粒子移動速度が速くなった。また、他のトレーサ粒子においても同様の傾向であった。

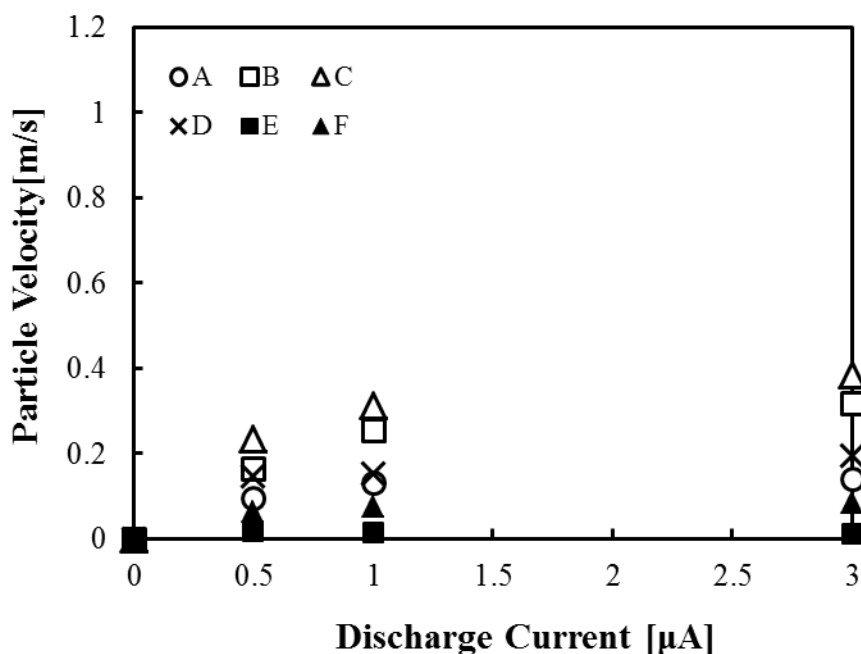


図 3-12. 粒子移動速度
(Talc, 0m/s)

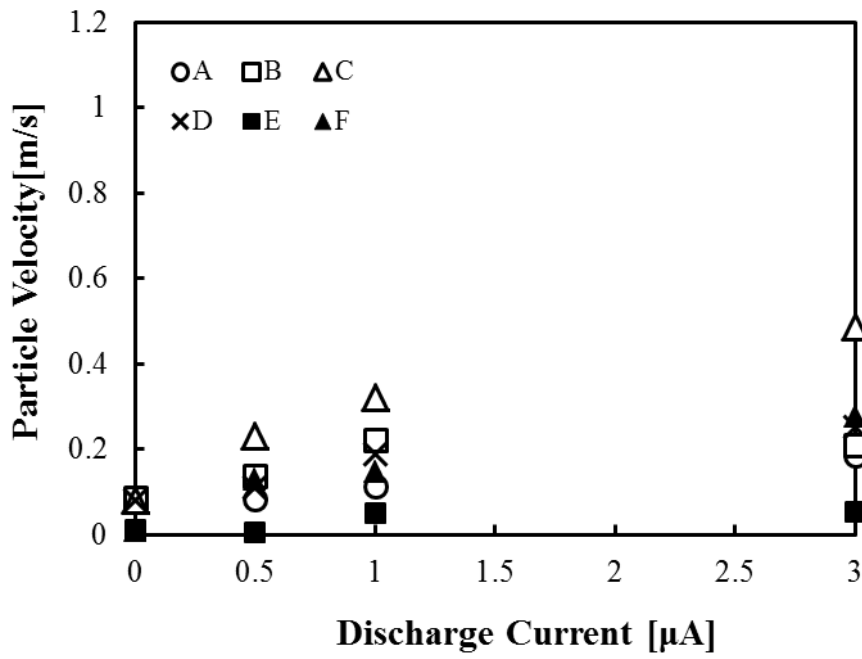


図 3-13. 粒子移動速度
(Talc, 0.15m/s)

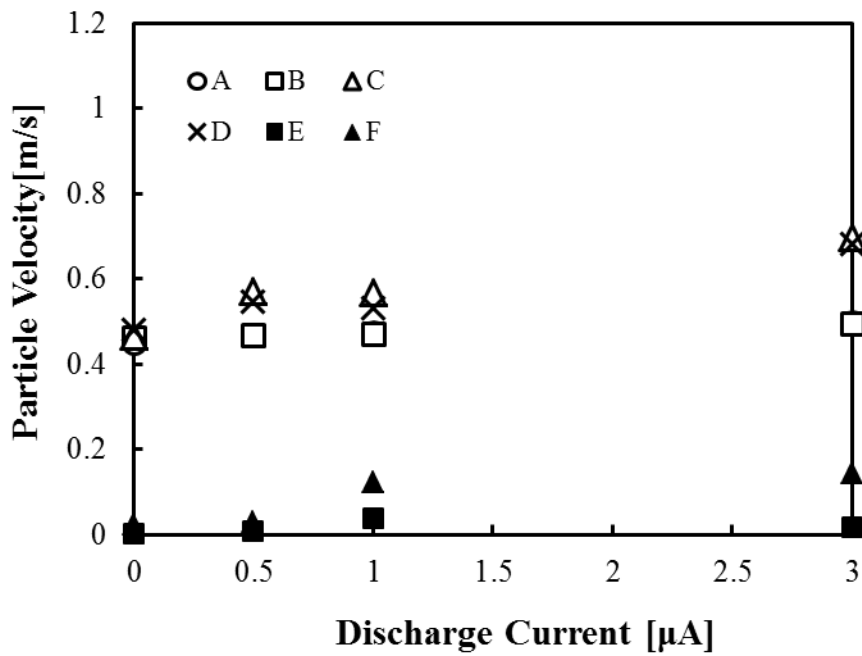


図 3-14. 粒子移動速度
(Talc, 0.5m/s)

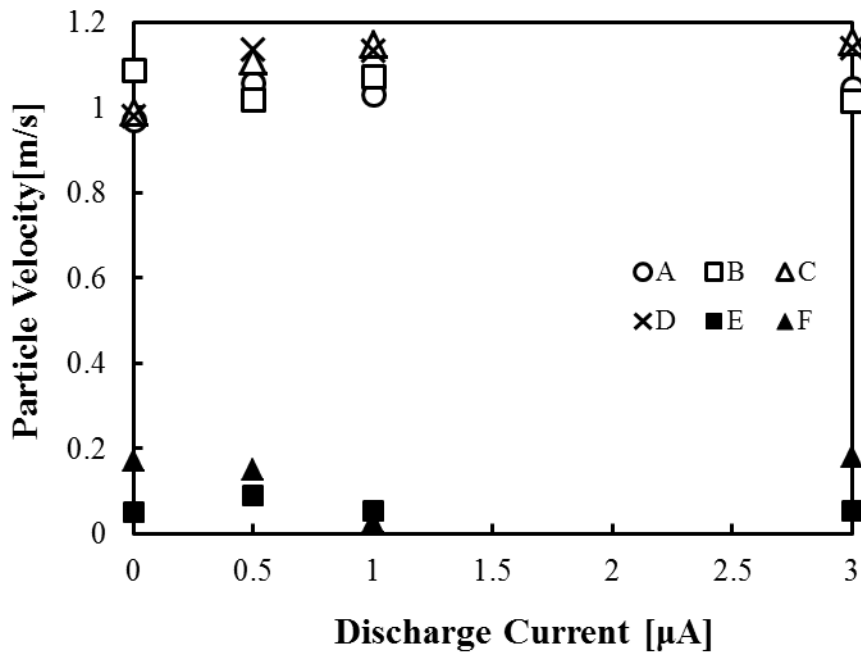


図 3-15. 粒子移動速度
(Talc, 1.0m/s)

コロナ放電極性による粒子移動速度の差を検討するため、正極性コロナ放電下および負極性コロナ放電下における粒子移動速度を測定した。図 3-16 に粒子移動速度と極性の関係を示す。測定領域は B, 放電電流値は 0~3 μA, 主流体速度は 0 m/s とした。正極性, 負極性ともに粒子移動速度は電流値の増加に伴い速くなる傾向であった。正極性に比べて負極性の粒子移動速度が遅くなった。負極性では針電極近傍で安定したグローコロナが形成され, 正極性の放電形態に比べて放電範囲が狭いと考えられる。また, 同一電流では, 印加電圧は負極性が低く, 粒子に及ぼす電界が低い。電界が低くなると粒子に働く F_q が弱くなる。これらのことから, 負極性の粒子移動速度が正極性に比べて遅くなった。

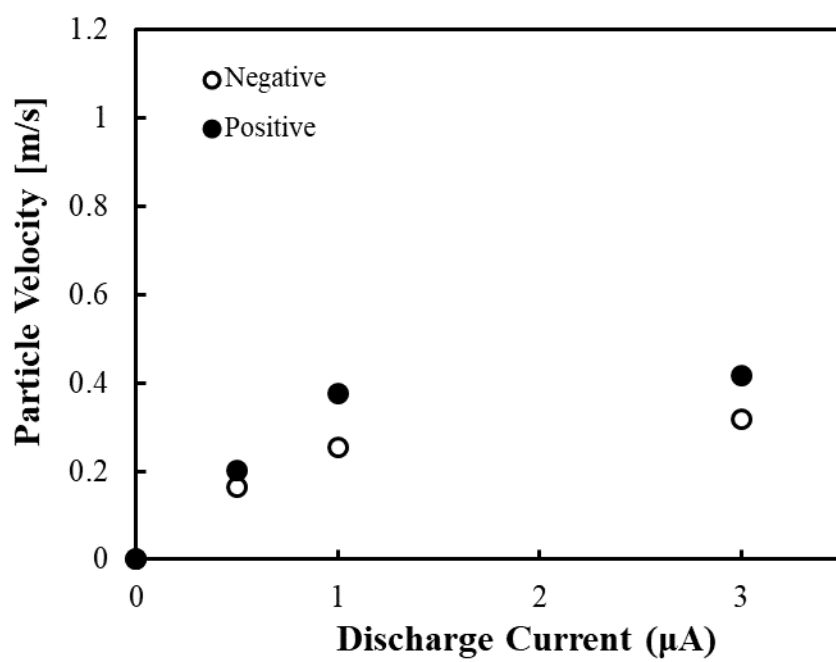


図 3-16. 極性による粒子移動速度の変化
(Talc, 0.15 m/s)

3-5-2 各トレーサ粒子における最大粒子移動速度の主流体速度特性

測定領域内で示された最大粒子移動速度を PIV 解析画像より求めた。図 3-17 に各トレーサ粒子における最大粒子移動速度の主流体速度特性を示す。トレーサ粒子は Talc, EG, Cu, 主流体速度は 0~1 m/s, 放電電流値は 3 μ A とした。主流体速度の増加によって, 最大粒子移動速度が増加する傾向が確認できた。これは, 主流体による力 F_p が増加したためである。この傾向は他のトレーサ粒子でも確認できた。最大粒子移動速度は Cu, Talc, EG の順番で速い。これは, 粒子の粒径, 比誘電率が関係している。以下に粒子の電界方向への移動速度 W_{th} の算出式を示す。

$$w_{th} = \frac{qE}{3\pi\eta_{air}d} C_m \quad [\text{m/s}] \quad (3-1)$$

q は粒子の帯電量である。粒子の帯電量の式を示す。

$$q = q_d + q_f \quad [\text{C}] \quad (3-2)$$

本実験で使用した粒子の粒径は 1 μ m 以上であり, 帯電量は q_f に比べ q_d は非常に小さな値となるため, ここでは帯電量を q_f だけで考えた。飽和電界帯電量の算出式を以下に示す。

$$q_f = \frac{3\pi\epsilon_0\epsilon_s d^2 E}{\epsilon_s + 2} \quad [\text{C}] \quad (3-3)$$

ここで, ϵ_0 は真空の誘電率, ϵ_s は粒子の比誘電率, d [μ m] は粒径である。

(3-1)式に(3-3)式を代入すると(3-4)式となる。

$$w_{th} = \frac{\epsilon_0\epsilon_s d E^2}{\eta_{air}(\epsilon_s + 2)} \quad [\text{m/s}] \quad (3-4)$$

以上の式より, 粒径 d が EG よりも大きく, 比誘電率 ϵ_s が Talc よりも高い Cu の最大粒子移動速度が最も速くなった。

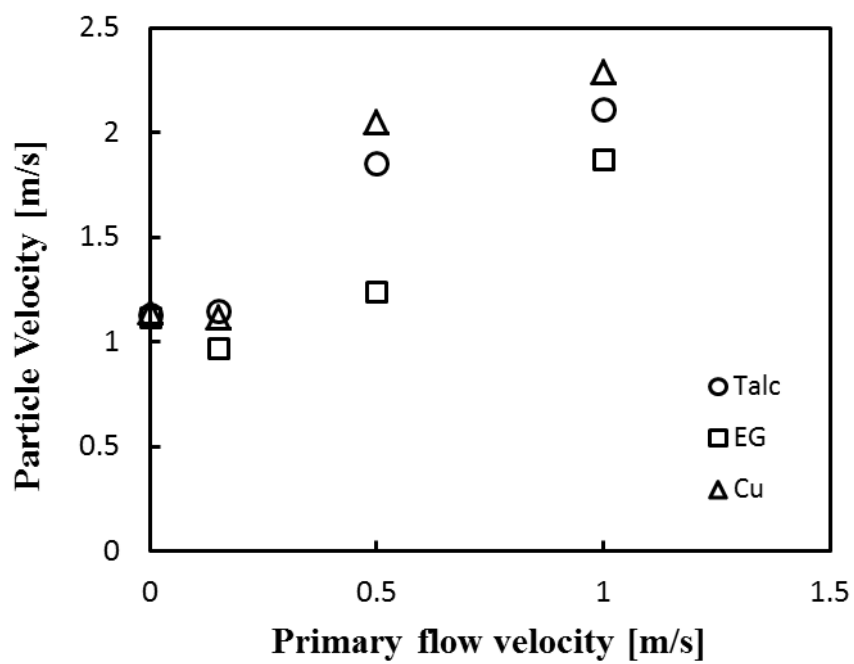


図 3-17. 最大粒子移動速度の主流体速度特性
(Talc, EG, Cu, 3 μ A)

3-6 粒子の移動角度

3-6-1 粒子移動角度の電流特性

ホールに粒子を流入するためには粒子の移動角度が重要である。そこで、ホール付近の粒子に着目し、PIV解析結果より粒子移動角度を求めた。計測粒子は領域B-Cの底面、E-F上面の境界付近の粒子を用いた。図3-18にトレーサ粒子Talcの粒子移動角度を示す。主流体速度は0~1 m/s、放電電流値は0~3 μA とした。角度は、主流体方向を 0° 、電界方向を -90° とした。主流体速度0 m/sでは、 F_p は0であり、イオン風とクーロン力による F_e のみ考慮するため、0.5 μA で角度はほぼ -90° を示している。主流体速度を増加すると F_p が増加するため、角度は 0° に近づいた。また、主流体速度0.15、0.5 m/sでは電流値を増加することで角度は -90° に近づいた。しかし、1 m/sでは F_p が非常に強いため、電流値を増加しても -10° 付近を示した。このことから、主流体速度1 m/sではホールに粒子は殆ど流入しないと考察した。

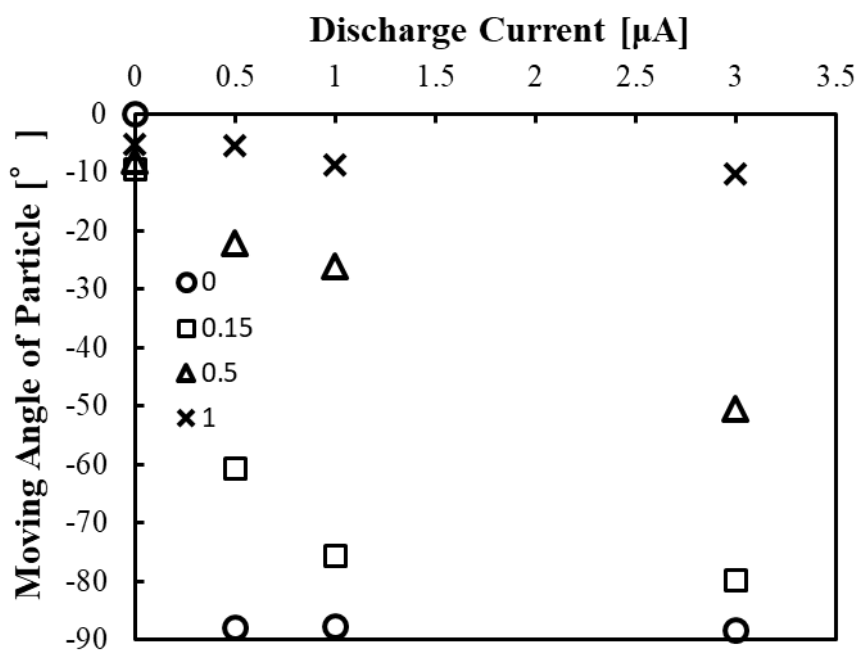


図 3-18. 粒子移動角度の電流特性 (Talc)

