

パルス放電型電気集じん装置を用いた
高温ディーゼル排ガス処理に関する研究

2023 年

袁 振 東

-目次-

第1章 序論

1-1 社会背景	1
1-2 研究背景	5
1-3 研究現状	9
1-4 研究目的	20
1-5 研究概要	21
参考文献	24

第2章 高温における直流放電型 ESP の異常現象

2-1 緒言	28
2-2 実験方法	29
2-2-1 実験装置	29
2-2-2 電極構成	35
2-2-3 集じん率の計算方法	35
2-3 高温雰囲気における直流放電特性	39
2-3-1 電流に対する温度と湿度の影響	39
2-3-2 放電電極特性の検討	39
2-3-3 放電ギャップ特性	43
2-3-4 棘本数と放電電流の関係	43
2-3-5 集じんに対する電極数の影響	47
2-4 結言	49
参考文献	50

第3章 高温に対応するパルス放電型 ESP 内の粒子挙動解析

3-1 緒言	51
3-2 実験方法	52
3-2-1 実験システム	52
3-2-2 ESP の解析モデル	52
3-3 針対平板電極構成における粒子挙動解析	54
3-3-1 電流電圧特性	54

3-3-2	粒子の可視化と PIV 画像	54
3-3-3	平均粒子移動速度、粒子移動角度	58
3-3-4	パルス周波数特性	59
3-3-5	パルス立ち上り時間特性	64
3-3-6	主流体速度特性	64
3-4	ワイヤ対平板電極構成における粒子挙動解析	68
3-4-1	電流電圧特性	68
3-4-2	粒子の可視化と PIV 画像	68
3-4-3	粒子移動速度における諸特性の影響	72
3-5	結言	75
	参考文献	76

第4章 パルス放電型 ESP における高温放電特性

4-1	緒言	77
4-2	実験方法	78
4-2-1	実験システム	78
4-2-2	放電発光観測システム	78
4-2-3	パルスエネルギーの計算	81
4-3	負極性における高温パルス放電特性	85
4-4	正極性における高温パルス放電特性	94
4-5	放電発光の観測	99
4-6	結言	103
	参考文献	104

第5章 ディーゼル排ガス処理におけるパルス放電型 ESP の温度の影響

5-1	緒言	105
5-2	実験方法	106
5-3	負極性パルス型 ESP の集じん特性	110
5-4	正極性パルス型 ESP の集じん特性	116
5-5	結言	120
	参考文献	121

第6章 結論

122

謝辭 124

研究歷 125

第1章 序論

1-1 社会背景

地球温暖化⁽¹⁾⁽²⁾、大気汚染、砂漠化⁽³⁾⁽⁴⁾、越境汚染⁽⁵⁾⁽⁶⁾、北極における氷原の融解などは近年世界各国の問題となっている。表 1-1 は主要温室効果気体の大気中濃度を示す⁽⁷⁾。温室効果ガスの増加についての起因は 18 世紀後半から始めた産業革命と考えられる。産業革命は 18 世紀後半にイギリスから始まった技術革新による産業構造の変化及び経済発達のことであり、第 1 次と第 2 次、今は第 4 次産業革命まで起きている。そのきっかけで、石炭、蒸気機関を動力源とする軽工業や石油を動力源とする重工業が高速発展して来た。産業革命までの人類社会の発展は、地球上の自然循環に依存していたが、産業革命以降、人類は石炭・石油などの化石燃料に全面的に依存し、大量消費してきたため、大気中に含まれる汚染物質の濃度は産業革命前に比べ大幅上回ったことが分かった。これらは経済活動の活性化に伴うことが原因と考えられる。具体例として、電力需要の増加に伴い、火力発電所の増設や多くの発電が必要とした。また、人間の生活品質が向上した上で、自動車の需要が増加したことや世界各国の経済活動や貿易の増加と共に船や航空などの輸送が増えた。その結果、大気中のエアロゾル、硫黄酸化物 (SO_x)、窒素酸化物 (NO_x)、ばいじん、有害物質、粉じん、一酸化炭素 (CO)、炭化水素などが含まれたガスが多く排出されていることは現状である⁽⁸⁾。また、これらの有害物質は地球環境に悪影響を及ぼすだけでなく、人間の健康にも影響を与えている。表 1-2 は人間に対して大気汚染の慢性と急性影響を示している。大気汚染対策は主として硫黄酸化物 (SO_x) や窒素酸化物 (NO_x) などのガスになされていたが、最近の疫学的研究は浮遊粒子状物質ことに超微粒子が人の健康により傷害的であることの報告もある。粒子状物質はその粒径に応じて、粒径が 10 μm より小さい粒子が粒子状物質 PM₁₀、粒径が 2.5 μm より小さい粒子が微小粒子状物質 PM_{2.5} に分類されている。また、粒径が 0.1 μm より小さいナノサイズの超微少粒子は UFP (ultrafine particle) と呼ばれている⁽⁹⁾。PM10 値は慢性咳、喘鳴などの呼吸器症状の頻度や、小児の気管支炎・喘息による入院日数と関連し、肺機能測定によっても、気流障害が認められている。超微小粒子は PM10、PM2.5 より人体への健康被害があり、粒径が小さくなるにつれて、酸化還元活性や活性酸素種の生成が高くなり、発がん性を有する多環芳香族炭化水素を含む割合が多くなる⁽¹⁰⁾。したがって、大気汚染物質の排出抑制が急務であり、改善しなければならない。

そして、大気汚染物質の発生源としては、工場などの固定発生源や自動車、船舶などの移動発生源と分けられる。移動発生源の一つである船舶のディーゼルエンジンから排出されるガスは濃度が高く、温度も非常に高い。排ガス濃度は使用された燃料や燃焼効率などによるもので、図 1-1 に示したように多く成分が含まれている、特に浮遊粒子状物質 (Particulate Matter: PM) が問題視となっている⁽¹¹⁾。また、大気エアロゾル炭素については、

大きく無機炭素(inorganic carbon: IC)と有機炭素(organic carbon: OC)に分類される。無機炭素は更に元素状炭素(elemental carbon: EC)と炭酸塩(carbonate carbon: CC)に分類される。ECは黒色炭素(black carbon: BC)とも呼ばれるが、完全には同義ではない。熱的分離ではEC、工学的分離ではBCと呼び、大気汚染物質はEC、気候変動ではBCを用いる。どちらも燃焼過程によって大気中に放出されるものである。一般に、燃焼過程によって生成する黒色及び黒っぽい物質はスス(shoot)と呼んでいる。光吸収に関する大気エアロゾル炭素は光吸収炭素(light-absorbing carbon: LAC)と呼ばれる⁽¹²⁾。

排ガス温度は負荷により変化するため、温度は300°Cから450°Cまで上昇する特性の研究もあった⁽¹³⁾。ディーゼルエンジンから排出される粒子の仮想的な粒径分布を図1-2に示す⁽¹⁴⁾。質量の大部分は、粒径0.1~0.3 μm の範囲にある。この範囲の粒子は、累積モード(accumulation mode)と呼ばれ、炭素質の粒子と吸着した有機物質が主成分である。個数分布では、大部分が粒径0.005~0.05 μm の範囲(核モード:nuclei mode)にある。これらは排気が希釈、冷却される期間に生成され、揮発性の有機物質、硫酸化合物から成り、固体炭素や金属化合物を含むものと考えられている。核モード粒子は、通常、質量では1%~20%に過ぎないが、粒子個数では90%以上を占める。船舶は航行時と停泊時にエンジンとボイラから大気汚染物質を排出するため、国際海事機関(International Maritime Organization: IMO)では、その排出基準(1973年の船舶による汚染の防止のための国際条約に関する1978年の議定書(MARPOL条約)附属書VI)を踏まえ、海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律(昭和45年法律第136号)により規制されている。

NO_xとSO_x規制について、NO_x規制値は、新造船に搭載されるエンジンの定格回転数で決められている。2011年以降の新造船はそれ以前の一次規制よりも約15~22%の排出量削減が課せられ、更に、排出規制区域(Emission Control Area: ECA)においては、2016年以降の新造船に対して一次規制より約80%削減の三次規制が適用されている。SO_xについては燃料中の硫黄分濃度で規制されている。現在規制値は3.5%(C重油)であるが、2020年以降は0.5%に強化されることが決まっている。指定海域においては、2015年より1.0%(A重油相当)から0.1%(軽油相当)に強化された。

CO₂については、排他的経済水域を越えて航行する総トン数400t以上の船舶に対し船舶エネルギー効率マネジメントプランの策定が義務付けられ、新造船に対してはエネルギー効率指標が導入されている。

PMについては、原因物質のひとつであるSO₂の濃度の削減、つまり、SO_xの規制により排出量の削減が期待されている。カーボンについては、IMOは北極圏に及ぼす影響について調査を行い、規制の必要性について検討するとともに、技術的検討を進めている。現時点でカーボンについての排出規制はまだ発効されていないが、近いうちに、その規制が定められると考えられる。この状況に応じて、前文で述べたような硫黄分の少ない燃料油を使用するか、または同等性能を有する排ガス浄化装置(Exhaust Gas Cleaning Systems: EGCS)を船舶に搭載することが必要となる⁽¹²⁾。

表 1-1. 主要温室効果気体の大気中濃度

	CO ₂	メタン	N ₂ O	フロン11	フロン22	四フッ化炭素
産業革命以前の濃度	280 vol ppm	700 vol ppb	275 vol ppb	0	0	0
1994年の濃度	358 vol ppm	1720 vol ppb	312 vol ppb	268 vol ppt	110 vol ppt	72 vol ppt
温暖化係数(100年)						
各温室効果気体が100年間に及ぼす温暖化の効果 (CO ₂ を1とした場合)	1	21	310	3800	1500	6500

(注) vol ppmは容積比で100万分の1(10⁻⁶), vol ppbは同10億の1(10⁻⁹), vol pptは同1兆分の1(10⁻¹²)

表 1-2. 人間に対して大気汚染の影響

急性影響(短時間暴露)	慢性影響(長時間暴露)
・喘息発作回数の増加	・肺機能障害(主に閉塞性障害)
・慢性呼吸器疾患患者の呼吸器症状の増悪	・慢性気管支炎など
・一過性の肺機能の変化	・肺がん

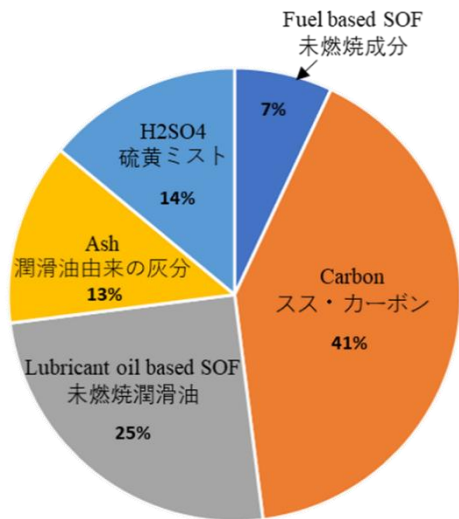


図 1-1. ディーゼルエンジン PM 成分

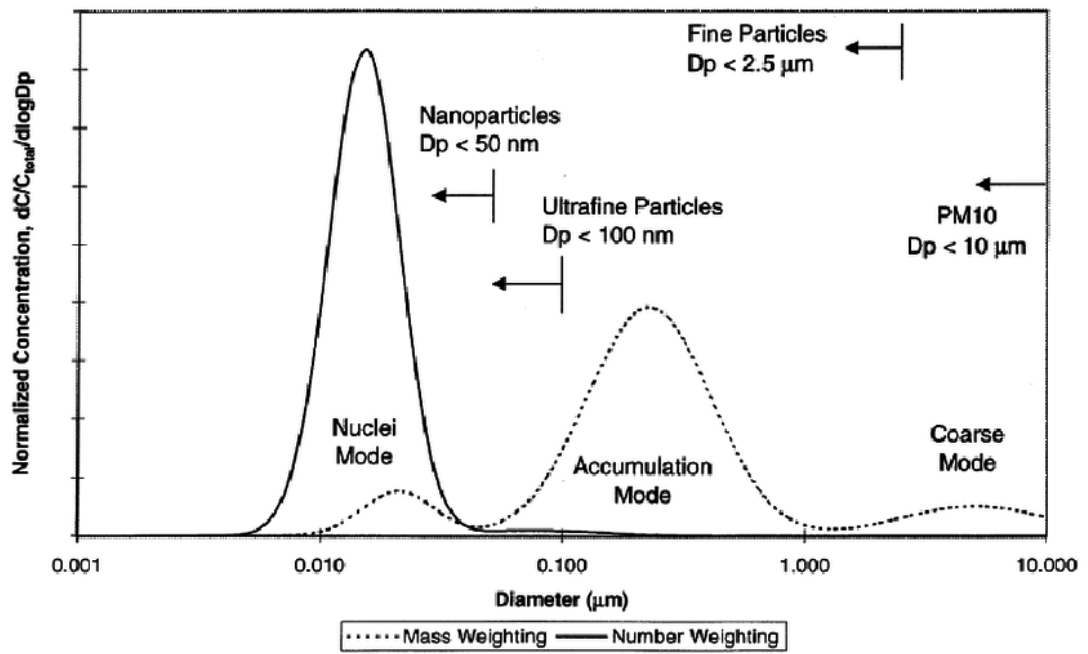


図 1-2. ディーゼルエンジンから排出される粒子の仮想的な粒径分布

1-2 研究背景

排ガス浄化技術として、多くの種類がある。その中で排ガス再循環技術、図 1-3 に示したようなディーゼル微粒子捕集フィルター (Diesel Particulate Filter : DPF) ⁽¹⁵⁾、図 1-4 に示したような慣性力集じん、海水スクラバ⁽¹⁶⁾、電気集じん(Electrostatics Precipitator: ESP) などがある。その中で、ESP は幅広い粒径が適応できることで注目されている。

● ESP の歴史と原理について

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。この作用が ESP の発端となっており、1824 年に電気集じんの現象をホールフェルド(Holfeld)が発表した。ESP を工業的として応用されたのは、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⁽¹⁷⁾。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、鑄造工場、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。また、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⁽¹⁸⁾。

ESP はコロナ放電を利用して大気汚染物質を捕集する装置である。ESP の基本構造及び原理は図 1-5 に示したようにコロナ電流を発生する針放電極と帯電した粒子を集める平板集じん極からなっていて、通過する粒子は放電によるイオン風⁽²⁰⁾⁽²¹⁾ (Electrohydrodynamic: EHD 現象の 1 種である⁽²²⁾) などの影響で電荷を帯びた。よって、粒子はクーロン力、電界などにより GND 電極に向かって移動し捕集する仕組みである。

集じんに大きく影響するパラメーターの一つは粒子の帯電量であり、帯電量が大きいほど、粒子が GND 電極に引き寄せるクーロン力が大きくなる。下記の(1-1)式は集じん装置内部における粒子に及ぼすクーロン力の式である。

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

ただし、 F_c はクーロン力 [N]、 q は電荷量 [C]、 E は電界強度 [V/m]。

そして、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 は拡散帯電量 q_d と電界帯電量 q_f の和として(1-2)式で表される⁽¹⁹⁾。

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

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。

また、集じん方式にも二種類存在し、前節で説明した一段式 ESP と図 1-6 二段式 ESP で分けられる。二段式 ESP は粒子を帯電する帯電領域と帯電した粒子を GND 電極上に集める集じん領域がそれぞれ分かれているもので、家庭やビルなどにおける空気清浄用に広く利用されている。これに対して、一段式 ESP は帯電と集じんが一つの領域内でするもので高濃度粒子の集じんに長けて、産業用として広く用いられている。

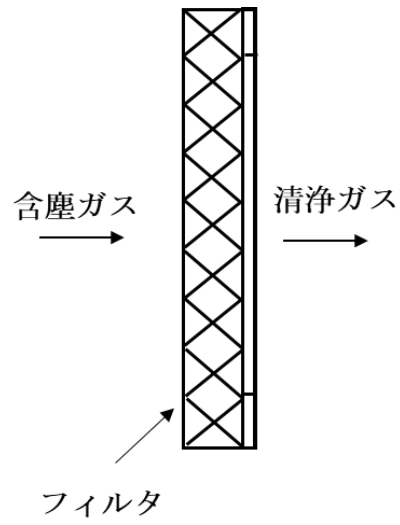


図 1-3. フィルター方式

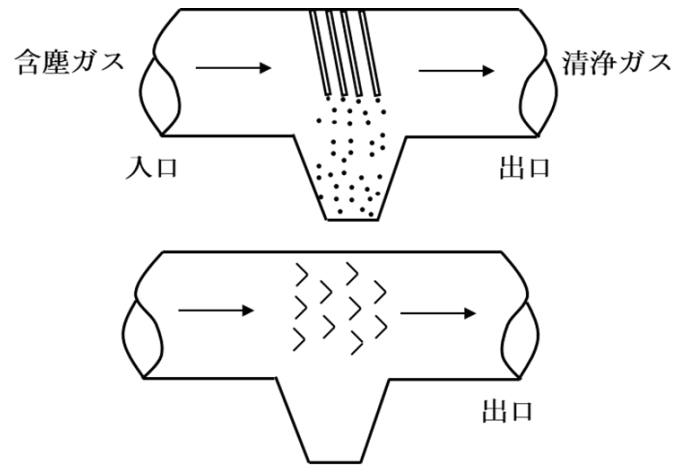


図 1-4. 慣性力集じん方式

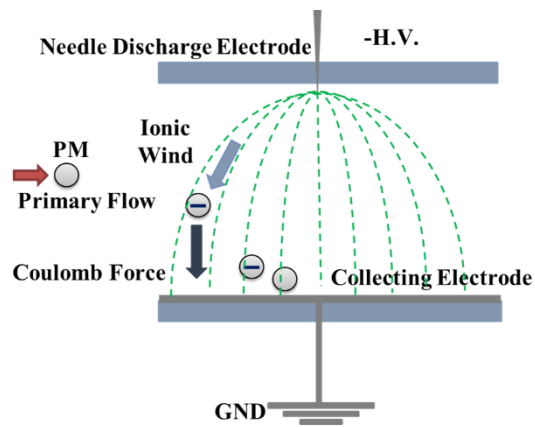


図 1-5. ESP 集じん原理

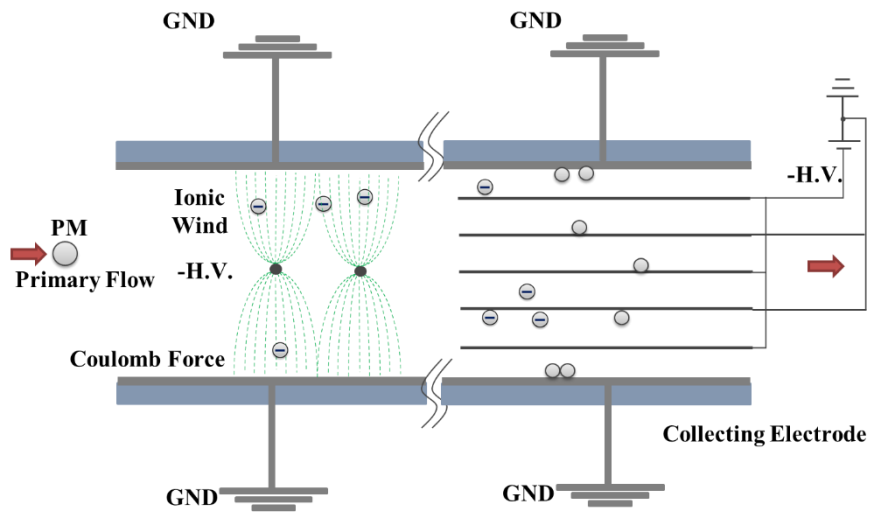


図 1-6. 二段式 ESP 集じん原理

1-3 研究現状

● ESP における課題

ESP のメリットとしては集じん率が高い、フィルターより圧力損失が少ないなどがある⁽²³⁾。しかし、ESP の性能は対象粒子の性状に大きく依存する、特に低抵抗粒子($10^4\Omega\text{cm} > \rho$)を捕集するには再飛散現象が生じて集じん率は低下する。また、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、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、捕集した粒子が集じん極上に堆積し、空間電荷や主流体風速の影響で再飛散が生じる。図 1-7 は 1 段式 ESP の再飛散モデルを示す。針電極に負の直流高電圧を印加することにより、コロナ放電が発生する。ESP 内の粒子がコロナ放電領域に到達すると、(a) に示すように負極性に帯電し、クーロン力とイオン風によって接地電極に引き寄せられる。(b) は同様に GND 電極上で粒子が凝集・肥大化した様子を示している。前述に述べたように、粒子の抵抗率が低い場合、誘導帯電による力や主流体速度が粒子付着力を超えたために、捕集された粒子が GND から脱離した。最終的に、(c) に示すように、粒子は後部放電領域に再び捕集されるか、そのまま ESP を通過し排出される。図 1-8 は 2 段式 ESP の再飛散モデルを示す。(a) に示すように、荷電粒子の一部は、針電極が存在する帯電部の GND 電極に捕集される。ただし、粒子のほとんどは、帯電部を通過し、集じん部の電界によって捕集される。(b) は GND 電極上で捕集された粒子が凝集・肥大化している様子を示す。(c) は静電誘導によって正に帯電した粒子が再飛散され、集じん部の GND 電極に付着することを示している。さらに、電極間の空間と集じん部で捕集された粒子は主流体速度または誘導帯電によって再飛散されることもある。帯電部から再飛散した粒子は集じん部で再び捕集されることを示している。この現象は再飛散と呼ばれ、集じん効率の低下に繋がる⁽²⁴⁾。したがって、再飛散粒子の現象を理解し、防止することが不可欠です。

ESP は直流コロナ放電が一般的に使用されているが、高温雰囲気下において、放電が不安定になり、大電流が発生しやすいことが報告されている⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。典型的な放電とは、電極間に電圧差を生じさせることで、気体中にある多数のイオンが電極間を移動し、気体中に絶縁破壊が生じて電流が流れる。電圧を増加させると気体中の分子や原子が電離し、陽イオンと電子になる。電子は、他の分子や原子に衝突することで新たに電離され電子雪崩が発生する。このようにして、気体中の放電は維持させる。放電状態で周囲温度が上昇すると、気体密度や気体分子の内部励起レベルの変化など電極間の大気に影響が現れる。これらは、放電特性が変化する要因となる。

気体密度の変化について記述する。気体の状態方程式(1-9)より、温度が上昇すると、気体は膨張するため密度が低くなる。これにより、大気中にある分子間の平均自由行程が伸びる結果、電子の加速経路が長くなる。衝突する電子が与えるエネルギーは大きくなるため、電離の発生確率が上がる。このため、電離回数が常温時に比べて雪崩的に増大し、空間中の電

子・イオン密度が増えていき、やがて大電流を低電圧でも引き起こすようになる。

$$pV = nRT \quad (1-9)$$

p：圧力[Pa] V：体積[m³] n：物質量[mol] R：気体定数 T：温度[K]

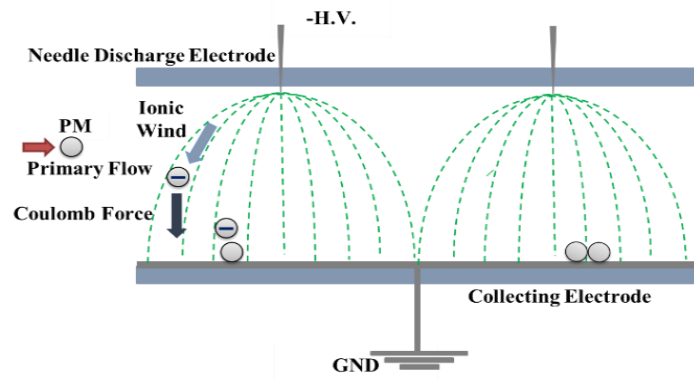
続いて、分子内部の励起レベルについて記述する。マクスウェル分布の式(1-10)より、電子エネルギーは粒子の温度と比例している。熱エネルギーを得ると、分子や原子の回転・振動数が増加し、電子は励起状態になる。つまり小さいエネルギーによっても電離を引き起こすようになるため、電子差によって生じる電子や衝突解離作用によって生じる電子の発生確率が上がり、電子雪崩が引き起こされやすい状態となる⁽²⁵⁾。

$$K_{av} = \frac{3}{2} kT_e \quad (1-10)$$

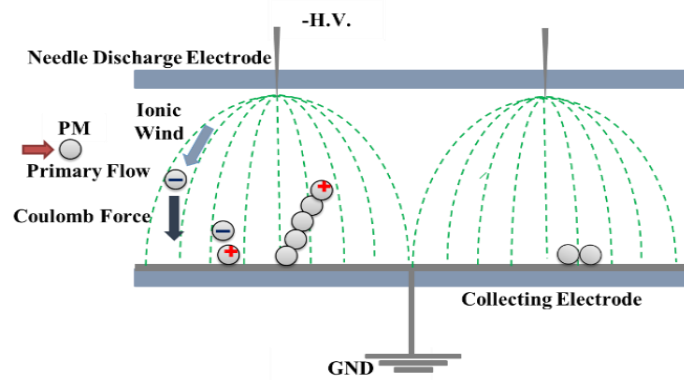
K_{av} ：電子1個あたりの平均エネルギー[J] k：ボルツマン定数 T_e ：電子温度[K]

これにより、温度が高くなると電子雪崩が起こりやすくなり、放電開始電圧やスパークオーバ電圧の値も低くなる。

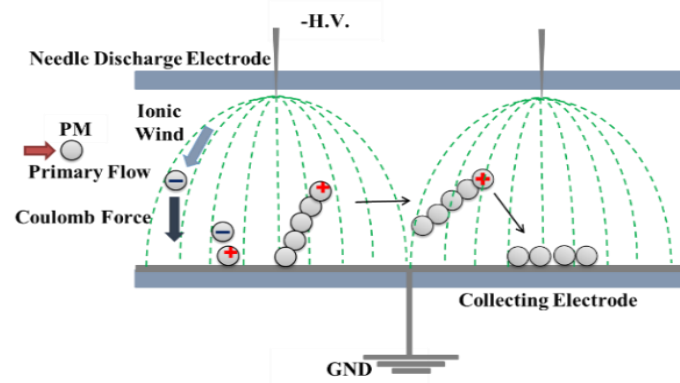
Xiao 氏らは放電発光の写真と対応する V-I 特性を分析することにより、350°C ~ 850°C のガス温度範囲でのワイヤ対円筒構成での DC 放電の特性を研究した。スパークオーバ電圧は、周囲温度が上昇するにつれて急速に低下する。放電ギャップを大きくすると、スパークオーバ電圧とコロナ放電開始電圧の差が大きくなる。放電ギャップが 29mm の場合、周囲温度が 850°C の場合、電圧の増加に伴ってコロナ、グロー、アーク放電が連続して発生するが、温度が 350°C ~ 750°C の場合、コロナとアーク放電のみが発生する⁽²⁶⁾。図 1-9 は高温と室温でのコロナ放電の大幅な変化を比較したものである。最も大きな変化は、ドリフト領域の電子数が大幅に増加することである。高温状態で増えた電子は、2つのプロセスで生成される。(1) ガス温度が上昇するにつれて、ドリフト領域の負イオンからの電子の脱離を加速することによるもの。(2) 二次電子の放出増加または熱放出エネルギーの増加から生成されるもの。電子は GND に直接移動するため、放電電流が飽和イオン電流よりもさらに大きな電流が流れる⁽²⁷⁾。この現象は ESP の集じん効率に強く影響し、実用化が難しくなる理由の一つにある。



(a)

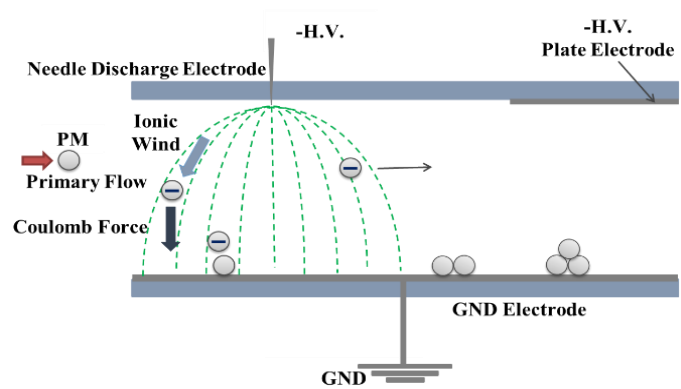


(b)

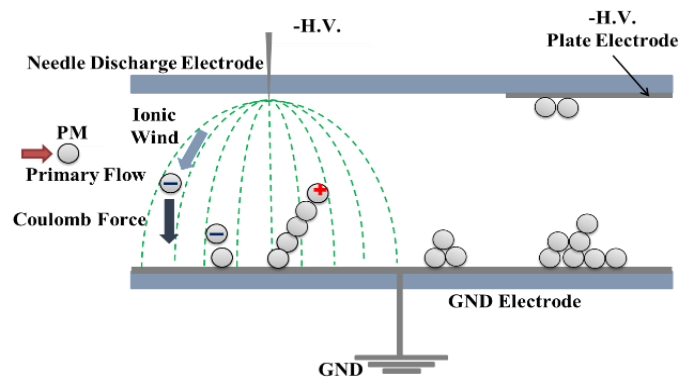


(c)

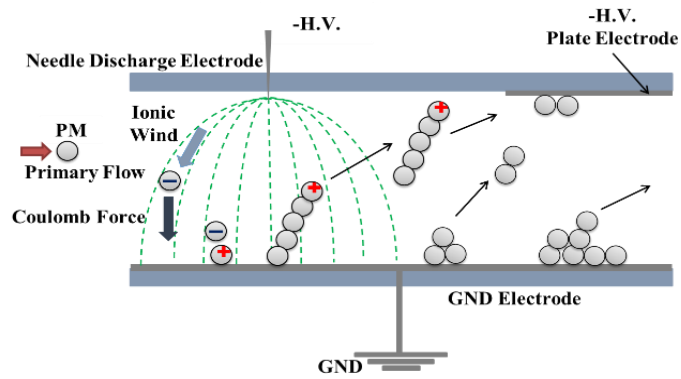
図 1-7. 1 段式 ESP の再飛散モデル



(a)



(b)



(c)

図 1-8. 2 段式 ESP の再飛散モデル

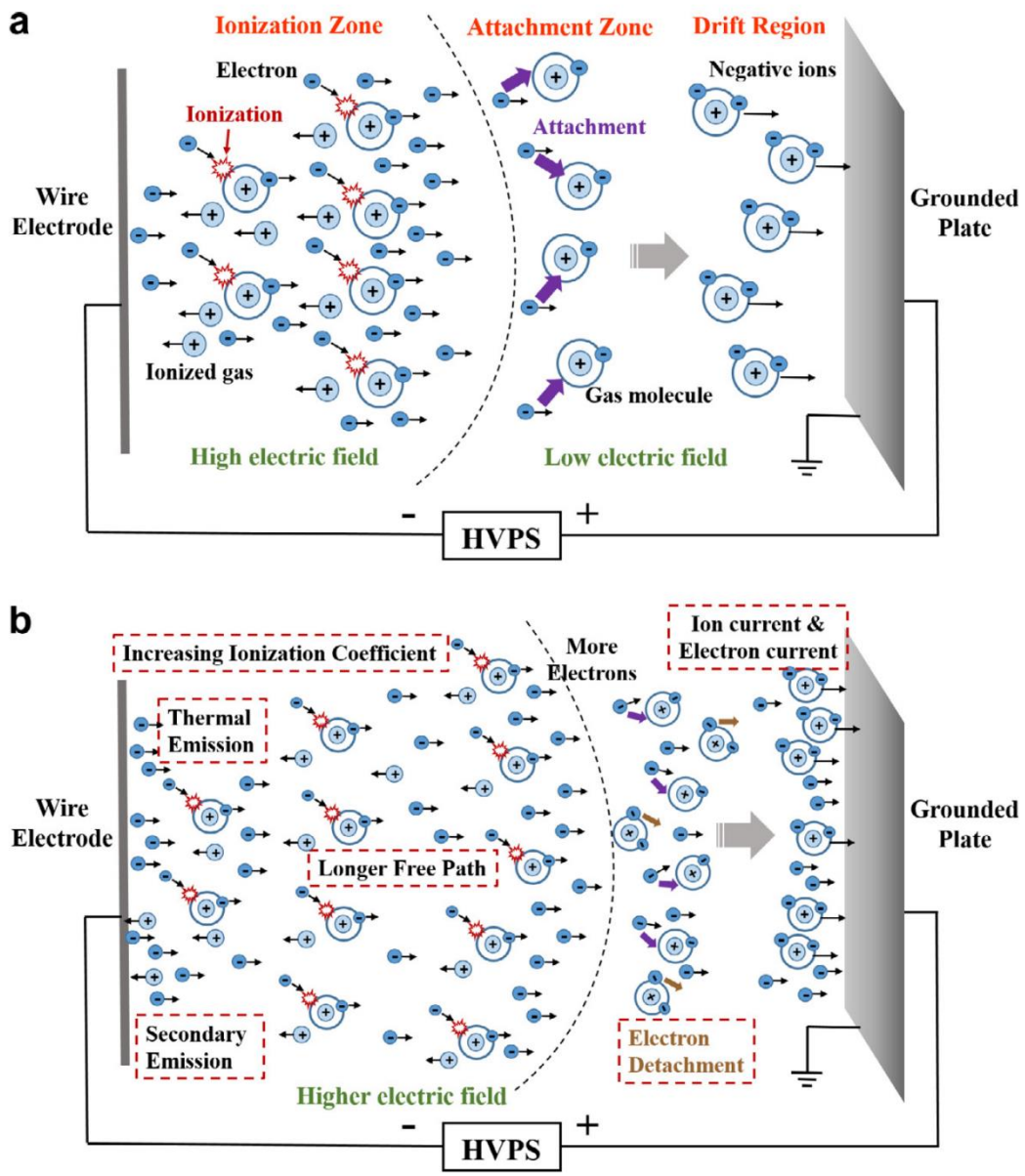


図 1-9. 放電メカニズム
(a)室温, (b)高温

また、フライアッシュのように粒子の電気抵抗率が高いと、GND電極のダスト層表面から放電電極に向かってストリーマ放電が発生することがある。この現象はバックコロナ放電と呼ばれ、ESPの動作に大きな影響を与える。Krupa氏らはバックコロナ放電を可視化するために、粒子画像流速測定(PIV)法を使用した。放電電流が $50\mu\text{A}$ 未満の場合、針の先端の周囲とフライアッシュ層の表面での弱いグロー放電が肉眼で確認できた。電圧が十分に高くなると、フライアッシュ層からストリーマが現れ、針電極に向かって広がる⁽²⁸⁾。

● ESPにおける異常現象の解決

前述に述べたようにディーゼル排ガスからの粒子抵抗率が低いため、再飛散しやすい。この現象は集じん効率に大きく影響する。宮下氏らはホール型ESPを開発し、再飛散を抑制した⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾⁽³¹⁾。実験では図1-10のような平行平板ホール型ESPを用い、電極間距離は20mmで最もイオン風が強いと考えられるホール径20mmで行った。電極構成は図1-11のような従来の針対平板電極型の構造だけではなく図1-5に示したようにGND電極上に穴を設けた。帯電した粒子はGND電極上ではなく下部のケーシング内に入ったため、空間電荷による誘導帯電や主流体風速による剥離力などの影響を受けず再飛散が抑えられると考えられる。