3-6-2 各トレーサ粒子における粒子移動角度の主流体速度特性

図 3-19 に各トレーサ粒子における粒子移動角度の主流体速度特性を示す。トレーサ粒子は Talc, EG, Cu, 主流体速度は 0~1 m/s, 放電電流値は 3 μ A とした。FP が増加することで粒子移動角度は 0° に近づいた。この傾向は他のトレーサ粒子でも確認できた。主流体速度 1m/s では, Talc と EG の粒子移動角度は約-10° である。しかし, Cu の粒子移動角度は -23° であった。3-5-2 で示したように, Cu は電界方向への力が最も強く, F_e が他のトレーサ粒子に比べて高くなる。そのため, この結果が生じた。

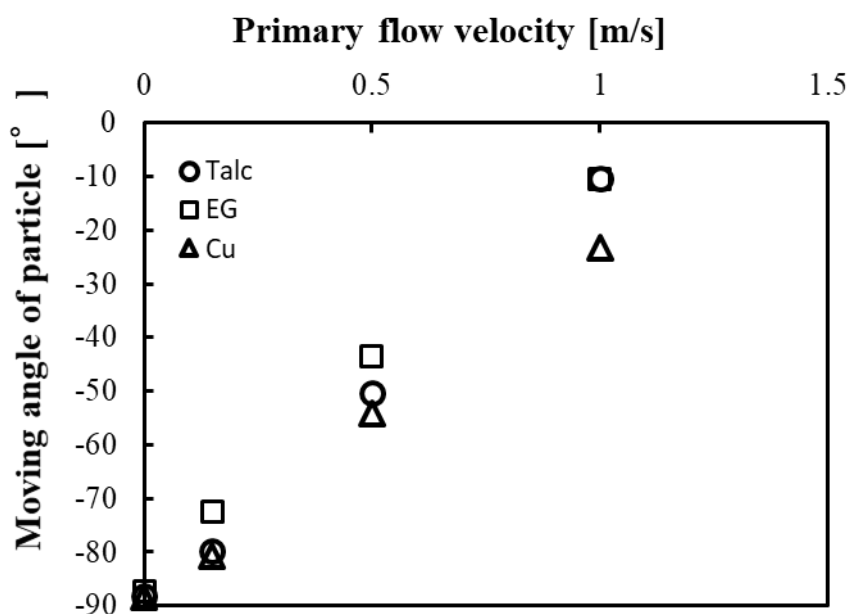


図 3-19. 粒子移動角度の主流体速度特性
(Talc, EG, Cu 3 μ A)

3-6-3 電界方向への粒子移動速度

集塵率には電界方向への粒子移動速度が関係する。以下に ESP の理論集塵率の計算式として最も基本的な Deutsch の理論式を示す。

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{W_{th} \cdot l}{V_g \cdot g}\right) \times 100[\%] \quad (3-5)$$

W_{th} が電界方向への粒子移動速度 [m/s]、 l が電極長 [m]、 V_g がガス流速 [m/s]、 g が電極間ギャップ [m] である。(3-5)式より、 W_{th} が増加するほど、集塵率が高くなることがわかる。このことから、電界方向への粒子移動速度 W_{th} を算出した。算出式を以下に示す。

$$W_{th} = \sin\theta \times v \text{ [m/s]} \quad (3-6)$$

θ は粒子の移動角度、 v は粒子移動速度である。電界方向への粒子移動速度と放電電流値の関係を図 3-20 に示す。トレーサ粒子は Talc、放電電流値は 0~3 μA 、主流体速度は 0.15, 1.00 m/s とした。主流体速度 0.15 m/s では、粒子移動相度は電流値の増加に伴い、速くなった。これは、イオン風、クーロン力による力 F_e が増加するためである。一方、主流体速度 1.00 m/s では、電流値を増加しても粒子移動速度は速くならなかった。これは、主流体速度による F_p が支配的になっているためである。このため、粒子は殆どホールには流入せず、集塵率は低くなる。主流体速度 1.00 m/s では、電流値 0 μA でも粒子移動速度が約 0.1 m/s であった。これは、集塵空間とケーシング内の圧力差によって、電圧を印加せずともホールに微量の風が流入しているためである。

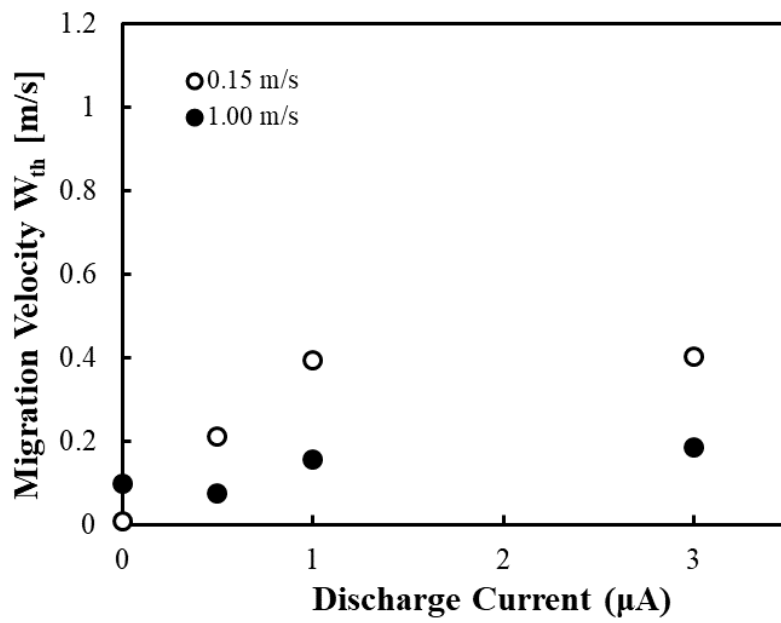


図 3-20. 電界方向への粒子移動速度と放電電流値の関係
(Talc, 0.15, 1.00 m/s)

3-7 ホール流入率

粒子がホール内に流入しているかを定量的に示すため、粒子画像を二値化処理し、領域内の白色の部分の部分を粒子とし、ピクセル数をカウントした。二値化処理を行う際のしきい値は256階調中45として二値化処理を行った。また、測定したピクセル数を用いてホール流入率を算出した。ホール流入率は(3-7)式を用いた。解析領域を図3-21に示す。N_{out}がESPを通過した粒子のピクセル数、N_{hole}をホールに流入した粒子のピクセル数とした。

$$\text{ホール流入率 [\%]} = \frac{N_{\text{hole}}}{N_{\text{hole}} + N_{\text{out}}} \times 100 \quad (3-7)$$

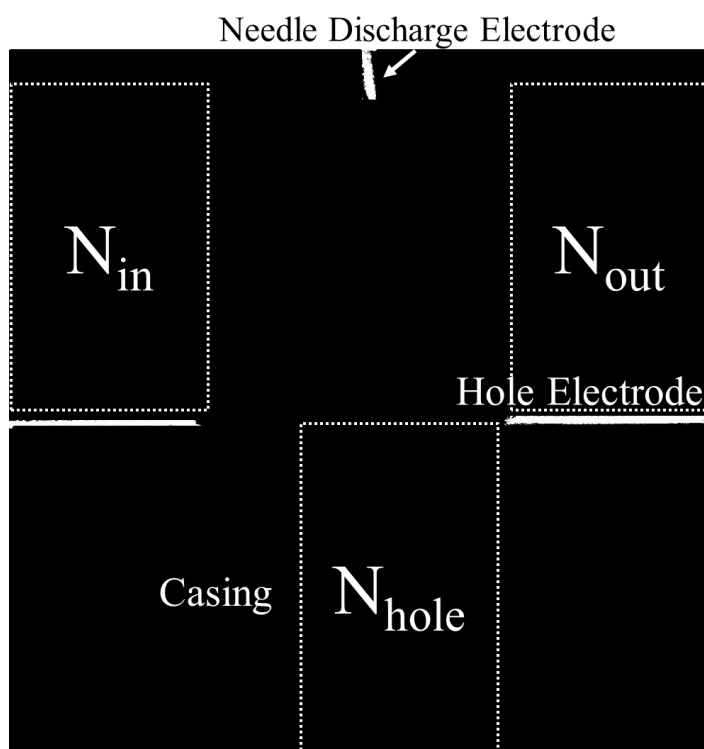


図 3-21. 解析領域

図3-22にトレーサ粒子Talcのホール流入率を示す。放電電流値は0~3 μ A、主流体速度は0.15, 0.5 m/sとした。0.15 m/sでは、電流値の増加に伴い、ホール流入率が増加している。これは、イオン風とクーロン力が増加するため、粒子がよりホールに流入したためである。0.5 m/sでは、3 μ Aに増加してもホール流入率10%を示している。この結果から、主流体速度を増加することで、主流体の力が支配的になっていることが確認できた。以上のことから、ホールに流入する粒子量の定量的な評価に成功したと言える。

PIV法はレーザーシート内の粒子を可視化し解析する技術である。そのため、イオン風や主流体の影響を受けてレーザーシート面外へと押し出された粒子は測定することができな

い。そこで、コロナ放電下における ESP の N_{in} , N_{out} , N_{hole} を測定した。主流体速度 0.5 m/s, 放電電流値 0.5 μA では、粒子数が 98.8 %に減少し、放電電流値 3 μA では、94.2 %に減少した。主流体中の粒子が F_e の作用を受けることで、数パーセントの粒子がレーザーシートから押し出されていることが明らかとなった。また、このことから、実際のホール流入率は解析値に比べて高いことが明らかとなった。

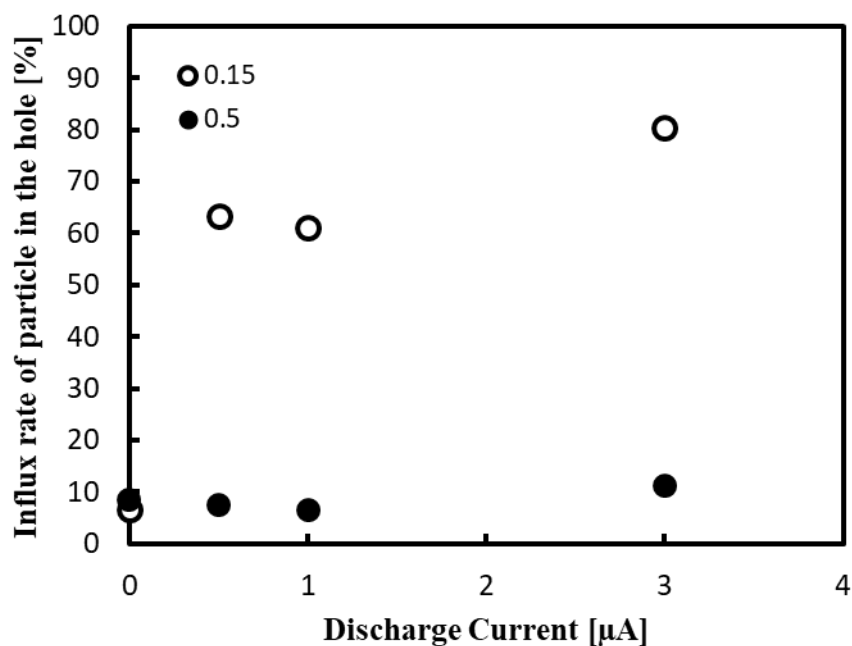


図 3-22. ホール流入率の放電電流値特性
(Talc, 0.15, 0.5 m/s)

3-8 結言

ホール型 ESP 内における帯電粒子の粒子挙動を解析することは、集塵過程および集塵効率を明らかにするために重要である。そこで、PIV を用いてホール型 ESP 内の粒子挙動を可視化するとともに、粒子移動速度、粒子移動角度、ホール流入率の向上に適した放電電流値や主流体速度について検討を行った。本研究で明らかになったことを以下に述べる。

1. 粒子がイオン風およびクーロン力による力 F_e の作用を受け、ホール内部に流入する様子を確認できた。このことから、ホール型 ESP において、粒子の可視化および粒子挙動の撮影に成功したといえる。
2. 粒子挙動はクーロン力、イオン風、主流体速度に依存しており、電流値を増加することで粒子移動速度は増加した。また、粒子移動速度が最も速い領域は針電極の直下であった。Cu, Talc, EG の順番で粒子移動速度が速かった。
3. 電流値の増加によって F_{EHD} が強くなり、粒子の移動角度は -90° に近づいた。1 m/s では、 F_p の影響が支配的となり、イオン風、クーロン力の影響をほとんど受けなかった。
4. ホール流入率を算出することで、定量的な検討を行えた。ホール流入率は F_e の増加により向上し、 F_p の増加により減少した。

参考文献

- (1) 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, P. 427-433, (2016)
- (2) 静電気学会:「静電気ハンドブック」株式会社オーム社, (2006)
- (3) J.D. Bassett, K Akutsu, S. Masuda: "A Preliminary Study of Re-entrainment in an Electrostatic Precipitator" Journal of Electrostatics, Vol. 3, No. 4, P. 311-325, (1977)
- (4) 可視化情報学会編:「PIV ハンドブック」森北出版株式会社, (2002)
- (5) 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, Vol. 106, No. 8, P. 377-383, (1986)
- (6) J. Mizeraczyk, J. Dekowski: " Laser flow visualization and velocity fields by particle image velocimetry in an electrostatic precipitator model" Journal of Visualization, Vol. 6, No. 2, P. 125-133, (2003)
- (7) A. Niewulis, J. Podliński: " EHD flow measured by 3D PIV in a narrow electrostatic precipitator with longitudinal-to-flow wire electrode and smooth or flocking grounded plane electrode" Journal of Electrostatics, Vol. 65, No. 12, P. 728-734, (2007)
- (8) イオン風は集塵方向へ 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, Vol. 41, No. 2, P. 99-104, (2017)

第4章 ホール型 ESP を用いたディーゼル微粒子の捕集

4-1 緒言

環境汚染の改善が重視されている近年において、粒子状物質(PM)の高効率な集塵方法の確立に期待が高まっている。PMの主な発生源としては火力発電所、自動車、船舶などが挙げられ、発生源によって粒子性状や濃度が異なることが知られている。PMの捕集方法としては、フィルタ方式や電気集塵装置(ESP)が挙げられる。フィルタ方式では、機械的に集塵するため、集塵性能が高く、確実に粒子を捕集できることが利点である。一方、集塵時間が長くなると、フィルタに目詰まりが生じ、集塵性能が低下してしまうことが問題とされている⁽¹⁾。ESPは簡単な構造で圧力損失が低く、保守も容易で高濃度粒子やナノ粒子の集塵に長けていることが知られている⁽²⁾。また、機械式のフィルタではなく、電気的な力でPMを集塵するため、目詰まりなどの問題が生じないことも評価されている。そのため、様々な火力発電所や道路用トンネル内の換気システムにESPが設置されている⁽³⁾。このように、ESP技術の進歩により、陸上における環境汚染対策は着実に進められているのが現状である。一方、近年では海洋汚染が特に問題視されており、2005年には国際海事機構(IMO)においてNO_x、SO_x規制が、2008年にはMEPC58でPM規制が遂行されている⁽⁴⁾。PM規制はPM発生の主原因が燃料中の硫黄分であることから、燃料中の硫黄濃度の規制が挙げられた。これにより、硫黄分が低い高価な燃料への転換による燃料費の上昇が問題視されている。しかし、このPM規制は排出前に排ガス浄化装置の利用も可能としており、硫黄濃度規制の代替案としてESPによる排ガス浄化が期待されている。ESPは他の装置と比べて集塵率が高いことが知られているが、その性能は処理対象粒子の性状に大きく依存する。特に低抵抗粒子を捕集する際には再飛散現象が生じてしまい、集塵率は低下する。前述した船舶ディーゼル機関における排ガスはその電気抵抗率が約 $10^4 \Omega \text{cm}$ 以下の低抵抗粒子であり、再飛散現象が生じる⁽⁵⁾。ESP内のコロナ放電により帯電部で帯電された粒子は、クーロン力とイオン風によって集塵電極に引きつけられる⁽⁶⁾。粒子は集塵部の電極上に付着すると直ちに電荷を失い、誘導帯電によって逆極性に帯電する。帯電した粒子は放電極へ引きつけられる剥離力によって集塵電極上から剥離し、帯電空間上へ誘導される。空間に誘導された粒子は放電極によって再び帯電し、集塵電極上へと引きつけられる。この際に、粒子は数珠状に凝集肥大化し、風力等の剥離力を更に受けることとなる。以上の過程を繰り返すことで集塵電極へ粒子が捕集されずにESPを通過してしまう現象が再飛散現象である。再飛散現象はESPを船舶ディーゼル機関の排ガスに適用するには解決しなければならない問題であり、対策が必要とされている。再飛散防止技術については、ESPの後段にサイクロンや機械式フィルタを設置するものがある⁽⁷⁾。しかし、これらはESPの利点である低圧力損失性を維持出来ていない。そこで、ESP内の再飛散現象を抑制する装置として、ホール型ESPが開発された。針電極と集塵電極に穴を設けたホール電極および捕集ケースから構成されるホール型ESPは、接地さ