一方、図1-9(b)図に示したように、高温状態のESPにおける放電が不安定になる問題は未だに解決できていない。高温になると、アーク放電が発生しやすくなる。よって、この問題を解決するには電界を弱くし、アークになる条件を断つか、もしくはアークになる前に放電を止めること。著者はこの問題に対して、直流コロナ放電でなく、パルス放電を導入することで、アークになる前に放電を一旦止めることで、安定した放電が発生できると考えている。

● パルス放電

不平等電界を形成する金属電極に直流高電圧を印加すると、容易にコロナ放電が発生する。この電極に立上がり時間の急峻なパルス高電圧を印加すると、ストリーマ放電が発生する。このパルスストリーマ放電は直流コロナ放電でのスパークオーバ電圧より高い電圧を瞬間的に印加でき、高電界領域を広くできる。また、パルス電圧の立上がりが急峻なため、空間電荷電界による放電抑制が少ない。直流コロナ放電よりはるかに広い領域を、プラズマ化できると考えられている⁽³²⁾。近年、パルスストリーマ放電は多くの産業分野に展開することが期待されている。例えば、血小板を活性化させ止血の促進を図る医療分野⁽³³⁾や、きのこへ電気刺激与えて収穫促進を図る食品分野⁽³⁴⁾、水中衝撃波による岩石やコンクリートを効率的に破碎する⁽³⁵⁾、NO_xやダイオキシンを処理する環境分野⁽³⁶⁾などへの適用が試みられている。ガス処理装置に組み込まれるパルス放電リアクタは、同軸円筒型やワイヤー平板型がよく使用されている⁽³⁷⁾。放電電極のワイヤの直径がパルスストリーマの形成に影響し、電極径が細かい場合は熱損失が少なくオゾン生成などに適し、太い電極径では熱

損失は大きくなり、排ガス処理に適すと考えられている⁽³⁶⁾。また、正のナノ秒パルス放電と直流電流をワイヤ対円筒構造で重畳することにより、ディーゼル排ガスを浄化する研究報告⁽³⁸⁾がある。飲食店の業務用オープンから排出されるガスなどを処理する ESP にナノ秒パルス放電を応用した研究も報告されている⁽³⁹⁾。澁田氏らはマルチワイヤーのパルス放電特性について実験をした。使用した電極構成はシングル、マルチと外部マルチワイヤーであった。シングルワイヤーの放電電流はマルチワイヤーより低いが、ストリーマヘッド空間密度が高い。したがって、オゾンの生成効率の観点からシングルの方が適した⁽⁴⁰⁾。A. Abahazem らは純窒素中のパルス放電特性を研究した結果、電極間距離とパルス印加電圧の変化は、電極間距離が長くなると、コロナ放電電流、平均放電電流、ストリーマの平均伝搬速度が低下することを示した⁽⁴¹⁾。

パルスパワー発生システムについて、図 1-12 に示すように、エネルギー供給、エネルギー貯蔵、スイッチ、パルス形成・圧縮装置、負荷で構成されている⁽⁴²⁾。電気エネルギーの貯蔵については大きく二つが分かれている。一つは容量性エネルギー、つまりキャパシタ (capacitor: コンデンサ) を用いた誘電体媒質中に電界のエネルギーとしてエネルギー貯蔵を行う方法。もう一つはインダクタ (inductor: 誘導子) を用い、媒質中の磁界エネルギーとしてエネルギー貯蔵を行う誘導性エネルギーの貯蔵方式がある。

また、スイッチ技術としてはサイリスタ、真空遮断器などを利用する開放スイッチ。スパークギャップ、電界歪みなどを利用する短絡スイッチがある。パルスパワーでは大電流を発生するため、安全性と性能面を十分考慮しないといけない。よって、パルスパワー発生回路に対して、適切なスイッチの使用も重要である⁽⁴³⁾。

ところで、近年、パルスパワー発生システムにおいて、重要である半導体スイッチと磁気パルス圧縮回路の研究が進めているため、短パルス高出力のパルスパワー電源の開発ができています。その中でもパルス回復時の急峻な電流変化を高速パルス発生に利用する目的で電流変化率を緩和させないハードリカバリタイプの高逆電流の高電圧ファストリカバリダイオード (Fast Recovery Diode: FRD) が Rukin 等によって開発され、このデバイスをセミコンダクタオープンニングスイッチ (Semiconductor Opening Switch: SOS) ダイオードと呼ばれる。可飽和トランス (Saturable Transformer: ST) と FRD を用いた回路で更に高速立ち上がりのパルス高電界を印加できる⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁵⁾。

そして、パルスパワーの問題点として、エネルギー変換時の損失、表皮効果による銅損、接点・電極などの消耗、周囲の電気機器に対する電磁波の影響等が挙げられるが、直流放電よりスパーク電圧が高く、瞬時に大電流とエネルギーの発生ができる利点もある。

● 粒子流れの可視化技術

流れの様子は肉眼では直接観察出来ないことが多いため、速度場や温度場などを視覚的に表現する流れの可視化が行われる。典型的な方法は以下に示したように

(1) レーザ誘起蛍光法 (Laser Induced Fluorescence Method: LIF 法) :

光励起によってエネルギーを吸収した物質が、その逆過程としてエネルギー放出を光放射の形で行う現象をフォトルミネッセンスと呼ぶ。この現象を利用し、流れの可視化を行う⁽⁴⁶⁾。

(2)シュリーレン法：

図 1-13 に示すようなレンズまたは凹面鏡によって、光の波面の乱れの少ない平面波または球面波を作り、この光束の中に流れの場を置き、光の屈折率勾配によって光束が曲げられるのをフローパターンとして観測する⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾。足立氏はこの手法を用いて、電気集じん装置内のイオン風については考察した⁽⁴⁹⁾。

(3)可視化画像解析法：

近年のデジタル技術の発展により従来の可視化技術にデジタル画像処理を加え、流れ場の瞬時・多点の速度情報を抽出する方法が PIV である。PIV は流れの速度分布を調べる方法として最も進化した計測法の一つであり、有力な流れ解析ツールとして近年用いられている。その原理は人間の最も素朴な観察行動に基づいている。人は、流れの中に漂う目印があればその動きを読んで、無意識のうちにも流れの速さや方向を推定している。PIV 手法の発想の原点がこのような素朴な行動にあっても、人間が頭脳で行う処理は極めて高度で複雑な過程を経ている。それゆえ、PIV 手法の開発は多くの人々を魅了し、多くの発想から高度な数学的根拠に基づいた研究開発が進められてきた。その結果、シンプルで実用的な PIV システムが構築され、標準的な流速計測法にまで発展したといえる。

図 1-14 に PIV 計測の原理図を模式的に示す。流れに微細なトレーサ粒子を混入させ、これをレーザーなどの光源で瞬間的にシート状に照射する。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。次に、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。

PIV は平面内の速度分布が一度に取得可能なことや、使用するハードウェアやソフトウェアの完成度が高いこと、非接触計測が可能であることが特徴である。

個々のトレーサ粒子を時々刻々に追跡および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計算する PIV 法、任意の断面の円周上全方向から積分値データを集めてその切断面を描くコンピュータモグラフィなど、いずれもコンピュータ処理によって必要な画像を得られる。

シュリーレン法にはピントが甘い綺麗な写真が撮れないといった欠点に対して、流れを定量的に評価・計測できるトレーサ粒子を用いる PIV 計測の方が適すと考えられる。Niewulis 氏らは ESP 内の電気流れを 3DPIV によって実験を行い、検討した⁽⁵⁰⁾。また Mizeraczyk 氏らはワイヤ対平板構造の ESP 内部の二次流れを PIV で解析し、集じん強く影響することを判明した⁽⁵¹⁾。これらの結果から、ESP 内部の流れの解析には PIV 法を用いる方が有効であることを示唆された。

PIV は様々なところで扱われている。分野別にすると 5 つの分野で主に用いられている⁽⁵²⁾⁽⁵³⁾。

- 1) 建設物：配管モデルの試験、燃焼室などの燃焼流
- 2) 輸送システム：自動車のエンジン、燃焼噴射、航空機周りの流れ
- 3) 空調：ファン周辺の気流、家電
- 4) 環境：竜巻、ヒートアイランド現象、環境水理等
- 5) 医療：人口血流、呼吸器もでる

PIV では流線やベクトルだけでなく、渦度や乱流エネルギーなどを扱える点で幅広く扱われている。

以上のパルス放電と PIV 法，及び実機集じん試験で，高温ディーゼル排ガス処理における ESP の開発が可能と考えられる。

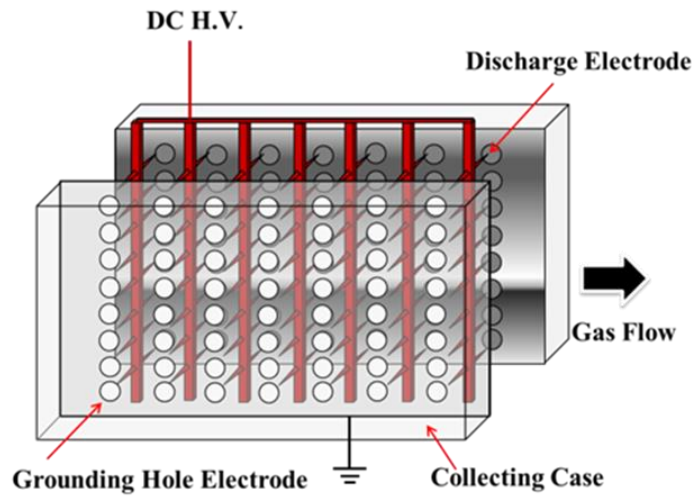


図 1-10. 平行平板ホール型 ESP

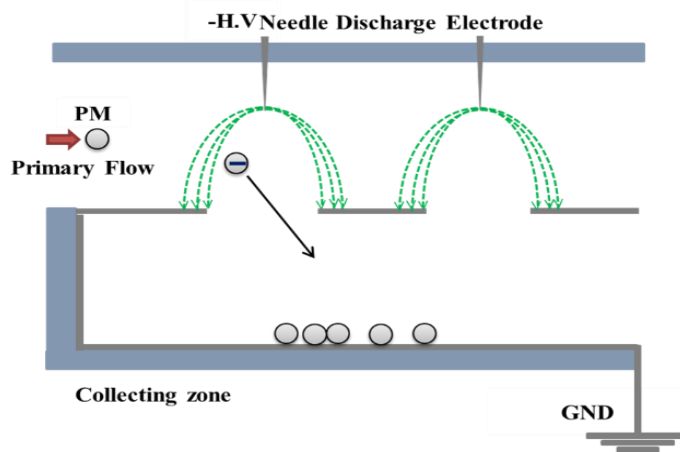


図 1-11. ホール型 ESP モデル

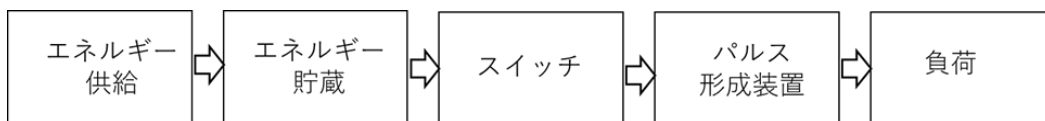


図 1-12. パルスパワー発生システムのエネルギーの流れ

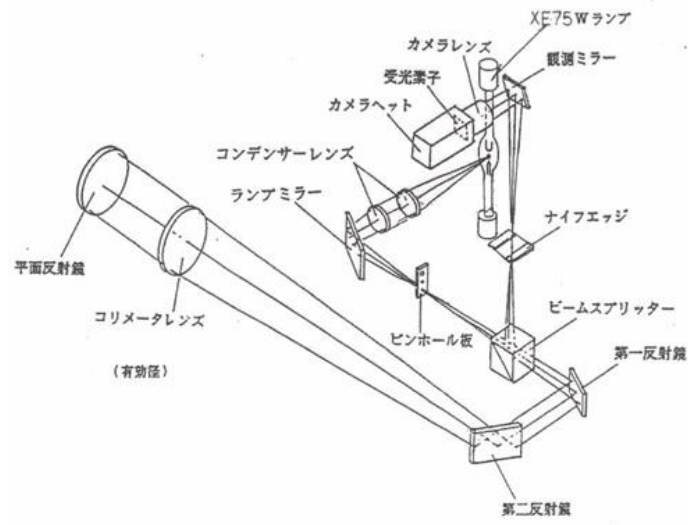


図 1-13. シュリーレン法

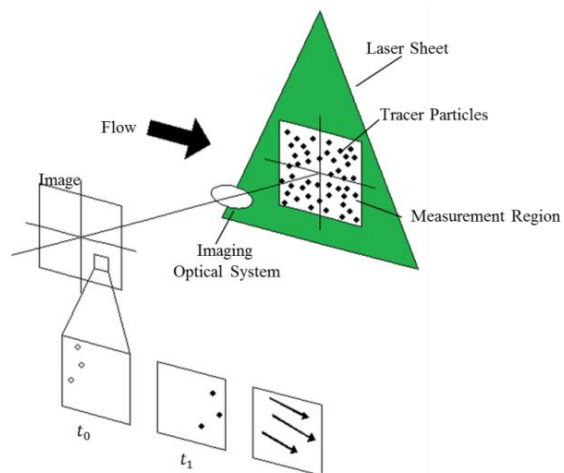


図 1-14. PIV 計測の原理図

1-4 研究目的

近年、大気汚染物質による人体への悪影響や環境汚染の懸念や国民の関心が高まってきている。しかしながら、船舶のディーゼルエンジンからの排ガスが高温なため、従来の直流コロナ放電を用いた時の電極構成の最適化を図る。また、直流コロナ放電の代わりにパルス放電を印加する。高温状態でも安定した放電が発生でき、かつ制御できる電圧領域が広い（10kV以上）ESPにおいて、集じん効率に対して、90%以上確保できるESPを目標とした。この目標を達成するために、基礎放電特性や放電発光、パルス放電型ESP内の粒子挙動の検討が非常に重要で、不可欠である。

本研究では、船舶用ディーゼルエンジンの高温排ガスに対して、直流コロナ放電は不安定であるため、ESPの実用化は難しくなっている。高温雰囲気でも集じんできるには、スパーク電圧が高いパルス放電を導入することで、放電領域を広げつつ、安定した放電が発生させる。しかし、高温雰囲気における直流放電型ESPの研究はまだ少ない。そのため、最初は直流放電型ESPについて、新たな形の放電電極と構成を用い、100～400°Cにおける放電特性や温度、湿度の影響を明らかにすると同時に、従来の直流放電を用いたESP内の異常現象を十分理解した上で、次のステップに進める。直流の結果に基づき、パルス放電を導入する。PIV法を用いた粒子挙動の解析で、粒子全体の挙動、移動速度分布等から、パルス型ESPの集じん可能性と妥当性を検討した。更に、ディーゼル排ガス処理の前に、空気条件での高温状態におけるパルス放電の放電ギャップ特性や放電発光、パルス立ち上がり時間等の影響について検討を行い、その特性を把握する。粒子挙動解析結果と高温パルス放電特性の二つの観点から、実機ESPを提案し製作する。最後に、高温のディーゼル排ガスをESP内に流入させ、集じんに対する温度特性、パルス立ち上がり特性等の性能評価を行った。以上の結果で、船舶からの高温ディーゼル排ガス処理に適する、高集じん率と安定したESPを目的とした。

1-5 研究概要

船舶のディーゼル機関からの高温排ガス処理において、一般的な直流放電型 ESP は適応できないことが現状である。そのため、200°C以上の高温雰囲気に適する ESP の研究及び装置の開発が必要不可欠である。そこで、著者らは高温排ガスでも集じんできる ESP の開発について研究を行った。図 1-15 に示すように本論文では 6 部構成となっており、第 1 章は序論として大気汚染、気候変動、排出規制、抑制方法についての社会背景と研究背景を述べた。その後は ESP に関する研究の現状、ESP における問題点、解決方法と研究手法について述べた。

第 2 章は高温雰囲気において直流放電型 ESP の異常現象とその特性を解明した。ESP には 3 種類の本数が違う棘電極と円板電極、計 4 種類の放電電極を用いた。そして、ESP での処理温度を 100~400°C とし、乾燥空気と飽和水蒸気状態の雰囲気における直流放電型 ESP の放電特性を検討した。温度が上昇すると同電圧における放電電流の増加が確認された。実験で用いた模擬排ガスにおいて、乾燥空気より湿度が高いガス雰囲気の場合、スパークオーバー電圧は高いことを示した。更に円板電極より棘電極の方が、放電安定領域が広く、集じんに適することを明らかにした。また、3 種類の棘電極のうち、棘 6 本の電極の放電安定領域が広く、放電効率も良い特性を示した。しかしながら、空間的帯電領域を考慮すると、包絡直径が大きく棘ピッチが同じ 12 本の棘電極の方が、ESP に適すると考えられた。また、15mm の放電ギャップは高い放電電流値を得るのに適し、45mm の放電ギャップは放電安定領域を広げるのに適する。そして、電極のセット数が多いほど、集じん率が高くなる。

第 3 章は高温ディーゼル排ガス集じんに適するため、放電方式を変えてパルス電圧を印加する ESP を開発した。しかし、第 1 章で述べたように、パルスの放電時間が短いため、粒子が帯電できるかについて明らかにした。用いたパルス電圧の立ち上がり時間については正極性 4 種類で、負極性も 4 種類で計 8 種類である。実験ではスモールモデルを作成し、PIV 解析で装置内部の粒子挙動解析を行った。放電電極として使用したのは針電極とワイヤ電極である。針電極を用いた場合、パルス放電により粒子は帯電され、GND 電極に移動することを確認した。直流放電の場合と同様に放電したあと、両側に渦流が生じた。また、粒子移動速度はパルス繰り返し周波数、パルス立ち上がり時間に依存する。また電圧がある程度高くなる場合、帯電された粒子は GND 電極に向けて移動せず、下から放電電極方向に移動することが確認された。一方、ワイヤ電極を用いた場合、放電領域が広く、針電極を使用した場合より粒子が動き始める電圧が低かった。同じ電圧を印加しても、粒子が下から上に移動する現象がなかった。

第 4 章はパルス放電の高温放電特性について研究を行った。第 3 章でパルス放電を用いても粒子が帯電できることから、実際の高温状態においてパルスの基礎放電特性の検討が必要である。実験では管状炉を用いて、ESP 及び装置内の空気を加熱して、50~400°C の間

のピーク電流や放電電流，スパークオーバ電圧，放電ギャップ特性等について実験を行った。パルス立ち上がり時間は短くなるほどスパークオーバ電圧が高いことを示した。同じ装置で直流放電と比べ，パルス放電の放電安定領域が広く，高温雰囲気に適することを明らかにした。また，正極性と負極性のパルス放電発光を比較し，放電領域と帯電効率から考慮すると正極性の方が集じんに適すること明らかにした。

第5章では第4章の結果から，ESPモデルを作成し，高温ディーゼル排ガスを装置内に流入させ集じん特性についての検討を行った。ディーゼル排ガスを用いた場合の放電特性は空気の場合と違うことを明らかにした。第4章と同様に立ち上がり時間の長いパルス放電は，高温の影響を受けやすく，温度上昇とともにスパークオーバしやすくなる。立ち上がり時間の短いパルス放電では高温においてもスパークオーバしにくく，高温雰囲気に適する。温度が上昇すると集じん効率が下がるが，パルス繰り返し周波数を増やすことで集じん率を上げられる。また，集じん率に対して，排ガス流量とパルス放電の極性の影響の検討も行った。帯電効率について，立ち上がり時間の長いパルス放電は集じんに適する。

第6章では，以上の各章を総括し，本論文の結論をまとめた。

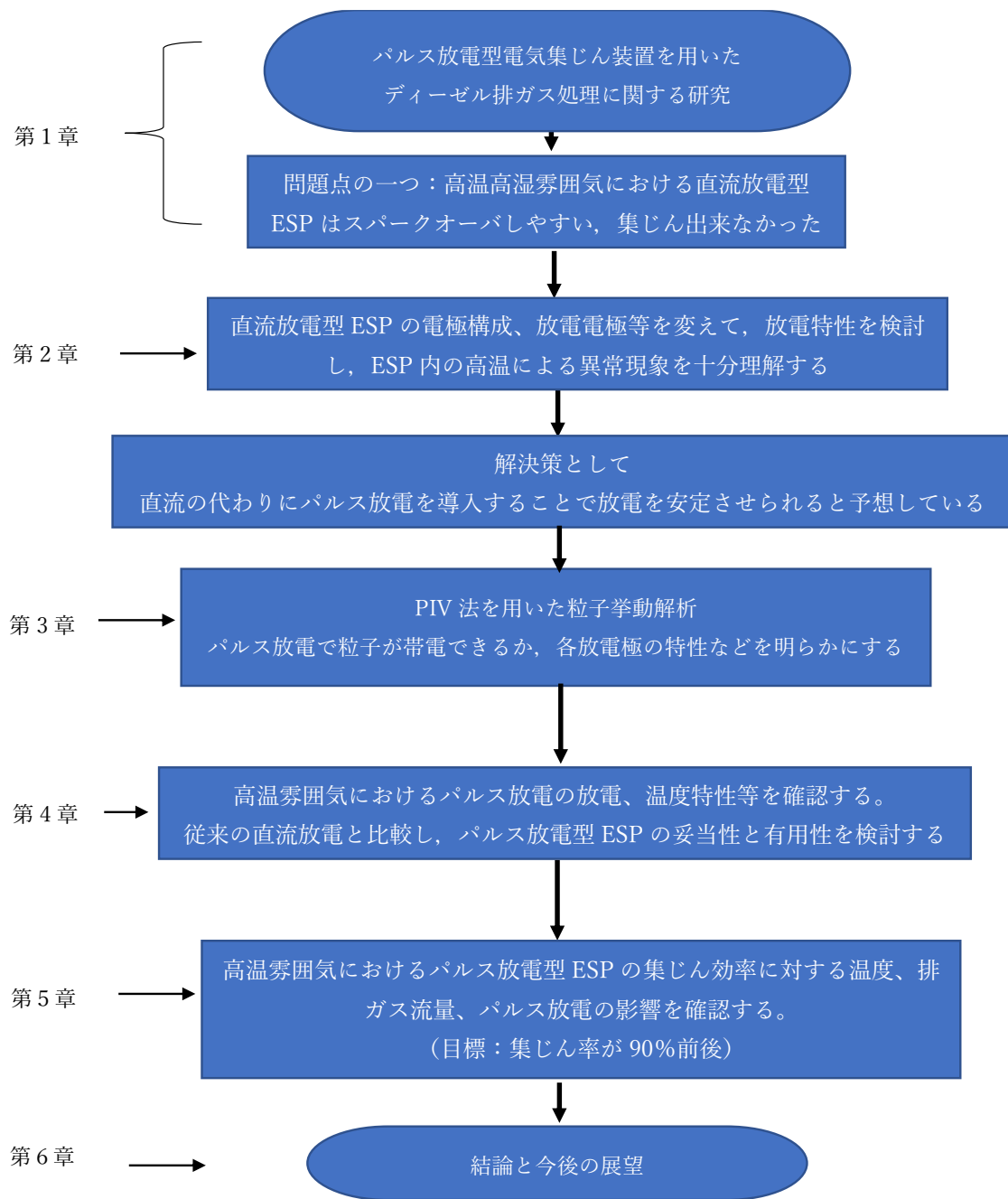


図 1-15. 研究の概要と流れ

参考文献

- (1) 瓦家 敏男:「地球の温暖化」生活衛生, Vol.40, No.5, P.220-225, (1996)
- (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) 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) 鬼頭 昭雄:「気候変動の現状と将来～地球温暖化による水循環の変化～」砂漠研究, Vol. 31, No. 4, P. 95-101, (2022)
- (5) 向井 苑生, 佐野 到, 他 18 名:「エアロゾル集中観測 DRAGON/J-ALPS を終えて」エアロゾル研究, Vol. 37, No. 2, P. 136-144, (2022)
- (6) 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)
- (7) 槌田 敦:「CO₂ を削減すれば温暖化は防げるのか」日本物理学会誌, Vol.62, No.2,(2007)
- (8) 公害防止の技術と法規編集委員会:「五訂・公害防止の技術と法規〔大気編〕」産業環境管理協会, 平成 10 年 12 月 15 日発行
- (9) 東 賢一:「微小粒子状物質の健康リスクに関する近年の知見と国際的な動向」室内環境, Vol.23, No.2, P. 129-139, (2020)
- (10) 岩井 和郎:「浮遊粒子状物質の健康影響に関する研究の動向」室内環境, Vol.23, No.2, P. 129-139, (2020)
- (11) B.J.Shim, K.S.Park, J.M.Koo, M.S.Nguyen, S.H.Jin:「Estimation of Soot Oxidation Rate in DPF Under Carbon and Non-Carbon based Particulate Matter Accumulated Condition」International Journal of Automotive Technology, Vol. 14, No. 2, P. 207-212 (2013)
- (12) 大気環境学会:「大気環境の事典」朝倉 誠造, 初版第 1 刷, 2019 年 9 月 10 日
- (13) 川原 秀夫, 他 2 名:「船用ディーゼル機関の排出ガス特性の把握」, 独立行政法人国立高等専門学校機関大島商船高等専門学校 紀要 第 47 号
- (14) D. B. Kittelson :「Engines and nanoparticles: a review」Journal of Aerosol Science, Vol. 29, Issues. 5-6, P. 575-588 (1998)
- (15) J.Yang, M.stewart, G.Maupin, D.Herling, A.Zelenyuk: 「Single wall diesel particulate filter (DPF) filtration efficiency studies using laboratory generated particles」Chemical Engineering Science, Volume 64, Issue 8, 15 April 2009, Pages 1625-1634
- (16) 高山 敦好,他 2 名:「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 2013 年 42 巻 4 号 p. 228-234
- (17) 橋本 清隆,谷口 堯:「電気集じん装置の理論と実際」発行者 株式会社 電気書院 昭和 40 年 10 月 1 日第 1 版第 1 刷発行
- (18) 静電気学会:「静電気ハンドブック」株式会社オーム社, (2006)
- (19) 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)
- (20) 足立 宜良, 他 2 名「電気集じん装置内の粉じん粒子の挙動」静電気学会誌, Vol.4,No.3,152-159,

- (1980)
- (21) 川本 広行, 他 2 名「針対平板電極系コロナ放電場におけるイオン風について」日本機械学会論文集 C, Vol. 70, No.689, P.169-175, (2004)
- (22) A. Niewulis, A. Berendt, J.Podlinski, J. Mizeraczyk, 「Recent progress Electrohydrodynamic flow patterns and collection efficiency in narrow wire-cylinder type electrostatic precipitator」 Journal of Electrostatics, Vol.71, Issue.4, P.808-814, (August 2013)
- (23) 檜山 和成:「実例にみる集じん技術」株式会社 工業調査会, 2002 年 6 月 24 日初版第 1 刷発行
- (24) H. Kawakami, A. Zukeran, K. Yasumoto, M. Kuboshima, Y. Ehara, T. Yamamoto, 「Diesel Exhaust Particle Reduction using Electrostatic Precipitator」 International Journal of Plasma Environmental Science & Technology 5, Issue 2, P.179-184, (2011)
- (25) 中野 武雄:「プラズマの基礎」日本真空学会誌, Vol.57, No.8, (2014)
- (26) G.Xiao, X.H.Wang, J.P. Zhang, M.J Ni, X. Gao, K. Cen: 「Characteristics of DC discharge in a wire-cylinder configuration at high ambient temperatures」 Journal of Electrostatics 72, P.13-21, (2014)
- (27) P. Yan, C.H. Zheng, G. Xiao, X. Xu, X. Gao, Z.Y. Luo, K. Cen: 「Characteristics of negative DC corona discharge in a wire-plate configuration at high temperatures」 Separation and Purification Technology, Vol.139, P. 5-13, (2 January 2015)
- (28) A. Krupa, J.Podlińska, J.Mizeraczyk, A.Jaworek : 「Velocity field of EHD flow during back corona discharge in electrostatic precipitator」 Powder Technology, Vol.344 P.475-486, (2019)
- (29) 宮下 皓高, 江原 由泰, 他 4 名:「平行平板ホール型電気集じん装置によるディーゼル排ガス中の微粒子除去」マリンエンジニアリング, Vol. 53, No. 5, P. 737-742, (2018)
- (30) Y. Ehara, M. Ohashi, A. Zukeran, K. Kawakami, T. Inui, and Y. Aoki : 「Development of Hole-Type Electrostatic Precipitator」 International Journal of Plasma Environmental Science & Technology 11, Issue 1, P.9-12, (2017)
- (31) H. Miyashita, Y. Ehara, T. Inui, Y. Aoki : 「Particle Behavior Analysis in a Hole-Type Electrostatic Precipitator Using PIV」IEEE Transactions on Industry Applications, 54, Issue 5, P.4857-4863, (2018)
- (32) 水野 彰:「4. 放電プラズマによる排ガス処理の研究」, <講座>放電現象の応用 IV, プラズマ・核融合学会, Vol. 70, No. 4, P.342-349, (1994)
- (33) 勝木 淳, 高木 浩一, 浪平 隆男:「5. パルスパワー技術の応用」, パルスパワー技術入門, J. Plasma Fusion Res., Vol. 87, No. 4, P.268-275, (2011)
- (34) 高木 浩一, 猪原 哲:「パルスパワー技術の農業・食品分野への応用」, 電気学会論文誌 A, Vol. 129, No. 7, P. 439-445, (2009)
- (35) 大塚 誠彦, 岡本 直樹, 他 4 名:「パルスパワーにより発生する水中衝撃波を利用した破碎技術に関する研究」, Journal of MMIJ, Vol. 123, No. 2, P.82-86, (2007)
- (36) 龍 輝優, 王 斗艶, 浪平 隆男:「同軸円筒型電極内ナノ秒パルス放電の挙動特性」, 電気学会論文誌 A, Vol.139, No.10, P. 445-452, (2019)

- (37) 安井裕之:「パルスコロナ放電による排ガス処理技術」電気学会誌, Vol. 119, No. 5, P. 274-277, (1999)
- (38) S. Yang, I. Aravind, B. Zhang, S. Weng, B. Zhao, M. Thomas, R. Umstattd, D. Singleton, J. Sanders, S. B. Cronin: 「Plasma-enhanced electrostatic precipitation of diesel exhaust using high voltage nanosecond pulse discharge」 Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol.9, Issue.6, No.106565, (2021)
- (39) S. Yang, P. Ford, S. Subramanian, D. Singleton, J. Sanders, S. B. Cronin: 「Transient plasma-enhanced remediation of nanoscale particulate matter in restaurant smoke emissions via electrostatic precipitation」 Particuology, Vol.55, P. 43-47, (2021)
- (40) 澁田哲, 王斗艶, 浪平隆男, 秋山秀典:「ナノ秒パルス放電方式オゾン発生におけるマルチワイヤ電極の特性」静電気学会誌, Vol.37, No.1, P. 2-7 (2013)
- (41) A. Abahazem, N. Merbahi, H.Guedah, M. Yousfi: 「Electric and spectroscopic studies of pulsed corona discharge in nitrogen at atmospheric pressure」 Journal of analytical sciences, methods and instrumentation, Vol.7, pp57-74, (2017)
- (42) 秋山秀典:「EE Text 高電圧パルスパワー」オーム社, 平成15年12月25日
- (43) 原雅則, 秋山秀典共著:「高電圧パルス工学」森北出版株式会社, 1997年2月20日第1版第4刷発行
- (44) 佐久川貴志:「パワーデバイスと磁気スイッチを用いたパルスパワー発生装置と最近の応用」J. Plasma Fusion Res., Vol.94, No.4, P.202-209, (2018)
- (45) S.k.Lyubutin, S.N.Rukin, B.G.Slovikvsky, S.N.Tsyranov: 「Operation of a semiconductor opening switch at ultrahigh current densities」 Original Russian Text © S.K. Lyubutin, S.N. Rukin, B.G. Slovikovsky, S.N. Tsyranov, 2012, published in Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov, Vol. 46, No. 4, P.535-543, (2012)
- (46) 川橋正昭, 平原裕行:「希薄気体流れの可視化法及びシミュレーション」流れ可視化, Vol.9, No.32, (1989年1月)
- (47) 日本流体力学会編:「流体力学ハンドブック」オーム社, (1998)
- (48) 浅沼強:「流れの可視化ハンドブック」株式会社朝倉書店, (1977)
- (49) 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-」電気学会論文集 Vol.93-B, No.7
- (50) A.Niewulisa, J.Podlińska, M.Kocik, R.Barbucha, J.Mizeraczyk, A.Mizunoc: 「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, Issue 12, P.728-734, (November 2007)
- (51) J.Mizeraczyk, M.kocik, J.Dekowski, M.Dors, J.Podlinski, T.ohkubo, T.Kawasaki: 「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, (May 2001)
- (52) 甲谷寿史, 相良和伸, 山中俊夫, 他2名:「パ PIV による通風時の建物周辺の気流場解析」可視化

情報学会, Vol.29, P.46-50, (2009)

(53)山本 富士夫, 植村 知正 : 「PIV の基礎と応用」 混相流, Vol.6, No.1, P.65-79, (1992)

第 2 章 直流放電型 ESP における電極構成の最適化

2-1 緒言

重油を燃料とした船舶用ディーゼルエンジンの排ガスは、PM 濃度が高く、温度も高い。一般的に使用されている DPF は、目詰まりを引き起こし、効率が低下する傾向があるため、大型ディーゼルエンジンの排ガス処理に適応できない。一方、ESP は構造がシンプルで圧力損失が低く、高濃度粒子の捕集効率が高いというメリットがある。これは、ESP が船舶のディーゼル排気ガスから有害物質を収集するのに適していることを示唆しています⁽¹⁾。

高温時と低温時のコロナ放電特性は異なるため、その特性についての基礎研究は重要である。Bologa 氏らは点電極を使用して、さまざまな圧力で室温および 500°C でのコロナ放電特性を調査した。圧力の増加は、コロナ放電の開始電圧とスパークオーバ電圧を増加させる。コロナの開始電圧と放電開始電圧は、圧力に比例して増加する。印加電圧が同じの場合、圧力が増加するとコロナ放電電流が減少する。そして、圧力が一定な状態では、負のコロナ放電は、正のコロナ放電よりも電流が高いという特徴がある。ガス温度が 500°C まで上昇すると、安定したコロナ放電が発生するための圧力の値が大きくなる⁽²⁾。

Abdel-Salam 氏らは、棒状電極の放電特性を数値解析し、実験値と比較することで正極性放電開始電圧の温度特性を理論的に算出できると報告している⁽³⁾。高温での電流電圧特性については、空間電荷密度と棒電極付近の電子なだれにも関連することを示した。

一方、コロナ放電の温度特性は多くの研究で明らかにされているが、高温下での ESP の最適な電極配置に関する研究はあまり行われていない。船舶用ディーゼルエンジンの排ガスから PM を除去するために ESP を適用するためには、高い集じん効率を維持する必要がある。このため、コロナ放電が安定して発生する範囲を把握する必要がある。この研究の目的は、直流放電を使用して 100~400°C の範囲でディーゼルエンジンの模擬排ガス下で最適な電極構造とそのコロナ放電特性を分析することです⁽⁴⁾。