れている捕集ケース内部に粒子を誘導することで再飛散現象が抑制することができる。ホール型 ESP を船舶用ディーゼル機関に適応するには、再飛散現象の抑制効果の検証が必要不可欠である。また、再飛散現象の抑制と同時に、高集塵率な ESP の開発も求められている。本研究では、ホール型 ESP とディーゼルエンジンを用いて、ホール型 ESP による再飛散現象抑制の確認と、集塵率の向上に最適な集塵条件および電極構造について検討を行った。

4-2 実験方法

4-2-1 実験システム

実験システムの概略を図 4-1 に示す。また、実験に使用したディーゼルエンジンの仕様を表 4-1,4-2 に示す。ディーゼルエンジンは軽油を燃料とし、負荷 88%として稼働した。粒子濃度の測定には、ディーゼルエンジンから出る排ガスをホール型 ESP に流入し、希釈機を用いて 100 倍希釈する。希釈したガスは光散乱式自動粒子計数器(Particle Counter : PC)と走査型移動度粒子分析器(Scanning Mobility Particle Sizer : SMPS)を用いて粒子の個数濃度を測定する。測定範囲は SMPS が 20~500 nm, PC が 300~5,000 nm である。ESP 内を流れる主流体速度は 1.0 m/s とした。高圧電極には負極性の直流高電圧を印加した。印加電圧は-9.2~-15.8 kV とした。

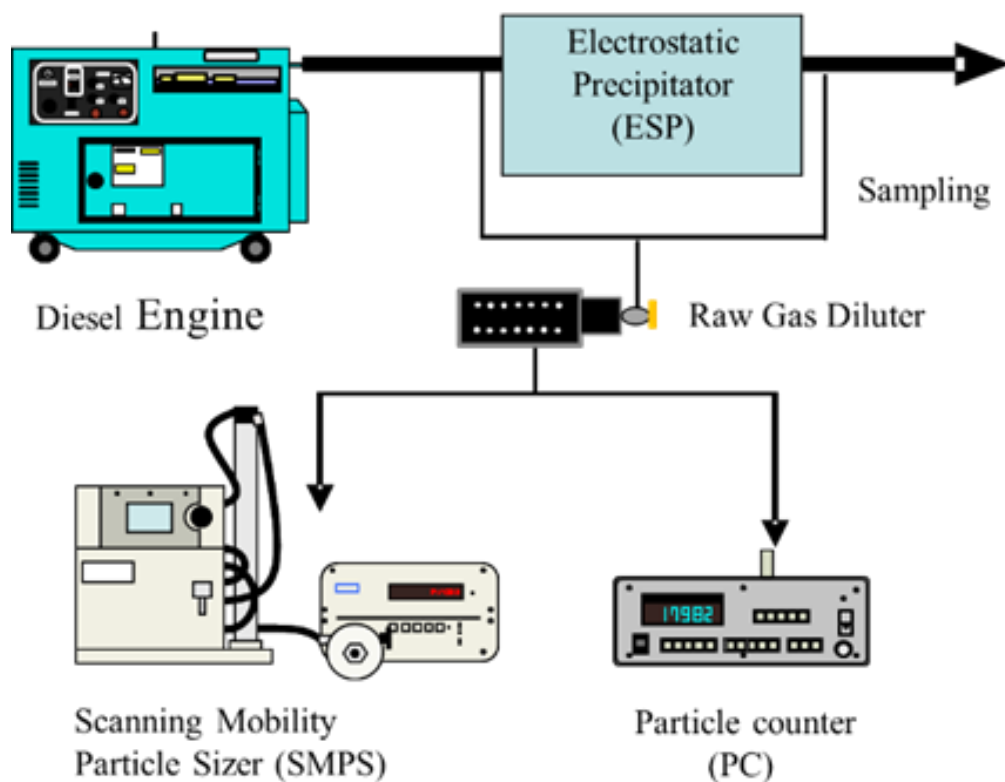


図 4-1. 実験システム

表 4-1. ディーゼルエンジン仕様

ディーゼル発電機	ヤンマー株式会社		
機種名称	YDG200A-5E		
エンジン		発電機	
名称	L40ADEGY56	形式	自励式回転界磁形交流発電機
形式	立形空冷4サイクルディーゼル	周波数	50Hz
定格出力 連続	2.5(3.4)/3000kW(PS)/rpm	出力	1.7kW
排気量	0.199L	電圧	100V
使用燃料	軽油	電流	17A

表 4-2. ディーゼルエンジン仕様

ディーゼル発電機	ヤンマー株式会社		
機種名称	YDG500VS-5E		
エンジン		発電機	
名称	L100V5-GYSS	形式	自励式回転界磁形(単層交流発電機)
形式	立法空冷4サイクルディーゼル	周波数	50Hz
定格出力 連続	5.7(7.7)/3000	出力	2.5kW
排気量	0.435L	電圧	100V
使用燃料	軽油	電流	40A

4-2-2 微粒子の測定方法

前述したように、粒子の測定には SMPS と PC を用いた。SMPS は空間浮遊粒子として、広範囲なサブミクロン粒子を高分解能で計測する装置であり、静電分級器(Differential Mobility Analyzer : DMA)と凝集粒子計測器(Codensation Particle Counter : CPC)で構成されている。SMPS 測定器を図 4-2 に示す。SMPS では、流入したサンプルガスにインパクトを適応し、大粒径粒子を除去する。その後、DMA に流入した粒子は平衡荷電装置によってマイナスにイオン化され、層流状態で二重円筒に流入される。この時、内外筒間に直流電圧を印加することで、粒子は静電気力により内筒に引き寄せられながら流下する。この静電気力は粒子の粒径によって定まるため、印加電圧を制御することで、同径の粒子を抽出することができる。DMA によって分級された粒子は CPC へと流入される。その際、ブタノールとともに継続的に加熱されたサーキュレーター部を通過する。そこでブタノール分は気化され、サンプルガスに拡散される。その後、冷やされたコンデンサーを通過する際にアルコール分が飽和され、粒子サンプルが核となり、飽和されたブタノールとともに凝集する。そして光散乱方式を用い粒子個数を測定する。以上が SMPS の測定原理である⁽⁸⁾。

PC は光散乱方式を用いてダクト内の浮遊粒子濃度を粒径別に測定する機器である。原理としては、粒子と光には相対散乱強度が粒径の 6 乗に比例するという関係があるため、レーザーをサンプルガスに照射することで、粒径の判別および計測をするものである。300 nm 以下の小さい粒径の場合、散乱強度が小さすぎるため測定ができなくなる。そのため、本研究では、小粒径粒子は SMPS、大粒径粒子は PC にて測定を行った。

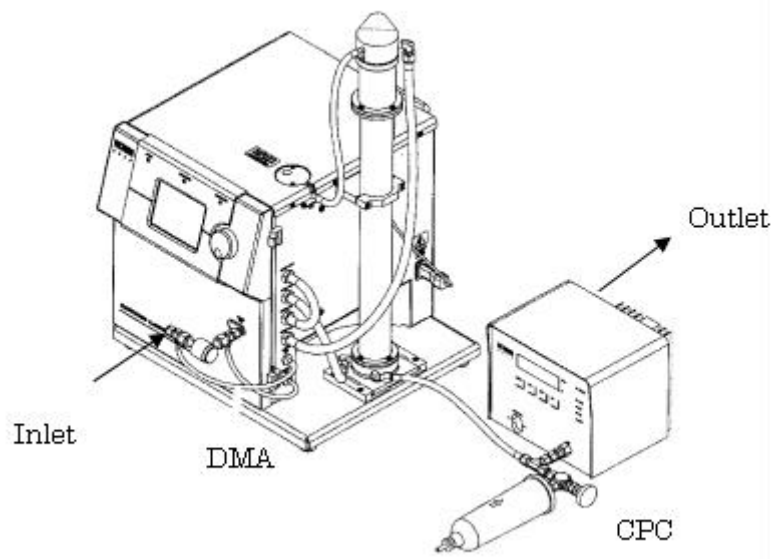


图 4-2. SMPS 概略

4-2-3 集塵率算出法

集塵率の算出方法としては、ESP 上流と下流におけるそれぞれの粒子数を測定し、これらの差から集塵率を算出した。また、集塵率は瞬間値ではなく、集塵開始と終了までの時間平均値を用いた。個数集塵率の算出式を式(4-1)に示す。

$$\eta = \left(1 - \frac{N_{IN}}{N_{OUT}}\right) \times 100 \quad (4-1)$$

N_{IN} : ESP 上流における粒子個数 [parts/L]

N_{OUT} : ESP 下流における粒子個数 [parts/L]

η : 個数集塵率 [%]

また、個数集塵率とは異なる集塵率として重量集塵率がある。重量集塵率の算出式は以下の式から求める。

$$V_p = \frac{4\pi r_1^3}{3} \quad (4-2)$$

$$V_{ps} = V_p \times N \quad (4-3)$$

$$m = V_{ps} \times m_d \quad (4-4)$$

$$\eta_a = \left(1 - \frac{m_{IN}}{m_{OUT}}\right) \times 100 \quad (4-5)$$

r_1 : 粒子半径 [mm]

N : 粒径別個数 [parts/m³]

m : 総重量 [mg/m³]

m_{IN} : 上流側の総重量 [mg/m³]

η_a : 重量集塵率 [%]

V_p : 粒径別体積 [m³]

V_{ps} : 粒子総体積 [m³/m³]

m_d : 比重 [mg/m³]

m_{OUT} : 下流側の総重量 [mg/m³]

4-3 ホール型 ESP におけるディーゼル微粒子の捕集

4-3-1 ホール径の検討

ホール型 ESP では、ケーシングに流入する粒子の個数が多いほど再飛散の抑制が可能である。そこで、ホール流入率に寄与するイオン風に着目し、イオン風が最も強く吹く電極構造を検討した。実験装置の概略を図 4-3 に示す。高圧電極はステンレス製の針電極、接地電極は平板の中心に孔を開けたホール電極を使用した。ホール電極は縦 15 cm、横 9 cm、電極間距離 d は 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30 mm、ホール径 Φ は 5, 8, 10, 13, 20, 25, 30 mm と変化させ実験を行った。高圧針電極には負極性の直流高電圧を印加し、印加電圧は負極性-4.9~12.9 kV とした。風速は接地電極のホールを通過するイオン風をホール電極から 56 mm 下にあるベーン式風速計(hontzsch, HFA RS232)を用いて測定した。

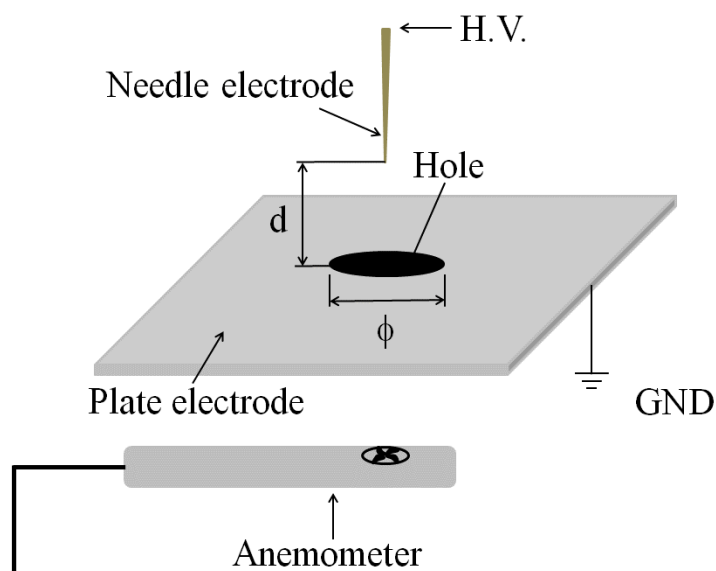


図 4-3. イオン風測定装置

図 4-4 にホール径 Φ を 5 mm とした時のイオン風の放電電流特性を示す。放電電流値は 2.5~30 μA 、電極間距離 d は 5, 8, 10, 15, 20 mm とした。いずれの電極間距離においても放電電流値の増加に伴いイオン風は増加した。放電電流値の増加に伴い電流密度が増加するため、イオン風が速くなったと考えられる。放電電流値 30 μA では電極間距離 5 mm のイオン風が最も速い結果であった。放電空間内の電界は高圧針電極とホールのエッジ近傍が強く、イオン風はエッジに向かって生じる。エッジ付近では、イオン風はホールを通過する流れと、接地電極に当たり、反対方向へ向かう流れに分流する。したがって、ホールを通過するイオン風の割合は、針先端とホールエッジの位置関係に大きく依存することが考えられ

る。ホール径5 mmでは、電極間距離が長くなるとホールから針電極までの距離が長くなる。主流体が空間中を移動する場合、静止している空気との摩擦によって主流体は減衰し流動する。そのため、ホールを通過するイオン風が遅くなった。電極間距離が5 mmになると、ホールのエッジに針電極が近づくため、イオン風はホールを通過する割合が多くなる。

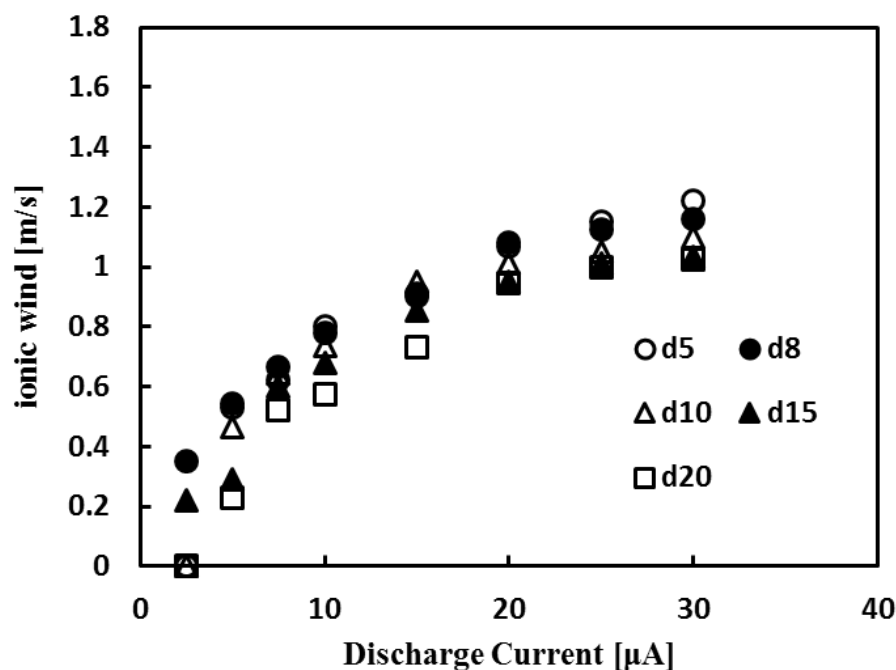


図 4-4. イオン風の放電電流特性 ($\phi 5$)

図 4-5 にホール径を 20 mm とした時のイオン風の放電電流特性を示す。放電電流値は 2.5 ~ 30 μA 、電極間距離 d は 5, 8, 10, 15, 20 mm, とした。ホール径 5 mm と同様に、放電電流値の増加に伴いイオン風は増加し、電極間距離が 20 mm の時に最大値を示した。電極間距離が 20 mm より短い場合は、針先端とホールのエッジとの距離が近づき、エッジから針先までの角度が浅くなる。このとき、イオン風がホールのエッジに向かって流れるため、イオン風が分流し、ホールを通過するイオン風が遅くなった。以上のことから、各ホール径においてイオン風が最大値を示す最適な電極間距離が存在し、ホール径 5 mm では電極間距離 5 mm、ホール径 20 mm では電極間距離 20 mm が最適な電極構成であることが明らかとなった。

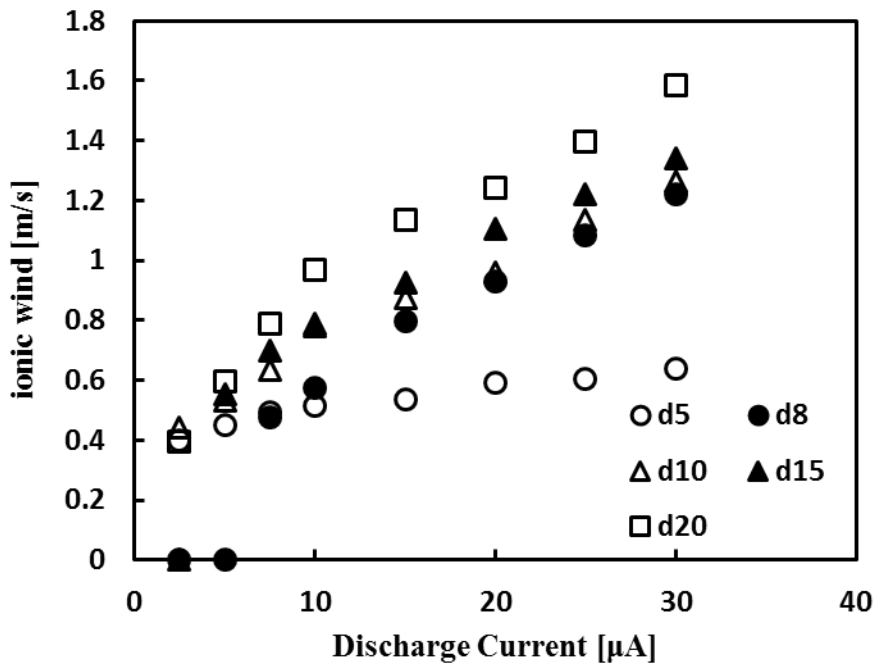


図 4-5. イオン風の放電電流特性 (φ20 mm)

図 4-6 にイオン風に対するホール径と電極間距離の影響を示す。グラフの横軸はホール径と電極間距離の比とし、次式で表される。

$$\text{ホール径と電極間距離の比} = \frac{\text{ホール径}}{\text{電極間距離}} \quad (4-6)$$

ホール径は 5, 8, 10, 20 mm, 電極間距離は 5, 8, 10, 13, 20, 30 mm とした。ホール径と電極間距離の比が 1 付近で最も速いイオン風が確認できた。ホール径と電極間距離の比が 1 付近で電界が最も強まるため、イオン風が最大値を示したと考えられる。これらのことから、最大イオン風を発生させる最適な電極構成はホール径と電極間距離の比が 1 のときであることが明らかとなった。これには理由があり、ホール径と電極間距離の比が 1 の時はホールエッジの電界強度が最も強くなるためである。電界強度が最も強くなる形状は針対針電極である。ホール電極には厚みがあるため、針電極先端から見てホールのエッジが 45° となる電極間距離において最も針対針電極の形状に近づくため、電界が最大値を示したと考えられる。

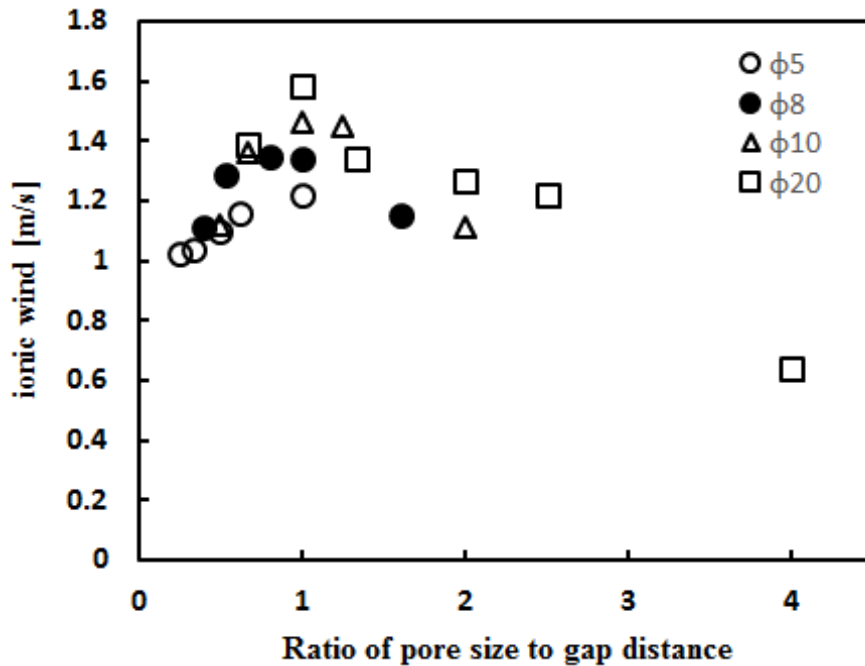


図 4-6. ホール径と電極距離の比によるイオン風の変化

これまでの検討から、イオン風が最も強く吹く条件はホール径と電極間距離の比が 1 であることが明らかとなった。高風速下の条件でホール型 ESP を稼働する際、イオン風の強さは集塵率に影響を与えると考えられる。そこで、ホール径と電極間距離の比を 1 に固定した時に最もイオン風が強く吹く電極構造を検討する。図 4-7 にイオン風の最大値を示す。印加電圧はスパーク電圧から 1 割下げた値とした。ホール径および電極間距離が 20 mm の条件で最もイオン風が速い。電極間距離が近い場合、すぐにスパーク電圧に達してしまうが、電極間距離を伸ばすことでより高い電圧を印加することができ、より電流を流すことができるため、速いイオン風が吹いたと考えられる。電極間距離が 20 mm よりも長い場合では、針電極からホールまでの距離が遠くなるため、測定箇所に辿り着く前にイオン風が分散してしまう。これは、風は移動距離が長くなるにつれて発達していくため、中心の速い風は発達空間に存在する遅い風を巻き込み進展していく。つまり、空気との摩擦によって主流体の速度は減衰する。このことから、電極間距離とホール径は長ければ良いとは言えず、20 mm が最適であることが明らかとなった。本研究ではスパーク電圧は電極間距離 20 mm までは直線的に増加するが、電極間距離 20 mm 以降ではスパーク電圧の増加率が低い。このことから、イオン風の最大値が 20 mm の条件で確認できたと考えられる。

これらのことから、ホール型 ESP の電極構造は電極間距離 20 mm、ホール径 20 mm とした。

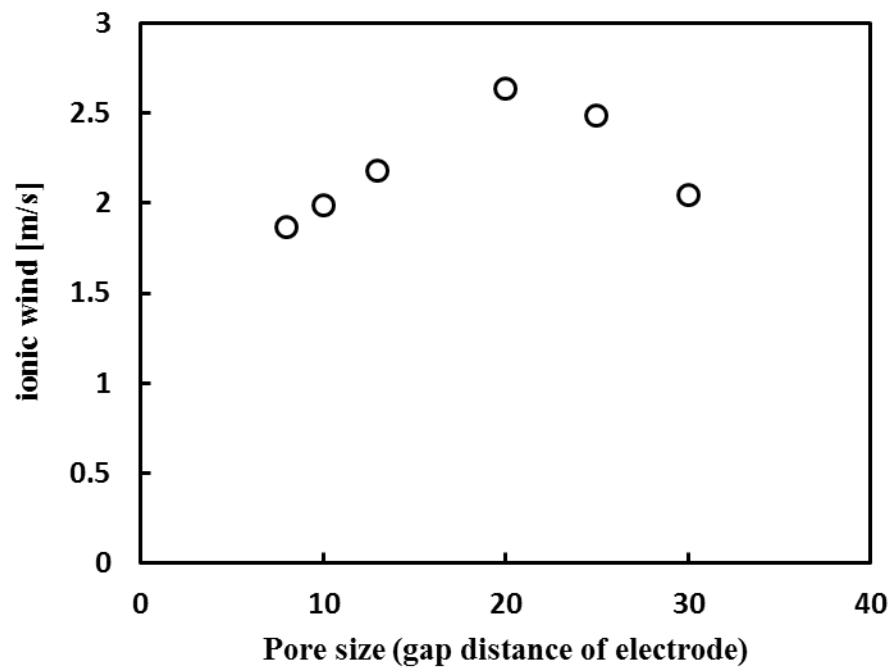


図 4-7. イオン風の最大値

4-3-2 電極構成

本実験で使用したホール型 ESP を図 4-8 に示す。ESP は、接地されたステンレス製のケーシング、ホール電極および高電圧印加用の放電電極から構成されている。放電電極は全てステンレスで、支柱に針電極 13 本を配置した構造となっている。ESP にはこれを 7 セット配置しており、針の総本数は 91 本である。針のピッチは 20mm, 針と接地電極間距離も 20mm である。ホールの電極は縦 240mm 横 420mm の長方形である。ホール電極のホール径は 20mm, 平板に対しホール開口率は全て 16% とした。

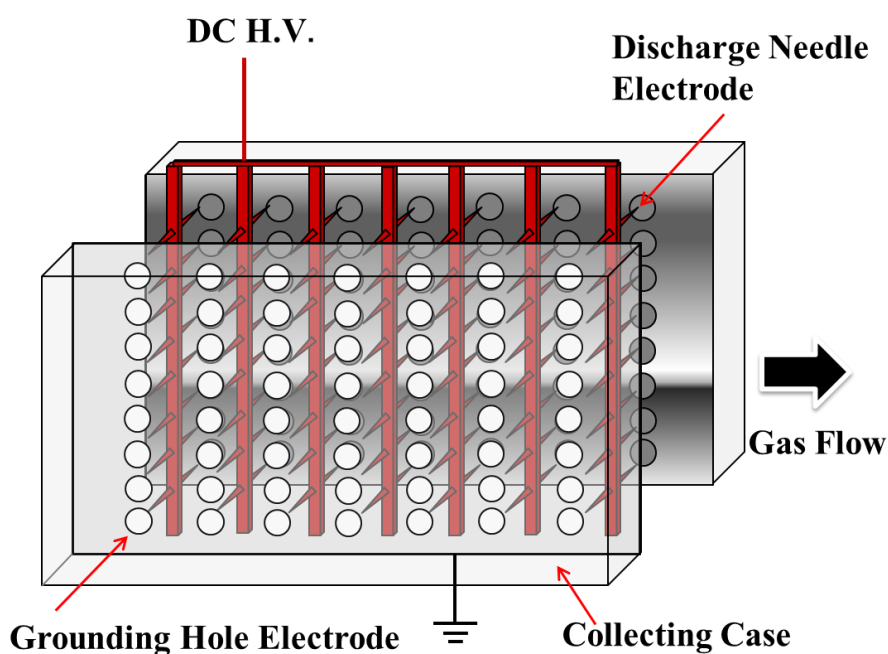


図 4-8. ホール型 ESP

4-3-3 ホール型 ESP と従来型 ESP における集塵率の粒径特性

ホール型 ESP における再飛散現象の抑制を確認するため、集塵率の粒径特性を測定した。図 4-9 にホール型 ESP と従来型 ESP における集塵率の粒径特性を示す。集塵時間は 60 分、放電電流値は 0.6 mA とした。小粒径では、従来型 ESP の集塵率が高くなり、大粒径では、ホール型 ESP の集塵率が高くなった。また、従来型 ESP では、大粒径において集塵率がマイナスを示した。集塵電極上で凝集肥大した粒子が電極上から剥離したことで、大粒径の集塵率が減少した。ホール型 ESP では、電界がゼロのケーシング内に粒子を捕集することで、再飛散が抑制されたため、大粒径の集塵率が減少しなかった。

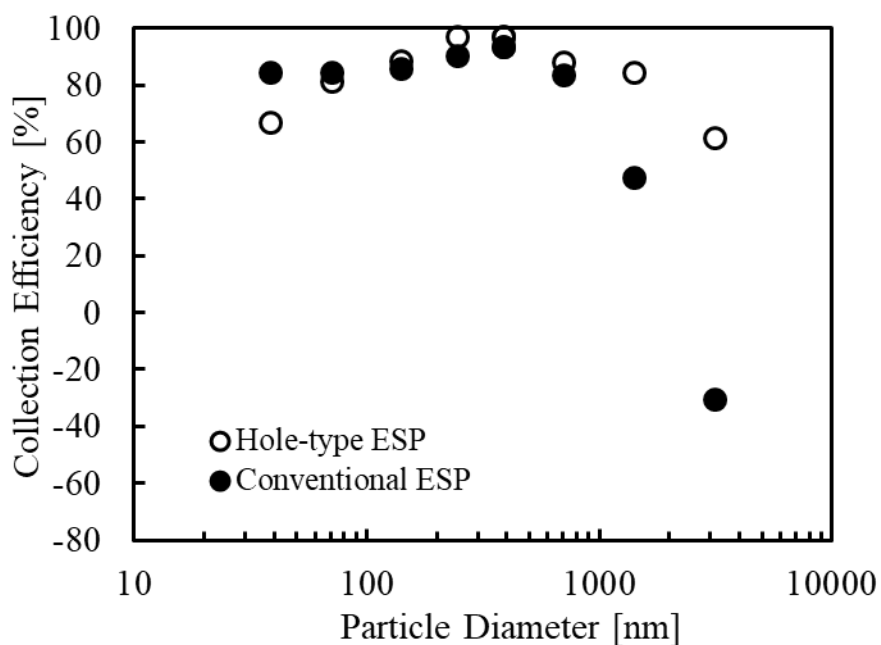


図 4-9. ホール型 ESP と従来型 ESP における集塵率の粒径特性

4-3-4 各粒径における集塵率と放電電流値の関係

集塵率に影響する要因であるイオン風、クーロン力は放電電流値によって変化する⁽⁶⁾⁽⁹⁾。そこで、集塵率の放電電流値特性について検討を行った。図 4-10 に集塵率と放電電流値の関係を示す。電極構造は針対ホール構造(針垂直)、稼働時間は 72 分、放電電流値は 0.4, 0.6, 1.0, 1.4, 2.0 mA, 排ガス温度は 160°Cとした。10~30 nm の小粒径と 70~140 nm, 200~300 nm の中粒径では、放電電流値の増加に伴い集塵率が増加した。放電電流値を高くすると印加電圧が大きくなる。そのため、空間中で帯電した粒子にかかるホール電極方向へのクーロン力 F_q が増加し、よりホールに粒子が流入した。一方、2000~5000 nm の大粒径では、電流値の増加に伴い集塵率が減少した。ディーゼルエンジン排ガス中の PM は、電気抵抗率が低く、ホールに流入せずに接地電極上に捕集されると誘導帯電により逆極性となる。また、粒子は電極上で凝集し大きくなる。大粒径の粒子は小粒径や中粒径に比べて飽和帯電量が多い。そのため、放電電流値の高い印加電圧の大きい条件では、捕集された粒子に針電極へ引き寄せるクーロン力がより作用し、剥離力が増加する。このことから、大粒径では再飛散現象が起りやすく、集塵率が低下した。図 1-5 から、ディーゼルエンジンから排出されるガスの粒径分布は 100 nm 付近の粒子が最も多いため、全体集塵率で見ると 1.0 mA の条件が最も集塵に適している。