2-2 実験方法

2-2-1 実験装置

実験システムを図 2-1 に示す。この実験で使用した模擬排気ガスの組成は、 N_2 79%、 O_2 13%、 CO_2 8% であった。模擬ガスはバブリングにより加湿し、ガス中の H_2O 濃度は 5% とした。加湿後の濃度は、それぞれ N_2 75%、 O_2 12.4%、 CO_2 7.6% で、これらのガスを恒温槽に流した。恒温槽内の温度が 100~400°C になるようにヒーターで制御した。ESP は、図 2-1 の真ん中に示すように、同軸の円筒電極で構成されている。GND 電極の外側には多数の穴がある。これは、第 1 章で述べたようなホール型 ESP である。電極間に負の直流高電圧を印加した。放電電流は、GND 電極に接続された 10k Ω の検出抵抗によって測定された。

高温雰囲気下では、同電圧での放電電流値は正極性よりも負極性の方が高くなる⁽⁵⁾。コロナ放電が湿度の影響を受けることも多くの研究で示されている。Yawaotti 氏らは、針電極でコロナの正および負のコロナ放電に対する空気の相対湿度と空気流量の影響を研究した。その結果、湿度が高い場合でも、同じ印加電圧で負の放電電流が正の放電電流よりも高いことが示唆された⁽⁶⁾。さらに、Wang 氏らは、1 段式のワイヤ対円筒電極構成における負のコロナ放電に対する湿度の影響を調査した⁽⁷⁾。室温では、同じ電圧での放電電流は、湿度が増加してもあまり変化しなかった。ただし、温度が 60°C まで上昇すると、湿度が上昇するにつれて放電電流はわずかに低下した。また、印加電圧が低い場合、電荷密度の変化が大きな影響を与えることも示した。さらに、Rinard 氏らは、高圧高温での ESP の動作を評価するために、正と負の放電特性と集じん効率を調査した。正のコロナ電流ではスパークオーバー電圧に制限され、負のコロナでは最大電圧が電源によって制限された。つまり、負極性コロナのスパークオーバーは正極性コロナ放電よりも高くなる。負極性のコロナ放電における集じん率はいずれの場合も高かった⁽⁸⁾。以上のことから、本研究では負極性のコロナ放電を使用した。

粒子濃度については、SMPS とパーティクルカウンタ(PC)を用いて、個数濃度を計算した。

● SMPS

20nm~730nm のナノ粒子の粒子濃度測定には、走査式モビリティパーティクルサイザー(SMPS: Scanning Mobility Particle Sizer, TSI 社製, Model 3936)を用いた。SMPS は、サブミクロン領域の粒子を、高分級能で連続的に計測する自動連続粒径分布計測装置であり、静電分級器(DMA: Differential Mobility Analyzer, Model 3081)と凝縮粒子カウンター(CPC: Condensation Particle Counter, Model 3775)で構成されている。SMPS の測定装置を図 2-2 に示す。また仕様を表 2-1 に示す。

DMA の原理を図 2-3 に示す。また CPC の原理を図 2-4 に示す。サンプルガスは、インパクタにより測定範囲外の大粒径粒子を除去した後、DMA に流入する。流入後の粒子を含んだサンプルガスは、平衡荷電装置にてマイナスにイオン化させられ、層流の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させることにより、イオン化した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サイズによって決まるため、同一の静電気力を持つ粒子、つまり同径の粒子を内筒に設けたサンプリングスリットから取り出すことができる。よって、内外筒間に印加する電圧を変化させることにより、粒子を分級することが可能となる。DMA によって分級された粒子は CPC に流入する。このとき n-ブタノールとともに継続的に加熱(35°C)されたサチュレータ一部を通過する。そこで n-ブタノール分は気化され、サンプルガスに拡散される。直後に、サンプルガスと気化された n-ブタノール分は冷やされたコンデンサー (10°C) を通過しアルコール分は飽和され、粒子サンプルが核となり、飽和された n-ブタノールと共に凝集する。その凝集した粒子を光散乱方式を用い粒子個数を測定する。CPC の精度は粒子濃度が 5×10^5 個/cm³ では ±10 % であり、それ以上の濃度の場合は ±20 % である。

- PC

粒径 300nm~5000nm の粒子濃度測定にはパーティクルカウンタ (PC: Particle Counter, リオン KC-01E) を用いた。PC の仕様を表 2-2 に示す。PC は光散乱方式を利用しダクト内の浮遊状の粒子濃度を粒径別に測定する機器である。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、レーザー光を試料ガスにあてることで粒径の判別と計測が可能となる測定器である。測定可能範囲は 300nm 以上である。これは小さい粒径は散乱強度が小さすぎるため測定出来なくなるからである。300~500nm, 500~1000nm, 1000~2000nm, 2000nm~5000nm, 5000nm 以上の 5 つの測定範囲で同時測定を行なえる。ここでは希釈器を用いているため 5000nm 以上の粒子は計測対象外とする。

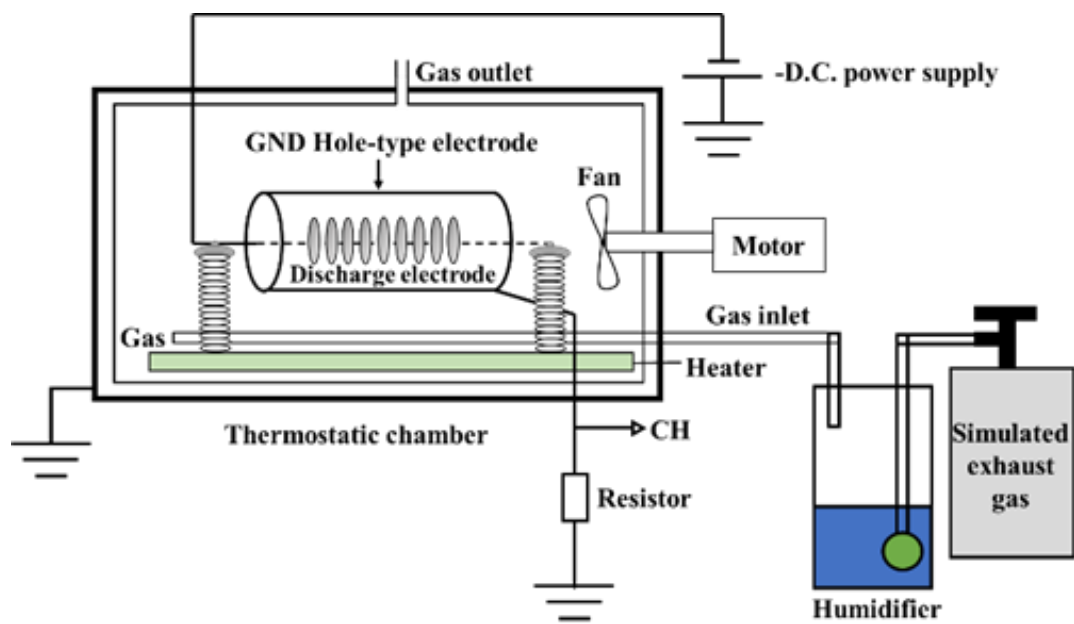


図 2-1. 直流高温実験システム

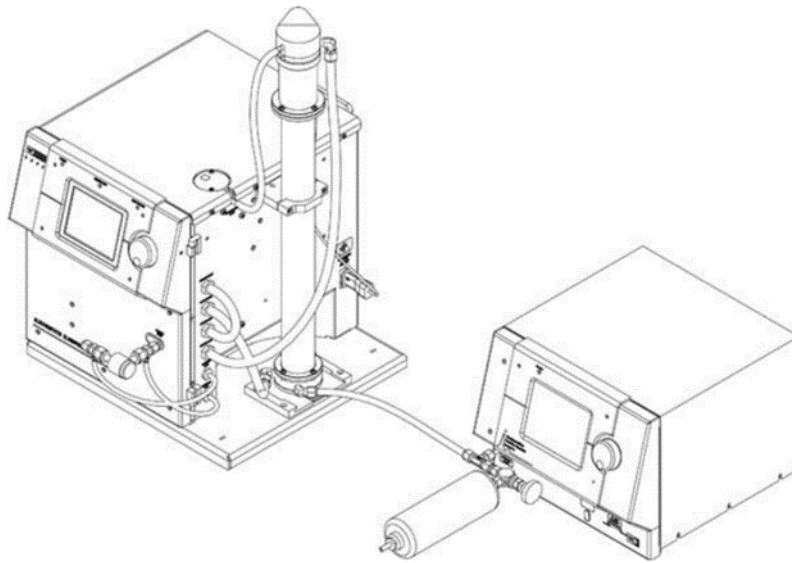


図 2-2. SMPS

表 2-1. SMPS の仕様

粒径範囲	10-487 nm
分解能	54 チャンネル
濃度範囲	100-100000000 p/cm ³
測定時間	3分/1 Scan(固定)
データ平均時間	1-20 Scanの粒径分布を任意に選択して平均化
サンプル流量	1.0 L/min
シース流量	4.0 L/min
アルコール	n-ブタノール
アルコール容量	1L(30日連続計測可能)
環境温度	5-35°C
保管温度	0-40°C
サンプル条件	温度:5-35°C 湿度:0-95°C 気圧:75-105 kPa(海拔2132 m)
データロガー	接続されているPCのハードウェアに自動的に保存される
データ容量	1スキャンあたり1 KB
インサレット サイクロン50%カット径	0.8 μm
ディスプレイ	320×240(ドット)
ウォームアップ時間	12分(20°C)
インターフェイス	RS232コネクタ
電源	90-260 VAC 50/60 Hz 250 W
寸法	D 440×W 350×H590 (mm)
重量	28 Kg

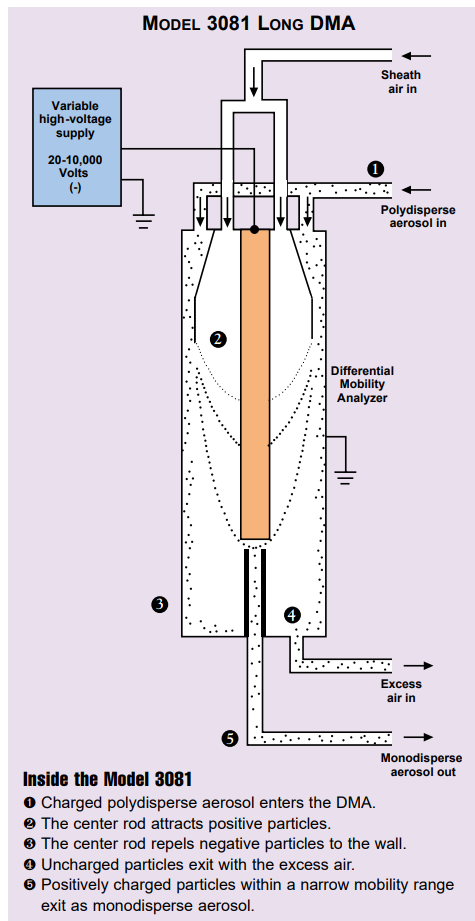


図 2-3. DMA の原理

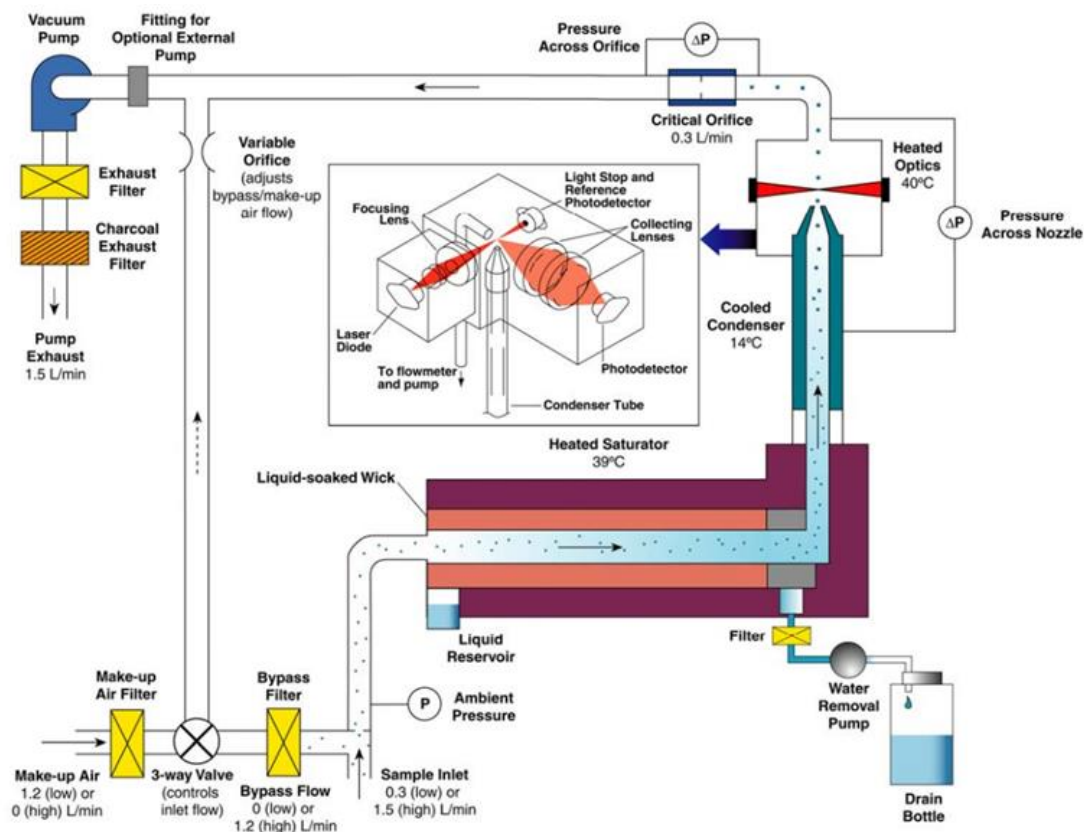


図 2-4. CPR の原理

表 2-2. PC の仕様

Particle Counter リオン株式会社	
形式	KC-01C、KC-01E
光学系	光軸交角70度散乱方式
流体系	試料空気を洗浄空気により同軸状に包み込む
吸引空気流量	0.5[L/min]
測定粒径分布	300~500, 500~1000, 1000~2000, 2000~5000, 5000[μ m]以上
最大個数濃度	100000[個/L]
感度調整	測定開始後、自動で行われる
試料空気量	手動測定 任意
	自動測定 1L, 10L, 0.01[], 0.1[] CF: 立法フィート
利用温湿度範囲	0~40[°C] 85%RH以下

2-2-2 電極構成

実験で使用したステンレス製棘電極と円板電極の写真を図2-5に示す。棘の本数は6, 12, 24本の3種類である。棘6本と円板の包絡直径は30mmで、12本と24本の包絡直径は60mmと等しい。棘の先端角度は20°で板厚は1mmである。実験では図2-1に示したように放電電極を軸方向に10mmピッチで並べて行った。

放電電極の規格を表2-3に示す。棘6と12本は棘のピッチが16mmと等しく、24本のピッチは8mmである。棘6本では異なる接地電極を用い、3種類のギャップ長で実験を行った。

図2-6に電極のセットアップを示す。(a)に示すように、放電電極の数は9であり、放電電極間の距離はそれぞれ10mmであった。放電電極は、(b)に示すように、ホール型の円筒形GND電極の中央に配置した。絶縁として使用されているがいしは、放電電極の両端に取り付けられた。

2-2-3 集じん率の計算方法

集じん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、これらの差から集じん率を算出した。また、集じん率は瞬間値ではなく、集じん開始と終了までの時間平均値を用いた。個数集じん率の算出式を式(2-1)に示す。

$$\eta = \left(1 - \frac{N_{IN}}{N_{OUT}}\right) \times 100 \quad (2-1)$$

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 : 個数集じん率 [%]

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

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

$$V_{ps} = V_p \times N \quad (2-3)$$

$$m = V_{ps} \times m_d \quad (2-4)$$

$$\eta_a = \left(1 - \frac{m_{IN}}{m_{OUT}}\right) \times 100 \quad (2-5)$$

r_1	: 粒子半径 [m]	V_p	: 粒径別体積 [m ³]
N	: 粒径別個数 [parts/m ³]	V_{ps}	: 粒子総体積 [m ³ /m ³]
m	: 総重量 [mg/m ³]	m_d	: 比重 [mg/m ³]
m_{IN}	: 上流側の総重量 [mg/m ³]	m_{OUT}	: 下流側の総重量 [mg/m ³]
η_a	: 重量集じん率 [%]		

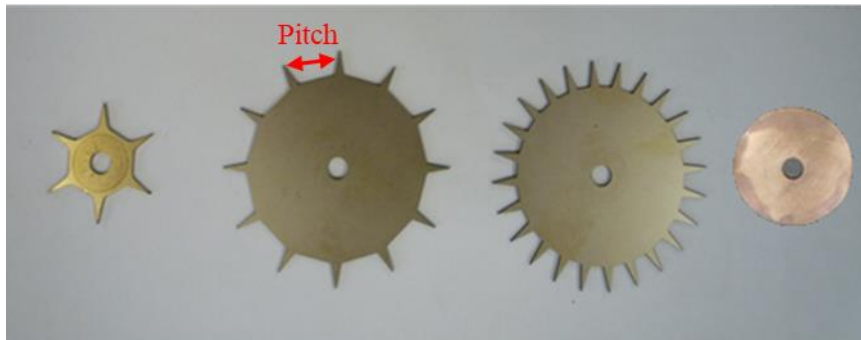
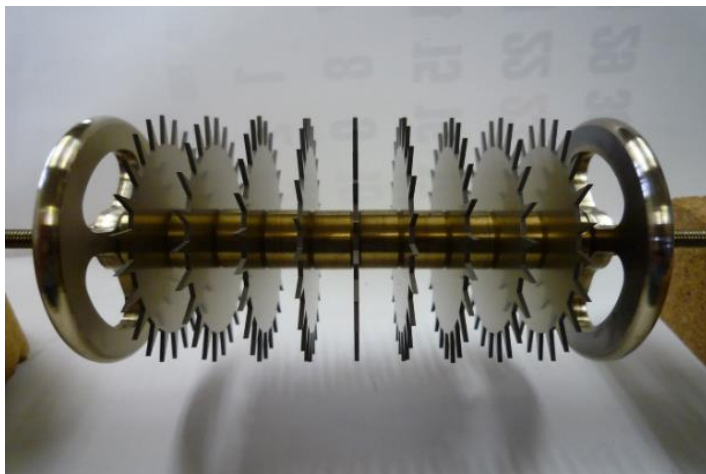
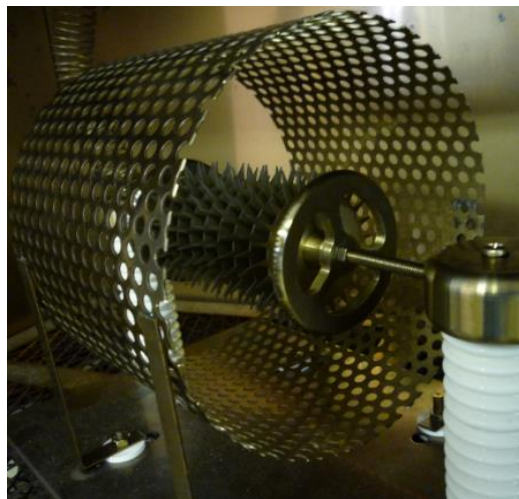


図 2-5. 放電電極規格図



(a) 放電電極



(b) ホール型 GND 電極

図 2-6. 電極のセットアップ

表 2-3. 電極構成の規格

Symbol	Projection	Pitch [mm]	Gap [mm]	GND dia [mm]
P6-G15	6	16	15	Φ 60
P6-G30	6	16	30	Φ 90
P6-G45	6	16	45	Φ 120
P12-G45	12	16	45	Φ 150
P24-G45	24	8	45	Φ 150
D-G30	Disc	-	30	Φ 90

2-3 高温雰囲気における直流放電特性

2-3-1 電流に対する温度と湿度の影響

電流に対する温度の影響を図 2-7 に示す。棘電極 6 本とギャップ 30 mm で実験を行った。プロットは加湿時、線は乾燥時で、結果はすべて放電開始からスパークオーバ直前までプロットした。加湿時と乾燥時に問わず、同じ電圧において、放電電流は温度上昇とともに増加していることが確認された。これは高温で電離係数が増加し、電子とガス分子の非弾性衝突により、より多くの電子が生成されることも意味する。ガスの相対密度は高温で減少し、それによって電子とガス分子の平均自由行程が増加する。初期の電離で生成された自由電子は、電界により加速され、電子エネルギーは増加する。同じ電界でも、電離係数は E/P の減少とともに増加する。したがって、電離係数は、温度上昇による圧力の低下とともに増加する。一方で、同じ温度で加湿時は乾燥時より放電電流値が低くなる傾向がある。これは加湿条件下において、水分子の電子付着によりコロナ放電電流が抑制されるが原因と考えられる。また、800 K での光電子放出による 2 次電離係数は 293 K での 4.4 倍であることが報告されている⁽⁹⁾。

更に、スパークオーバ電圧における温度の影響を図 2-8 に示す。横軸は温度、縦軸は放電電流とした。どの湿度条件においてもスパークオーバ電圧は温度上昇とともに下がる傾向が示された。また、加湿時は乾燥時に比べ、スパーク電圧が高かった。これも同じく水分子の電子付着によりコロナ放電が抑制されたと考えられる。乾燥ガス中の電子付着によるマイナスイオンは酸素から発生する。しかし、水分子の電子付着に寄与するエネルギー分布は、酸素のエネルギー分布とは異なり、効果的であると考えられる。そして、より高い温度では、加湿条件と乾燥条件の差は減少した。

2-3-2 放電電極特性の検討

円板電極を用いた実験も行い、その結果を図 2-9 に示す。実験条件は図 2-7 と同じであった。電流に対する温度の影響は棘電極と同じであるが、放電電流値において、どの温湿度条件でも、棘電極の値より小さいことを示している。また放電開始電圧も棘電極の方が小さかった。

コロナ放電電流は温度によって大きく異なることは緒論で述べた。ディーゼルエンジンの排気ガス温度は、エンジン負荷に依存する。そのため、船舶用ディーゼルエンジンの排気ガスに ESP を応用する場合は、安定した放電状態を確保するために、印加電圧を制御して電流を一定に保つ必要がある。このため、放電安定領域が広いと、コロナ放電電流の制御が容易になり、集じん性能も向上する。本研究では放電開始電圧とスパークオーバ電圧の差を放電安定領域(コロナ放電電圧領域： ΔV)として定義し、検討を行った。

図 2-7 と図 2-8 をもとに、放電安定領域を評価基準とした特性を図 2-10 に示す。温度上昇とともに、両電極の放電安定領域は狭くなる傾向であった。また、どの温度においても円板電極より棘電極の方が、放電安定領域が広いことを示している。一方、同じ電極において、加湿時の放電安定領域は乾燥時より広がった。これは水分子による放電の抑制効果と考えられる。以上の特性から、円板電極より棘電極の方が高温雰囲気における ESP の稼働に適すると考えられる。

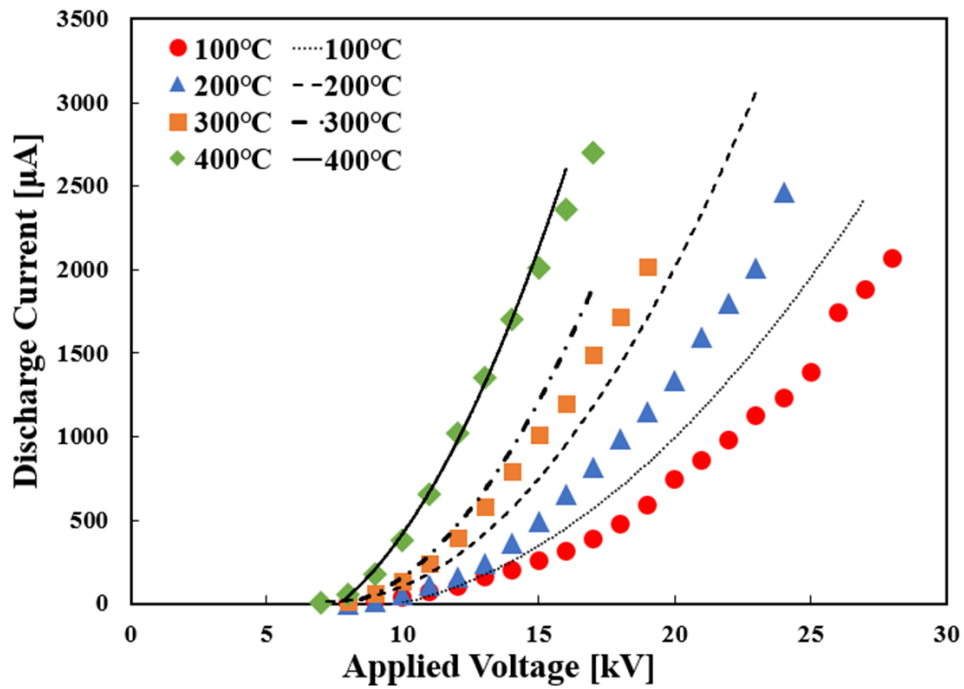


図 2-7. 放電電流に対する温度の影響

P6-G30

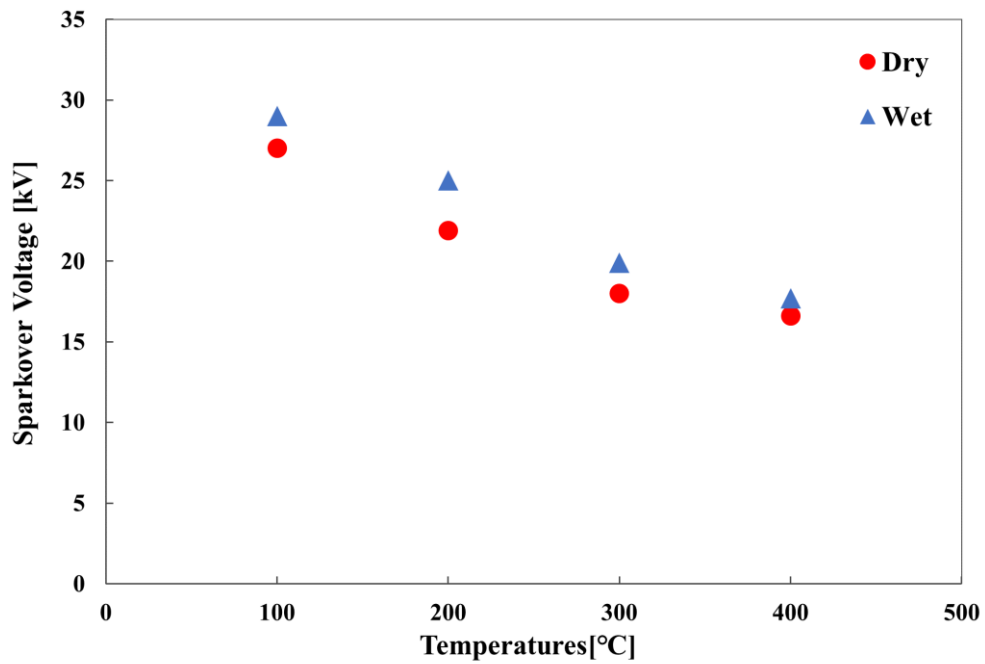


図 2-8. スパークオーバ電圧における温度の影響

P6-G30

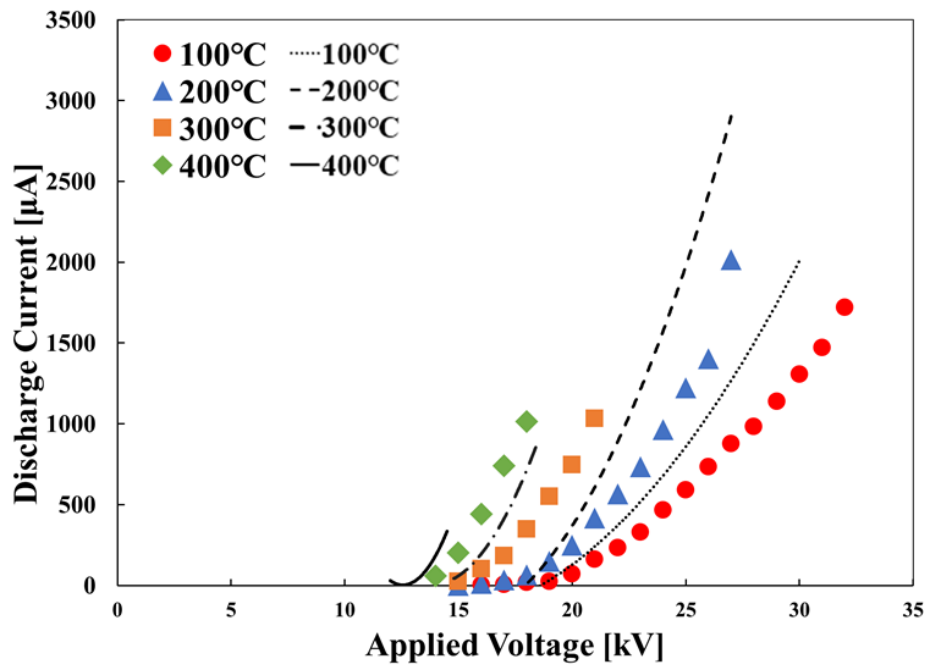


図 2-9. 放電電流に対する温度の影響

D-G30

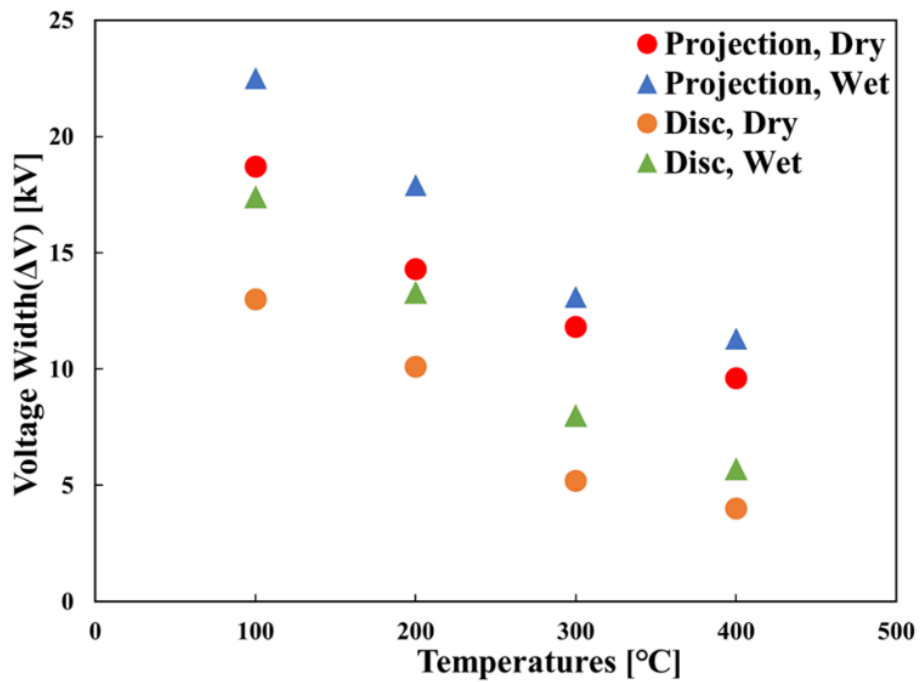


図 2-10. 放電安定領域における放電電極の影響

P6-G30

2-3-3 放電ギャップ特性

板電極より棘電極の方が高温 ESP に適することが分かったため、棘電極を用いた場合のギャップ特性も検討した。

加湿状態の電流電圧によるギャップ特性を図 2-11 に示す。棘 6 本の電極を使用し、放電ギャップは 15mm, 30mm, 45mm とした。放電開始からスパークオーバーまでプロットした。どの放電ギャップでも、放電安定領域は温度の上昇とともに減少した。また、同じ温度において、ギャップが大きいほど、同電圧における放電電流値が小さくなることが示された。次に、高温雰囲気下の放電安定領域における放電ギャップの影響を図 2-12 に示す。縦軸は放電安定領域、横軸は温度とした。どのギャップでも、放電安定領域は温度の上昇とともに減少し、400°C になると、放電安定領域は 50% 未満までに減少した。また、ギャップ 45mm の放電安定領域はほかのギャップより広い。しかし、図 2-10 の結果を考慮すると、ギャップ 45mm の放電安定領域は広がったが、放電電流値は低い。そのため、粒子を十分に帯電するためには、電極枚数を多くする必要がある。

2-3-4 棘本数と放電電流の関係

棘本数における電流電圧特性を図 2-13 に示す。ギャップは 45mm で、棘本数が違う 3 種類の電極を使用した。実験条件は加湿時で、模擬排ガス温度 300°C、印加電圧-16kV とした。棘 6 本は他の形状に比べて、放電開始電圧が低く、放電電流値が一番高かった。また、棘 24 本は棘 12 本に比べて、放電電流が低かった。この理由は同じ包絡直径で、棘本数が多い程、ピッチが小さく、棘先で発生した電界が相互干渉し、弱まることが原因と考えられる。

放電安定領域の温度特性を図 2-14 に示す。どの電極形状でも、温度上昇とともに安定領域が下がる傾向が示された。また、どの温度においても、棘 6 本の放電安定領域が一番広がった。一方、棘 24 本の安定領域が一番小さいことが示された。

放電電流値を棘本数で割って一本あたりの放電電流値を求め、その値と温度の関係を図 2-15 に示す。棘 6 本の方は電流が高く、棘 24 本が一番低い傾向であった。

以上の結果より、棘 6 本の放電電流が高く、放電効率が一番良かった。しかし、ESP の放電電極では一本あたりの放電電流が低いほど、電極の摩耗が少なくなり、電極の寿命が長くなる。さらに、棘の数が多いほど、放電ギャップでより均一な放電が生成される。粒子の帯電は放電電流に大きく依存することを考慮すると、4 つの電極の中で、棘 12 本の電極が ESP に最も適していると考えられる。