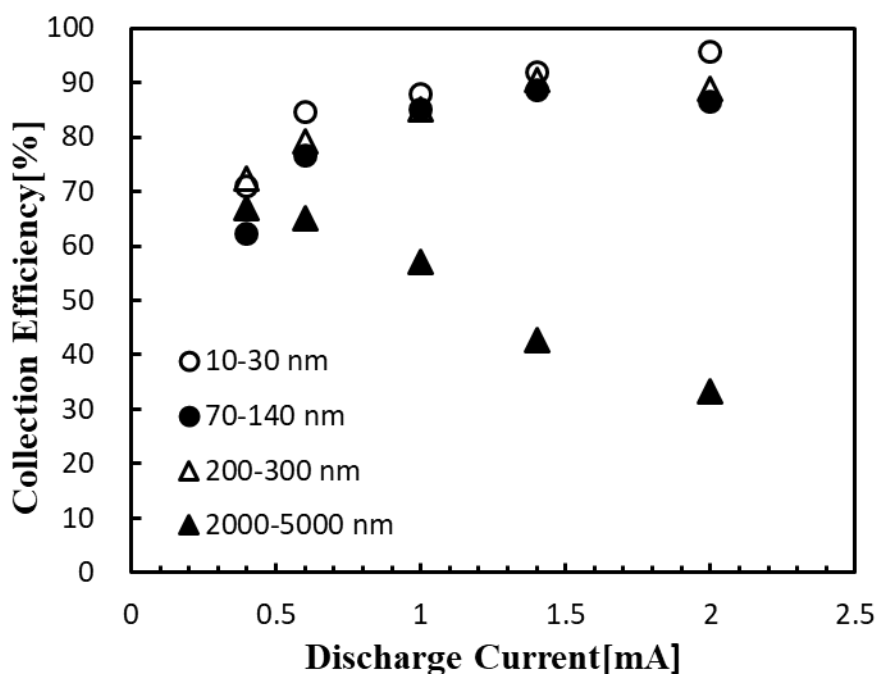


図 4-10. 集塵率の放電電流特性

4-3-5 集塵率と排ガス温度の関係

船舶ディーゼルエンジンに ESP を搭載する際、排ガス温度は重要な要素の 1 つである。そこで、排ガス温度を 90~160 °C に変化させ、集塵率の排ガス温度特性を測定した。図 4-11 に集塵率の排ガス温度特性を示す。電極構造は針対ホール構造(針垂直)、ESP の稼働時間は 36 分、放電電流値は 1.0 mA とした。排ガス温度の調整は、エンジンと ESP を接続する排気管長の変更や、排気管を水槽に浸けることで行った。小粒径と中粒径では、排ガス温度の変化による集塵率の違いは殆どない。また、集塵率は 90% 付近と高い値を示している。しかし、大粒径では、排ガス温度 140 °C において集塵率は極小値を示している。集塵率がマイナスになっており、小さい粒子がホール電極上で凝集肥大して、再飛散しているものと考えられる。軽油は JIS 規格により沸点が 240 °C と定められている。240 °C よりも低い排ガス温度 100 °C 付近では、燃料の未燃焼成分が凝縮して粒子と共に電極に捕集されたと考えられる。このことから、粒子の粘度が高くなることで付着力が増加し、再飛散現象が抑制されたと考えられる。フライアッシュにおいて、排ガス温度の上昇に伴い粒子の電気抵抗率が上昇する知見がある⁽¹⁰⁾。ディーゼルエンジンから排出される粒子においても同じ現象が生じると仮定すると、排ガス温度が 160 °C では、本来の電気抵抗率である $10^2 \sim 10^3 \Omega\text{cm}$ に比べて高い値となる。再飛散現象は電気抵抗率が低いほど生じる現象であるため、電気抵抗率が増加することで、再飛散が抑制されたと考えられる。

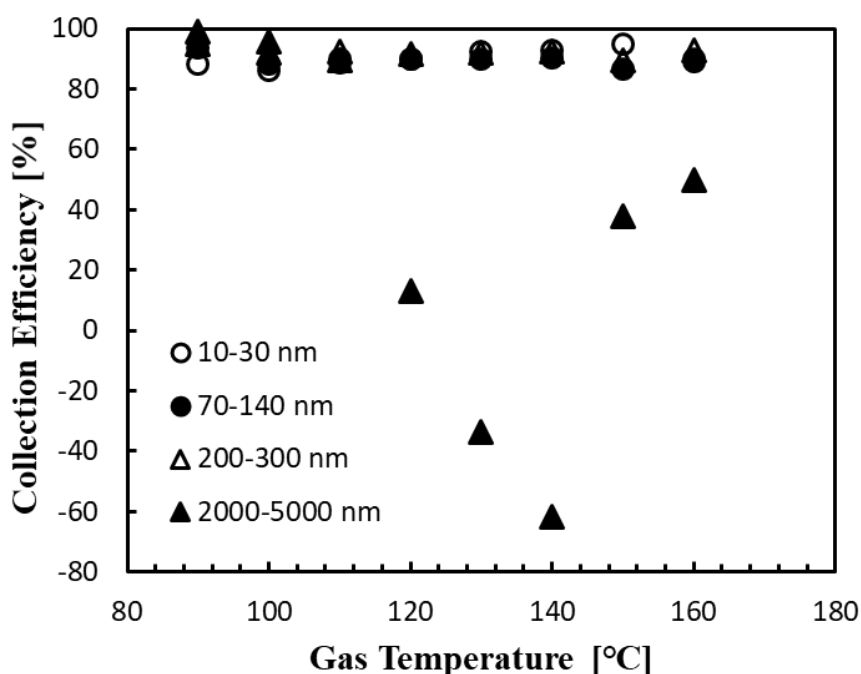


図 4-11. 集塵率の排ガス温度特性

4-4 ホール型 ESP における理論集塵率の算出

集塵率は、ESP の性能を示す数値として度々用いられているが、理論式による理論集塵率の算出については深く研究が行われていない。理論値の算出法としては、Deutsch の式を用いて算出する方法が代表的である。(4-7)式に Deutsch の理論式を示す。

$$\eta = 1 - \exp\left(-W_{th} \cdot \frac{S}{Q}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{W_{th}L}{V_g d_g}\right) \quad (4-7)$$

W_{th} : 電界方向への粒子の移動速度 [m/s], S : 集塵面積 [m²], Q : 処理ガス流量 [m³/s]
 L : 集塵電極長 [m], V_g : ガス流速 [m/s], d_g : 電極間ギャップ [m]

Deutsch の理論式は円筒の中心にワイヤが設置してある電極構成を対象としている。また、Deutsch の理論式にはイオン風、放電の局在化による粒子移動速度の変化、粒子濃度、粒子性状、排ガス温度のパラメータが含まれていない。そのため、対象とする ESP の形状やガス性状によって理論式と実験値に乖離が生じてしまう。そこで、本研究ではホール型 ESP における放電電極の形状による電界の局在化について検討を行い、Deutsch の理論式を修正した、Deutsch の修正式を導出した。

式(4-7)における W_{th} は Stokes 抗力と静電気力の釣り合いの式より(4-8)式で表される。電界値 E [V/m]は 2 章で取り扱った有限要素法により導出した。

$$W_{th} = \frac{qE}{3\pi\eta_{air}d} C_m \quad (4-8)$$

q : 粒子の帯電量 [C], d : 粒径[μ m], C_m : カニンガムの補正係数 1
 η_{air} : 空気の粘性係数 1.81×10^{-5} [Ns/m²]

コロナ放電による粒子の帯電量は、電界帯電(q_f)と拡散帯電(q_d)の和として考えられる。ここでは、粒径 1μ m 以上の粒子を対象として計算を行う。粒径 1μ m 以上では帯電量 q_f に比べ q_d は非常に小さな値となるため、ここでは帯電量を q_f だけで考えた。電界帯電量を次式(4-9)に示す。

$$q_f = \frac{3\pi\epsilon_0\epsilon_s d^2 E}{\epsilon_s + 2} \quad [C] \quad (4-9)$$

ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率 8.85×10^{-12} , ϵ_s は粒子の比誘電率 5.5 である。

続いて、Deutsch の理論式を用いて算出した理論集塵率とホール型 ESP における実験値から求めた集塵率を比較した。図 4-12 にホール型 ESP における集塵率の理論値と実験値の比較を示す。電流値の増加に伴い、集塵率は増加している。また、理論集塵率と実験値に差が生じた。前述したように、Deutsch の理論式には、電界の局在化、粒子濃度、粒子性状、排ガス温度など、様々なパラメータが含まれていない。そのため、理論集塵率と実験値に差が生じた。

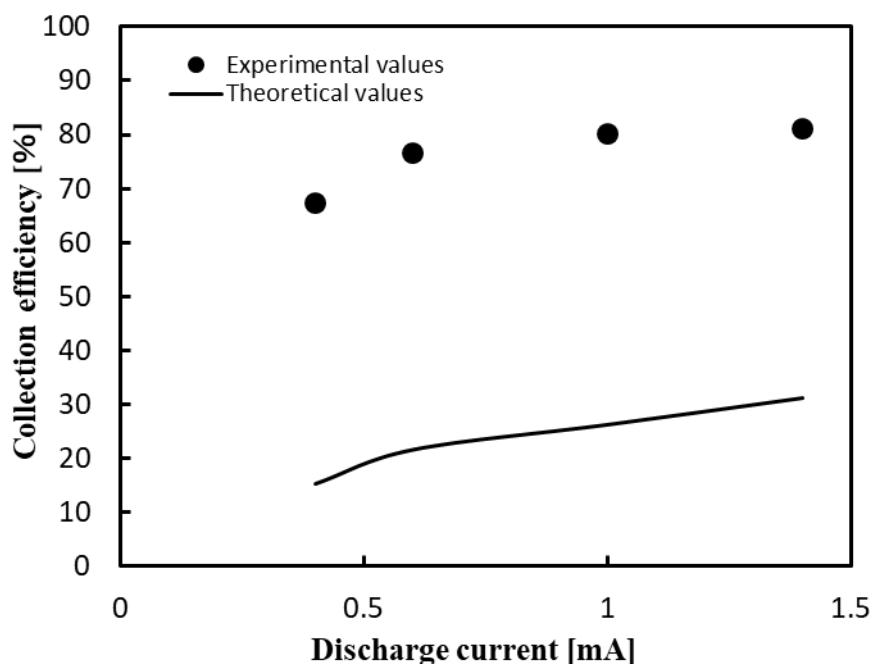


図 4-12. ホール型 ESP における集塵率の理論値と実験値の比較

Deutsch のモデルでは、円筒内にワイヤを通してあるため放電が一様となる。ホール型 ESP では、針電極を用いているため、放電点が局在化してしまう。Deutsch の理論式では、この放電点の局在化を考慮していない。このため、ホール型 ESP における Deutsch の修正式では、電界方向への粒子の移動速度 W_{th} を補正する必要がある。Deutsch の理論式を修正した式を次式に示す。

$$\eta = 1 - \exp \left\{ - \left(A W_{th} + B \right) \cdot \frac{S}{Q} \right\} \quad (4-10)$$

ここでは、 W_{th} にかかる係数 A と B を考えた。 A の算出式を式(4-11)に示す。

$$A = \alpha \ln(I) \quad (4-11)$$

これは、放電電流値が大きくなれば、放電の局在化における影響が小さくなることを表している。 α は実験結果の集塵率から導出した実験係数であり、 -0.0061 とした。また、係数 B はここでは考慮していない再飛散現象や摩擦力などの電氣的、機械的なパラメータによる影響として、 W_{th} に定数として 0.05 m/s を加算した。図 4-13 にホール型 ESP における集塵率の修正理論値と実験値の比較を示す。修正理論式では、放電の局在化の影響を考慮することで、実験値と近い値を示した。このことから、実験値を用いて係数を算出することで、異なる放電電流値の集塵率を算出することが可能となった。

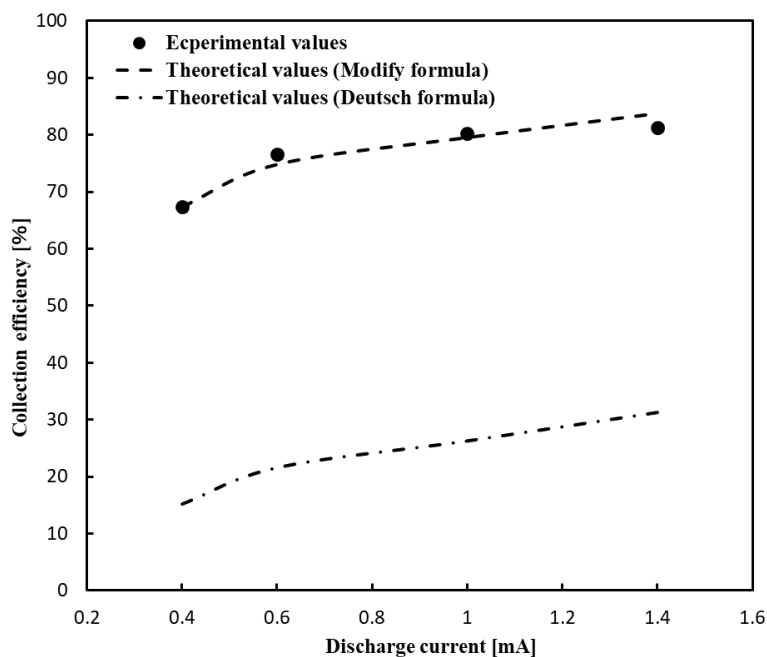


図 4-13. ホール型 ESP における集塵率の修正理論値と実験値の比較

4-5 結言

ホール型 ESP を船舶用ディーゼル機関で実用化するには、再飛散現象の抑制効果の検証が必要不可欠である。また、ホール型 ESP による集塵率の向上に適した集塵条件や電極構造の検討も重要である。そこで、ホール型 ESP を用いて実証実験を行い、検討および考察をした。本研究で明らかになったことを以下に述べる。

1. イオン風が最も強く吹く条件は、ホール径 20 mm, 電極間距離 20 mm であることが明らかとなった。
2. ホール型 ESP において、再飛散現象の抑制効果が確認できた。
3. 小粒径と中粒径では放電電流値の増加に伴い集塵率は高くなった。また、大粒径では放電電流値の増加に伴い集塵率は減少した。大粒径の粒子は小粒径や中粒径に比べて飽和帯電量が多いため、再飛散現象が起こりやすく、集塵率が低下した。
4. 排ガス温度が 140 °C で集塵率は極小値を示し、排ガス温度 100 °C で極大値を示した。粒子の電気抵抗率と粘度による、再飛散現象の抑制が原因だと考えられる。
5. 放電の局在化を考慮した理論集塵率の修正式を提案し、実験値と比較して良い一致が見られた。

参考文献

- (1) 桑本 拓也：「間接プラズマを用いたディーゼル微粒子低温除去に及ぼす排ガス温度の影響」日本機械学会論文集 B, Vol. 79, No. 800, P. 723-727, (2013)
- (2) 水野 彰：「電気集塵および低温プラズマ化学反応によるディーゼル自動車排ガス処理」エアロゾル研究, Vol. 30, No. 2, P. 100-107, (2015)
- (3) 社団法人建設電気技術協会：「道路トンネル用集じん便覧」 1979
- (4) 平原 祐：「船舶からの排ガスに対する規制の強化について-MARPOL 条約附属書 VI 改正の概要」マリンエンジニアリング, Vol. 43, No. 6, P. 830-832, (2008)
- (5) J.D. Bassett, K Akutsu, S. Masuda：”A Preliminary Study of Re-entrainment in an Electrostatic Precipitator” Journal of Electrostatics, Vol. 3, No. 4, P. 311-325, (1977)
- (6) 静電気学会：「静電気ハンドブック」株式会社オーム社, (2006)
- (7) 徐 芝徳, 古堅 宗勝, 牧野 義, 塚本 達郎：「船用ディーゼル機関の粒子状物質除去装置の開発 - 静電サイクロン方式 DPF の PM 捕集特性」マリンエンジニアリング, Vol. 44, No. 2, P. 304-309, (2009)
- (8) 東京ダイレック：「TSI Particle Technology」(2017)
- (9) Khanh Duong TRAN：”Measurement and Numerical Simulation of Flow and Electric Fields in Charge Injection Type of Electrostatic Oil Filter” Transactions of the Japan Fluid Power System Society, Vol. 40, No.1, P 8-15, (2009)
- (10) Mao Hong Lin, Kazutaka Makino, Koichi Iinoya：”Estimation of Performance of Electrostatic Precipitator” Journal of the Research Association of Powder Technology, Vol. 12, No5, pp 271-288, (1975)

第 5 章 再飛散抑制に最適な電極構成の検討

5-1 緒言

ホール型 ESP は大気汚染物質である PM を捕集し、従来型 ESP で問題とされていた再飛散現象を抑制する装置である。ここまで、ホール型 ESP におけるシミュレーション解析と PIV 解析から、ホール内に粒子が流入する現象の再現と観測を行ってきた。また、実際のディーゼルエンジンを用いた集塵実験から、ホール型 ESP は、再飛散現象の抑制を確認し、従来型 ESP に比べて集塵性能が高いことが明らかとなった。粒子挙動は放電電極の位置やホール径など、電極構成によって変化すると考えられ、ホール型 ESP におけるホール流入率の向上には放電電極位置の検討が必要である。ここでは、集塵実験で使用したホール型 ESP の性能を更に向上させるために、シミュレーションと PIV 解析の比較を行い、捕集モデル A の妥当性の確認を行う。次に、流体中の帯電粒子がホールに移動する角度について検討を行う。第 3 章の PIV 解析から、主流体速度 0.5 m/s においてホール流入率が低くなる現象が確認されていた。これを改善する案として、放電電極の針位置を ESP 流入方向へ移動させることで、帯電粒子の移動方向をホール側へと誘導する電極構成の提案を行う。また、PIV 解析にてホール流入率の向上が確認できた場合、再飛散抑制に最適な放電電極位置を移動したホール型 ESP を用いて集塵実験を行い、集塵率の検討を行う。

5-2 シミュレーション解析と粒子可視化実験の比較

シミュレーション解析では、妥当性の検証が必要不可欠である。そのため、同サイズのモデルを用いた粒子可視化実験との流体の比較を行った。図 5-1 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)の流体分布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、白い線が接地電極、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、ホール内部へと流入している様子が確認できる。流体分布ではホールに流入する流れは 0.6 m/s 付近であり、粒子挙動では 1 m/s 付近と F_{EHD} に F_q が加わっていることが明らかとなった。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。