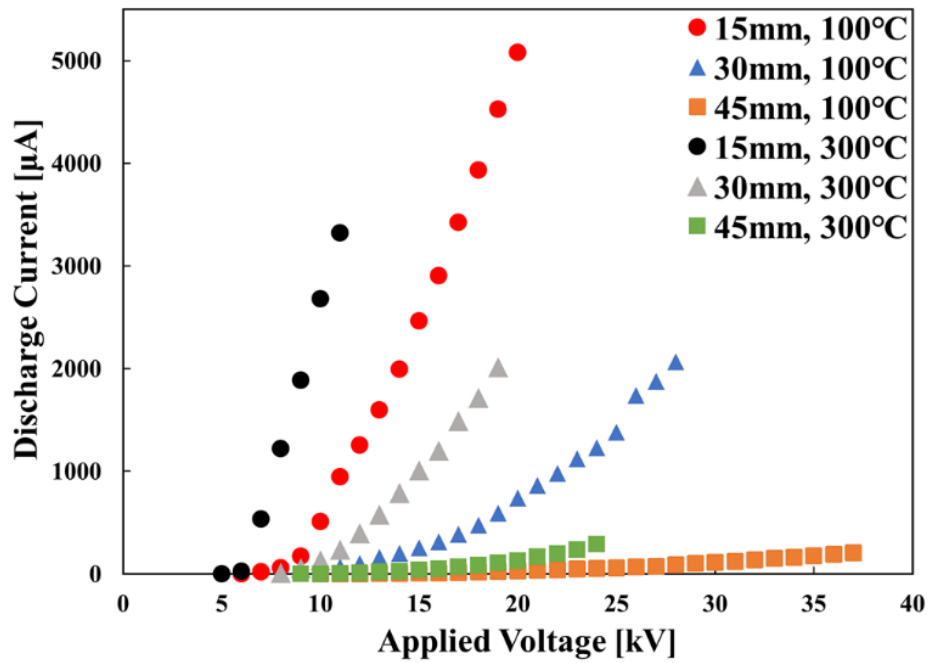


図 2-11. 電流電圧によるギャップ特性
P6-G15, P6-G30, P6-G45

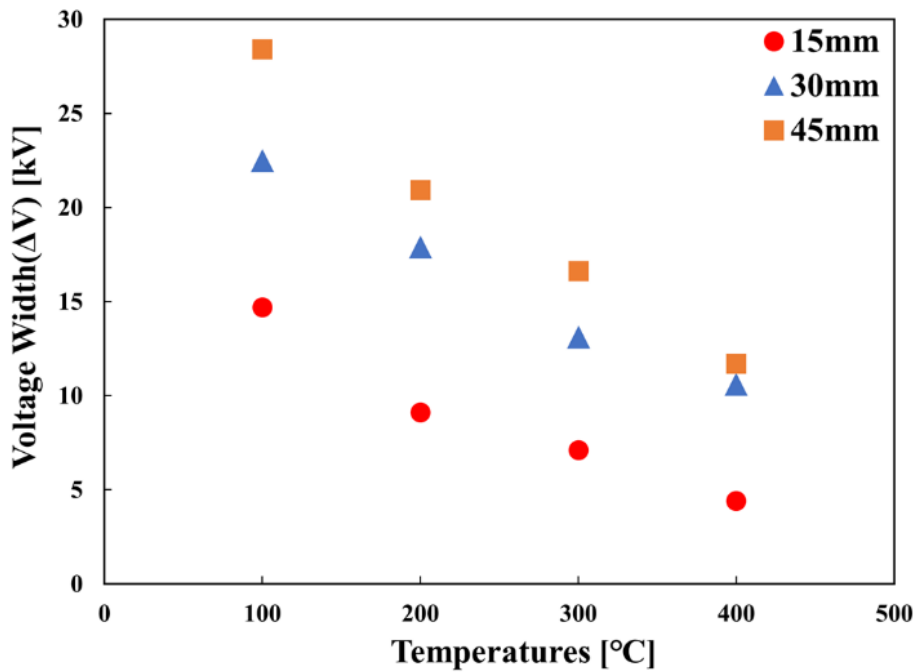


図 2-12. 放電安定領域におけるギャップ特性
P6-G15, P6-G30, P6-G45

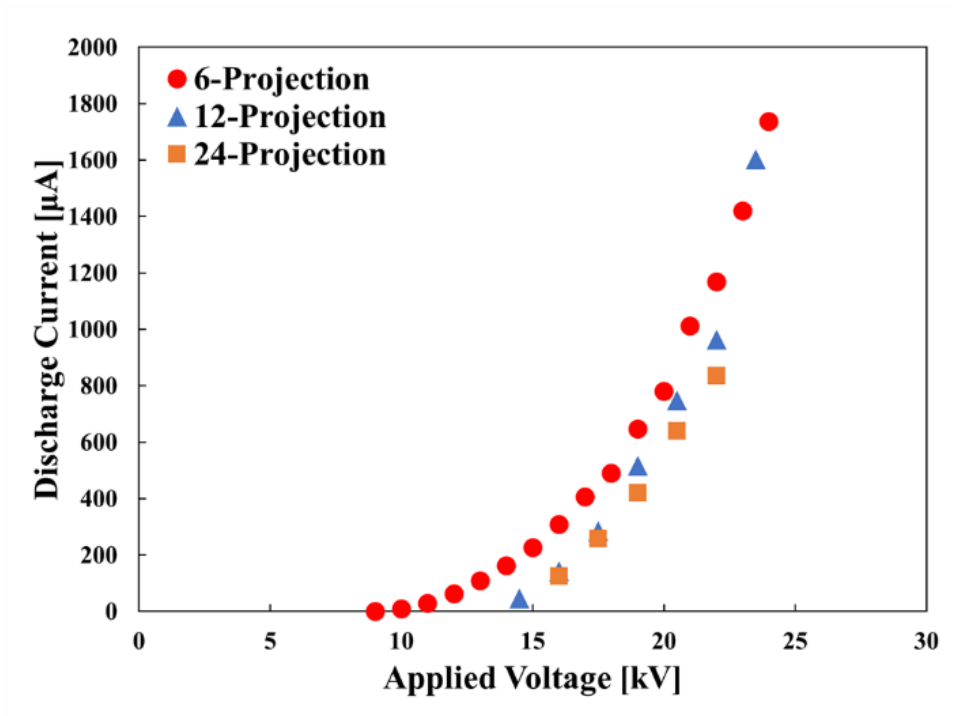


図 2-13. 棘本数における電流電圧特性
P6-G45, P12-G45, P24-G45

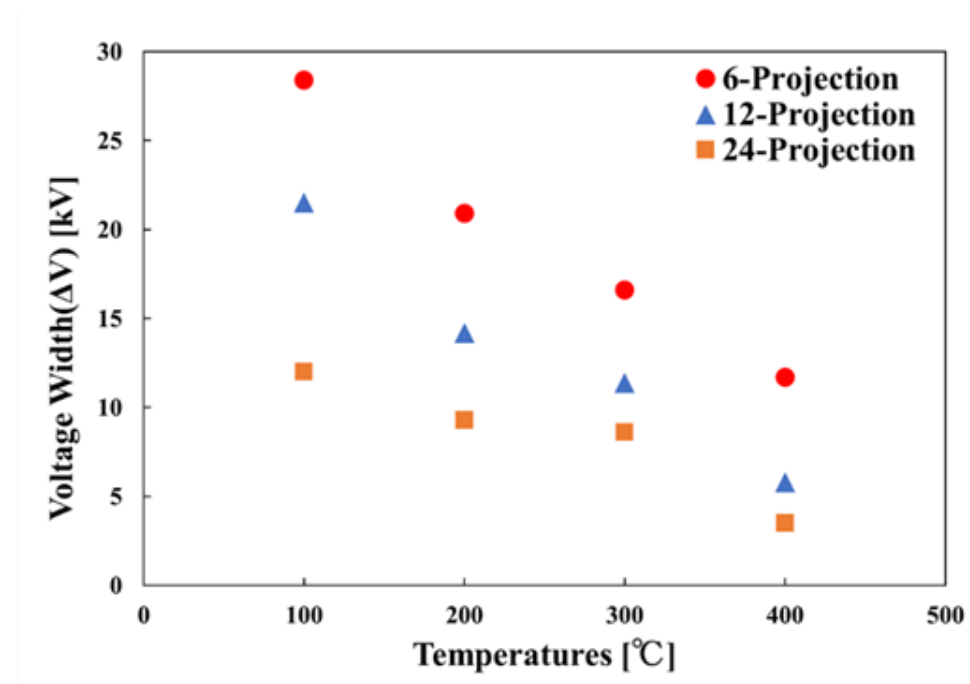


図 2-14. 放電安定領域の温度特性
P6-G45, P12-G45, P24-G45

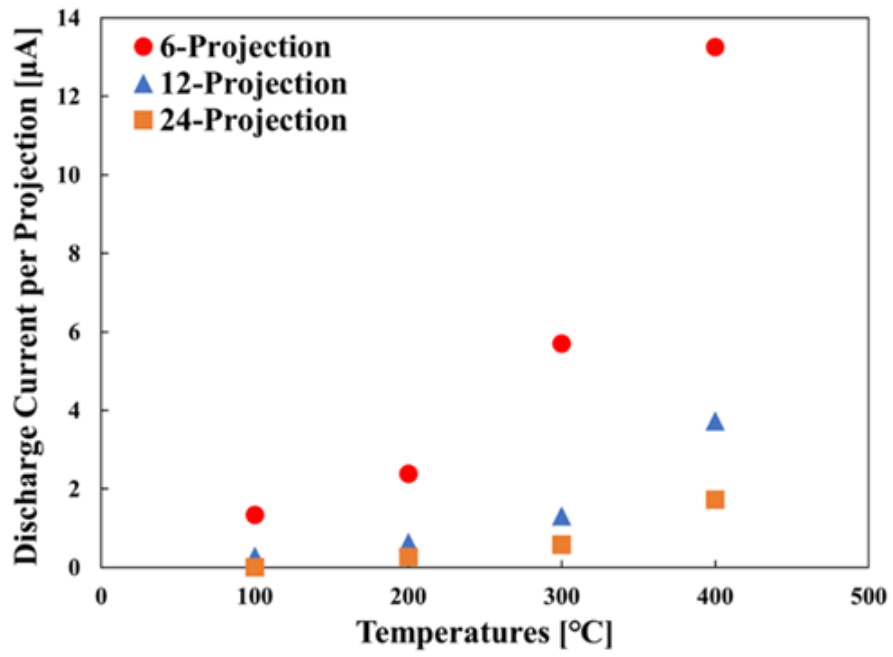


図 2-15. 棘本数における電流電圧特性
P6-G45, P12-G45, P24-G45

2-3-5 集じんに対する電極数の影響

棘電極を帯電部とし集じん部を設けた2段式ESPにおいて、ディーゼル排ガスの有無による直流とパルス電流電圧特性を電極枚数8枚で実験を行った。ディーゼル排ガスを直接ESP内に流し、流入温度は約120°C前後とした。直流の電流電圧特性を図2-16に示す。ディーゼル排ガスを流入した場合、放電開始電圧は15kVで、スパーク電圧は23.5kVに対して、流入してなかった場合は17kVと24kVであった。放電開始電圧とスパーク電圧の減少は電極間に空気より電気抵抗率が低いかつ粒子密度が高いディーゼル排ガスが多く存在することで、電離しやすくなって、放電しやすくなっていることが原因と考えられる。

ディーゼルエンジンの排ガスを処理した結果を図2-17に示す。放電ギャップ長および集じん部の電極間隔は45mmで、印加電圧はスパーク電圧より0.5kV下げた、22, 23kVである。棘数24本の電極を用い、電極を2, 4, 8枚用いた結果を示している。電極のセット数が多いほど、集じん率が高くなっている。これは、放電電流が大きくなったことや、帯電領域の増加が原因と考えられる。以上のことから、棘電極を使用し適正な電極構成を用いることで、高温状態でも安定した放電が持続し、高い集じん効率が得られるESPの構築が可能となることが示唆された。

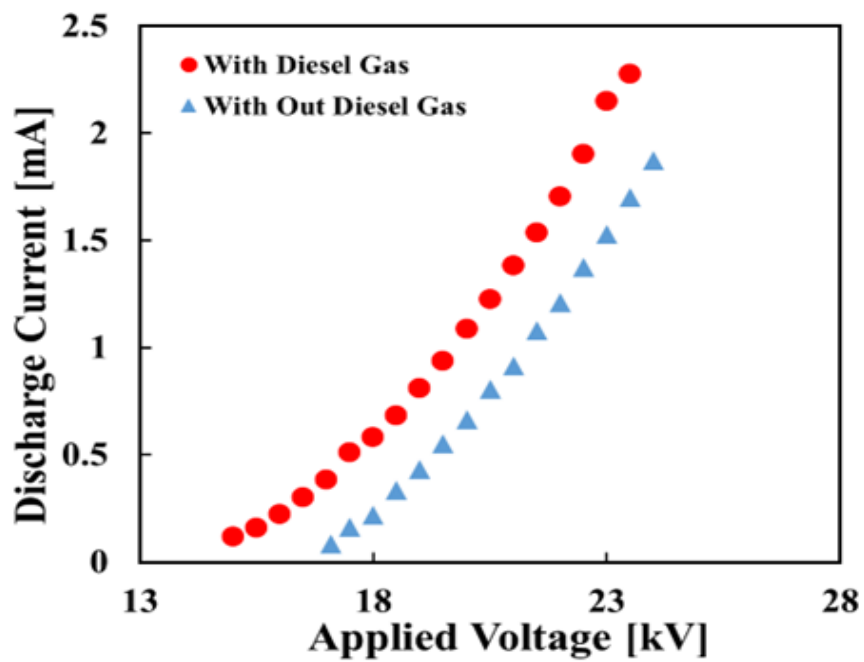


図 2-16. 電流電圧におけるディーゼル排ガスの影響

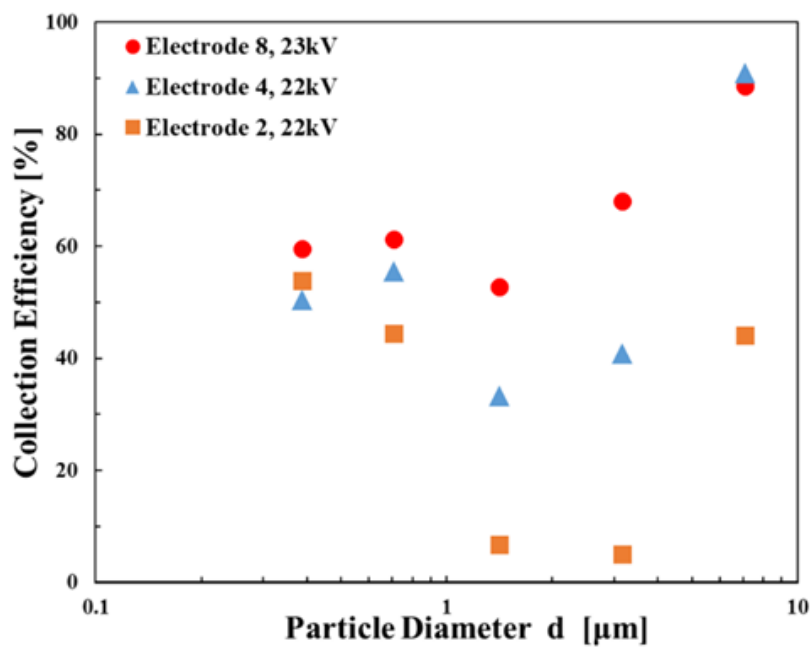


図 2-17. 集じんに対する電極数の影響

2-4 結言

本研究では、負極性の直流放電型 ESP の最適な電極配置と高温で安定した放電発生について、以下のことを明らかにした。

1. ディーゼルエンジンの模擬排ガス温度が高くなると、コロナ放電安定領域が狭くなる。
2. 放電電極ギャップが同じ場合、高温時のスパークオーバ電圧は乾燥時よりもわずかに高くなることが示された。
3. 高温高湿ガス雰囲気では、棘電極の方が円板電極よりコロナ放電電流および放電維持領域が高かった。したがって、棘電極は円板電極より高温ディーゼル排ガスの捕集に適していることが確認された。
4. 放電ギャップ 15mm は高い放電電流値を得るのに適しており、放電ギャップ 45mm は放電安定領域を広げるのに適する。
5. 3種類の棘電極のコロナ放電特性を比較すると、6本の棘電極の総放電電流が最も高いことが分かった。しかし、異なる温度下での棘1本あたりの放電電流値の結果から、ESPには12本の棘電極が適する。12本の棘電極の方が同じ電流での帯電効率が高いと考えられる。

以上のことが新しい放電電極を用いた直流放電型 ESP の高温放電特性において明らかになったことである。しかしながら、高温、ここでは 400°C において、放電の安定領域が広くなかったことが課題になる。要するに、直流放電を用いたこの研究では、400°C において放電安定領域をある程度広げたが、10kV 以上の電圧を制御できる安定したコロナ放電が発生出来なかった。したがって、電極構成とは別の方法から放電安定領域を広げる必要がある。

参考文献

- (1) F.D. Natale, C. Carotenuto: 「Particulate matter in marine diesel engines exhausts: Emissions and control strategies」 Transportation Research Part D 40, P.166-191, (2015)
- (2) A. Bologna, H.-R. Paur, H. Seifert, K. Woletz: 「Influence of Gas Composition, Temperature and Pressure on Corona Discharge Characteristics」 International Journal of Plasma Environmental Science & Technology, Vol.5, No.2, (SEPTEMBER 2011)
- (3) M. Abdel-Salam, N.L. Allen: 「Current-voltage characteristics of corona in rod-plane gaps as influenced by temperature」 IEE Oric-Sci, Meas, Technol, Vol.150, No.3, (May 2003)
- (4) Z.D. Yuan, K. Suzuki, Y. Ehara, J. Ikeda, K. Yamashiro, T. Takano: 「Corona Discharge Characteristics in Electrostatic Precipitator under High Temperature」 in Proc. IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet., 2020-EPC-1098, (2020)
- (5) Charles G. Noll: 「Temperature dependence of dc corona and charge-carrier entrainment in a gas flow channel」 Journal of Electristatics 54, P.245-270, (2002)
- (6) A. Yawootti, P. Intra, N. Tippayawong, P Rattanadecho: 「An experimental study of relative humidity and air flow effects on positive and negative corona discharges in a corona-needle charger」 Journal of Electristatics, Vol.77, P.116-122, (October 2015)
- (7) X.H. Wang, C.F. You: 「Effect of humidity on negative corona discharge of electrostatic precipitators」 IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.20, No.5, (Oct. 2013)
- (8) G. Rinard, D. E.Rugg, T. Yamamoto: 「High-temperature high-pressure electrostatic precipitator electrical characterization and collection efficiency」 IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, Vol. IA-23, No.1 , Pages 114-119, January 1987
- (9) J.H. Chen, J.H. Davidson: 「Model of the negative dc corona plasma: comparison to the positive dc corona plasma」 Plasma Chem. Plasma Process., 23 (1), P.83-102, (2003)

第3章 高温に対応するパルス放電型 ESP 内の粒子挙動解析

3-1 緒言

パルス放電を用いた時、ESP の粒子における帯電効率や動きを明らかにすることは非常に重要である。パルス放電は高速な立ち上がりを持つ断続的な放電形態である。極端な大気圧非熱平衡状態を実現できることが知られている⁽¹⁾。通常の大気圧放電では高エネルギー電子を多量に生成することが難しいが、パルスストリーマ放電を用いることで、均一な放電中に高エネルギー電子を生成することが可能となる。そのため、パルス放電は大気中有害物質の除去にも適応が検討されている⁽²⁾。ESP 内の粒子挙動は ESP の集じん効率に深く関わっており、ESP 内の粒子挙動と集じん効率には明確な関係があると予想される。したがって、粒子画像流速測定 (PIV) 法は ESP の設計と改善に適していると考えられます。この方法は通常、流体力学の研究に使用される。また、粒子の挙動や、EHD の流れの 1 つであるイオン風を解析するためにも使用される。非接触計測で粒子の運動分布を解析できる手法である。Honma 氏らは針電極から発生するイオン風による可視化粒子の動きを PIV 法で観察した⁽³⁾。さらに、Mizeraczyk 氏らは、PIV 法を使用して、ワイヤ対平板電極構成の ESP 内におけるガス流の速度場を測定し、二次流れが微小粒子の運動と捕集に大きな影響を与えることを報告している⁽⁴⁾。Niewulis 氏らは、狭いワイヤーシリンダータイプの電気集じん機における EHD の流れパターンと収集効率を調査し、瞬間的な粒子の流れパターンが正の電圧極性に対して規則的であることを観察した。流れの構造は、負の電圧極性ではより不安定で乱流であった⁽⁵⁾。著者らは再飛散粒子の挙動について PIV 法を使って、解析を行った⁽⁶⁾。

したがって、高温時においてパルス電圧を印加することで、放電安定領域を長く取ることが期待できる。本研究はスモールモデル ESP にパルス放電を印加し、針対平板とワイヤ対平板構成における粒子挙動に着目し、放電ギャップ、パルス繰返し周波数、印加電圧などの影響を検討した。

3-2 実験方法

3-2-1 実験システム

本研究で使用した実験システムを図 3-1 に示す。ESP の上部には粒子可視化のためのレーザー(日本レーザー、DPGL-2W、 $\lambda=532$ nm)を配置し、レーザーシート(1mm 厚)はガス流入方向と平行に照射している。ハイスピードカメラ(Photron FASTCAM SA4)を ESP の側面に配置した。可視化された粒子がハイスピードカメラにより撮影し、データを PC に転送し PIV で解析を行った。カメラの解像度は 1024×1024 pix とした。トレーサ粒子としてエチレングリコールの水溶液を気化させた粒子(直径= $1 \mu\text{m}$ 以下, 抵抗率 $10^4 \Omega \cdot \text{m}$)を使用した。実験では、立ち上がり時間 30、80、500、3800ns の負極性パルス電圧と立ち上がり時間 50、80、500、3800ns の正極性パルス電圧を印加した。

パルス放電発光の可視化については、図 3-1 中のハイスピードカメラをゲート付きイメージンテンシファイア(浜松ホトニクス製 C9016-03)及び CCD カメラ(浜松ホトニクス製 C9018)に付け替え、正極性または負極性のパルス放電発光を観測した。

3-2-2 ESP の解析モデル

作成した ESP のスモールモデルを図 3-2 に示し、長さ 350mm、幅 45mm、高さ 45mm の透明なアクリルでできている。(a)は針対平板電極のモデル図になる。針電極はステンレス製で、直径は 2mm、曲率半径は 0.25mm、角度は 25° となる。放電ギャップは針電極先端から GND 電極までの距離を 20mm で固定した。主流体速度が $0 \sim 0.3 \text{m/s}$ であった。(b)はワイヤ対平板電極構成で、放電ギャップを 10~25mm とした。主流体速度が 0m/s であった。

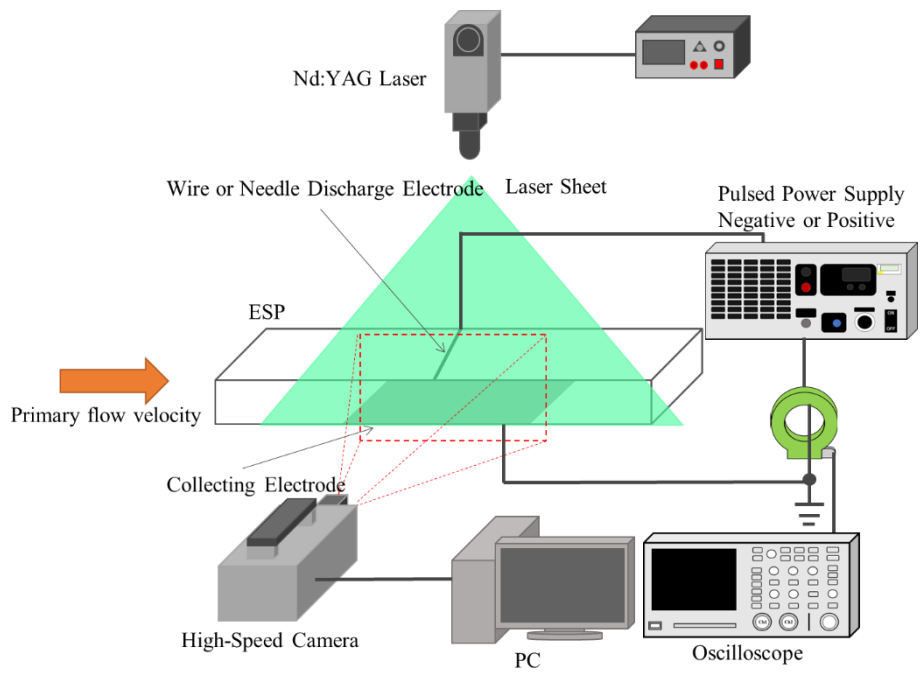


図 3-1. 粒子の可視化システム

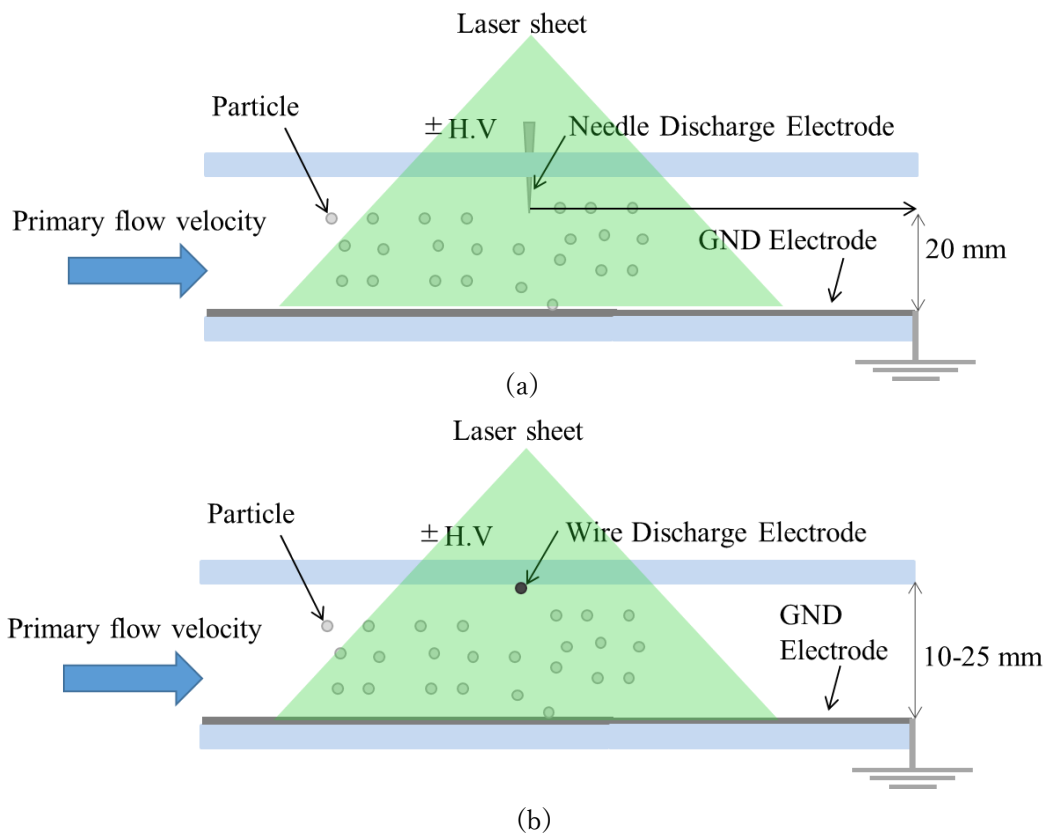


図 3-2. ESP モデル

3-3 針対平板電極構成における粒子挙動解析

3-3-1 電流電圧特性

図 3-3 は各パルス放電におけるピーク電流電圧特性になる。(a)に印加した正極性のパルス電圧は立ち上がり時間が 50、80、500、3800ns のものとし、電流のピーク値を計測した。立ち上がり時間 30ns のパルス電圧については 25kV 付近で、500ns の電源では 19kV 付近で電流値が上昇した。これは放電形態の変化によるものだと考えられる。また立ち上がり時間 30ns のパルス電圧において最も電流値が高い値を示した。これは放電開始電圧とピーク電圧の差である過電圧が一番大きいためだと考えられる。(b)は負極性の立ち上がり時間が 30、80、500、3800ns のパルス放電を印加した。

3-3-2 粒子の可視化と PIV 画像

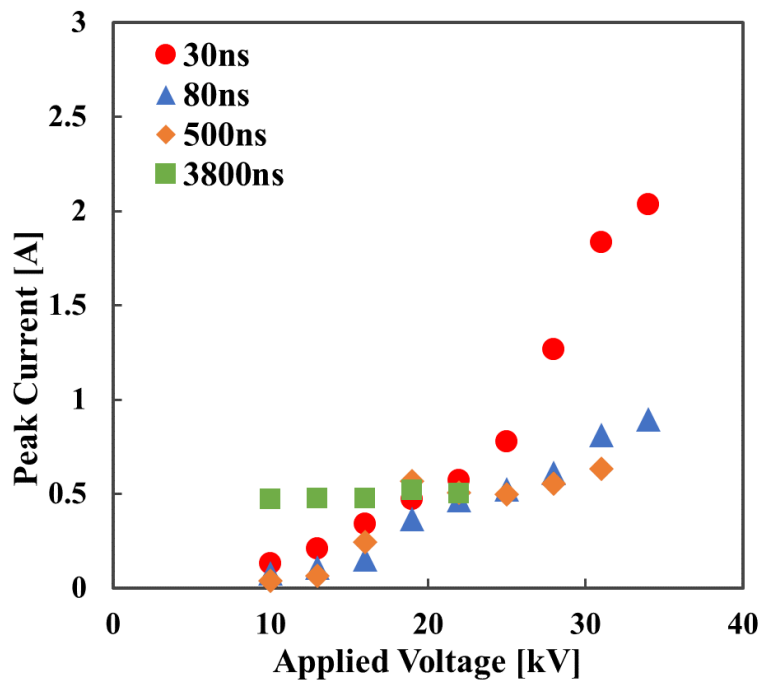
16kV での粒子解析画像を図 3-4 に、34kV での粒子解析画像を図 3-5 に示す。(a)は放電発光画像、(b)は粒子画像、(c)は PIV 解析画像である。主流体速度は 0m/s、パルス立ち上がり時間 80ns、パルス繰り返し周波数は 500pps とした。

(a)の放電発光画像では 16kV では針先付近でのみストリーマが伸びているのに対し、34kV では平板電極付近までストリーマが伸びている様子が確認できた。(b)の粒子画像では 16kV では針から平板方向に向かって粒子が流れている。それに対し、34kV では粒子が下から上に上昇していく様子が見られた。これは(c)の PIV 解析画像からも確認できる。

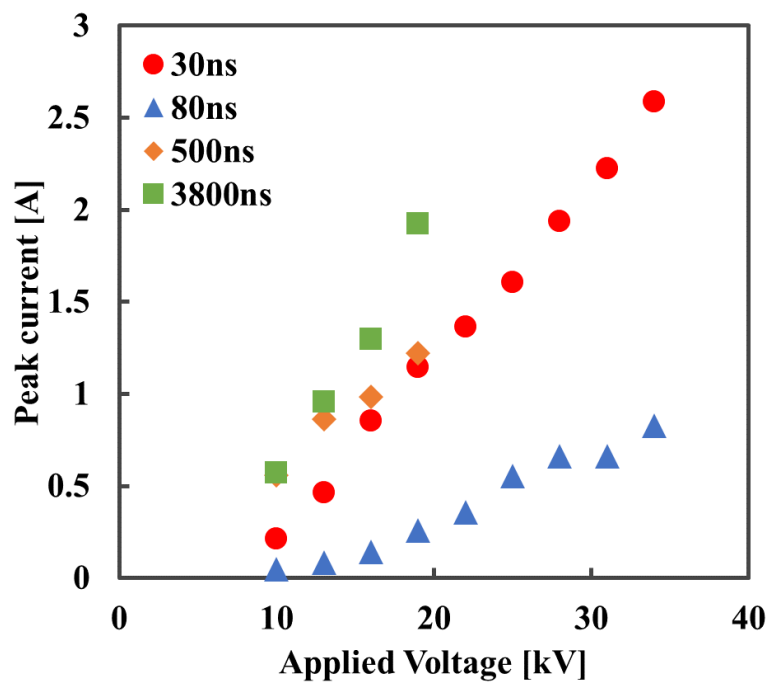
以上のことから、ストリーマの先端でイオン風が発生するため、針先付近でストリーマが伸びている発光では粒子が針から平板に向かう挙動に、ストリーマが平板付近まで達している発光では粒子が平板から針方向に向かう挙動になるといえる。

-16kV での粒子解析画像を図 3-6 に、-34kV での粒子解析画像を図 3-7 に示す。同様に(a)は放電発光画像、(b)は粒子挙動画像、(c)は PIV 解析画像である。主流体速度は 0m/s、パルス立ち上がり時間 80ns、パルス繰り返し周波数は 500pps とした。

(a)の放電発光画像では針先付近でのみ発光しており、電圧を増加させることで発光する領域も広がることを確認できた。(b)の粒子画像では針から平板方向に向かって粒子が流れている様子が確認できる。これは(c)の PIV 解析画像からも確認でき、34kV での針直下の粒子速度は約 0.1m/s であった。