図 5-2 に主流体速度 1.0 m/s における流体分布および粒子挙動を示す。1.0 m/s では、主流体の力が強まるため、ホール内への流れはほとんど生じていない。これは粒子可視化実験においても同様の傾向が確認できた。このことから、実際の粒子挙動は、シミュレーションの流体分布と同様の挙動となることが明らかとなった。

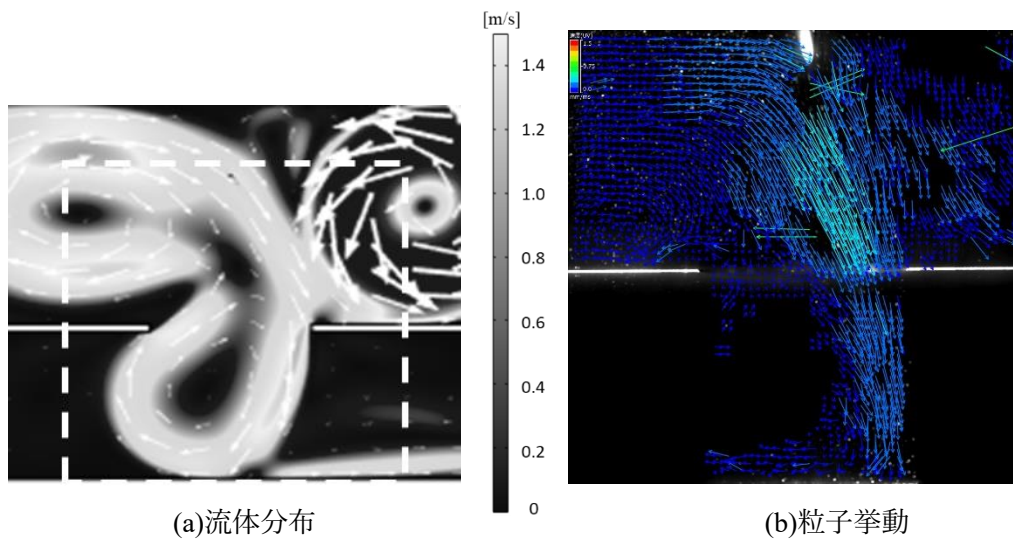


図 5-1. 流体分布および粒子挙動画像 (0.15 m/s)

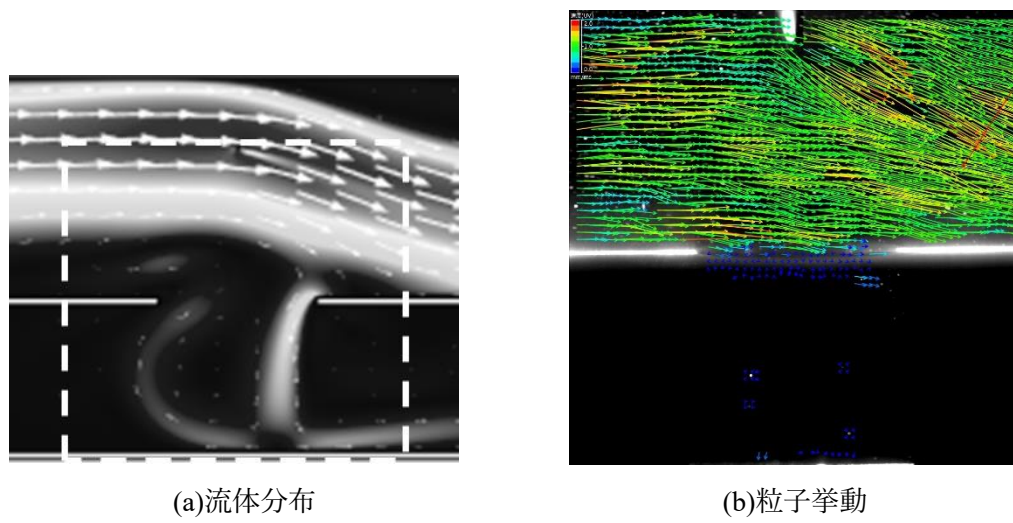


図 5-2. 流体分布および粒子挙動画像 (1.0 m/s)

5-3 粒子捕集モデル A の検討

シミュレーション解析と PIV 解析結果から、粒子捕集モデル A の妥当性の確認を行う。図 5-3 にホール流入率算出方法を示す。粒子を針先端からホールエッジに向かう電気力線上に配置し、図 1-11 のように F_p , F_e を導出することで粒子の移動方向を算出した。配置する粒子はシミュレーション解析と PIV 解析で用いた Talc 粒子を模擬し、 F_p は流体抗力の(1-15)式、 F_q は粒子の飽和帯電量の(1-7)式を用いて算出した。 F_{EHD} は F_e に対して 60%となる報告があるため⁽¹⁾、 F_q の値を用いて算出した。最後に、各位置における粒子のホール流入条件と粒子の移動方向から、捕集モデル A におけるホール流入率を算出した。

図 5-4 にホール流入率の比較を示す。捕集モデルは図 5-3、シミュレーションは粒子挙動解析、PIV 解析は可視化した粒子のピクセル数を用いてホール流入率を導出した。捕集モデルは、初期位置における F_p , F_e を考慮して粒子の移動方向を算出した、最も簡易なシミュレーションのホール流入率である。シミュレーションの粒子挙動解析から算出したホール流入率は、初期位置だけではなく、粒子が移動した各位置における F_p と F_e を考慮しているため、より実現象に近い値となる。そのため、捕集モデルとシミュレーションの値に差が生じた。PIV 解析とシミュレーションのホール流入率の傾向が概ね一致した。PIV 解析は ESP 内の粒子を可視化して算出しているため、実現象のホール流入率である。そのため、シミュレーション解析は実現象と近い挙動を示していることが明らかとなった。また、このことから、捕集モデル A で仮説を立てた、ESP 内の帯電粒子に働く力は F_p , F_q , F_{EHD} であり、粒子の移動方向はこれらのベクトル和によって決まることが証明された。ホール流入率の低風速時に差が生じたのは、PIV 解析が 3次元であるのに対し、シミュレーションでは 2次元解析で乱流を考慮していないためだと考えられる。

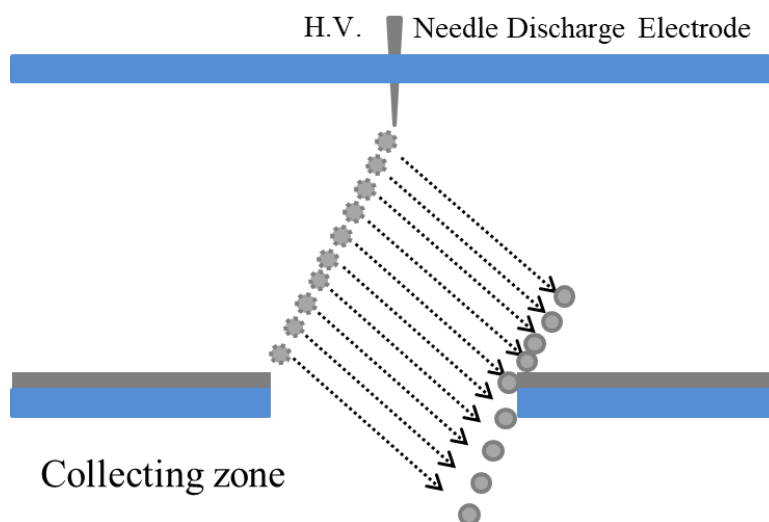


図 5-3. 捕集モデル A におけるホール流入率算出方法

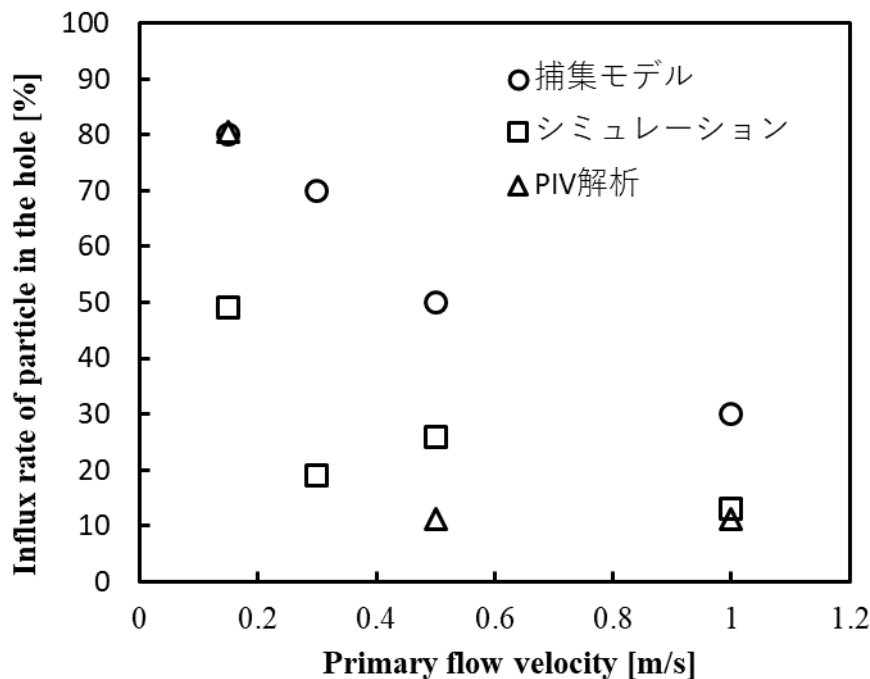


図 5-4 ホール流入率の比較

5-4 帯電粒子のホール流入角度

ホール型 ESP では、電界がゼロのケーシング内に帯電粒子を誘導することで、再飛散現象の抑制をすることができる。このことから、ホール型 ESP では、ホール流入率の増加が集塵性能の向上に繋がると考えた。集塵実験で使用するホール型 ESP は、放電電極とホールが複数存在する。しかし、装置の改良には、コロナ放電を発生させる放電電極とホール電極一対のみに着目して検討を行う必要がある。そこで、針電極とホール一対のモデルを用いて、流体解析と粒子挙動解析からホール流入率の向上について検討をする。モデルは 4 章で用いたホール型 ESP を模擬し、針電極とホール一対のモデルとした。シミュレーション解析における流体分布を図 5-5 に示す。主流体速度は 0.5 m/s、印加電圧は 7 kV、電圧印加から 2 秒後の結果である。図中の濃淡は最小値を黒色、最大を白色とした。針先端から生じたイオン風により、ESP 内の主流体がホール電極方向へと向きを変えている。しかし、ホール内に流入する流体速度は遅く、主流の大部分がホール電極上に衝突し、ESP 流出方向へと流動している。

続いて、PIV 実験における粒子画像を図 5-6 に示す。トレーサー粒子は Talc、主流体速度は 0.5 m/s、印加電圧は 7.5 kV である。(a)は粒子画像、(b)は粒子画像を PIV 解析した画像で

ある。図中の白いトゲが針電極、画像の中央がホール、ホールの両端がホール電極、白い斑点がトレーサー粒子である。コロナ放電によって帯電した粒子は、イオン風とクーロン力の作用を受けホール電極へ移動しているが、主流体速度 0.5 m/s では、ホールに流入する粒子の量が少ない。これは、主流体速度による ESP 流出方向への力が支配的なためである。(b) の PIV 解析した画像では最も粒子移動速度が速いと考えられる主流体が、ホール電極上へと衝突している様子が確認できる。これは、流体解析と同様の流れである。

図 5-7 にホール流入率の放電電流特性を示す。主流体速度は 0.5 m/s とした。どの放電電流値においても、帯電粒子は約 10 % しかホールに流入していない。前述したように、粒子のホール流入条件を満たしていないため、ホール流入率が低くなった。

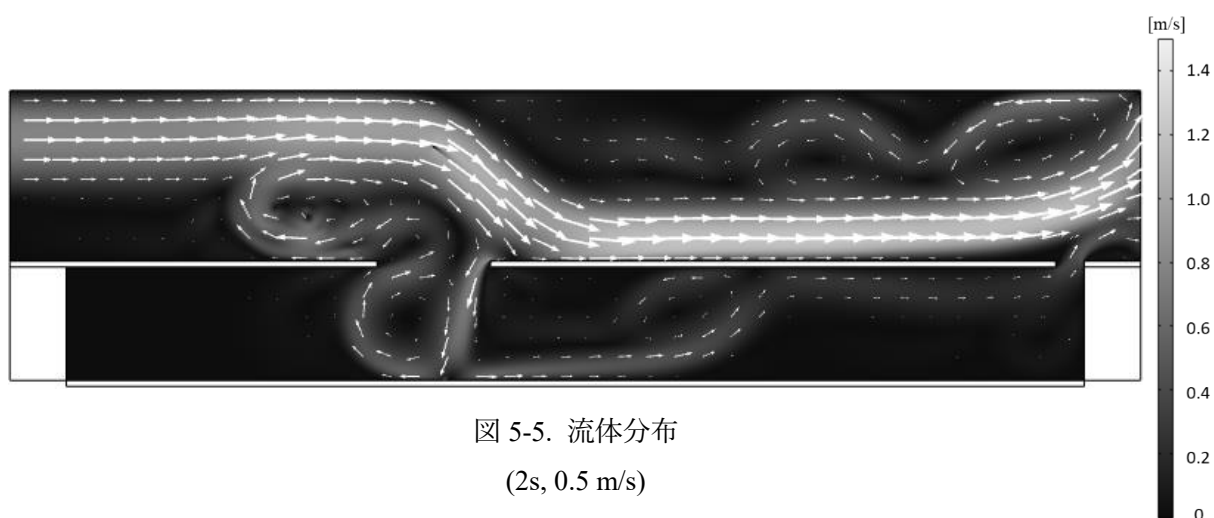
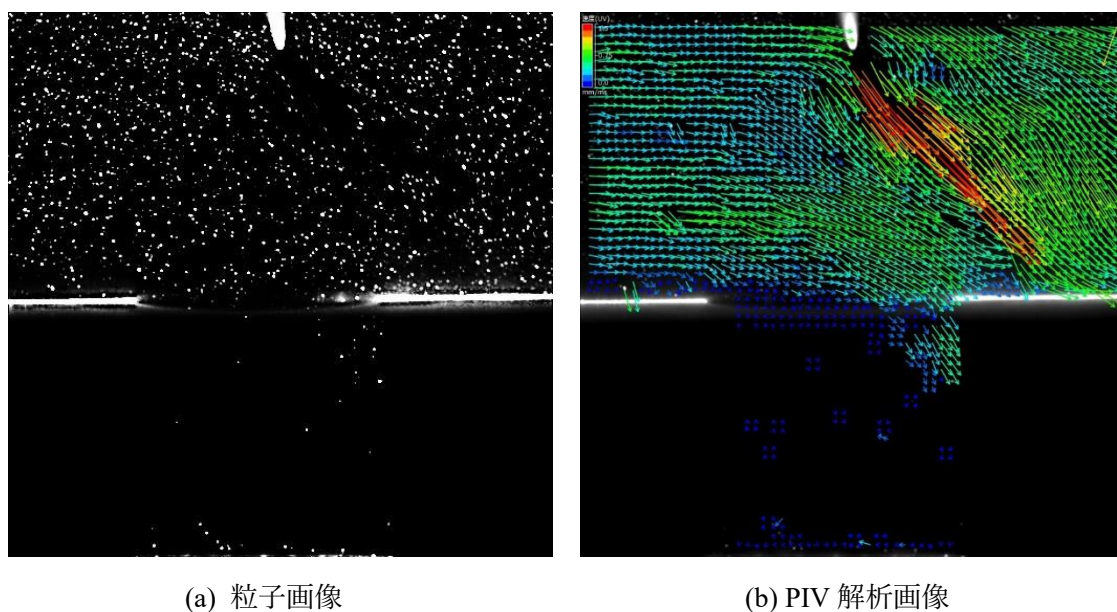


図 5-5. 流体分布
(2s, 0.5 m/s)



(a) 粒子画像

(b) PIV 解析画像

図 5-6. 粒子挙動解析
(Talc, 0.5 m/s)

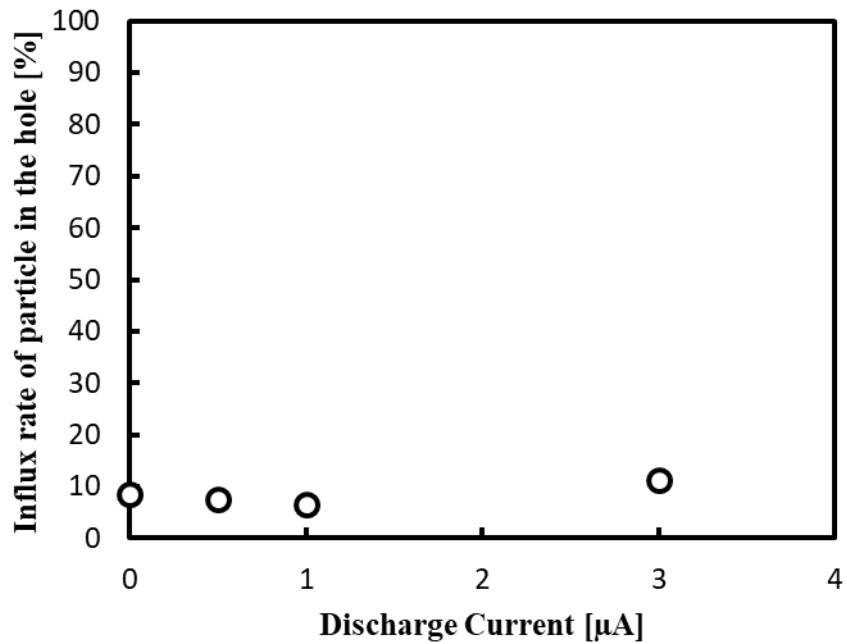


図 5-7. ホール流入率の放電電流特性
(Talc, 0.5 m/s)

これらの結果を踏まえ、ホール型 ESP 内の流体と粒子のホール流入角度について検討を行う。角度は ESP 流出方向を 0° 、電界方向を -90° とした。図 5-5 の流体分布では、針電極先端からホール電極上へと向かう主流の角度は -40° であった。また、PIV 解析の結果から、ホール電極上へ移動する帯電粒子の角度は -50° となった。捕集モデル A から、帯電粒子はクーロン力とイオン風の影響を受けて針先端付近から移動することが明らかになっている。ここで、ホール流入率が向上する最適な電極構成を検討すると、針電極をホールの中心から 10~15 mm ESP 流入方向へ移動することで、粒子がホールに流入するために必要な力が低下すると考えた。そこで、針電極位置を移動した針一対モデルを製作し、ホール流入率の比較を行った。

5-5 ホール流入率と針電極位置の関係

図 5-8 に針電極とホールの位置関係を示す。ホールの中心に針が位置するときを Center, ESP 流入方向に -5, -10, -15 mm 移動したときを Front として表した。図 5-9 に針位置 Front 10 mm における粒子画像を示す。主流体速度は 0.5 m/s とした。針位置を Front に移動することで、ホールに流入する粒子の量が増えていることが確認できる。これは、針電極から発生するイオン風のコアが ESP 流入方向へと移動したためである。

図 5-10 にホール流入率と針電極位置の関係を示す。印加電圧は 7.5 kV, 主流体速度は 0.5 m/s とした。針電極を Front に設置することで、ホール流入率が向上した。また、ホール流入率が最も高いのは Front 10 mm であった。捕集モデル A において、針位置を Front に 10 mm 移動すると、針直下の粒子のホール流入条件が 6.36×10^{-10} N から 5.70×10^{-10} N に下がる。このことから、ホール流入率が増加した。Front 15 mm では、ホール電極の両端部ではなく、片方のエッジにイオン風が吹く。そのため、ホール流入率が減少した。

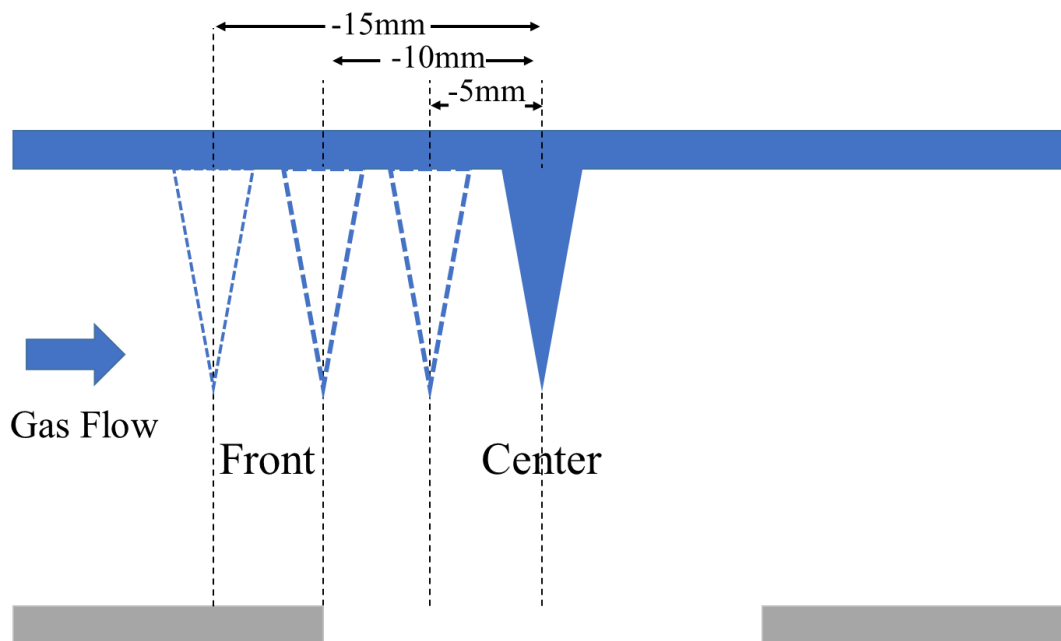


図 5-8. 針電極とホールの位置関係
(針一對モデル)

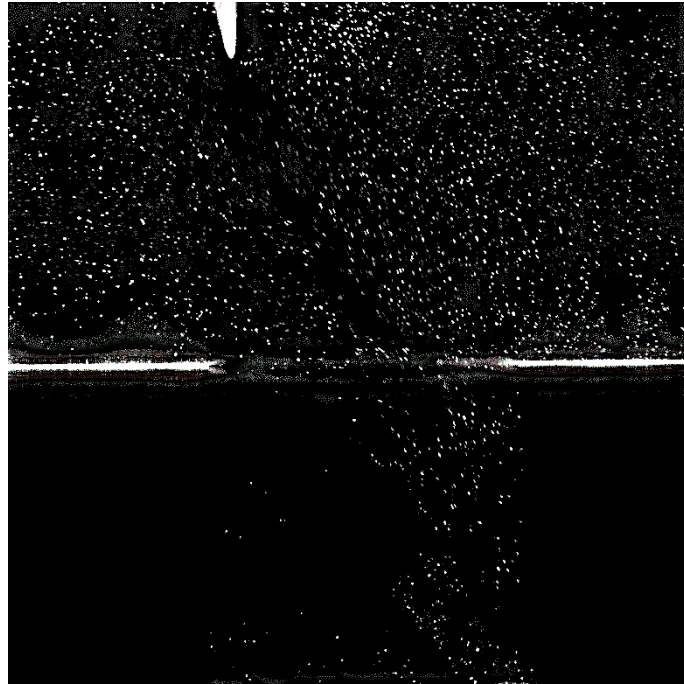


図 5-9. 粒子画像
(Front 10 mm)

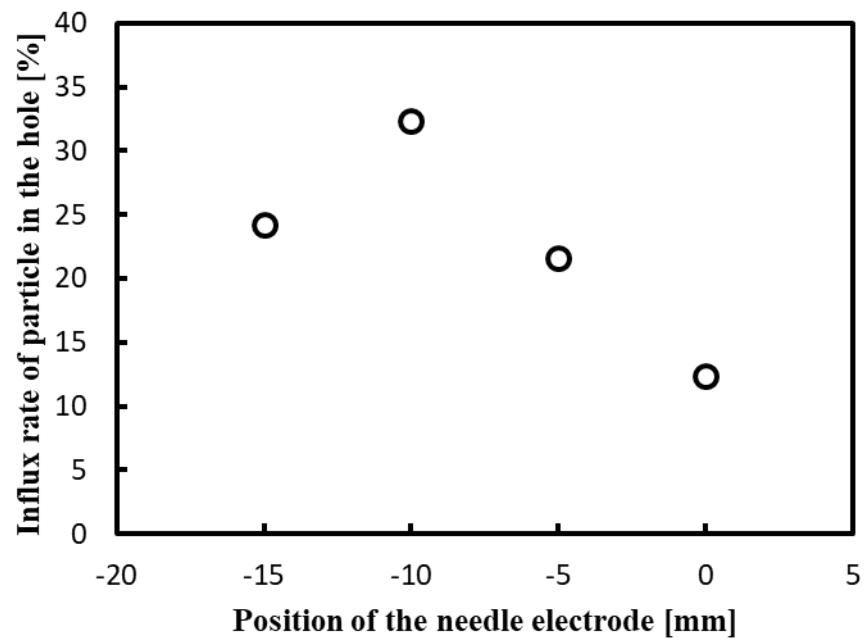


図 5-10. 針一對モデルにおける集塵に最適な電極構成の検討

5-6 ホール型 ESP における再飛散抑制に最適な電極構成

針対ホール一対のスモールモデルでは、針電極を Front に設置することで、ホール流入率の向上が確認できた。針位置効果は一対モデルだけではなく、針電極が複数設置してあるモデルにおいても有効だと考えられる。このことから、ホール型 ESP による針位置特性を検討した。ここでは、針電極の位置を ESP 流入方向から ESP 流出方向の Back まで変化させ集塵率を測定した。図 5-11 に針電極とホールの位置関係を示す。針が ESP 流出方向に+5, +10, +15 mm 移動した時を Back として表した。

図 5-12 にホール型 ESP における集塵に最適な電極構成の検討を示す。縦軸は全粒径の重量集塵率の比である。Center (0 mm)は毎回測定しており、その集塵率を基準とした各針電極位置の集塵率を表している。値が 1 の場合は、Center と同じ集塵率を表す。ESP の稼働時間は 72 分、放電電流値は 1 mA とした。集塵率は、針電極を Front に移動することで増加した。図 5-13 にケーシングの画像を示す。Center に比べて、Front の方がケーシングに多くの粒子が捕集されている。これは、前述したように、粒子がホールに流入するために必要な力が低下したためである。このことから、再飛散現象が抑制され、集塵率が向上した。針電極が複数設置してある場合においてもホール流入率が増加し、集塵率が向上することが明らかとなった。また、針対ホール一対モデルと同様に、Front 15 mm では集塵率が減少した。針位置は Front に動かすほど集塵率が向上するのではなく、最適値が存在することが明らかとなった。一方、針位置 Back では集塵率が減少した。これは、針位置を流出方向へ移動することで、ホール電極上に粒子が捕集されたことが原因である。ケーシング画像からも、ホール内に流入した粒子量が少ないことが確認できる。ホール電極上に堆積した粒子は、誘導帯電により逆極性となる。また、粒子は電極上に凝集し大きくなる。ホール電極上で凝集肥大した粒子は、針電極方向へのクーロン力による剥離力と、主流体による剥離力、そして針電極近傍から発生するイオン風の剥離力を受ける。針位置が Back だと、ホール内に流入する主流体も少なくなるため、Front に比べて剥離力が高い。このことから、再飛散現象が生じ、集塵率が減少した。

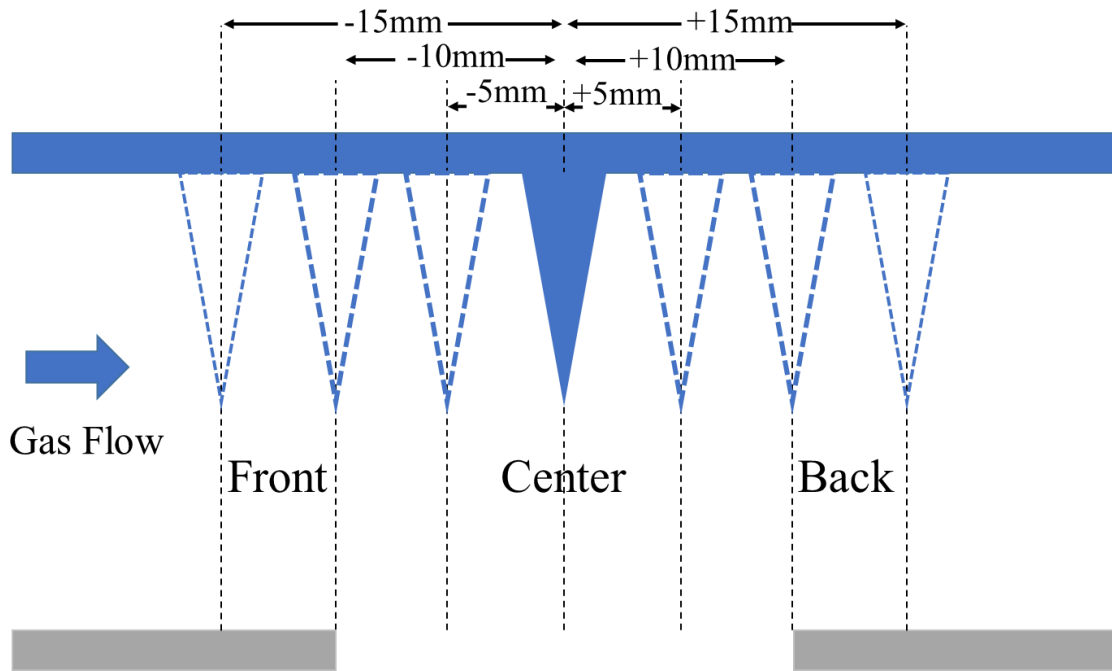


図 5-11. 針電極とホールの位置関係

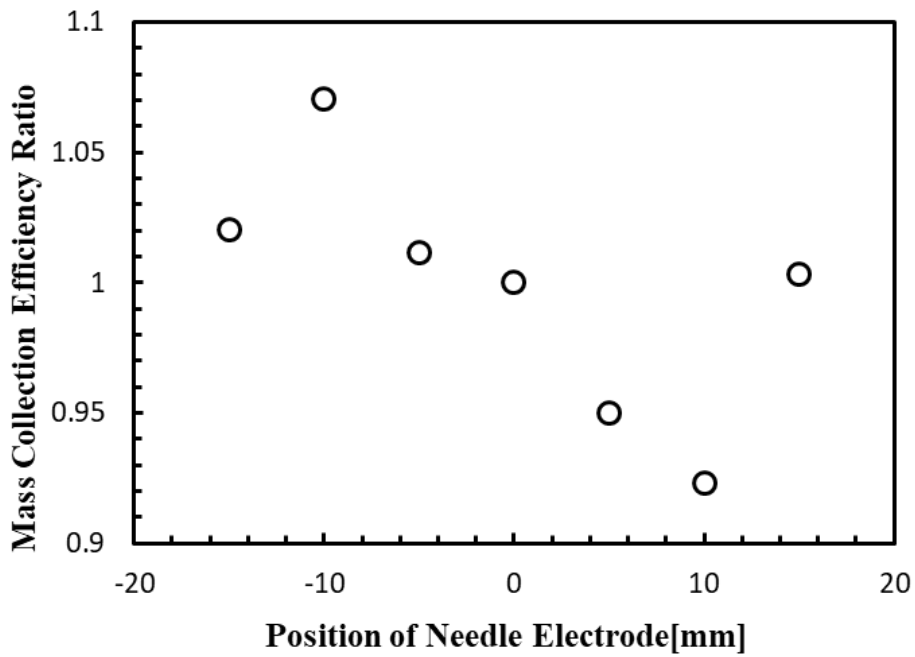
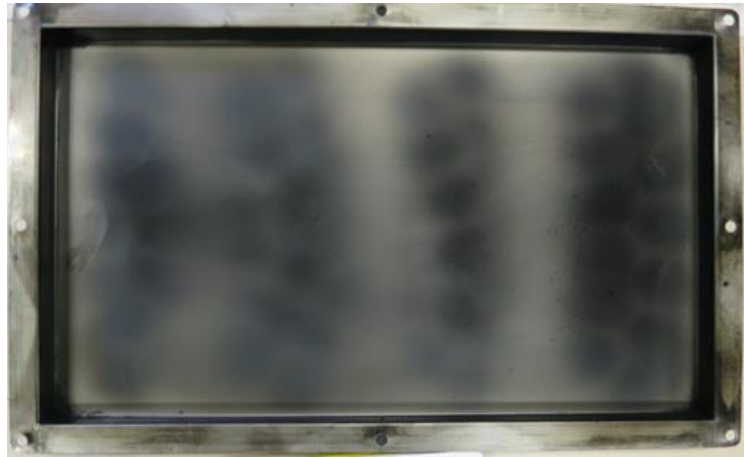


図 5-12. ホール型 ESP における集塵に最適な電極構成の検討 (0.5 m/s)