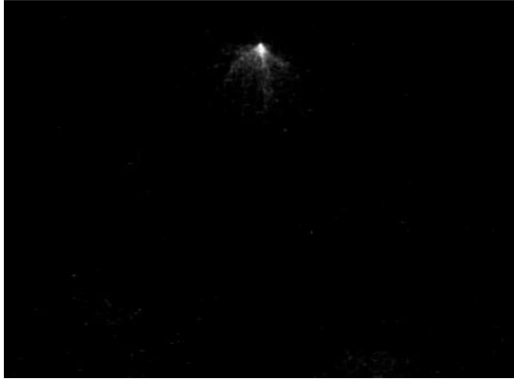


(a)正極性

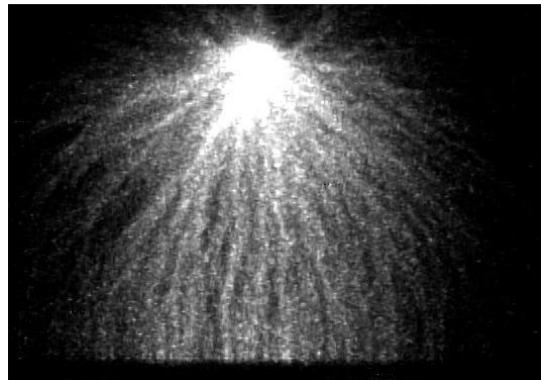


(b)負極性

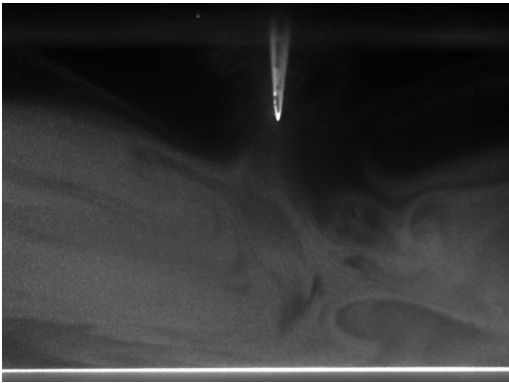
図 3-3. パルス放電におけるピーク電流電圧特性



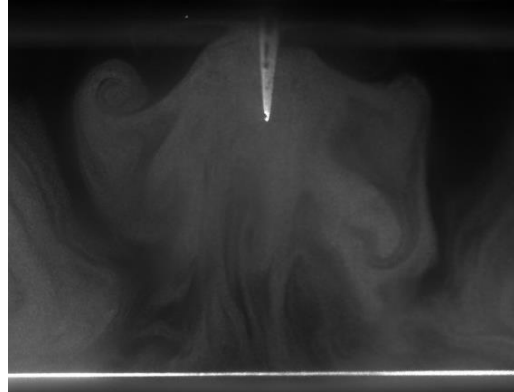
(a)放電発光



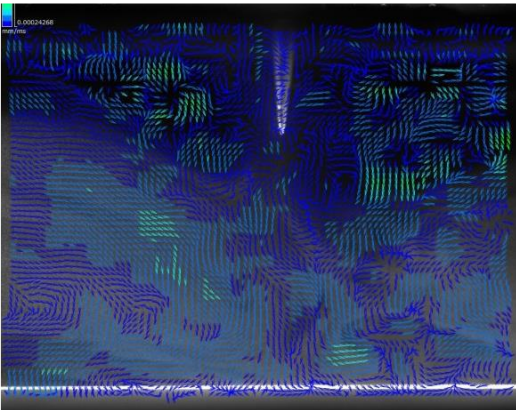
(a)放電発光



(b)粒子画像

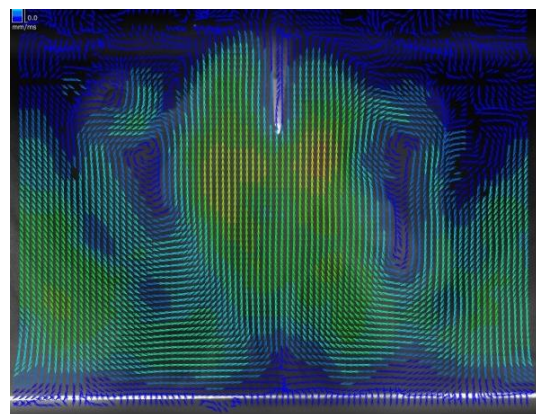


(b)粒子画像



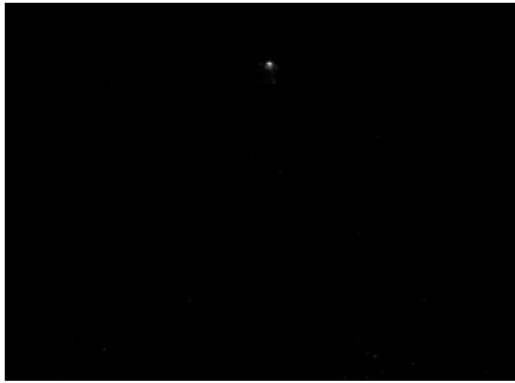
(c)PIV 解析

図 3-4. 正極性パルス
16kV

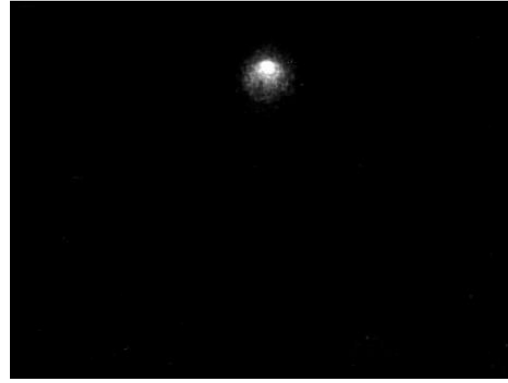


(c)PIV 解析

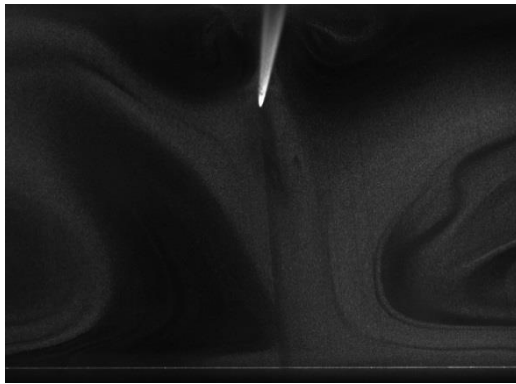
図 3-5. 正極性パルス
34kV



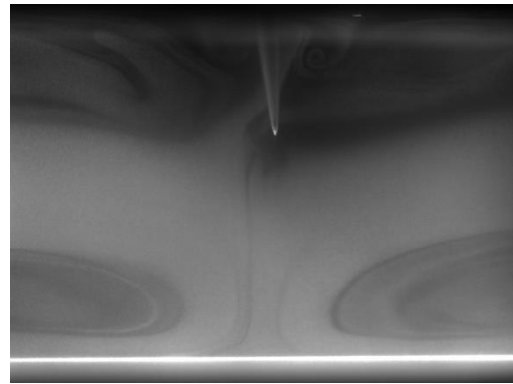
(a)放電発光



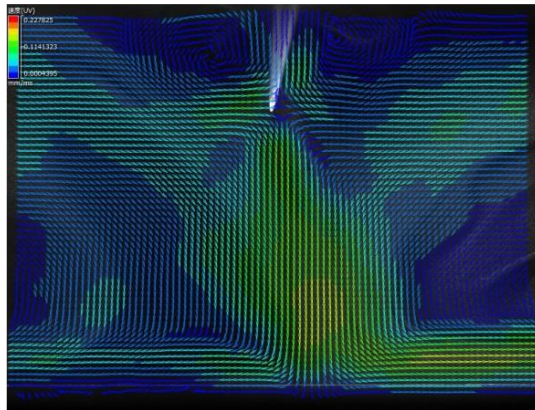
(a)放電発光



(b)粒子画像

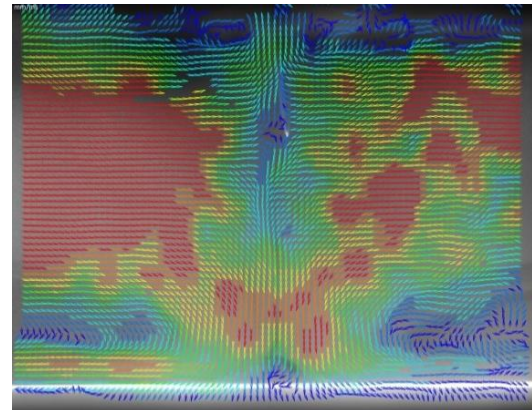


(b)粒子画像



(c)PIV 解析

図 3-6. 負極性パルス
-16kV



(c)PIV 解析

図 3-7. 負極性パルス
-34kV

3-3-3 平均粒子移動速度、粒子移動角度

平均粒子移動速度、粒子移動角度について、図 3-8 に示すような領域を分割して、解析を行った。6 等分にして各ブロックにおいて粒子移動速度、粒子移動角度の平均値を求めた。6 等分の仕方は行を 1 と 2, 列を a、b、c とし、放電電極は 1-b の上部に、GND 電極は 2 行目の下方に設置した。

● 正極性パルス

各領域における平均粒子移動速度を図 3-9 に、平均粒子移動角度を図 3-10 に示す。(a) は領域 1, (b) は領域 2 である。主流体速度は 0m/s、パルス立ち上がり時間 80ns、パルス繰り返し周波数は 500pps とし、印加電圧を 19~34 kV とした。また、粒子が動き始めてから 250ms 後の画像を用いて 5 回のデータを平均した。

図 3-9 から(a)、(b)ともに領域 b では電圧が上昇すると平均粒子移動速度も増加する傾向が見られた。これは電圧が増加すると放電電流が増加し、粒子の帯電量が増え、クーロン力が増加したためである。しかし(a)の 31、34kV では減少する傾向であった。また領域 a、c では電圧上昇による平均粒子移動速度の変化が見られないことから、電圧による粒子移動速度への影響は針直下の領域 b が大きいことを示した。

図 3-10 から(a)、(b)ともに 19kV では下方方向に、22kV 以降は上方方向に粒子が移動することが分かる。このことから 22kV からストリーマが平板まで到達すると考えられる。また電圧上昇による領域 b での角度の変化はなかった。領域 a、c では電圧の増加とともに平均粒子移動角度も増加した。平均粒子移動速度も大きく、平均粒子移動角度も 90 度付近であることから、正パルス放電において領域 1-b の粒子挙動に大きく影響を与えていると言える。

● 負極性パルス

正極性と同じ実験条件での負極性パルス放電の各領域における平均粒子移動速度を図 3-11 に、平均粒子移動角度を図 3-12 に示す。

図 3-23 から(a)の領域 b では電圧が上昇すると平均粒子移動速度も増加する傾向が見られた。これは電圧が増加すると放電電流が増加し、粒子の帯電量が増え、クーロン力が増加したためである。しかし(a)の領域 a、c では 22 kV 付近から減少する傾向であった。これは 22kV 付近で放電形態が変化したためである。また(b)においてはどの領域においても電圧増加に従い平均粒子移動速度も増加した。これは電圧が増加すると放電電流が増加し、粒子の帯電量が増え、クーロン力が増加したためである。

図 3-24 から(a)、(b)ともに電圧上昇により平均粒子移動角度は減少し、領域 b については-90 度付近まで到達した。これは電圧が増加したことによりイオン風が強くなり、針から平板方向の流れが強くなったためである。平均粒子移動速度が他の領域よりも速く、平均粒子移動角度も-90 度付近であることから負パルス放電において粒子挙動に最も影響を与えているのは領域 2-b である。

3-3-4 パルス周波数特性

平均粒子移動速度におけるパルス周波数特性の正負比較を図 3-13 に、平均粒子移動角度におけるパルス周波数特性の正負比較を図 3-14 に示す。(a)は領域 1-b、(b)は領域 2-b である。主流体速度は 0m/s、パルス立ち上がり時間 50ns、印加電圧を 28、34kV とし、パルス周波数を 1、10、50、100、500pps と変化させた。また、粒子が動き始めてから 200ms 後の画像を用いて 5 回のデータを平均した。

図 3-13 から正負どちらも電圧が高い方が粒子移動速度も大きいことが分かる。(a)では負極性、(b)では正極性の方が粒子移動速度は大きくなった。これは負極性では針先端付近でコロナ放電が発生しているのに対し、正極性はストリーマが平板付近まで達していることからイオン風が発生する場所が異なるためだといえる。また正負ともに 1、10pps では粒子移動速度が小さく、50pps 以降はパルス周波数を増加させると粒子移動速度も増加する傾向であった。

図 3-14 からパルス周波数にかかわらず正極性は平板から針方向に、負極性は針から平板方向に移動している事が分かる。これは先ほどと同じくイオン風の発生している場所が異なるためである。また正負ともに 1pps においても約 60 度の平均粒子移動角度であることから、粒子の流れを形成しているといえる。

以上より正負ともに 1pps においても平均粒子移動速度は小さいが、パルス放電により流れを形成できるといえる。

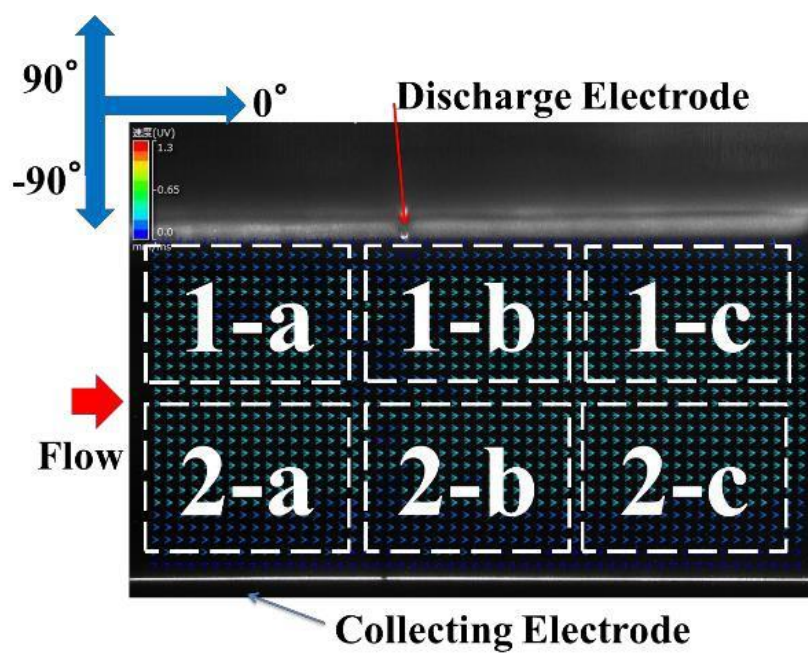
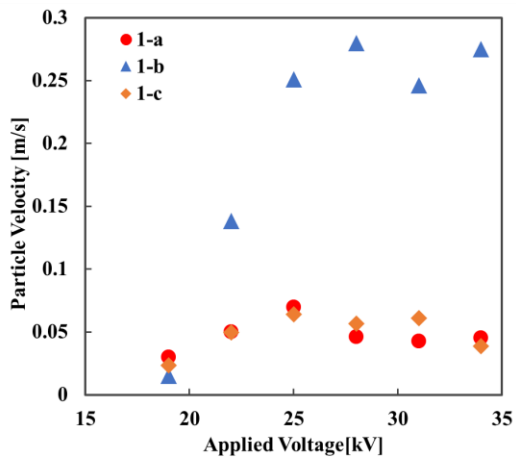
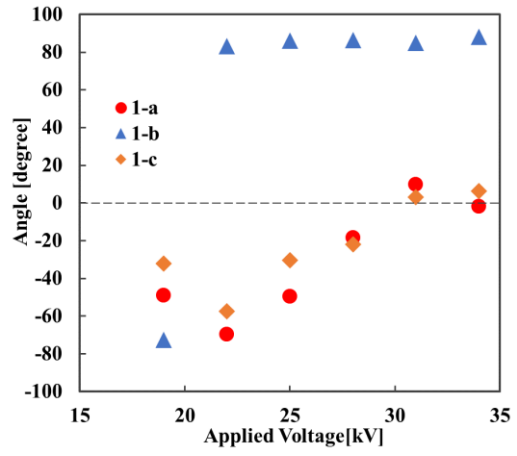


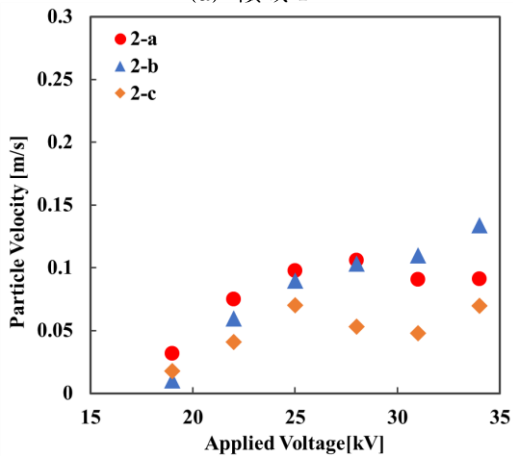
図 3-8. PIV 解析における領域分布



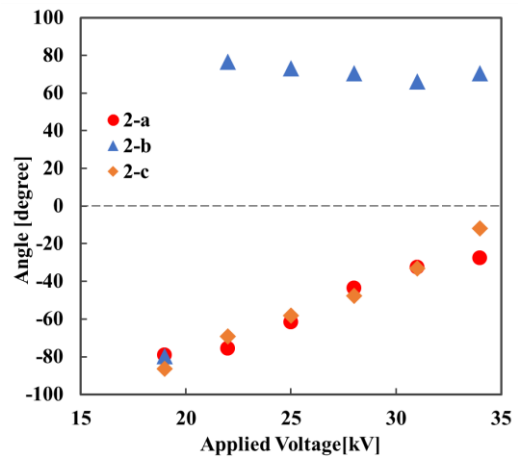
(a) 領域 1



(a) 領域 1



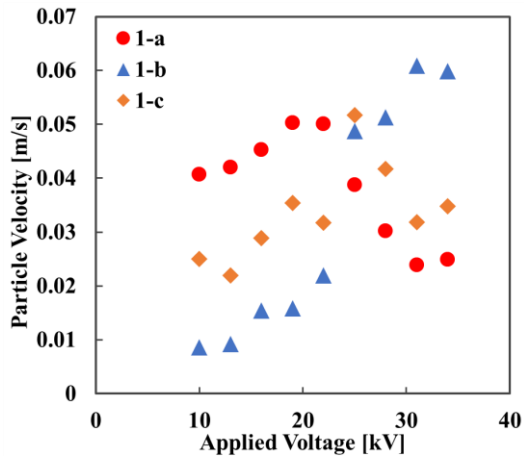
(b) 領域 2



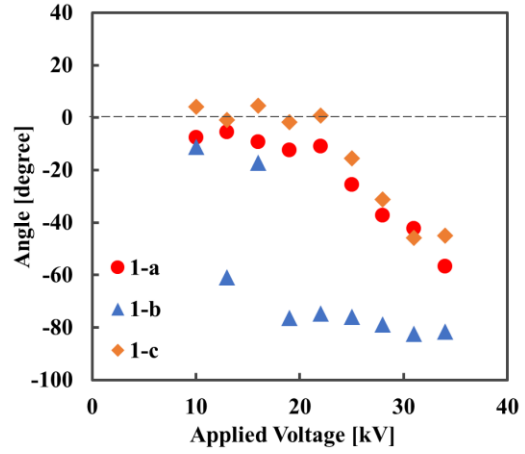
(b) 領域 2

図 3-9. 平均粒子移動速度
(正極性パルス)

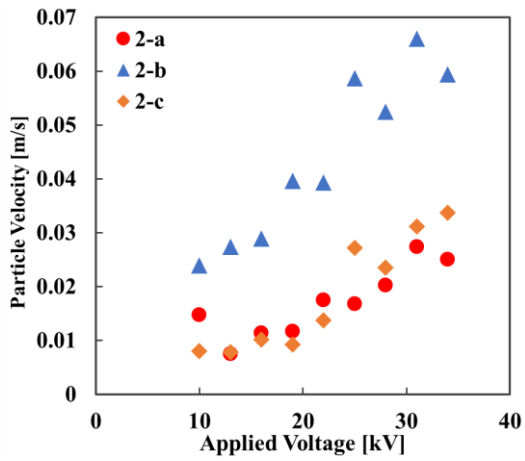
図 3-10. 平均粒子移動角度
(正極性パルス)



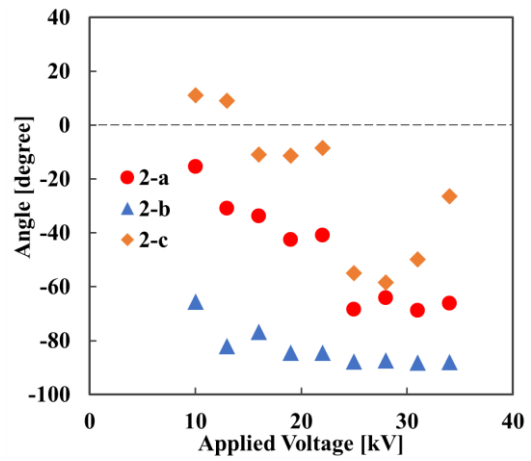
(a) 領域 1



(a) 領域 1



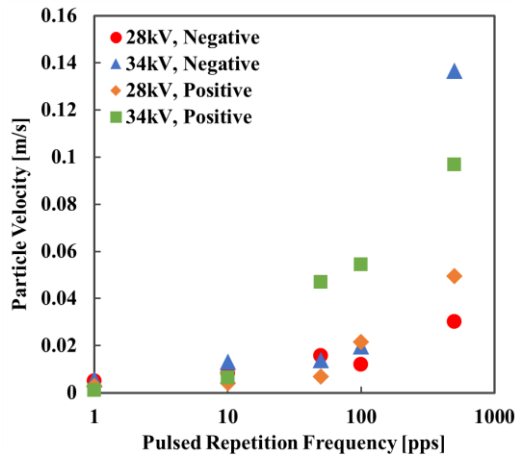
(b) 領域 2



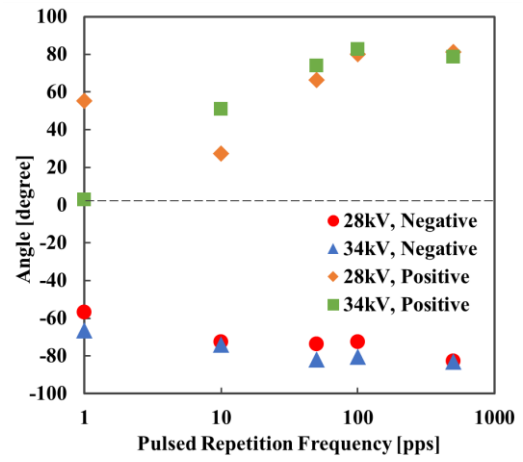
(b) 領域 2

図 3-11. 平均粒子移動速度
(負極性パルス)

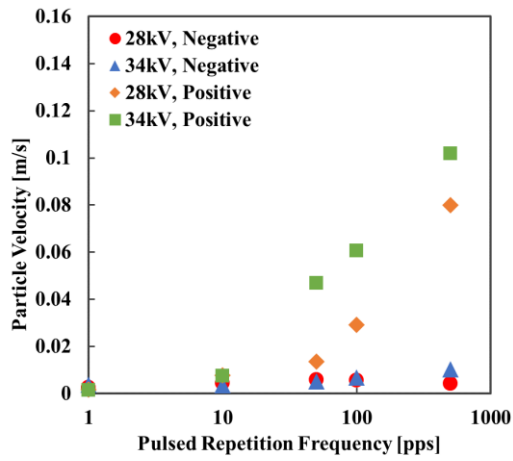
図 3-12. 平均粒子移動角度
(負極性パルス)



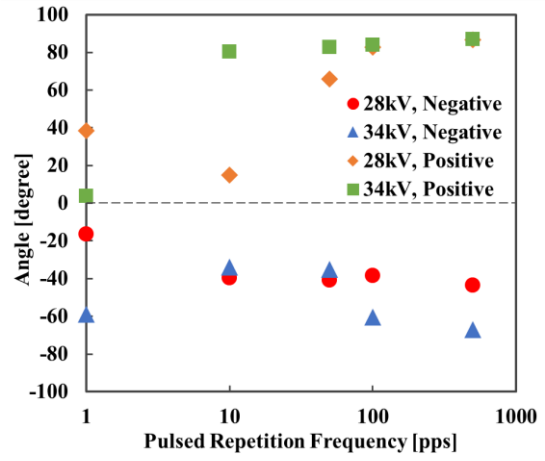
(a) 領域 1-b



(a) 領域 1-b



(b) 領域 2-b



(b) 領域 2-b

図 3-13. 平均粒子移動速度
(極性による比較)

図 3-14. 平均粒子移動角度
(極性による比較)

3-3-5 パルス立ち上がり時間特性

平均粒子移動速度におけるパルス立ち上がり時間特性の正負比較を図 3-15 に、平均粒子移動角度におけるパルス立ち上がり時間特性の正負比較を図 3-16 に示す。(a)は領域 1-b、(b)は領域 2-b である。主流体速度は 0m/s、パルス繰り返し周波数 100pps、印加電圧を負パルス放電は 10、16kV、正パルス放電は 16、22kV とした。パルス立ち上がり時間を 30ns、80ns、500ns、3800ns と変化させ、平均粒子移動速度、平均粒子移動角度が最大となる値をプロットした。

図 3-15 から負パルス放電についてはパルス立ち上がり時間の増加とともに平均粒子移動速度も増加した。それに対し、正パルス放電ではパルス立ち上がり時間が増加すると 16kV では増加傾向であったが、22kV ではパルス立ち上がり時間 80ns がピークとなった。これは 16kV と 22kV で放電形態が異なるためであると考えられる。

図 3-16 から負パルス放電についてはパルス立ち上がり時間の変化による平均粒子移動角度の変化は少なく、-90 度付近で一定であった。このことから負パルス放電はパルス立ち上がり時間に関係なく、安定した流れを形成できているといえる。正パルス放電では、パルス立ち上がり時間によって平均粒子移動角度の符号が異なった。これはパルス立ち上がり時間によって放電形態が異なるためである。

以上から、負パルス放電の方がパルス立ち上がり時間に関わらず、安定した放電を形成することができる。正パルス放電についてはパルス立ち上がり時間によって放電形態が異なり粒子の移動する向きは異なる。

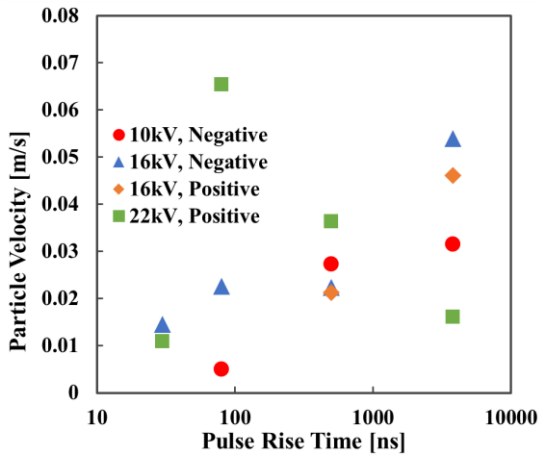
3-3-6 主流体速度特性

領域 b における平均粒子移動速度の主流体速度特性の正負比較を図 3-17 に、平均粒子移動角度の主流体速度特性の正負比較を図 3-18 に示す。(a)は領域 1、(b)は領域 2 である。パルス立ち上がり時間 50ns、パルス繰り返し周波数は 500pps とした。主流体速度を 0m/s、0.1m/s、0.2m/s、0.3m/s と変化させ、平均粒子移動速度、平均粒子移動角度が最大となる値をプロットした。主流体速度は装置中央で計測した値を用いた。

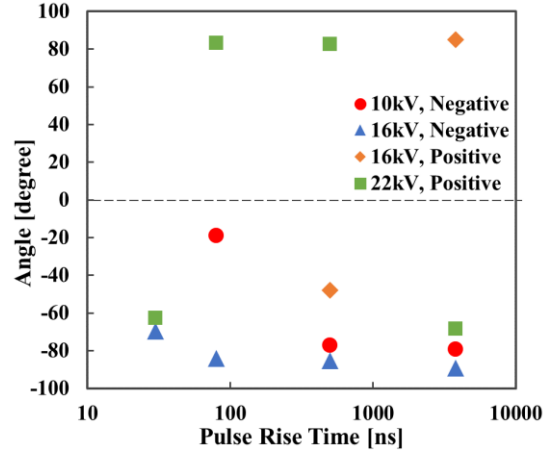
図 3-17 から負パルス放電については、主流体速度が増加すると、領域 2 よりも領域 1 の方が平均粒子移動速度は高い値となった。これは負パルス放電が針先付近でのみコロナ放電が発生しているためである。それに対し、正パルス放電では 34kV において、領域 1、2 とともに主流体速度に関わらず、平均粒子移動速度が 0.15m/s 以上となった。このことから正パルス放電については、ストリーマが平板まで達しているため、領域 2 にも影響を与えている。

図 3-18 から負パルス放電については、針から平板方向に、正パルス放電については、平

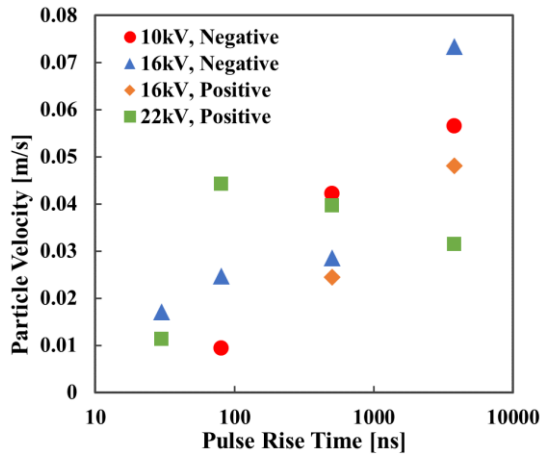
板から針方向に流れていることが分かる。これは負極性では針先端付近でコロナ放電が発生しているのに対し、正極性はストリーマが平板付近まで達していることからイオン風が発生する場所が異なるためだといえる。また負パルス放電では、主流体速度が増加すると、平均粒子移動角度は 0 度に近づいた。これは主流体速度が増加することでイオン風の影響を受けにくくなるためである。



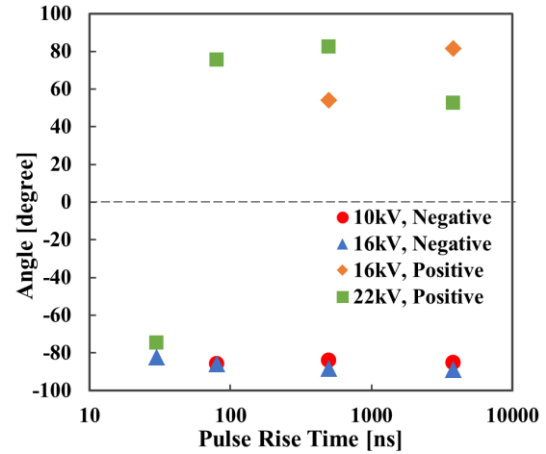
(a) 領域 1-b



(a) 領域 1-b



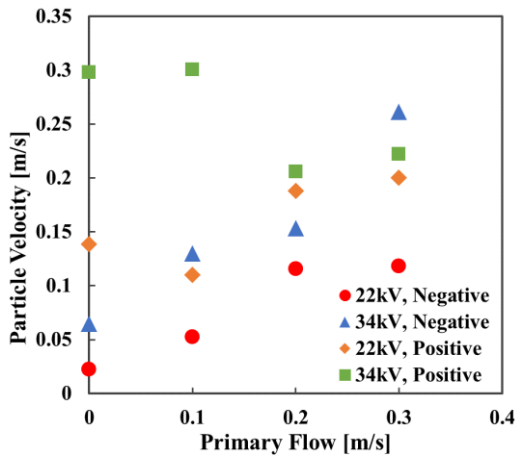
(b) 領域 2-b



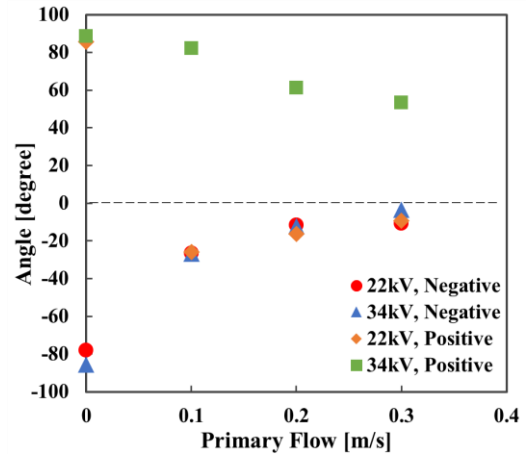
(b) 領域 2-b

図 3-15. 平均粒子移動速度の立ち上がり時間特性
(極性による比較)

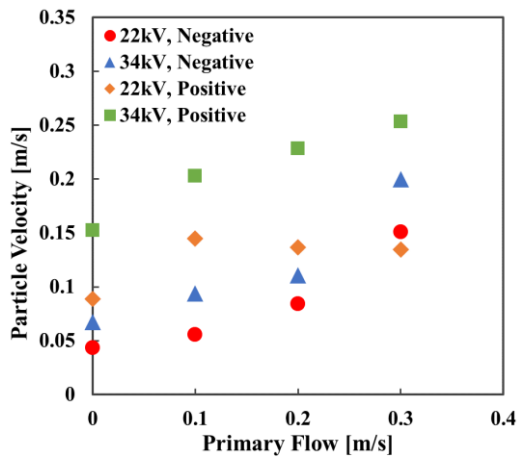
図 3-16. 平均粒子移動角度の立ち上がり時間特性
(極性による比較)



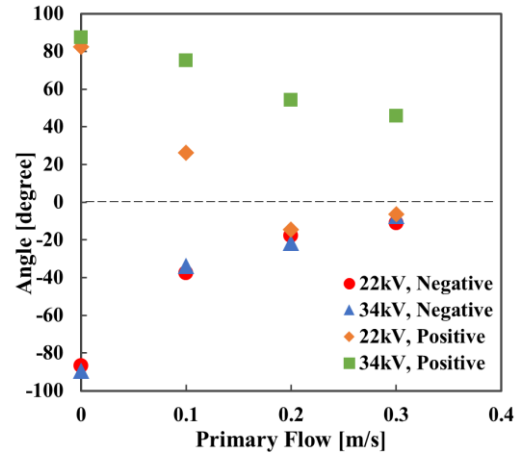
(a) 領域 1



(a) 領域 1



(b) 領域 2



(b) 領域 2

図 3-17. 平均粒子移動速度の主流体速度特性
(極性による比較, 領域 b)

図 3-18. 平均粒子移動角度の主流体速度特性
(極性による比較, 領域 b)

3-4 ワイヤ対平板電極構成における粒子挙動解析

3-4-1 電流電圧特性

3-3 節では針対平板電極構成での粒子移動速度、移動角度などを検討した。しかし、粒子が下から上に向けて移動する現象があり、原因を探る必要がある。また、針電極とした点電極では棘先端の電界が強く、イオン風も強いが、放電領域が狭い欠点もある。したがって、本節では放電領域を広く発生できるワイヤ対平板電極構成にいての検討を行った。

使用したパルス放電の立ち上がり時間は正極性 50、80、500、3800 と負極性 80ns の 5 種類であった。図 3-19 にワイヤ電極のピーク電流電圧特性を示す。電圧上昇とともにピーク電流が増加する。電圧が高いほどそれぞれのパルスにおけるピーク電流の差が広がった。50 と 80ns のピーク電流が同程度で、3800ns のピーク電流が一番低かった。また、負極性の 80ns のピーク電流は 500ns の正極性より高いことが示唆された、針電極を用いた時と同じ傾向であった。

3-4-2 粒子の可視化と PIV 画像

ピーク電圧は 11kV、放電ギャップ 20mm の粒子画像を図 3-20 に示す。矢印に示している箇所はワイヤ電極と GND 電極である。50ns では、電圧を印加しても粒子がほぼ動かなかったことが分かった。これに対して、ほかのパルス放電において、粒子は放電により GND 電極に移動し、左右に渦のような流れが形成したことを示した。

図 3-21 に示した PIV 解析結果も同じ傾向を示した。また、立ち上がり時間が長くなるにつれて、ワイヤ下部、装置中央の粒子移動速度が速くなることが明らかになった。粒子移動速度を検討するために、図 3-20(e)のようなワイヤ電極直下から GND 電極までの間に 10 × 20mm の領域内の平均粒子移動速度を検討した。

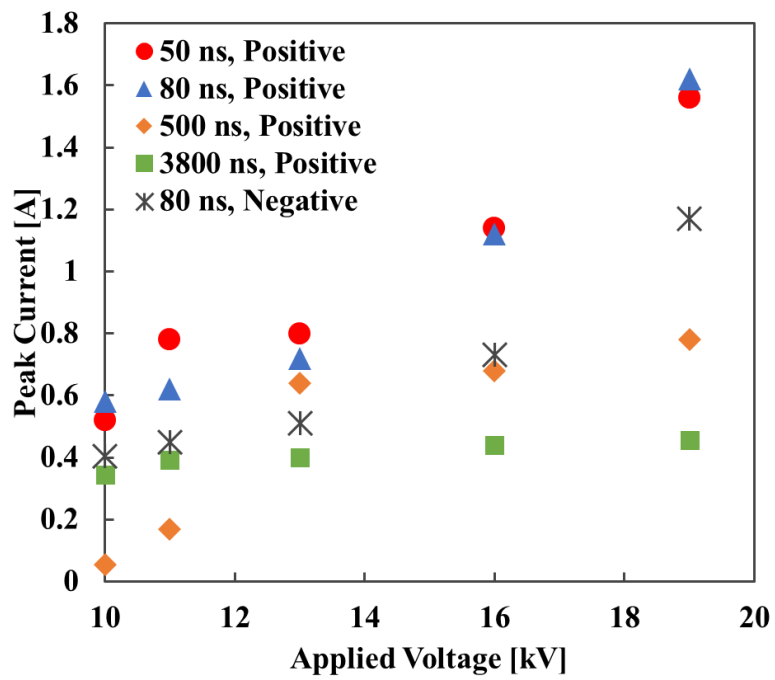


図 3-19. ピーク電流電圧特性
(ワイヤ, 20mm)