(a) Center



(b) Front



(c) Back

図 5-13. ケーシング画像

粒子の移動方向は主流体速度によって変化する。そのため、異なる主流体速度における針位置の影響について検討した。図 5-14 に主流体速度 1 m/s における集塵に最適な電極構成の検討を示す。集塵率は、Front 方向に針を移動することで減少した。また、Back+10 mm において、集塵率が最も高い。この原因について、ホール電極表面の状態から検討した。

図 5-15 に Front -5 mm と Back +10 のホール電極の画像を示す。画像は針電極面のホール電極表面を観測している。粒子は捕集されると黒く映るため、画像を 256 階調中、40 を閾値として二値化処理を行った。そのため、二値化画像の黒色は粒子が多く捕集されている箇所、白色は粒子の捕集量が少ない箇所を示している。Front -5 mm において、ホールの手前に粒子が多く捕集されていることが確認できる。これは、針電極を Front に移動することで、針電極とホールのエッジが近づき、エッジに向かってイオン風が吹いたためである。粒子の多くはケーシングに捕集されるが、一部はホール電極表面に集塵される。ホール電極表面に粒子が堆積すると再飛散現象が生じやすくなるため、Front において集塵率が減少した。主流体速度 0.5 m/s においても、エッジ付近に粒子が付着しているが、主流体速度による剥離力が少ないため、集塵率が減少しなかったと考察した。一方、Back においても、エッジに向かってイオン風は吹き付けるが、主流体の影響によって粒子はホールではなく、集塵電極上に向かう。このことから、粒子は電極上に均一に捕集された。粒子が均一に捕集されると、凝集粒子の粒径は Front に比べて小さくなり、剥離力も小さい。このことから、Back の集塵率が高くなった。

以上の結果から、主流体速度によって、集塵に最適な針位置が変化することが明らかとなった。主流体速度が増加すると再飛散現象が発生しやすくなり、針位置と主流体速度によって粒子付着位置が変化する。このことから、主流体速度によって各針位置における集塵率が変化した。また、本研究で使用したホール型 ESP の最適な放電電極位置は、主流体速度 0.5 m/s の時、Front 10 mm であり、主流体速度 1.0 m/s の時、Back 10 mm であることが明らかとなった。

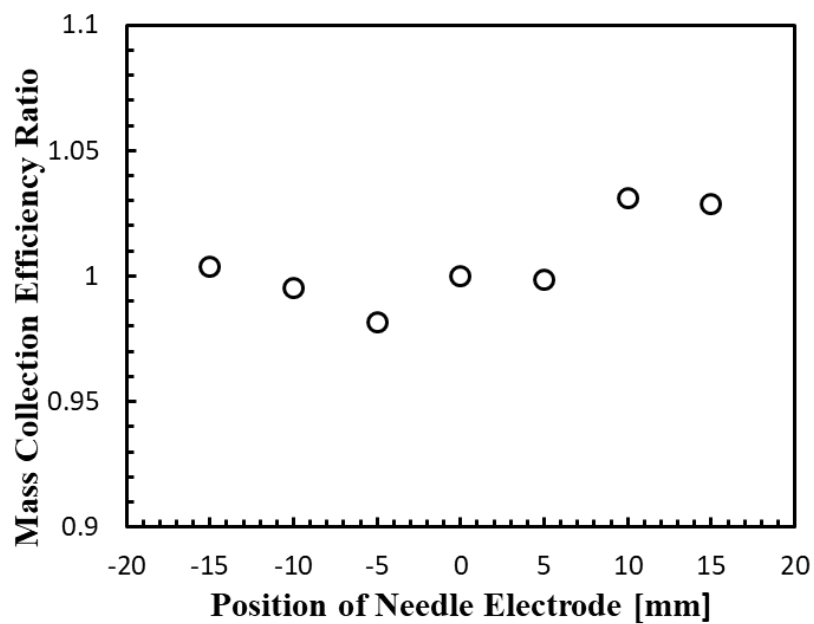


図 5-14. ホール型 ESP における集塵に最適な電極構成の検討 (1.0 m/s)

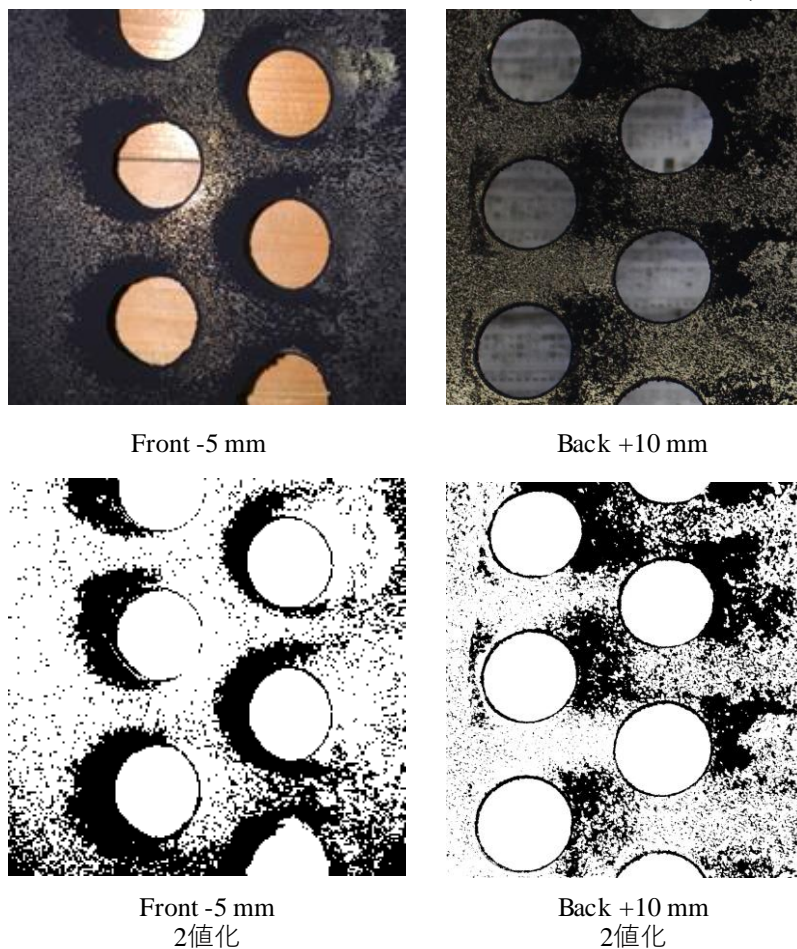


図 5-15. ホール電極画像 (1.0 m/s)

5-6 結言

ホール型 ESP では、再飛散現象の抑制にホール流入率が寄与している。そこで、ホール型 ESP を改良するため、捕集モデル A の妥当性を確認し、針電極とホール一対のモデルを用いてホール流入率の向上について検討を行った。また、解析から得られたデータから、新たな電極構成のホール型 ESP を検討し、集塵実験を行った。本研究で明らかになったことを以下に述べる。

1. 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。
2. 実現象である PIV 解析のホール流入率とシミュレーションのホール流入率の傾向が概ね一致した。このことから、捕集モデル A の妥当性が確認できた。
3. 帯電粒子がホール電極方向へと移動する角度は -50° であり、針位置を ESP 流入方向へ移動する電極構成を提案した。
4. 針一対モデルにおいて、集塵に最適な針位置は Front 10 mm であった。
5. ホール型 ESP に針一対モデルの実験結果を反映した結果、ホール流入率が向上した。ホール型 ESP における最適な放電電極位置は主流体速度 0.5 m/s の時、Front 10 mm であり、主流体速度 1.0 m/s の時、Back 10 mm であることが明らかとなった。

参考文献

- (1) 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, Vol. 136, No. 12, P. 797-803, (2016)

第6章 結論

近年、船舶用ディーゼル機関から発生する排ガスによる海洋汚染問題から、電気集塵装置 (Electrostatic Precipitator: ESP) の需要が高まっており、従来から問題視されていた ESP 内の再飛散現象を抑制するホール型 ESP の開発が行われた。著者はホール型 ESP の再飛散抑制効果および高効率化に着目し、研究を行った。以下に本研究で得られた結論を示す。

2章では、ホール型 ESP のモデルにおける電界解析、流体解析、粒子挙動解析を行った。電界解析では、ホール型 ESP は従来の針対平板構造の ESP (従来型 ESP) に比べて電界強度が非常に高いことを示した。これは、ホールによるエッジ効果によるものであり、捕集モデル A において、帯電粒子に働く F_e が強くなるホール型 ESP が捕集に適していることを明らかにした。流体解析では、 F_p に F_{EHD} の力が加わり、主流体がホール内に流入した。また、流入角度は F_p の増加にともない $-60 \sim -20^\circ$ に変化した。粒子挙動解析では、ホール型 ESP 内の帯電粒子がホール内へと流入する様子を示した。また、捕集モデル A における考察として、針直下の粒子に加わる F_p が $4.33 \times 10^{-10} \text{ N}$ よりも小さい時、粒子はホールに流入し、 F_p が大きくなる条件ではホール流入率は低くなると考察した。主流体速度によるホール流入率への影響を検討し、主流体速度が遅い場合、粒径が大きいとホール流入率が高い値を示すことが確認できた。一方、粒径が小さいとホールのエッジや集塵電極上に捕集される粒子量が増え、流体に比べてクーロン力が支配的となることが明らかにした。しかしながら、シミュレーションにはいくつかの課題も確認でき、本解析では空間電荷密度と電界計算の連成ができていないため、静電界中の粒子挙動として解析していることが課題として挙げられた。また、粒子を針電極付近に飽和帯電した状態で配置していることも課題の 1 つである。本来、粒子は ESP 入口から流入し、徐々に帯電しながらホールへ流入する。このような粒子挙動解析を今後の課題とした。

3章では、ホール型 ESP 内部の粒子挙動解析を目的とし、粒子可視化システムを用いてホール型 ESP 内部の粒子挙動を可視化した。また、粒子画像流速測定法 (PIV) 解析によって粒子の移動速度、移動角度を導出し、ホール流入率の向上に適した放電電流値や主流体速度について検討をした。粒子可視化システムを用いて、粒子がイオン風およびクーロン力の作用 F_e を受け、ホール内部に流入する様子を確認した。このことから、ホール型 ESP では、再飛散を抑制する捕集空間に帯電粒子を誘導できることが明らかにした。粒子挙動は F_e および F_p に依存しており、 F_e の増加により粒子の移動速度が増加することを示した。また、粒子移動速度が最も速い領域が針電極の直下であり、銅粉 (Cu) の粒子移動速度が最も速いことも示した。このことから、粒子性状によって電界方向への粒子移動速度 W_{th} が変化することが明らかになった。ホール流入率の算出から、ホール型 ESP の定量的な評価を行い、放電電流値の増加によってホール流入率が向上し、主流体速度の増加により減少することを示した。

第4章では、ホール型 ESP を船舶用ディーゼル機関で実用化するため、再飛散現象の抑

制効果の実証を行った。また、ホール型 ESP の高効率化を目的とし、集塵率に対する放電電流値および排ガス温度の影響を検討した。イオン風測定実験から、イオン風が最も強く吹く条件はホール径 20 mm、電極間距離 20 mm であることが明らかとなった。大粒径粒子において、ホール型 ESP は従来型 ESP に比べて集塵率が 92.1% 向上した。このことから、ホール型 ESP では大粒径粒子の集塵率低下が抑制できており、ホール型 ESP による再飛散現象の抑制効果が明らかとなった。放電電流値の影響として、小粒径と中粒径では放電電流値の増加に伴い集塵率は向上することを示した。また、大粒径粒子は小粒径や中粒径に比べて飽和帯電量が多く、再飛散現象が生じやすいため、集塵率が減少することも示した。このことから、ホール型 ESP ではナノ粒子の集塵性能が高いことが明らかとなった。排ガス温度の影響として、140°C では集塵率は極小値となり、100°C で極大値となることを示した。これは、粒子性状による再飛散現象の抑制効果と考えられ、ホール型 ESP では、放電電流値 1 mA、排ガス温度 100° の運転条件において集塵効率が高くなることが明らかとなった。最後に、ホール型 ESP における放電の局在化を考慮した理論集塵率の修正式を提案し、実験値と比較して良い一致が見られることを示した。

第 5 章では、シミュレーション解析、PIV 解析、ホール型 ESP における集塵実験の結果から、ホールに粒子が流入する最適な電極構造を提案した。また、最適な電極構造を用いて集塵実験を行い、ホール流入率および集塵率に対する最適な電極構成について検討した。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。また、捕集モデル A の妥当性の確認として、捕集モデル、PIV 解析、シミュレーションのホール流入率を比較した。結果として、実現象である PIV 解析とシミュレーションのホール流入率の傾向が概ね一致した。このことから、帯電粒子に働く力は F_p 、 F_q 、 F_{EHD} であり、粒子の移動方向はこれらのベクトル和であることが明らかとなった。PIV 解析から、主流体速度 0.5 m/s で粒子がホール電極方向へと移動する角度が -50° であることを示した。このことから、放電電極でありイオン風の発生源である針電極を ESP 流入方向へ 10~15 mm 移動することで粒子がホールに流入するために必要な力が低下すると考察し、新たな電極構成を提案した。その結果、針一対モデルにおいて、針電極位置を ESP 流入方向へ 10 mm 移動するとホール流入率が 20% 向上することが明らかとなった。また、集塵実験で用いたホール型 ESP へ電極構成を反映させ、主流体速度 0.5 m/s では針位置を Front 10 mm、1 m/s では針位置 Back 10 mm にすることで集塵率が向上することを示した。このことから、ホール型 ESP における最適な放電電極位置は主流体速度 0.5 m/s の時、Front 10 mm であり、主流体速度 1.0 m/s の時、Back 10 mm であることが明らかとなった。

以上の結果から、従来型 ESP で問題視されていた再飛散現象を抑制するホール型 ESP の再飛散抑制効果の検証および高効率化に成功したと言える。また、シミュレーション解析、PIV 解析、実証実験と 3 つの研究からホール型 ESP について検討を行ったことで、ホール型 ESP の課題である高風速下における運転も明らかとなり、流体分布および粒子挙動解析から新たな電極構成を提案することができた。

本研究で使用したホール型 ESP を船用エンジンからの大容量排ガス処理に適用する場合、ESP のスケールを考慮する必要がある。例えば、対象とする排ガスの排出量を 6,000 Nm³/h (1MW) とすると、排ガスを流速 1.0 m/s で処理するには、ESP の断面積は 1.67 m² 必要となる。これは、本実験に用いた ESP の 119 セットに相当し、縦 1200 mm、横 1380 mm、ガス流方向に 420 mm のスペースが必要となる。船舶の機関室は装置のスペースが限られているため、今後は高風速処理に対応したホール型 ESP の検討が必要である。本研究では風速 1 m/s までの検証だったが、今後は 5 m/s, 10 m/s と更なる高風速下でのホール型 ESP における解析、実証実験を行い、ホール型 ESP の実用化を期待したい。

謝辞

本研究の遂行にあたり、素晴らしい研究環境を提供して頂き、実験および本論文作成において懇切丁寧なご指導ご鞭撻を賜りました東京都市大学教授、江原由泰博士に深く感謝の意を表すとともに心より御礼申し上げます。

本論文作成において御指導を賜りました神奈川工科大学教授、瑞慶覧章朝博士、東京都市大学名誉教授、伊藤泰朗博士、職業能力開発総合大学助教授、川田由弘博士に心より謝意を表します。

本論文作成にあたり、大変有益な御意見を戴きました東京都市大学准教授、鳥居肅博士、同教授、岩尾徹博士、同教授、澤野憲太郎博士、同教授、大上浩博士に深く御礼申し上げます。

本研究の共同研究者であり、実験および本論文作成において御指導を戴きました富士電機株式会社、高橋武男博士、川上一美博士に深く御礼申し上げます。

本研究の共同研究者であり、豊富な経験から大変貴重な御意見を多数戴きました、富士電機株式会社、乾貴誌氏、青木幸男氏、榎本譲氏、豊角浩之氏に深く感謝致します。

多くの助言、相談事にも快く回答して戴きました神奈川工科大学瑞慶覧研究室の方々に深く御礼申し上げます。

東京都市大学電気応用研究室の修士論文および卒業論文として本研究の遂行に尽力されご協力戴いた大橋雅弘氏、村田晴香氏、董志増氏、茨木駿兵氏、横山駿氏、柳川鴻太氏、上條貴史氏、下田正也氏、田中直輝氏、鈴木菖平氏、島敏樹氏、内山美樹氏、片山啓氏、板倉雄士氏、袁振東氏、藤井厚希氏、大和田葵氏に謝意を表し、御礼申し上げます。

最後に、今までの人生 27 年間で全ての面で支えてくれた、父、宮下幸男、母、まやに深く御礼申し上げます。