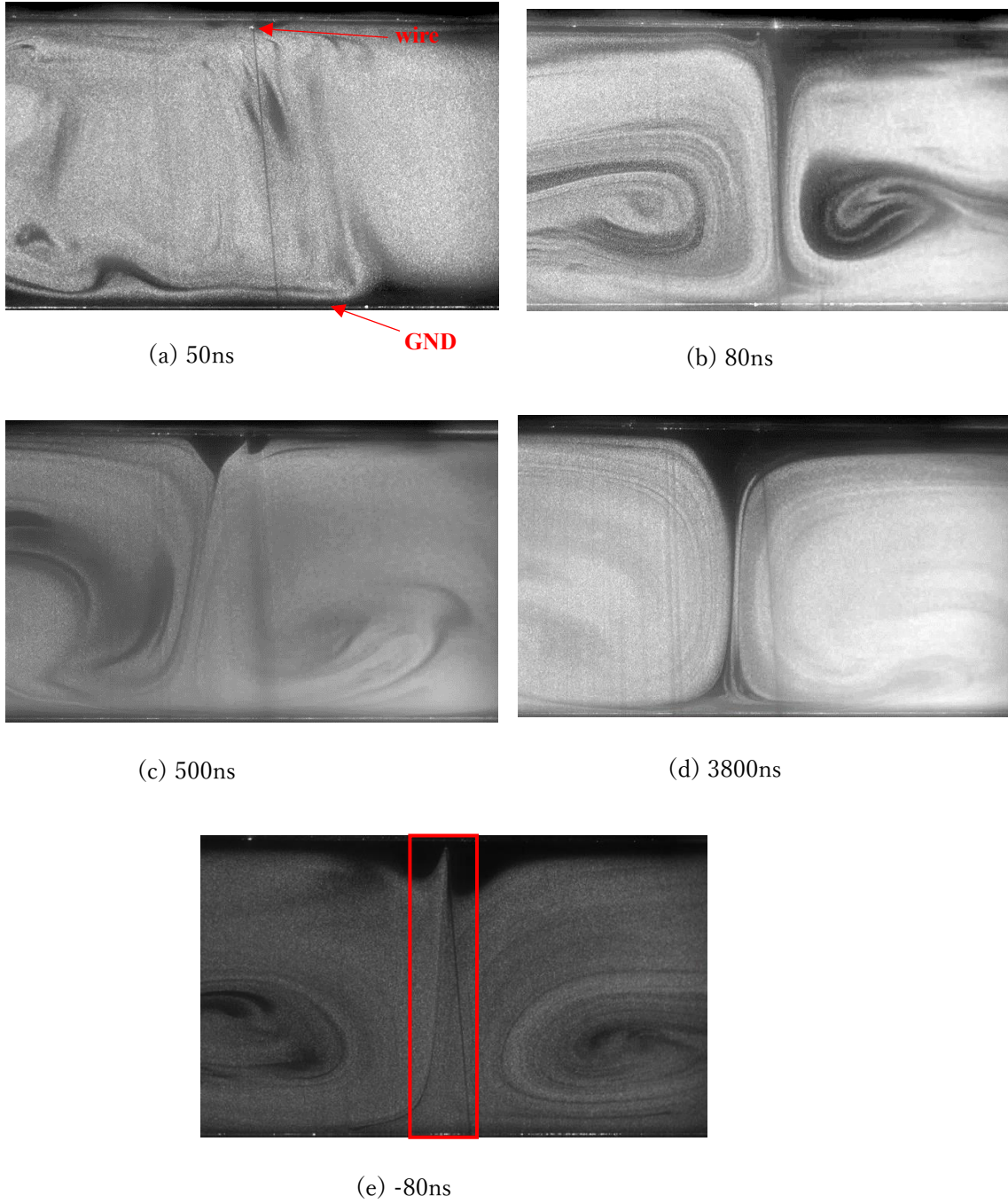
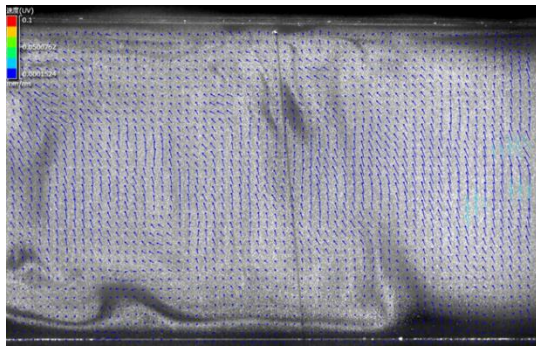
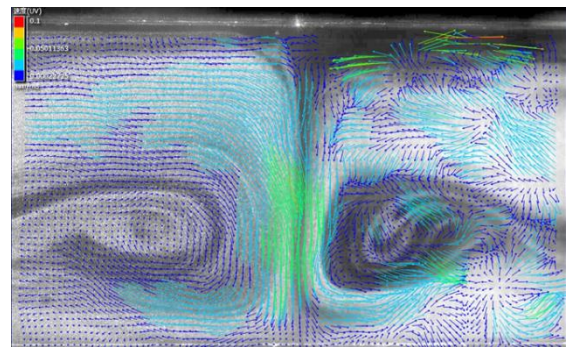


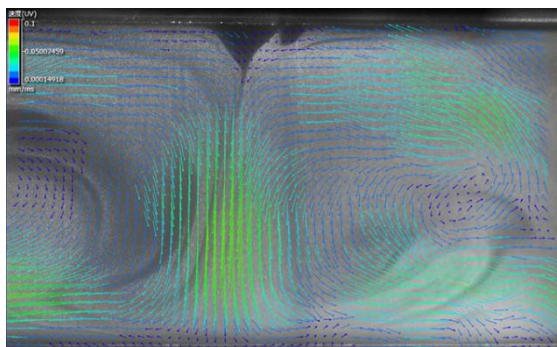
図 3-20. 粒子挙動の可視化画像
($\pm 11\text{kV}$, 20mm)



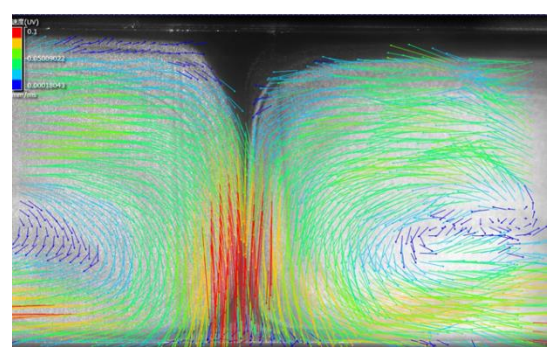
(a) 50ns



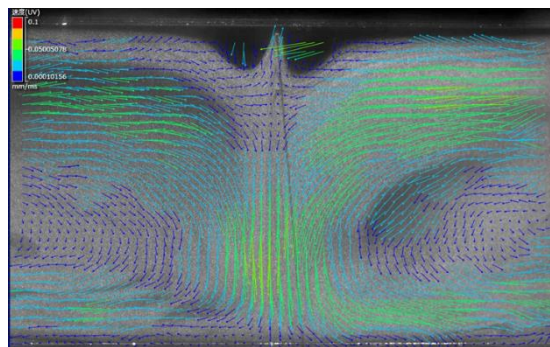
(b) 80ns



(c) 500ns



(d) 3800ns



(e) -80ns

図 3-21. 粒子挙動の PIV 解析結果
($\pm 11\text{kV}$, 20mm)

3-4-3 粒子移動速度における諸特性の影響

- パルス繰り返し周波数

粒子移動速度のパルス繰り返し周波数特性を図 3-22 に示す。放電ギャップは 20mm、主流体速度 0m/s、印加電圧 11kV であった。50ns 以外ではパルス繰り返し周波数増加とともに粒子速度が速くなった。これは周波数増加とともに、単位時間当たりの放電回数が増加したことが原因と考えられる。正極性において、粒子移動速度は立ち上がり時間に依存することを明らかにした。また、80ns の正負極性の粒子移動速度が同程度であったことを示した。

- 放電ギャップ

図 3-23 に粒子速度に対する放電ギャップの特性を示す。50ns のパルス放電は放電ギャップ 20mm で、粒子移動速度がピークになり、25mm になるとまた下がった。それ以外のパルス放電は放電ギャップを大きくすると、粒子速度が遅くなる傾向を示した。同じ電圧での放電ギャップが大きくなるほど、電界が弱くなり、イオン風や帯電効率が下がった。そして結果から、正極性立ち上がり時間 50ns は粒子移動速度が遅いため、集じんに向かないと考えられる。

- 印加電圧の影響

パルス印加電圧を 10 から 19kV まで調整し、その時の粒子速度に関する結果を図 3-24 に示す。放電ギャップは 20mm、主流体速度を 0m/s とした。50ns 以外のパルス放電の粒子速度に関して、ある電圧でピークに達した後速度が遅くなった。3800ns は 11kV、500ns と負極性 80ns は 13kV、80ns は 16kV であった。これは電圧が高くなると、放電形態が変わり、電極付近に電界緩和が生じたことが原因と考えられる。50ns のパルス放電は放電時間が短すぎて、100pps だけで粒子はほぼ動かないことが明らかになった。

粒子の可視化と PIV 解析から、正負極性とも適切なパルス繰り返し周波数と電圧を設定すれば、粒子が帯電できることが分かった。また、この結果から、パルス放電型 ESP は電圧が高くなるほど集じん率が高くなるとは限らず、平均粒子速度が減少するため、逆に集じん率が下がると考えられる。

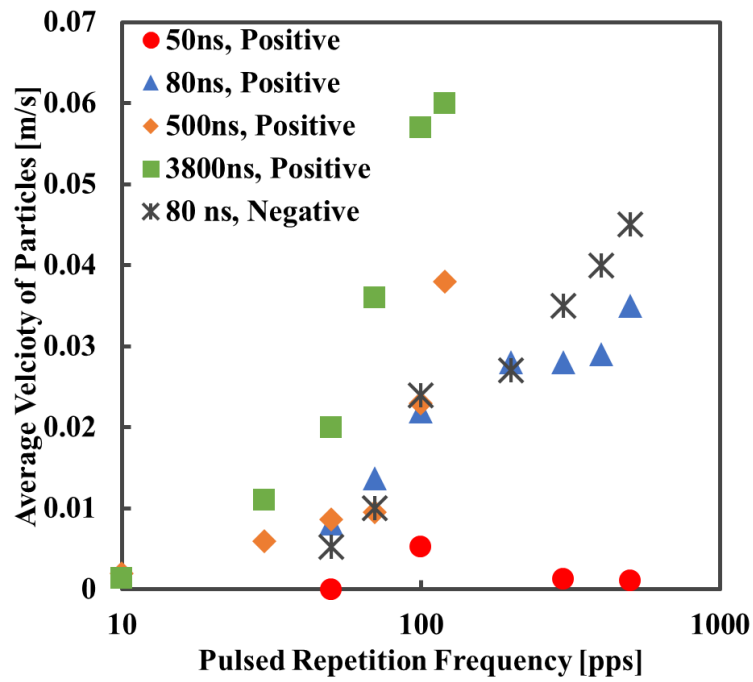


図 3-22. 平均粒子移動速度のパルス繰り返し周波数特性 (ワイヤ電極)

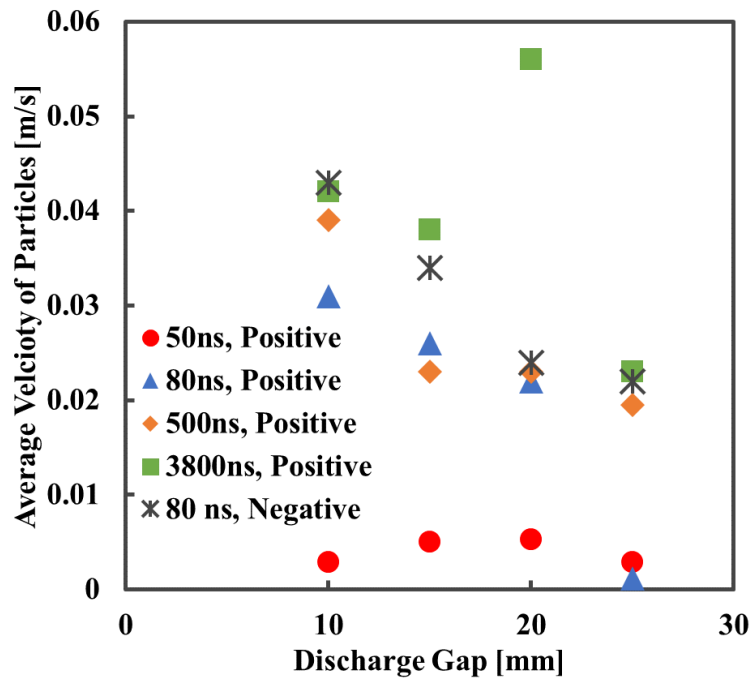


図 3-23. 平均粒子移動速度の放電ギャップ特性 (ワイヤ電極)

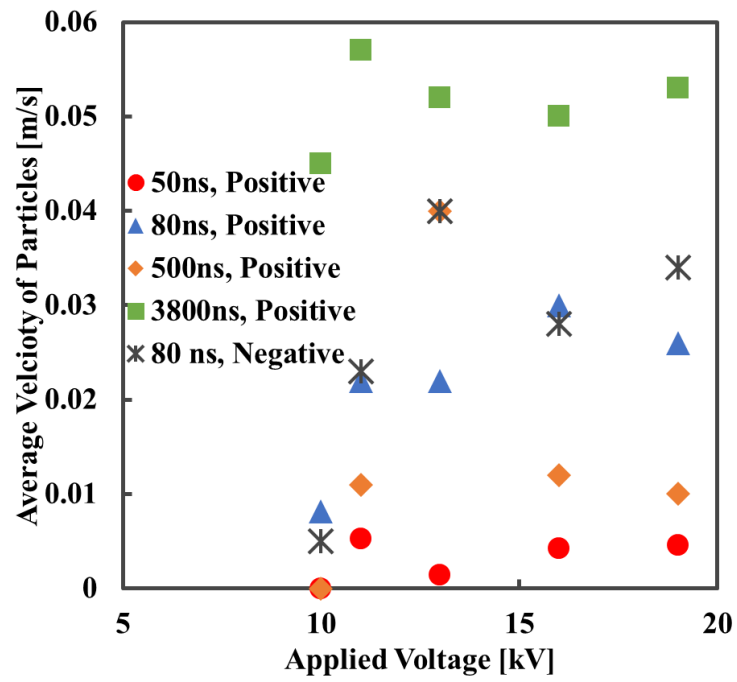


図 3-24. 平均粒子移動速度のパルス印加電圧特性
(ワイヤ電極)

3-5 結言

本研究では、粒子画像流速測定法を用いてパルス放電時の粒子挙動を解析することを目的とし検討を行った。そこで明らかになったことを以下に示す。

● 針対平板電極構成

1. ストリーマの伸びと粒子挙動には大きな関係があり、針先端でのみストリーマが伸びている時は針から平板方向に向かう挙動、平板付近までストリーマが伸びている時は平板から針方向に向かう挙動になる。
2. 正極性、負極性ともにパルス周波数の増加により、平均粒子移動速度、平均粒子移動角度は増加する。また、パルス周波数が小さくとも粒子挙動に影響を与える事が出来る。
3. 負極性の方がパルス立ち上がり時間に関わらず、安定した放電を形成することができる。正極性についてはパルス立ち上がり時間によって放電形態が異なり粒子の移動する向きは異なる。
4. 正極性では主流体速度の増加により針直下の領域 b だけでなく、針後方の領域 c にも影響を与えている。また負極性については、主流体速度によりイオン風の影響を受けにくくなる。

● ワイヤ対平板電極構成

1. 立上がり時間の短いパルス放電より長いの方が粒子速度に大きく影響する。
2. パルス繰返し周波数の増加とともに粒子速度が速くなった。
3. 放電ギャップを広げると粒子速度が遅くなった。
4. パルス印加電圧が高すぎると、電極近傍で渦が生じて、速度が遅くなる。
5. 負極性はワイヤ近傍で放電する。

参考文献

- (1) 江 偉華 : 「パルスパワー技術入門」 The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research Vol.87, No.1, P. 46-50, (2011)
- (2) F. J. C. M. Beckers, W. F. L. M. Hoeben, T. Huiskamp, A. J. M. Pemen, E. J. M. van Heesch : 「Pulsed Corona Demonstrator for Semi-Industrial Scale Air Purification」 IEEE Transactions on Plasma Science , Vol. 41, No.10, (2013)
- (3) R. Honma, R. Ohyam : 「 Experimental Study on Ionic Wind Measurement of an Electrohydrodynamically Induced Gas-Liquid Two-Phase Flow Field by Particle Image Velocity」 IEEE Annu. Rept-CEIDP, P.81-84, (2000)
- (4) J. Mizeraczyk, M. Kocik, J. Dekowski, M. Dors, J. Podlinski, T. Ohkubo, S. Kanazawa, T. Kawasaki : 「Measurements of the velocity field of the flue gas flow in an electrostatic precipitator model using PIV method」 Journal of Electrostatics, 51-52, P.272-277, (2001)
- (5) A. Niewulis, A. Berendt, J. Podlinski, J. Mizeraczyk : 「Electrohydrodynamic flow patterns and collection efficiency in narrow wire-cylinder type electrostatic precipitator」Journal of Electrostatics, 71, Issue 4, P.808-814, (2013)
- (6) Z. Yuan. A. Fujii, K. Yanagawa, Y. Ehara, T. Kaneko : 「Visualization and Behavior Analysis of Re-entrainment Particle in Electrostatic Precipitator」 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, EPC-0946 (2019)

第4章 パルス放電型 ESP における高温放電特性

4-1 緒言

船舶などのディーゼルエンジンから排出されるガスの温度は高いため、高温度状態で安定した放電が維持できる電気集じん装置の開発が課題となり、ESP におけるパルスの高温放電特性は実用化に一番重要である基礎研究である。第3章でパルス放電を用いても粒子が帯電できることから、実際の高温状態においてパルスの基礎放電特性の検討が必要である。パルス放電により最初に形成される1次ストリーマでは、ストリーマが進展し、接地電極へ到達した後にグロー様放電へ移行することが知られている⁽¹⁾。グロー様放電の電流は、ストリーマで形成されたプラズマチャンネル内を流れ急増する。この時のチャンネル内の電子の平均エネルギーは1-2 eV程度と考えられている。1次ストリーマにおいて、グロー様放電への移行前に印加電圧を立ち下げる、極めて短時間なパルス放電の研究もなされている。電極近傍の換算電界が高く、ナノ秒オーダーで完結するパルス放電では、汎用パルス放電(数十 ns オーダ)に比べ、電子エネルギーが高く、19 eVと算出されている報告もある⁽²⁾。

第2章より、高温度条件におけるDCコロナ放電について検討を行った結果、温度を上昇させるとスパークオーバに至る電圧値が低下し、放電安定領域が狭くなった。そのため、船舶からの排ガスなどの高温度条件において、放電形成が不安定であり集じんを行うことが困難となる。そこで、パルス放電を新たな放電形態として用いたESPについて検討を行うことにした。しかし、高温下におけるパルス放電の挙動は不明である。本研究では、高温度条件におけるパルス放電の電圧電流特性・放電安定領域を測定し、高温条件での放電処理に適するパルス立ち上がり時間や、放電ギャップ長を検討することを目的とした⁽³⁾。

4-2 実験方法

4-2-1 実験システム

実験システムを図 4-1 に示す。放電空間を高温とするために、放電リアクタを環状炉内に配した。リアクタと環状炉の間には空間があり、耐熱性ガラスウールによって隙間を埋め放熱を防いだ。温度調節器(omron 製：E5CN-HTQ2)に環状炉の温度を調整し、リアクタの内部温度を室温(RT：Room Temperature)から 400°Cまで 100°Cずつ変化させた。内部温度は、熱電対(A&D 製：SD-5616)を用いて確認した。リアクタ内に流入するガスは、ポンプを用いて大気を流入させマスフローメータによって流量 1L/min に制御した。熱したリアクタとパルス電源、抵抗(500Ω)を元に回路を作成した。放電電極にパルス電圧を印加することで、リアクタ内部にパルス放電を発生させる。使用したパルス電源(末松電子製)は表 4-1, 4-2, 4-3 に示す。立ち上がり時間は、回路のインピーダンスの影響を受け定格よりもパルス幅が長く出力される。そこで、観測したパルス放電の電圧電流波形から、各電源の立ち上がり時間を 30ns, 80ns, 500ns, 3800ns とした。パルス繰り返し周波数は 1pps とした。印加電圧は電圧プローブ(IWATDU 製：HV-P30)、放電電流はカレントトランス(Pearson 製：Model-6585)によってそれぞれ検出し、オシロスコープ(Tektronix 製：DPO-3012)を用いて測定した。

作成した放電リアクタの概略を図 4-2 に示す。リアクタは同軸円筒構造を採用しており、内側に放電電極として長さ 500mm のステンレスワイヤ($\phi 0.12\text{mm}$)、外側に接地電極としてステンレス管を配した。タングステンワイヤは、ステンレス管の中心に来るようにコルクを用いて固定した。リアクタの放電ギャップは 15mm を基本としつつ、異なる径のステンレス管を使用することで 11.5 mm から 19.5 mm に変化させた。放電電極にパルス放電を印加し、電極間にパルス放電を発生させた。

4-2-2 放電発光観測システム

イメージインテンシファイアを用いて、リアクタ内部におけるパルス放電の発光を観測した。図 4-3 に放電発光の観測に用いたリアクタを示す。側面から覗けるように、コルクからガラス管に変更した。リアクタの中心には、アルミニウムテープを用いて、GND 線を接地した。パルス放電を印加し、イメージインテンシファイアを用いてパソコンに発光画像を出力した。パルス繰り返し周波数は 100pps、カメラの gain は 7.0 に固定した。これにより、パルス放電の立ち上がり時間及び温度変化に伴う放電発光の変化について観測を行った。

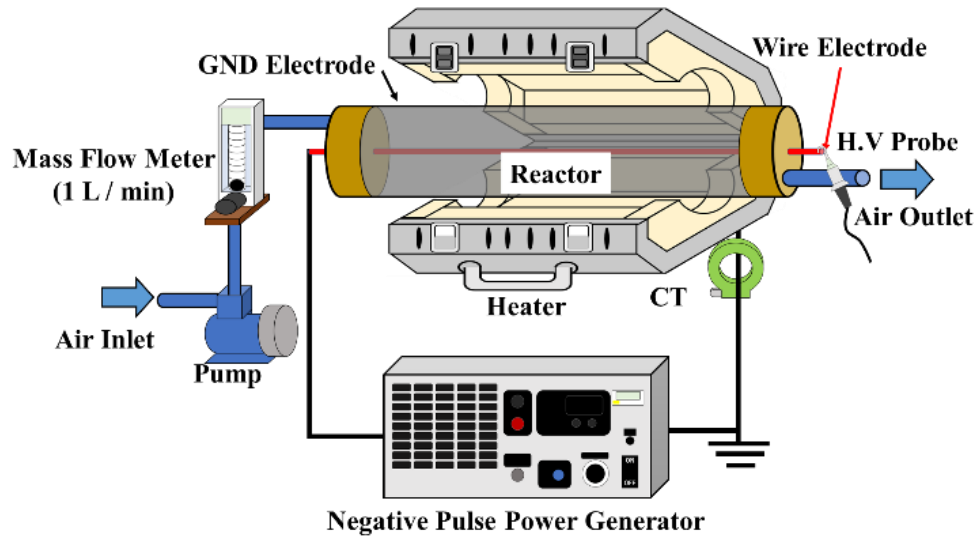


図 4-1. 実験システム

表 4-1. 立ち上がり時間 30ns のパルス電源仕様

製品名称		超短パルス電源
型式		CUS3000TT-1KESP
出力仕様	最大繰り返し周波数	1000pps
	最大出力電圧	-30kV(無負荷)
	パルス立ち上がり時間	10ns以下(無負荷)
	パルス半値幅	25ns以下(無負荷)
定格電圧		単相AC100V 50Hz/60Hz
最大消費電力		約200VA

表 4-2. 立ち上がり時間 80ns のパルス電源仕様

製品名称		超短パルス電源カスタム
型式		CUS4000TT-50KSP-P
出力仕様	出力電圧	-47kV(無負荷)
	立ち上がり時間	約13ns(無負荷)
	パルス幅(半値幅)	約30ns(無負荷)
	繰り返し周波数	500pps(最大)
定格電圧		単相AC100V 50Hz/60Hz
最大消費電力		約460VA

表 4-3. 立ち上がり時間 3800ns のパルス電源仕様

製品名称		小型パルスパワー電源
型式		CUS3010N-5J
ショートパルス出力仕様(500Ω抵抗負荷接続時)	出力電圧	-33kV
	出力エネルギー	約3.2J/pulse
	パルス立ち上がり時間	約100ns
ロングパルス出力仕様(500Ω抵抗負荷接続時)	出力電圧	-25kV
	出力エネルギー	約4.9J/pulse
	パルス立ち上がり時間	約2.4μs
	最大繰り返し周波数	120pps
定格電圧		単相AC100V 50Hz/60Hz
最大消費電力		約200VA

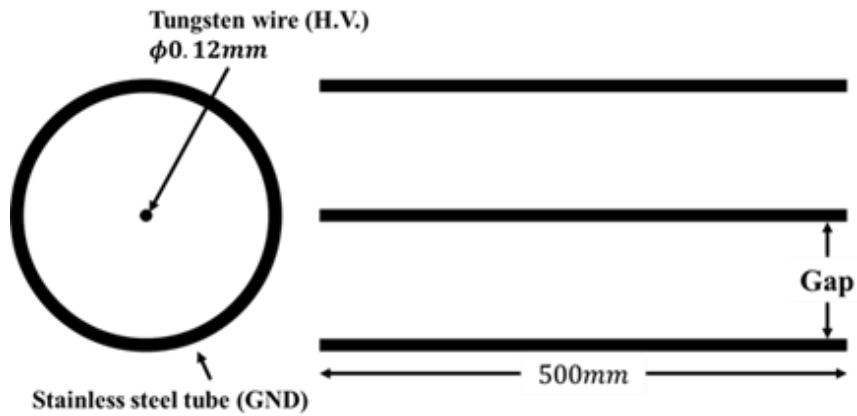


図 4-2. 放電リアクタの概略

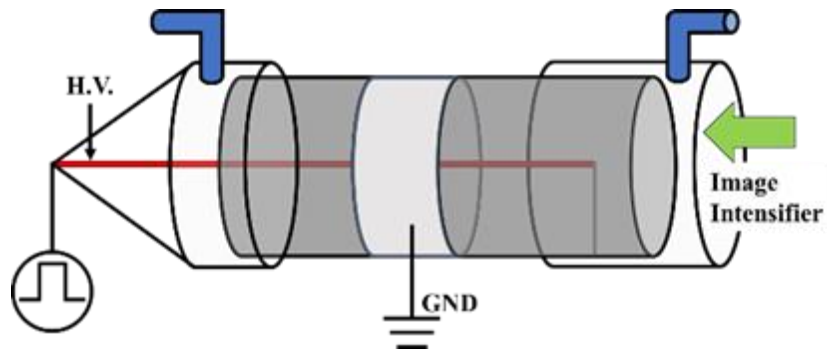


図 4-3. 発光観測の放電リアクタ
(15mm)

4-2-3 パルスエネルギーの計算

放電リアクタにピーク電圧-12 kV を印加した時、測定した電流波形を図 4-4 に示す。電流波形はパルスコロナ放電が起きた時の充電電流と放電電流が重畳された波形である。(a) は Tr 30 ns で、ピーク電流値は 10.5 A である。(b) は Tr 80 ns で、ピーク電流値は 6.3 A である。(c) は Tr 500 ns で、ピーク電流値は 3.3 A である。(d) は Tr 3800 ns で、ピーク電流値は 0.28 A である。

同様にピーク電圧 12 kV を印加した時の電流波形を図 4-5 に示す。(a) は 50ns で、(b) は 80ns で、(c) は 500ns で、(d) は 3800ns である。ピーク電流はそれぞれ 11A, 16A, 20A, 0.12A である。

パルス放電の放電エネルギーについて、龍氏らは⁽⁴⁾計測した電流($I_{measurement}$)から変位電流($I_{displacement}$)を減算して放電電流($I_{discharge}$)を求めている。本研究においても(4-1)式により、放電電流を求めることにした。また、リアクタのキャパシタンス成分($C_{reactor}$)は(4-2)式のように、パルスコロナ放電開始直前の放電していない充電電流(i_{charge})を測定し時間積分したものを、 V_{charge} で除した。 V_{charge} はパルスコロナ放電開始直前の印加電圧とした。(4-2)式で求めたキャパシタンスの値を(4-2)式に代入し、各印加電圧($V_{measuament}$)における $I_{displacement}$ を求めた。また、パルスエネルギーの影響を検討するため、1パルスにおける放電エネルギーEについては、(4-4)式を用いて計算を行った。

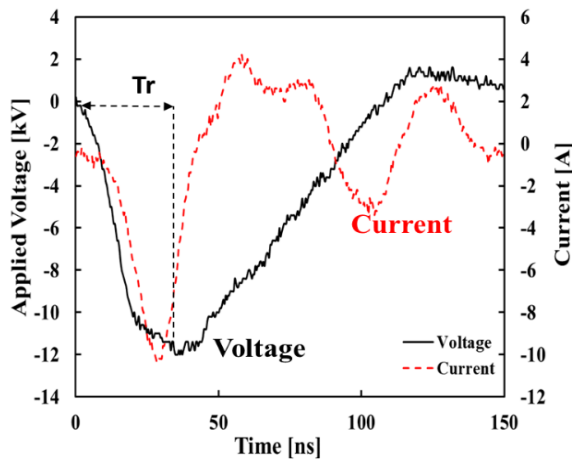
$$I_{measurement} = I_{discharge} + I_{displacement} \quad (4-1)$$

$$C_{reactor} = \frac{1}{V_{charge}} \int i_{charge} dt \quad (4-2)$$

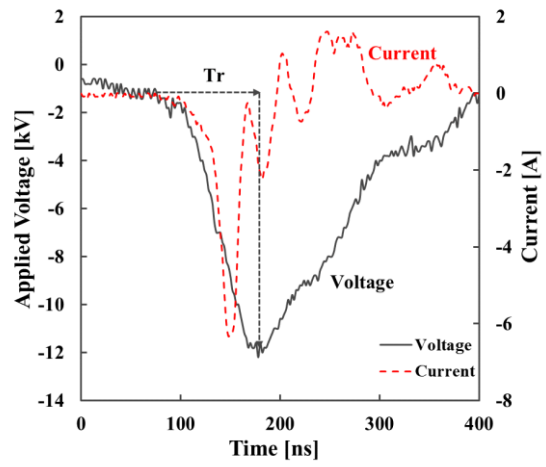
$$I_{displacement} = C_{reactor} \frac{dV_{measuament}}{dt} \quad (4-3)$$

$$E = \int V_{measuament} \times I_{discharge} dt \quad (4-4)$$

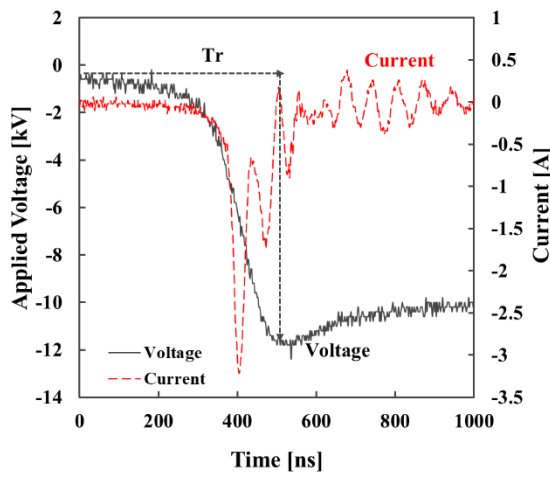
一方、(4-2)式を用いて400°C時の静電容量を算出すると、ギャップ長 11.5, 15, 17.5, 19.5 mm の静電容量はそれぞれ 12.2, 11.6, 11.3, 11.1 pF となった。また、印加電圧-12 kV、温度 400 °C、ギャップ長 15 mm, Tr 30ns での各電流波形を図 4-6 に示す。図中にはそれぞれ放電電流、変位電流、測定電流の波形を示した。測定電流は図 4-4 (a)の電流波形と同一である。変位電流は(4-3)式により求めた。変位電流を考慮すると、放電電流のピーク値は測定電流のピーク値より低い。



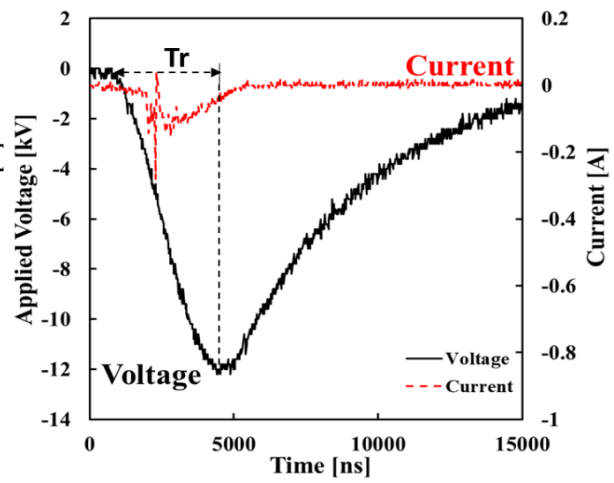
(a) Tr 30 ns



(b) Tr 80 ns

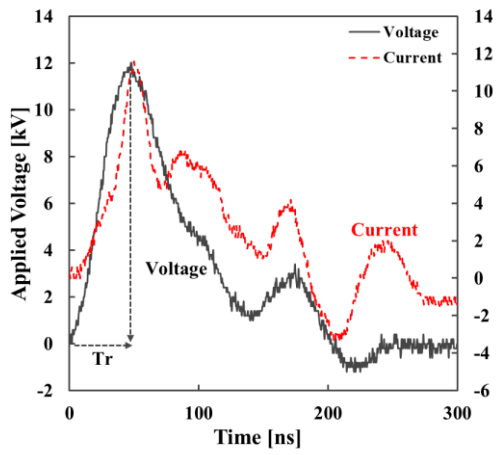


(c) Tr 500 ns

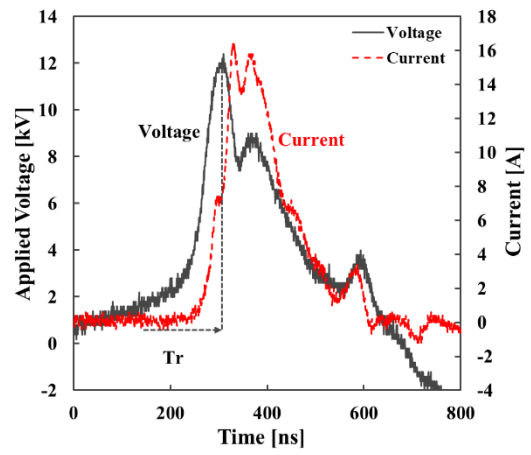


(d) Tr 3800 ns

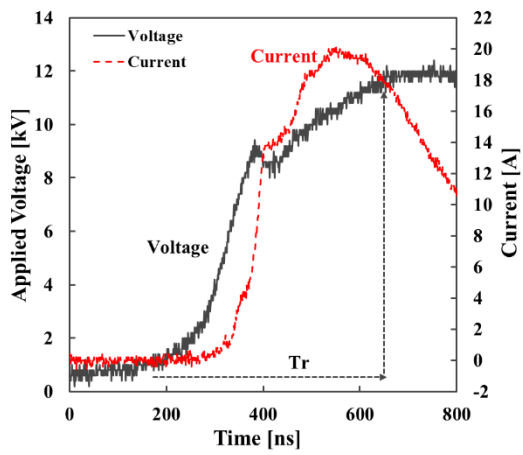
図4-4. パルスの電流電圧波形.
($G = 15 \text{ mm}$, $V = -12 \text{ kV}$, $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$)



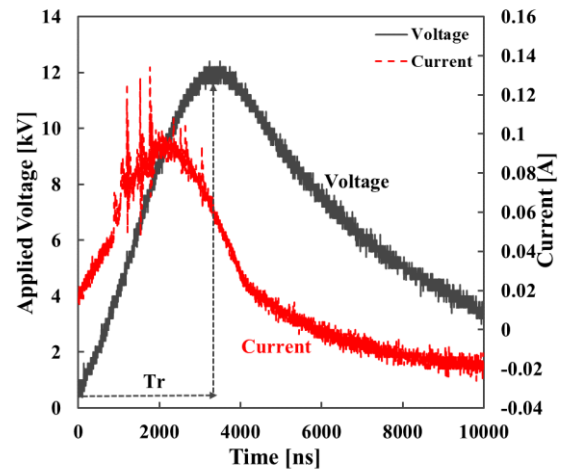
(a) Tr 50 ns



(b) Tr 80 ns



(c) Tr 500 ns



(d) Tr 3800 ns

図 4-5. パルスの電流電圧波形.
(G = 15 mm, V = 12 kV, T = 400 °C)

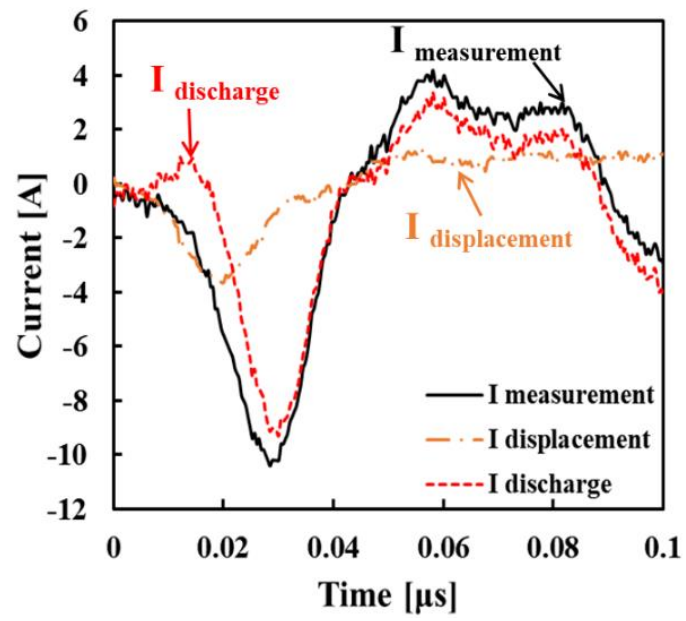


図 4-6. 測定電流・変位電流・放電電流の波形
 (G = 15 mm, V = -12 kV, T = 400 °C, Tr 30 ns)

4-3 負極性における高温パルス放電特性

- 放電電流に対する温度の影響

新しい放電形態としてパルス放電を検討するにあたり，一般的に電気集じん装置として使用されている DC コロナ放電の電圧電流特性と比較した。実験条件として，リアクタのギャップ長を 15mm とし，リアクタ内の温度は室温から 400°Cまで 100°Cずつ変化させた。図 4-7 に負極性の DC コロナ放電の電圧電流特性を示す。電流値は放電電流の平均値とし，放電開始電圧からスパークオーバ直前までの電流値をプロットした。温度が上昇するにつれて，電流特性は左側にシフトしスパークオーバ電圧は低下した。また，放電可能領域が狭くなっていることが確認できた。

図 4-8 に本実験で使用した各立ち上がり時間における，パルス放電の電圧電流特性を示す。使用したパルス電源の立ち上がり時間は，それぞれ 30ns, 80ns, 500ns, 3800ns である。図のプロットについて，図 4-8(a)では全ての温度条件においてスパークオーバが確認できなかったため，電源の最大印加電圧であった 20kV までのピーク電流値をプロットした。また，図 4-8 (b)(c)(d)ではスパークオーバが確認できたため，放電開始電圧からスパークオーバ直前までの電流値をプロットした。立ち上がり時間 30ns 及び 80ns パルス放電の電圧電流特性では，室温から 400°Cにかけて電流値の大きな変化は見られず，温度による影響が少なかった。一方，立ち上がり時間 500ns 及び 3800ns パルス放電の電圧電流特性では，200°C以降において電流値にバラつきが見られた。

- スパークオーバ電圧の温度特性

ギャップ長を 15 mm とし，パルス立ち上がり時間を変化させたときの，スパークオーバ電圧の温度特性を図 4-9 に示す。Tr 30 ns のパルス電圧では，スパークオーバ電圧は電源の最大出力電圧 21 kV 以上のためプロットしていない。Tr 80ns のパルス放電においても，200°C 以下の温度において，電源の最大出力電圧 28 kV ではスパークオーバしないため，プロットしていない。比較のため，直流コロナ放電のスパークオーバ電圧もプロットした。どの電圧波形においても，温度上昇とともにスパークオーバ電圧が低くなった。また，直流コロナ放電はパルス放電に比べて，スパークオーバ電圧が半分以下である。また，パルス電圧の立ち上がり時間が短い方が，スパークオーバしにくい傾向を示した。パルス電圧の立ち上がりが長いと，パルス幅も長く放電時間が長くなる。そのため，電極及び空間中により多くの電子が付着・生成⁽⁵⁾され，放電がスパークオーバへ移行しやすくなると考えられる。これらのことから，高温雰囲気において，スパークオーバを回避するには，放電時間の短いパルス電圧が適している。

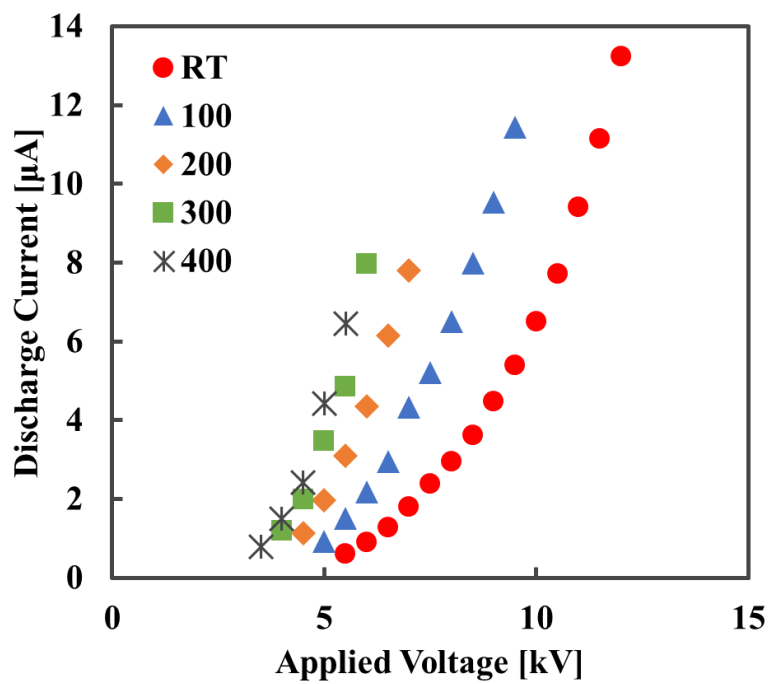
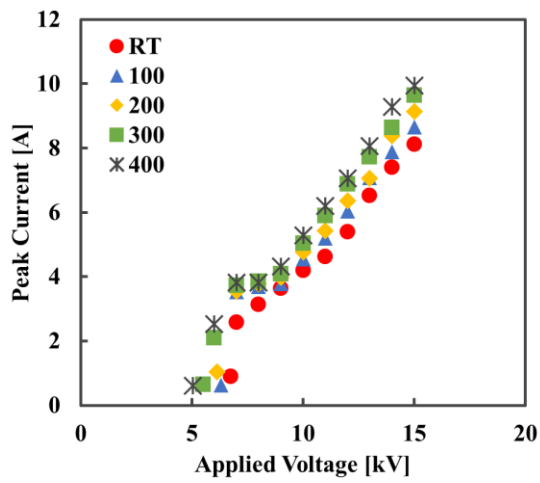
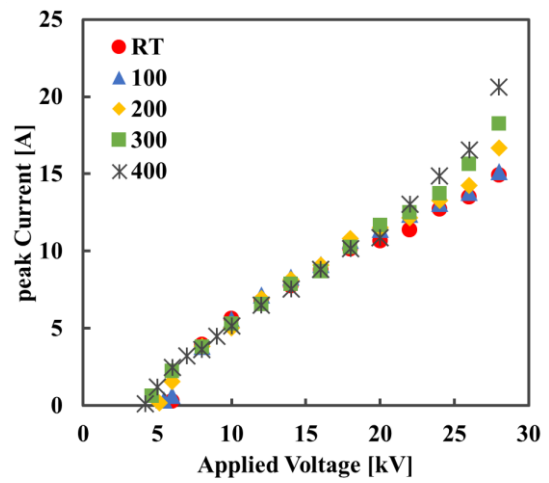


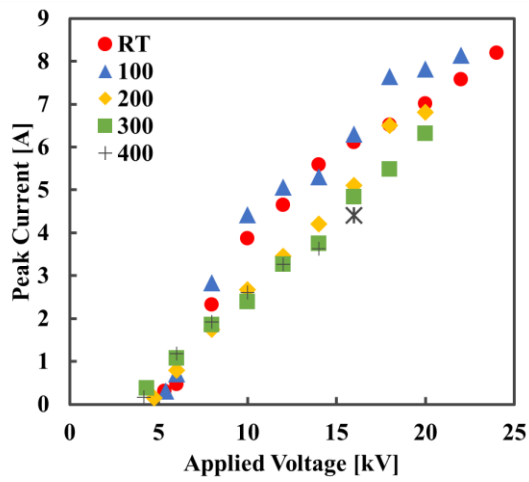
図 4-7. DC コロナ放電における電流特性
(G = 15 mm, DC)



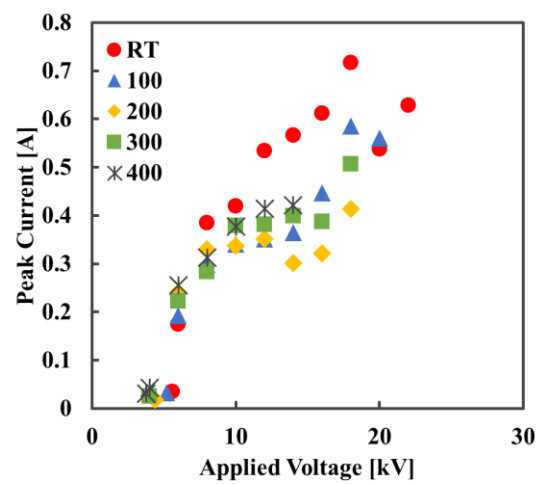
(a) Tr 30 ns



(b) Tr 80 ns



(c) Tr 500 ns



(d) Tr 3800 ns

図 4-8. 負極性パルス放電の電圧電流特性
(G = 15 mm)

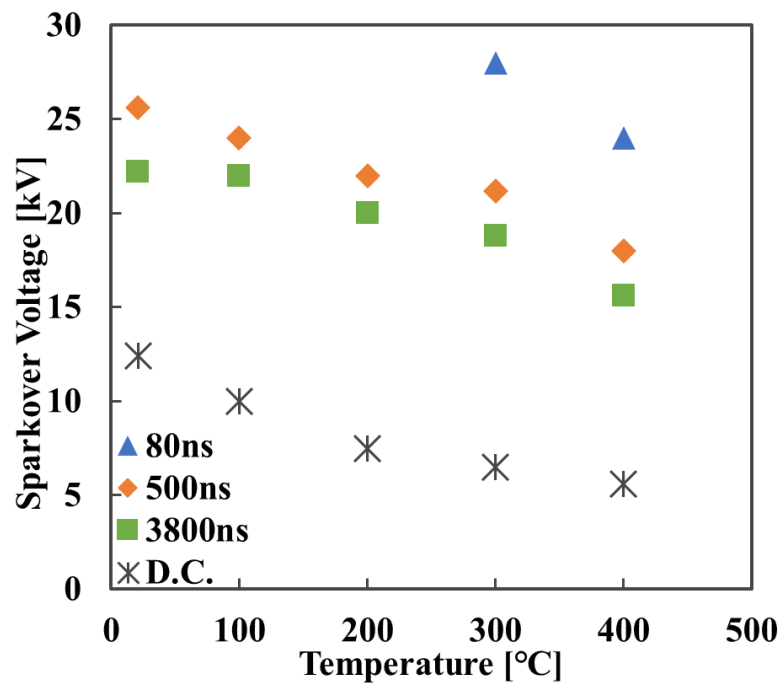


図 4-9. スパークオーバ電圧の温度特性
(G = 15 mm)

- 放電安定領域

本研究ではスパークオーバ電圧とパルスコロナ放電開始電圧の差をコロナ放電電圧領域 ΔV として表す。この領域が広いほど、安定した放電が持続できる。ギャップ長を 15 mm としたときの、 ΔV の温度特性を図 4-10 に示す。どの電圧波形の放電でも、温度上昇とともに ΔV が小さくなり、図 4-9 のスパークオーバ電圧特性と同様の傾向を示した。パルス電圧の立ち上がり時間が短いほど、温度による影響が少なく、比較的安定した放電が発生できている。どの温度においても、パルス放電は直流放電よりコロナ放電電圧領域が広いことが確認できる。

- 放電ギャップ特性

パルス立ち上がり時間を変化させたときの、ピーク電流と放電ギャップ長との関係を図 4-11 に示す。印加電圧は-12 kV で、温度を 400 °C とした。全てのパルス電圧において、放電ギャップ長が大きくなると電界が低下し、ピーク電流は減少した。また、同じギャップ長において、立ち上がり時間が短い 30 ns の放電はピーク電流が高い。放電の発生には遅れがあり、立ち上がり時間が短いほど過電圧が高い。急峻な立ち上がり電圧により放電が発生する電圧が高いと、放電発生時の電極間の電界が大きくなりピーク電流値は高くなる。

コロナ放電電圧領域 ΔV の放電ギャップ長特性を図 4-12 に示す。温度は 400 °C である。Tr 30 ns および Tr 80 ns の放電ギャップ長 17.5 mm と 19.5 mm においてはスパークオーバしなかった。どの放電ギャップ長においても、立ち上がり時間が短く放電時間の短いパルス電圧の方が、 ΔV が広いことを示した。また、放電ギャップ長が長いほどスパークオーバ電圧が高く、 ΔV が広くなった。この傾向は直流放電と同様で、高温条件の負極性コロナ放電においても、放電ギャップ長を大きくすることでスパークオーバ電圧が上昇し、安定したコロナ放電の ΔV が広くなることが報告されている⁽⁶⁾。

- 放電電荷量とパルスエネルギー

1 パルス当たりの放電電荷量を検討するため、放電電流を時間積分して、その値と立ち上がり時間との関係を図 4-13 に示す。Tr 3800 ns の 20 kV はスパークオーバしたため、プロットしていない。Tr 30 ns を除いて、放電電荷量はパルスの放電電流と立ち上がり時間に依存している。図 4-4(b)のパルス電流電圧波形から分かるように、立ち上がり時間が長いとピーク電流は小さい。しかしながら、立ち上がり時間が長いと放電が発生している時間も長くなる。そのため、立ち上がり時間が増加するほど 1 パルス当たりの放電電流は大きくなる。よって、時間積分で求めた放電電荷量が大きくなる。一方、図 4-4 (a)のような Tr 30 ns の急峻なパルス放電では、過電圧が高く電流のピーク値が高い。そのため、放電時間が短くても、Tr 30 ns における放電電荷量は Tr 80, 500 ns より大きくなっている。

1 パルスにおける放電エネルギーについて、(4-4) 式を用いて計算を行った。パルス放電エネルギーと立ち上がり時間の関係を図 4-14 に示す。放電ギャップ長は 15 mm、温度は

400 °Cとした。図 4-13 と同様の理由により、Tr 3800 ns の 20 kV は、プロットしていない。Tr 80, 500, 3800 ns は、同じ電圧において、立ち上がり時間が長くなるほど、放電エネルギーが高い。Tr 30 ns の放電エネルギーは 80, 500 ns のパルス放電に比べて、高いエネルギーを有することが示された。放電エネルギーは放電電流と電圧を掛け合わせた積分値として求めており、放電時間が短くても、1 パルス当たりの全放電電流が大きいことで、放電エネルギーが大きくなることを示唆している。

パルス放電エネルギーの放電ギャップ長特性を図 4-15 に示す。全パルス放電において、放電ギャップ長を大きくするとともにパルスエネルギーが減少した。放電ギャップ長が大きいほど、電界が弱くなることが原因と考えられる。また、立ち上がり時間が長いほどパルス放電エネルギーが大きいことを示している。

上記の負極性パルス放電特性の結果から、高温度雰囲気での放電処理に適する、パルス立ち上がり時間や放電ギャップ長を検討する。パルス電圧立ち上がり時間が 30ns と短い放電は、図 4-11 で明らかのようにピーク電流が高く、図 4-14 より放電エネルギーも Tr 80 や 500 ns の放電より高い。したがって、比較的高い電子のエネルギーが必要となる、NO_x などのガス分解処理に適している。一方、パルス電圧の立ち上がり時間が 3800 ns と長い放電は、放電時間が長く放電エネルギーが高いことが図 4-14 から分かる。そのため、放電により生成したイオンを拡散する時間も長く、処理粒子のイオンによる帯電効率の向上が期待できる。したがって、パルス電圧立ち上がり時間が長い放電は、ディーゼルエンジン排ガス中のカーボンブラックなどの粒子を、電気集じんするのに適すると考えられる。ただしこの場合、放電安定領域が狭くなるため、必要な放電電力の範囲で最大の放電ギャップ長となるような、電気集じん装置の設計が必要となるであろう。

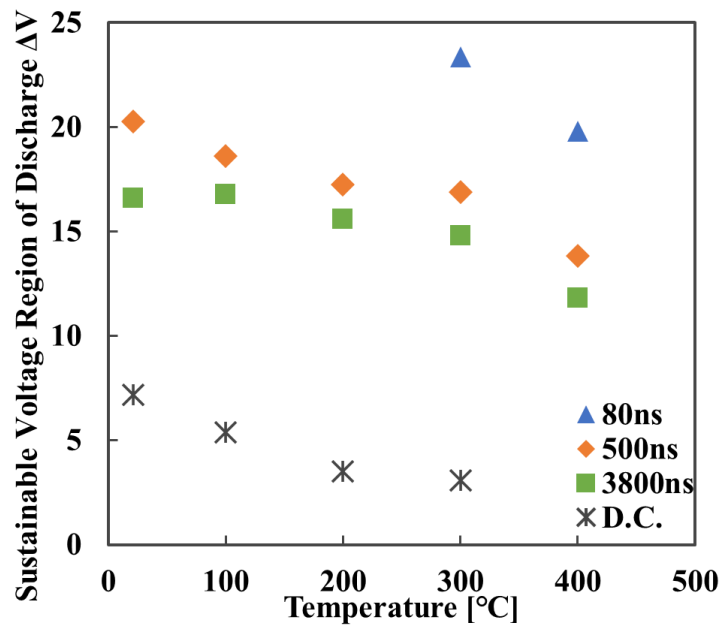


図 4-10. コロナ放電電圧領域 ΔV の温度特性
($G = 15 \text{ mm}$)

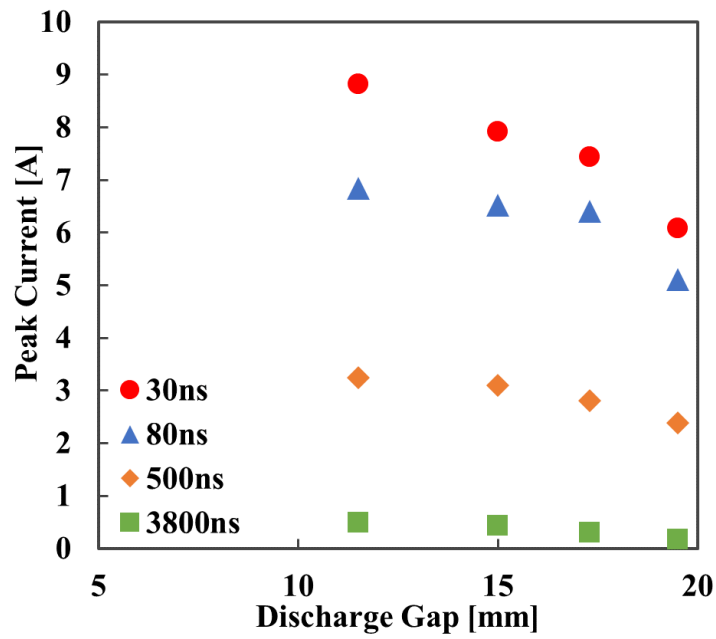


図 4-11. ピーク電流における放電ギャップの影響
($T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$)

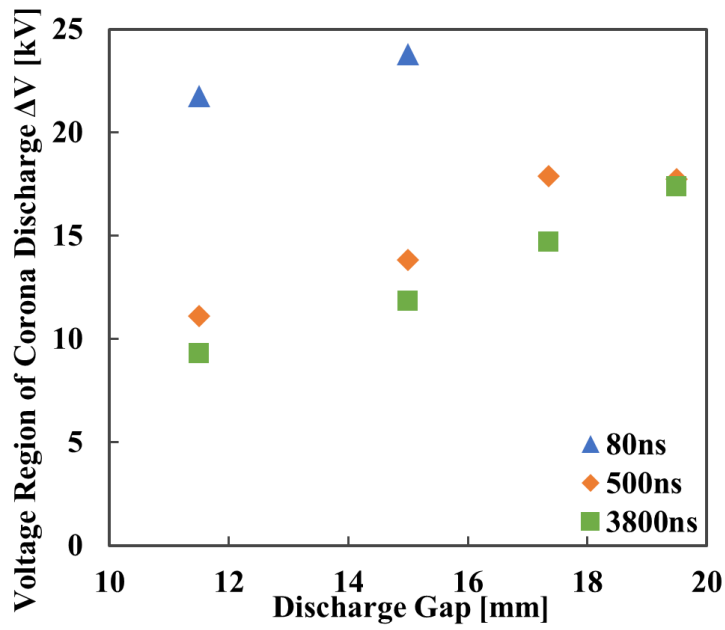


図 4-12. コロナ放電電圧領域 ΔV の放電ギャップ特性
($T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$)

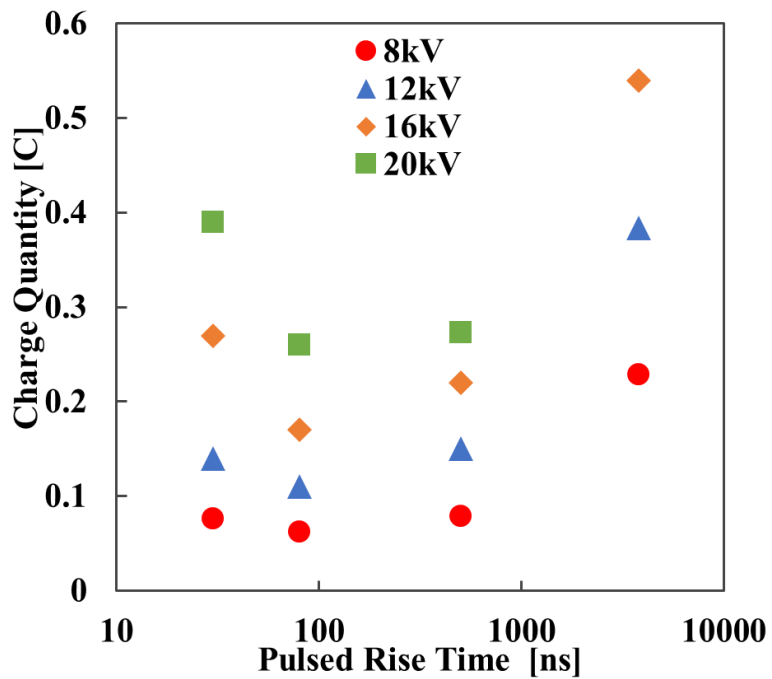


図 4-13. 放電電荷量のパルス立ち上がり時間特性
($G = 15 \text{ mm}$, $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$)

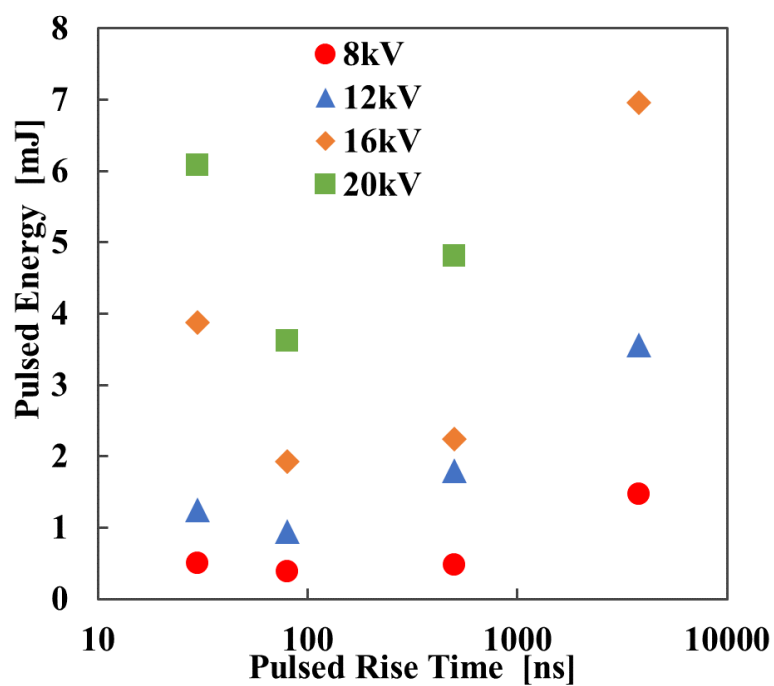


図 4-14. 1 パルス当たりのエネルギーに対するパルス立ち上がり時間の影響 (G = 15 mm, T = 400 °C)

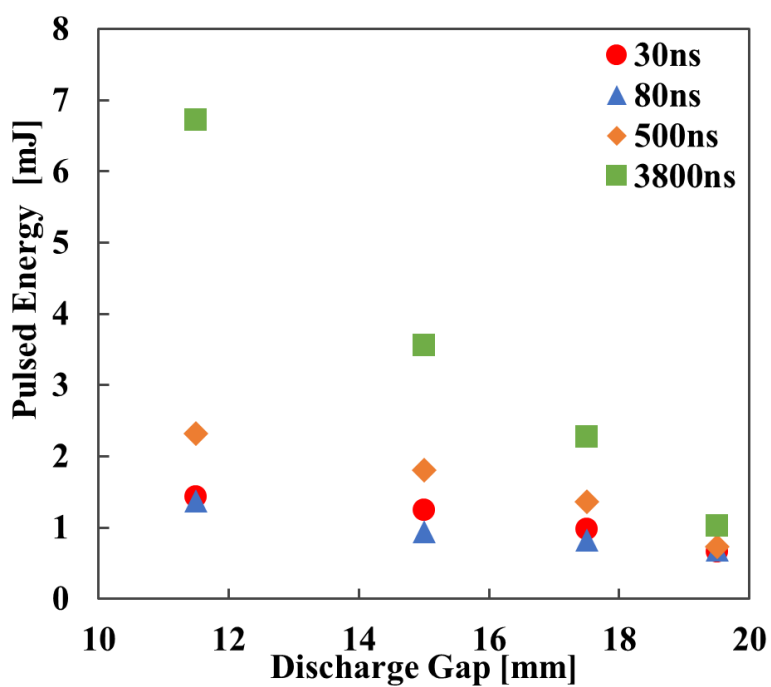


図 4-15. 1 パルス当たりのエネルギーに対する放電ギャップの影響 (V = -12 kV, T = 400 °C)

4-4 正極性における高温パルス放電特性

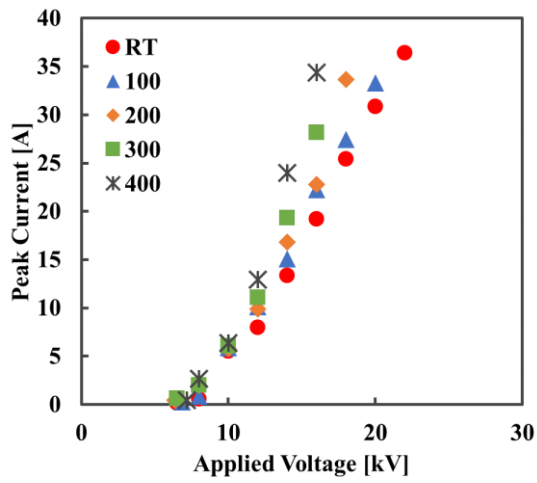
4-2 節において負極性のパルス放電の場合、立ち上がり時間が比較的に長いパルス放電の方が ESP の集じんに適することが分かった。よって、正極性も同様な検討を行う必要がある。

● 放電電流に対する温度の影響

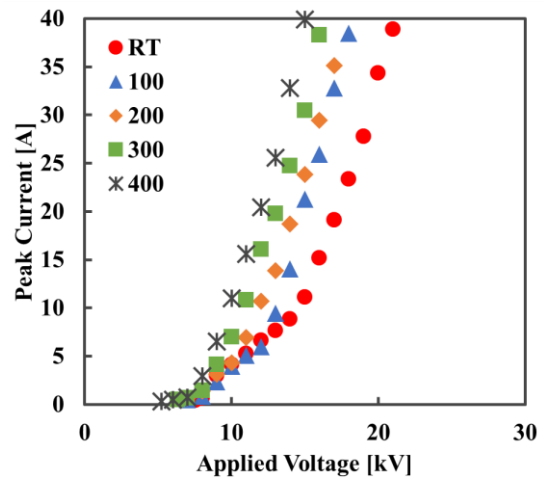
パルス放電の極性を負極性から正極性に変化させ検討を行った。図 4-16 に正極性パルス放電の電圧電流特性を示す。使用したパルス放電の立ち上がり時間は、それぞれ 50ns, 80ns, 500ns, 3800ns である。リアクタのギャップ長を 15mm とし、室温から 400°C まで 100°C ずつ変化させた。図 4-16(a)(b) では、スパークオーバが観測させなかったため、オシロスコープの故障を防ぐためにピーク電流値の最大値を 40A とし、それまでの電流値を測定しプロットを行った。一方、図 4-16(c)(d) ではスパークオーバが観測されたため、放電開始電圧からスパークオーバ直前までの電流値を測定しプロットを行った。図 3-15(a)(b)(c) において、温度が上昇するにつれて放電特性は左側にシフトし、同電圧におけるピーク電流値は上昇した。

一方、図 4-16(d) では温度の上昇に伴い、ピーク電流はバラつきが見られ、温度特性を確認することはできなかった。オシロスコープより電圧電流波形の観測を行ったところ、200°C 以上から複数のパルス成分が出力される電流波形に変化している。このことから、負極性パルス放電の電圧電流特性と同様に、立ち上がり時間が長いパルス放電は、空間の温度変化に伴い、1 発の大きいパルス成分から複数の持続的なパルス成分の出力に変化する。また立ち上がり時間が長いパルス放電において、正極性の方が 1 発のパルス成分を出力されることが確認できた。電流値の増加量が多いことから、正極性パルス放電はストリーマ放電からグロー様放電へ放電形態が移行していることが分かる。これにより、放電形成が不安定となりピーク電流値が急激に上昇するようになったと考えられる。

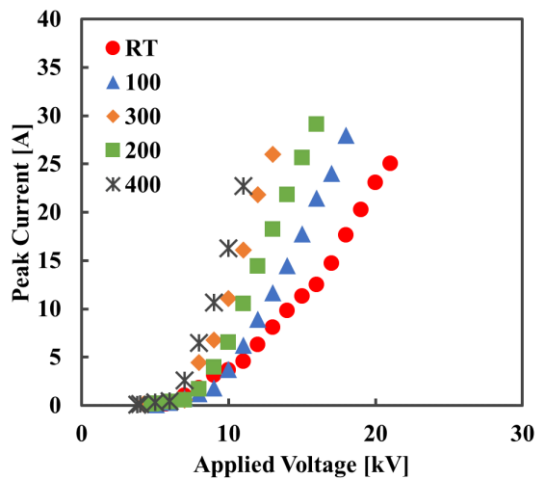
正極性パルス放電の立ち上がり時間ごとにおける、高温度条件での電流特性について比較を行った。図 4-17 に各立ち上がり時間におけるパルス放電の電流特性を示す。使用したリアクタのギャップ長は 15mm である。印加電圧が上昇するにつれて、立ち上がり時間が長いパルス放電ほど、同電圧値におけるピーク電流値は大きくなった。また印加電圧の増加量に対して、ピーク電流の増加量も多くなることが確認できた。このことから立ち上がり時間が長くなるほど、低い印加電圧で放電形態がストリーマ放電からグロー様放電に移行することが分かった。一方、立ち上がり時間 3800ns パルス放電では、ピーク電流値が減少し増加量も変化がなかった。これは、放電形態が 1 発のパルス成分から複数の持続的なパルス成分に変化し、時間的に圧縮されず小さい電流が出力されるためだと考えられる。



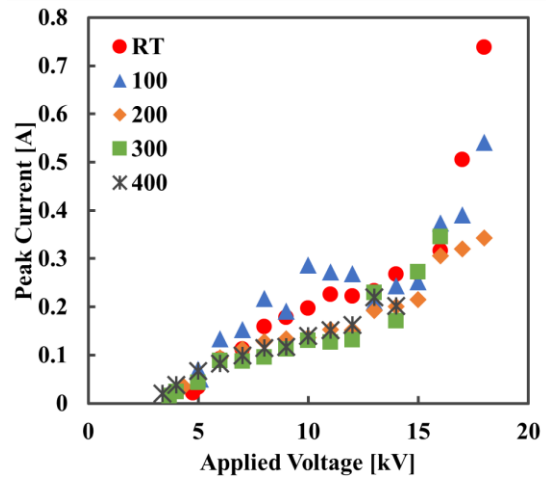
(a) Tr 50 ns



(b) Tr 80 ns



(c) Tr 500 ns



(d) Tr 3800 ns

図 4-16. 正極性パルス放電の電圧電流特性
(G = 15 mm)

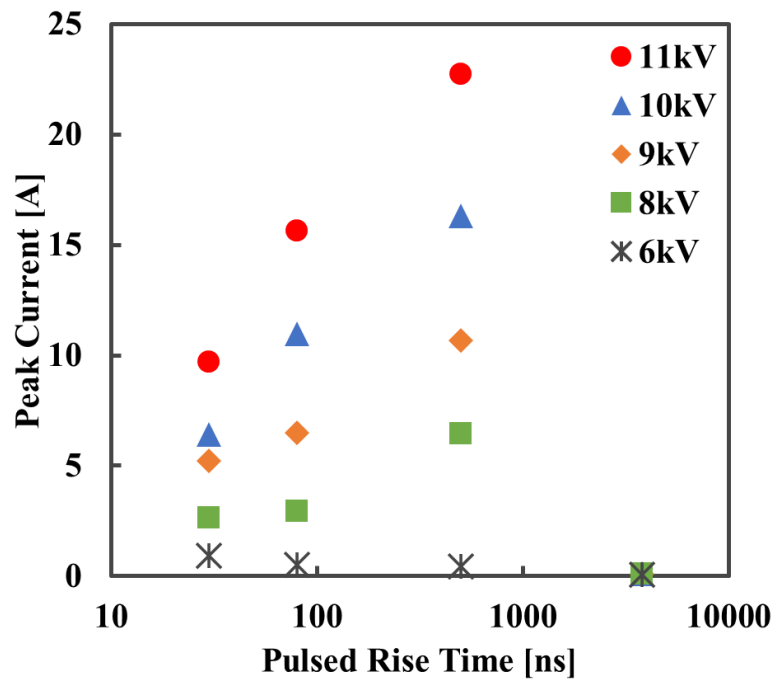


図 4-17. 正極性パルス立ち上がり時間による電流特性
(G = 15 mm, T = 400 °C)

- 極性による比較

図 4-8 及び図 4-16 より、極性におけるパルス放電の比較検討を行った。図 4-18 に極性における立ち上がり時間の電流特性を示す。実験条件として印加電圧を 10kV、リアクタのギャップ長は 15mm、内部温度を 400°Cとした。立ち上がり時間 80ns, 500ns において、正極性のピーク電流値の方が高く最大で 6 倍ほどの差が出た。これより、正極性パルス放電は負極性に比べて、低い印加電圧でグロー様放電の成分を強く出力していることが分かる。

続いて、スパークオーバが観測された立ち上がり時間 500ns 及び 3800ns パルス放電を用いて、極性によるパルスコロナ放電電圧領域 ΔV の比較を行った。図 4-19 に極性ごとにおけるパルスコロナ放電電圧領域を示す。負極性では、立ち上がり時間 500ns の方が電圧安定領域を広いのに対し、正極性では 100°C以降において、立ち上がり時間 3800ns の方が広くなっていることが確認できた。

高温度で放電を生成する際、負極性パルス放電ではストリーマ放電、正極性パルス放電ではグロー様放電を、それぞれ効率良く活用することが可能である。ストリーマ放電及びグロー様放電はともに、非熱平衡度が高い。一方ストリーマ放電は、各種粒子密度が低くその衝突頻度が低いため、グロー様放電に比べてプラズマ化学反応におけるエネルギー損失は小さくなる。これにより、オゾンを始めとした化学反応による有害物質の除去、電子によるガス粒子の帯電など排ガス処理の活用用途に対して、放電の極性を吟味する必要がある。

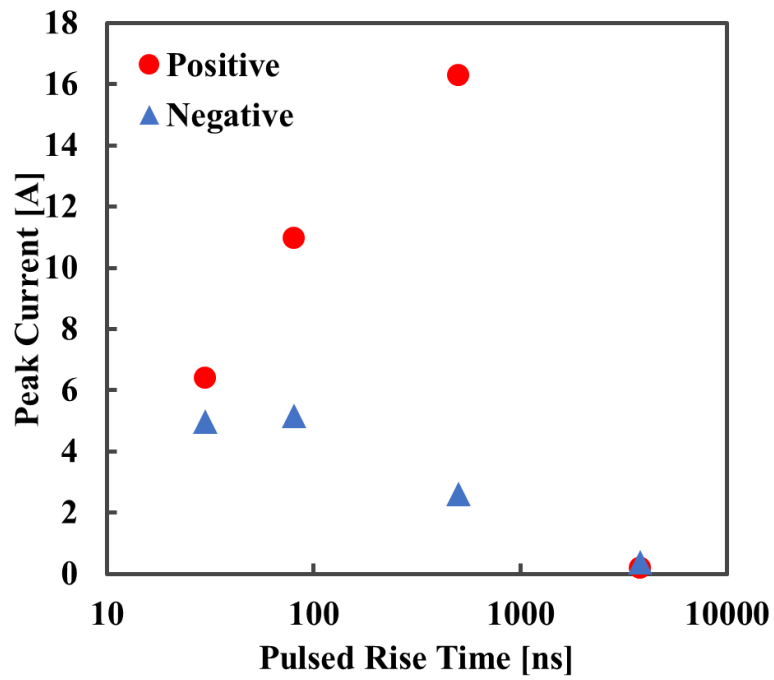


図 4-18. 立ち上がり時間によるピーク電流の比較
(G = 15 mm, T = 400 °C)

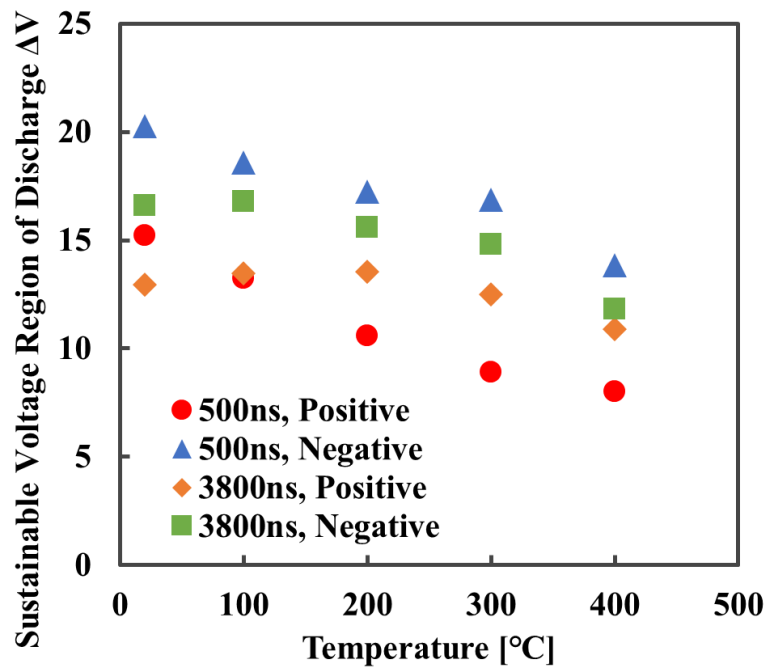


図 4-19. 極性によるパルス放電安定領域の比較
(G = 15 mm)

4-5 放電発光の観測

- 負極性パルス放電

図 4-20 に放電前の写真を示す。真ん中はワイヤ放電電極で，外側は円筒型 GND 電極である。印加電圧 6.5kV と印加電圧 12kV 時の各立ち上がり時間におけるパルス放電の発光画像を図 4-21 に示す。立ち上がり時間が短くなるほど，ワイヤ近傍における放電発光はより明るくなることが確認できる。これは，立ち上がり時間が短くなるほど同電圧値におけるピーク電流値は増加しているため，これらの結果は一致していると考えられる。

- 正極性パルス放電

図 4-22 に正極性パルス放電の発光画像を示す。印加電圧は 10kV である。また実験方法に記載した設定では，発光が明るすぎたためパルス繰り返し周波数を 30pps，カメラの gain を 5.0 にそれぞれ変更した。針から接地電極に向けて，ストリーマが進展していることが確認できた。また針近傍において，立ち上がり時間 500ns パルス放電の発光画像が最も明るく，グロー様放電の成分が大きくなっている。各立ち上がり時間における放電発光より，立ち上がり時間とピーク電流の関係は同様のことが言えると考えられる。

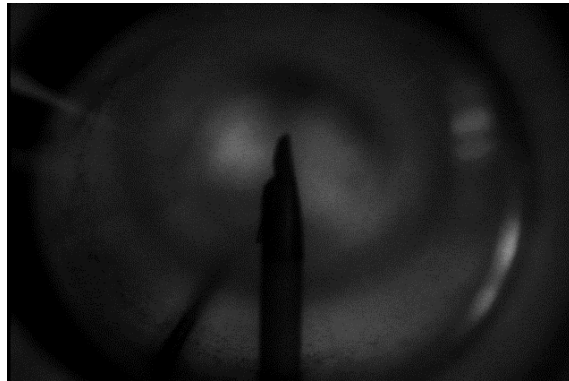
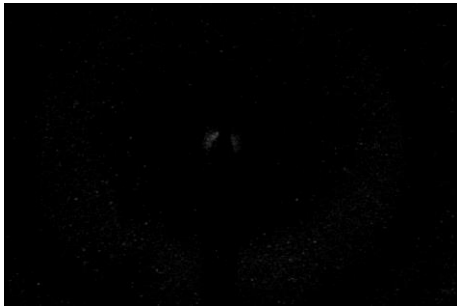
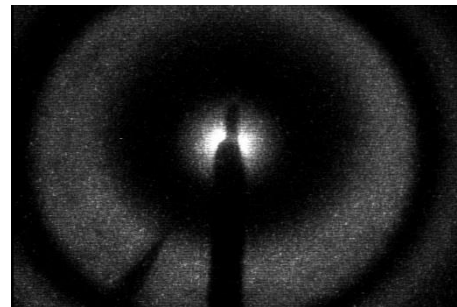


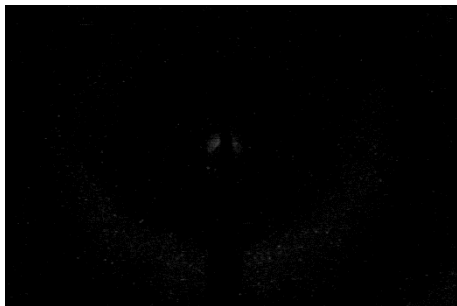
図 4-20. 放電前の写真



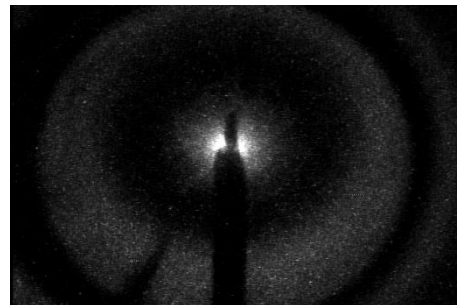
(a) 30 ns, 6.5kV



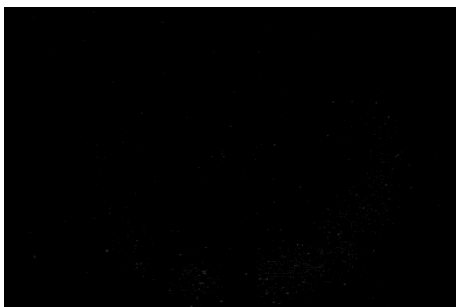
(b) 30 ns, 12kV



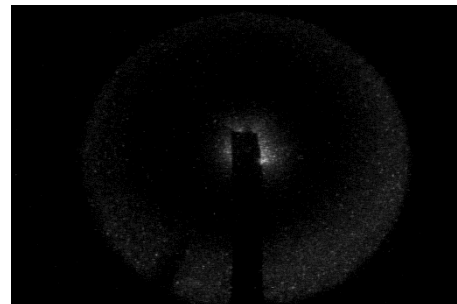
(c) 80 ns, 6.5kV



(d) 80 ns, 12kV



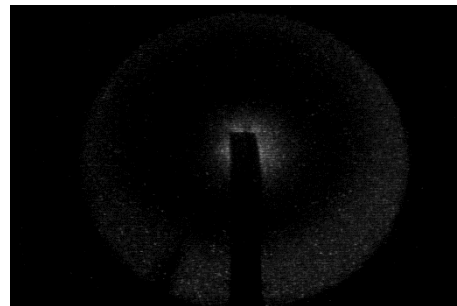
(e) 500 ns, 6.5kV



(f) 500 ns, 12kV

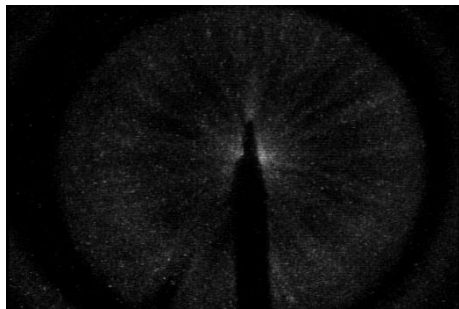


(g) 3800 ns, 6.5kV

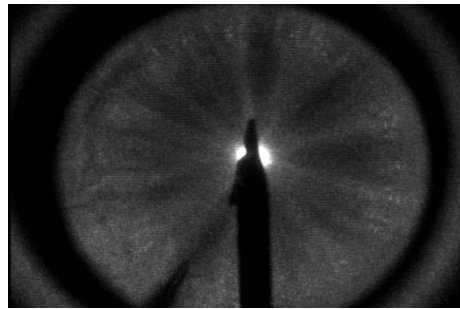


(h) 3800 ns, 12kV

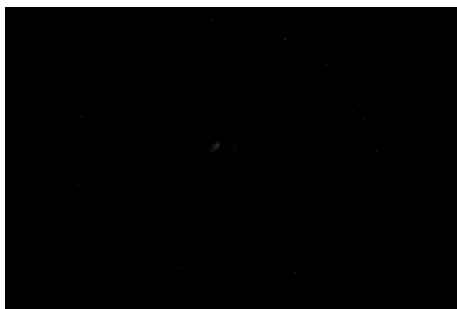
図 4-21. 負極性パルス放電発光
(G = 15 mm, T = 400°C)



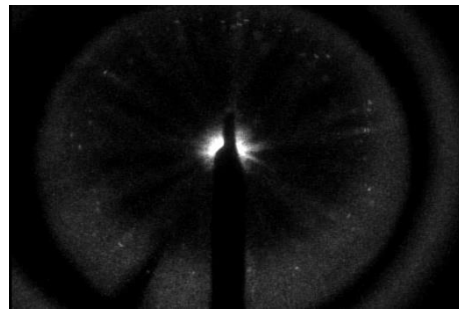
(a) 50 ns, 6.5kV



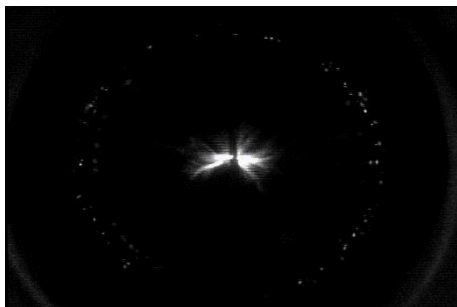
(b) 50 ns, 10kV



(c) 80 ns, 6.5kV



(d) 80 ns, 10kV



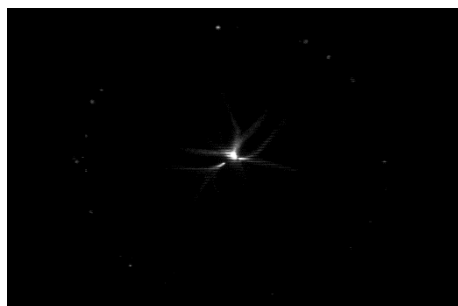
(e) 500 ns, 6.5kV



(f) 500 ns, 10kV



(g) 3800 ns, 6.5kV



(h) 3800 ns, 10kV

図 4-22. 正極性パルス放電発光
(G = 15 mm, T = 400°C)

4-6 結言

ワイヤ対円筒構造の放電リアクタを用い、ワイヤ電極にパルス高電圧を印加し、室温から 400 °Cまでの温度雰囲気における放電特性を検討した。本研究では以下のことが明らかとなった。

1. DC コロナ放電と比べて、パルス放電の方は電圧安定領域が広いことが確認できた。また立ち上がり時間が短くなるほど、電圧安定領域大きくなる。
2. 立ち上がり時間が短くなるほど、温度変化に伴うピーク電流値の増加量は大きくなる。
3. 立ち上がり時間が長くなるほど、1パルスあたりのエネルギー値が大きくなる。
4. ギャップ長が短くなるほどピーク電流値は大きくなり、電圧安定領域は狭くなった。
5. 500, 3800ns において、負極性は正極性より安定領域が大きい。
6. 放電発光から、負極性に比べ正極性のパルス放電領域が広い。

参考文献

- (1) 浪平 隆男, 王 斗艶, 松本 宇生, 岡田 翔, 秋山秀典:「ナノ秒パルス放電プラズマの特性とその応用展開」, 電気学会論文誌 A, Vol. 129, No. 1, P. 7-14 (2009)
- (2) 浪平 隆男, 龍 輝優, 王 斗艶:「超高換算電界を有するナノ秒パルス放電プラズマの特徴とその制御」, J.Plasma Fusion Res. Vol.96, No.3, P.97-102, (2020)
- (3) 袁 振東, 南雲 幹太, 日比野 晃久, 岩 尾徹, 江原由泰:「高温度パルス放電における立ち上がり時間の影響」 電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌), Vol.142, No. 8, (2022)
- (4) 龍 輝優, 王 斗艶, 浪平 隆男:「同軸円筒型電極内ナノ秒パルス放電の挙動特性」, 電気学会論文誌 A, Vo139, No.10, P. 445-452, (2019)
- (5) 林 眞, 三好 保憲:「空気の火花形成時間と放電域」, 電気学会雑誌, Vol85, No.920, P. 899-907 (1965)
- (6) P. Yan, C.H. Zheng, G. Xiao, X. Xu, X. Gao, Z.Y. Luo, K. Cen :「Characteristics of negative DC corona discharge in a wire-plate configuration at high temperatures」 Separation and Purification Technology, Vol.139, P.5-13, (2 January 2015)

第5章 ディーゼル排ガス処理におけるパルス放電型 ESP の研究

5-1 緒言

ディーゼルエンジンは1892年に発明され、燃焼効率が良く、経済性も優れている特徴を持つことから、幅広く利用されている。その中でコストが比較的安い船舶の主機関、発電機関としては最も多く利用されている。更に、近代の世界各国における経済・貿易の発展に伴い、海運での使用は増えつつある。そのため、大気汚染の進行や地球温暖化などの問題は非常に深刻な問題となっている。この問題に対して、幅広い粒径の集じんに対応するESPが適すると考えられる⁽¹⁾。

一般にコロナ放電では、正極性より負極性の方が、フラッシュオーバー電圧が高く、安定領域が広いことが知られている。しかし、船舶などに使用されている大型ディーゼルエンジンの排ガスは非常に高温で、従来の直流放電を印加したESPの場合、放電が不安定になり、スパークオーバーしやすくなることが確認されている⁽²⁾。この問題は集じん率に大きく影響するため、著者らは放電の安定性を向上させる目的で、直流コロナ放電よりスパークオーバーしにくい、パルス放電に着目した。現在パルス放電を用いた高温放電特性に関する研究はまだ少なく、ESPにパルス放電を用いた研究も多くない。

そこで、本研究ではESPを高温ディーゼル排ガス処理に適用するため、数種類の立ち上がり時間と極性の異なるパルス放電を用いた。ESPの集じん効率の評価として、処理ガス温度やパルス繰り返し周波数、ガス流量と排ガスが媒体とした時の放電特性について実験し、議論を行った⁽³⁾。

5-2 実験方法

● 実験システム

実験システムを図 5-1 に示す。実験は帯電部と集じん部で構成された 2 段式 ESP で実験を行った。帯電部の電極構成はワイヤ対円筒で、放電ギャップは 15 mm である。集じん部はギャップ 5.5 mm を有する同軸二重円筒で構成されている。帯電部に負、または正極性のパルス高電圧を印加し、集じん部には ± 3.5 kV の直流電圧を印加した。印加したパルス電圧については第 3 章と第 4 章で使われているものと同様に、パルス繰返し周波数を最大 1000 pps とした。

C 重油より比較的少ないスス発生量である A 重油を燃料としたディーゼル発電機から排ガスを発生させた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。排ガスはヒーターを通し、予備加熱してから ESP に流入させた。ディーゼル排ガスの処理流量は 15 から 30 L/min である。また、高温雰囲気を維持するために、帯電部と集じん部を管状ヒーター内に設置した。帯電部後方のガス温度を 50~300 °C で実験を行った。放電電流はカレントトランス(Pearson model 6585)とオシロスコープ(Tektronix TDS 620B)を用いて、測定した。ESP 出口でパーティクルカウンター(リオン社 KC-01E)を用い、粒径 0.3 から 5 μ m の粒子濃度を測定し、集じん率を求めた。

● パルス電圧について

第 4 章では空気を装置内に流れ込んで、高温放電特性について検討した。しかし、本実験ではディーゼル排ガスを用いたため、ガスの性質が全く違い、確認の必要がある。よって、ピーク電圧 11kV の負極性パルス電流波形を図 5-2 に示す。図 5-3 には同じく 11kV の正極性パルスの電圧電流波形を示す。排ガス温度を 300°C とした。

負極性パルス放電の波形について、立ち上がり時間の短い順からそれぞれのピーク電流は 4.8A、3.3A、1.3A、0.2A である。図 4-4 と比べて放電はしにくくなり、ピーク電流が小さくなった。これは水分子の電子付着により電流が抑制されるが原因と考えられる。

一方、正極性パルス放電のピーク電流は 6.3A、10A、2.8A、0.14A であった。負極性と同様な傾向が見られ、図 4-5 に比べてピーク電流が小さくなった。

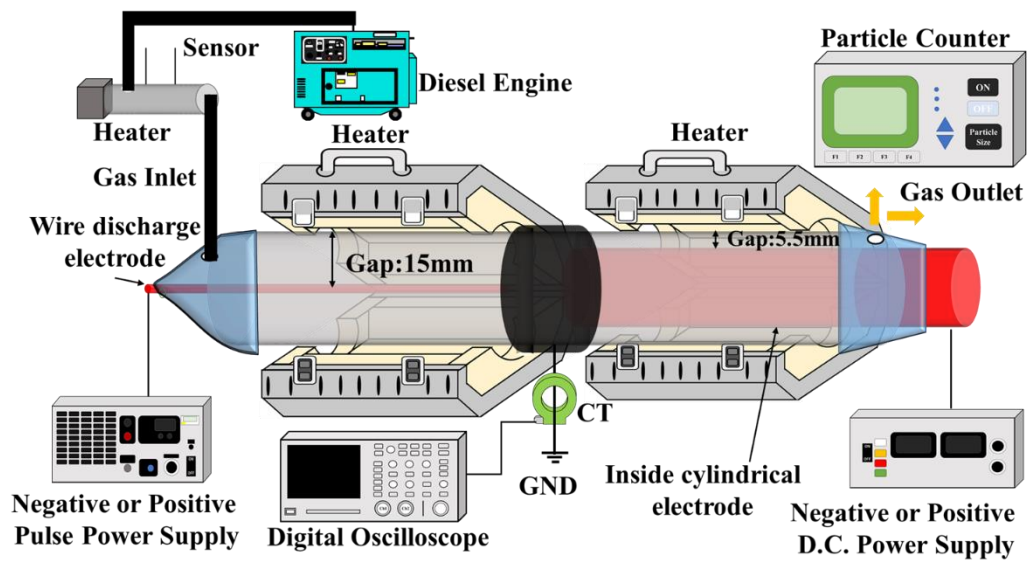
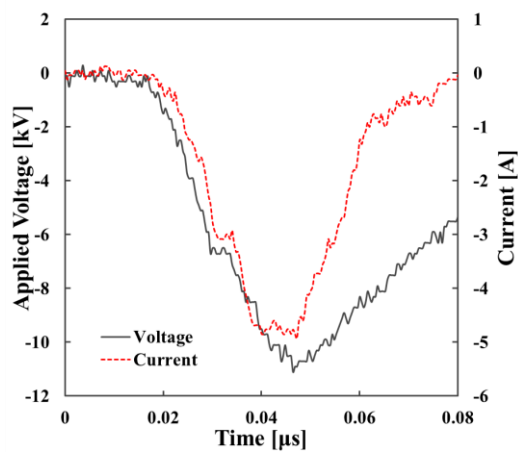
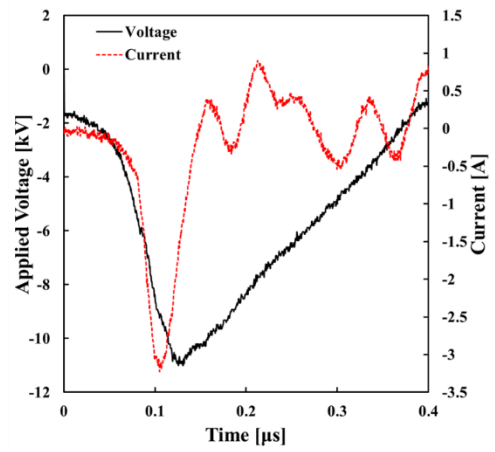


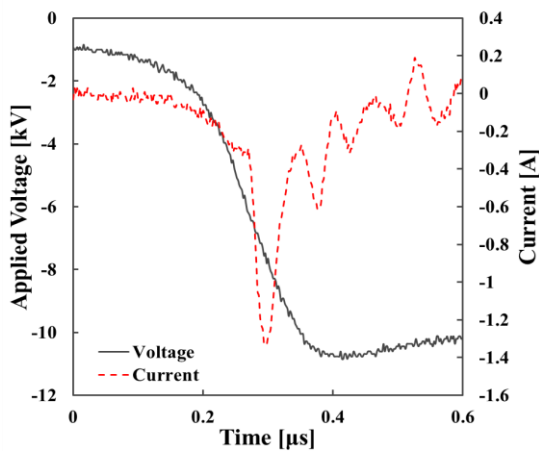
図 5-1. 集じんシステム



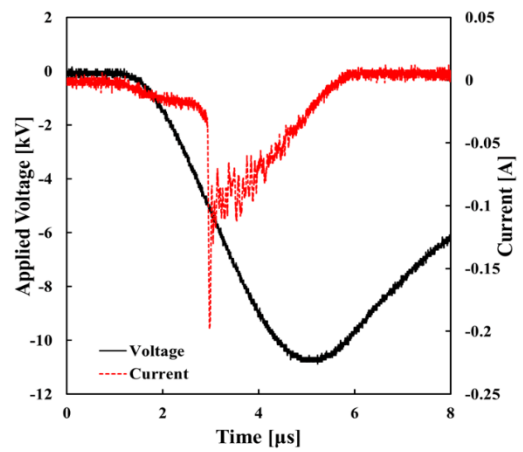
(a) Tr 30 ns



(b) Tr 80 ns

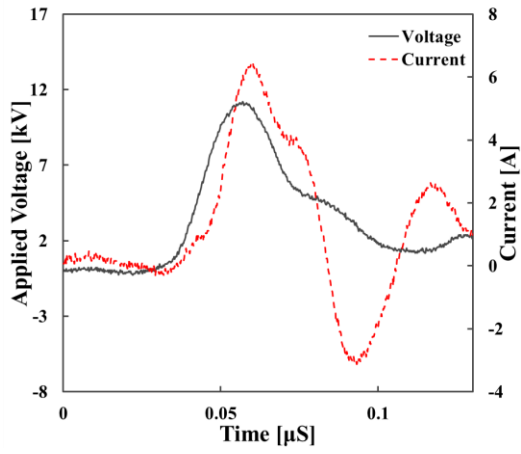


(c) Tr 500 ns

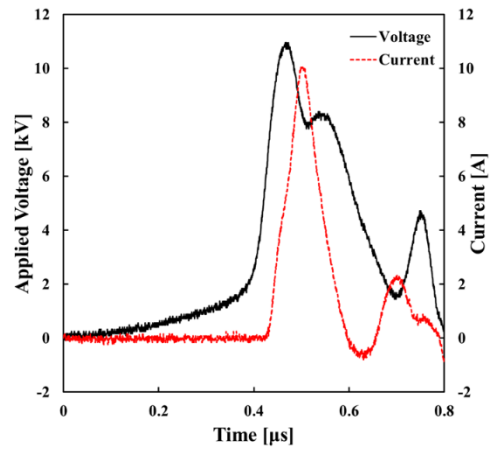


(d) Tr 3800 ns

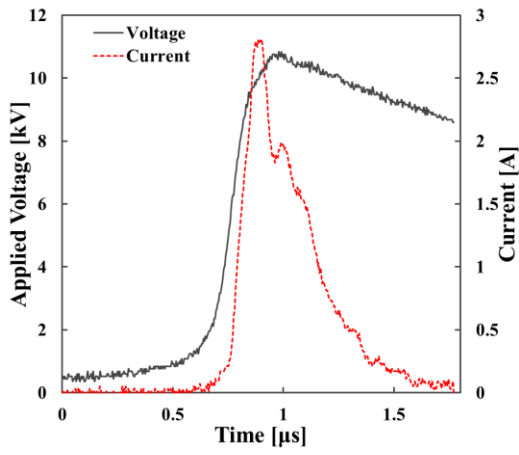
図 5-2. 負極性パルスの電流電圧波形.
($V = -121\text{kV}$, $T = 300\text{ }^\circ\text{C}$, ディーゼル排ガス)



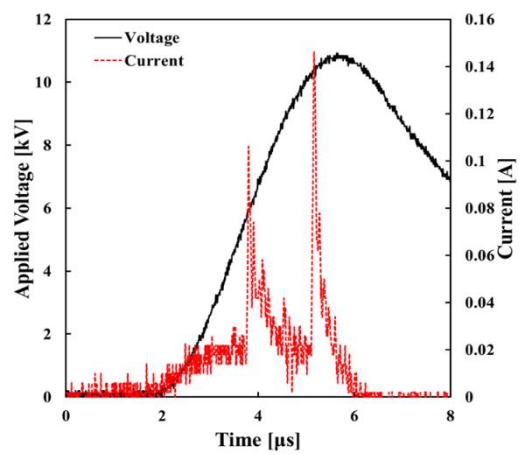
(a) Tr 50 ns



(b) Tr 80 ns



(c) Tr 500 ns



(d) Tr 3800 ns

図 5-3. 正極性パルスの電流電圧波形.
(V = 11 kV, T = 300 °C, ディーゼル排ガス)

5-3 負極性パルス型 ESP の集じん特性

- 放電電流に対する温度の影響

温度を調整し、ディーゼル排ガスを流した状態での放電特性を図 5-4 に示す。立ち上がり時間 30ns のパルス放電は電源規格の最大出力まで印加してもスパークオーバーしなかった。他の 3 種類はスパークオーバー直前まで実験し、電流値をプロットした。電圧上昇とともにピーク電流値が大きくなる傾向であった。(a)(b)(c)の負極性パルス放電は同電圧において温度が上がるとピーク電流値がわずかに上昇したが、直流放電に比べ、温度の影響が少ないことを示している。(d)の立ち上がり時間が一番長い 3800ns のパルス放電では温度上昇とともに電流が大きく増加した。同じ 10kV の電圧において、50°Cから 300°Cになるとピーク電流が 2 倍になった。これは電子エネルギーと熱放出エネルギーの増加が原因と考えられる。

図 5-5 には同電圧におけるピーク電流、放電電荷量と 1 パルス当たりの放電エネルギーを示す。温度は 300°C、ガス流量は 15L/min とした。ピーク電圧は-11kV である。ピーク電流について、立ち上がり時間が短いほどピーク電流が高い。これは放電遅れなど影響と考えられる。放電電荷量と放電エネルギーは同様な傾向で、立ち上がり時間が一番長い 3800ns のパルス放電は高い。続いては放電時間が短い 30ns のパルス放電である。放電時間が短くても、電流が大きいため、時間積分で求めた電荷量とエネルギーも大きくなる。逆にピーク電流が低くても、放電時間が長ければ、電荷量とエネルギーが大きくなる。

- 放電安定領域

放電安定領域を比較するために、同じ条件での直流コロナ放電の結果も入れた。図 5-6 にはそれぞれ立ち上がり時間 80ns,500ns,及び 3800ns のパルス電圧と直流電圧の特性を示す。温度は 300°C、パルス繰り返し周波数は 100pps、ガス流量は 15L/min とした。使用したパルス放電の種類に問わず、温度上昇とともに放電安定領域が減少することが示唆された。これも高温による電離係数の増加が原因と考えられる。また、どの温度でも、直流よりパルス電圧の放電安定領域が広いことを示した。さらに、パルス放電の場合、立ち上がり時間が短くなるほど安定領域が広いことを示す。したがって、直流に比べて、短いパルス放電の方が高温雰囲気稼働に適すると考えられる。

- 温度の影響

図 5-7 は集じん率に対する排ガス温度の影響を示す。パルス印加電圧は-11 kV、パルス繰り返し周波数は 100 pps とし、排気ガス流量は 30 L/min で実験を行った。温度が上昇するにつれて、すべてのパルス放電の集じん率が低下した。装置の容積は一定で、高温により排気ガスが膨張し、ESP 内のガス速度が速くなった。その結果、荷電された粒子は GND 電極に向かって移動せず、より多くの粒子が通過したと考えられる。そして、いずれの温

度においても立ち上がり時間の長い 3800ns のパルス放電の集じん効率が最も高かった。パルス立ち上がり時間は長いほど、放電時間が長く、通過する粒子の帯電効率が高くなる。

- パルス繰り返し周波数特性

高温状態において、集じん率のパルス繰り返し周波数の影響を図 5-8 に示す。パルス印加電圧は-11 kV とした。立上り時間 30 と 80ns のパルス放電は 1000 と 500pps まで、立上り時間 500 と 3800ns のパルス放電は 120pps まで実験を行った。どの電源を使っても、パルス繰り返し周波数増加とともに集じん率が増加する傾向を示した。これはパルス繰り返し周波数の増加により、単位時間当たり通過する粒子の帯電数を増やすことが可能となることが示唆された。100pps 以下の周波数領域において、立ち上がり時間が長いほど集じん率が高い。30 と 80 ns の 600 と 400pps は 3800ns の 120pps 時の集じん率が高い。つまり、適切にパルス繰り返し周波数を調整すれば、短い立ち上がり時間のパルス放電でも高い集じん率を得られることが可能である。

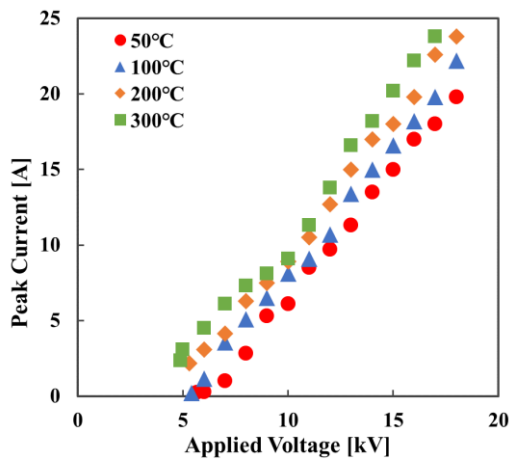
- パルス印加電圧の影響

排ガス温度は 300°C で、流量を 15L/min での集じん率に対するパルス印加電圧特性を図 5-9 に示す。パルス繰り返し周波数は 100pps とした。30ns 以外のパルス放電では印加電圧増加とともに集じん率が減少した。集じん率の減少は第 4 章で述べたグロー放電の増加が原因の一つと考えられる。また、パルスストリーマの先端のイオン風と電界が一番強かった。電圧増パルスストリーマが伸びる、イオン風が吹かれる空間が少なくなる。そのため、帯電効率が下がり、集じん率が減少した。これはもう一つの原因と推測する。したがって、ESP を稼働させるためには、パルス印加電圧について更に研究が必要である。

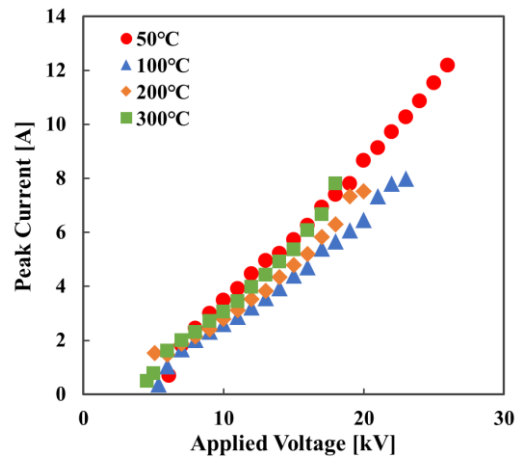
- ガス流量による集じん率の変化

排ガス流量を変化し、集じん率の流量特性を図 5-10 に示す。温度を 300 とし、パルス繰り返し周波数は 100pps で実験を行った。すべてのパルス放電において、排ガス流量が増加するにつれて集じん率が低下することを示した。これは、流量の増加により ESP 内の風速が増加したため、粒子の帯電効率が下がり、集じんできなくなった。

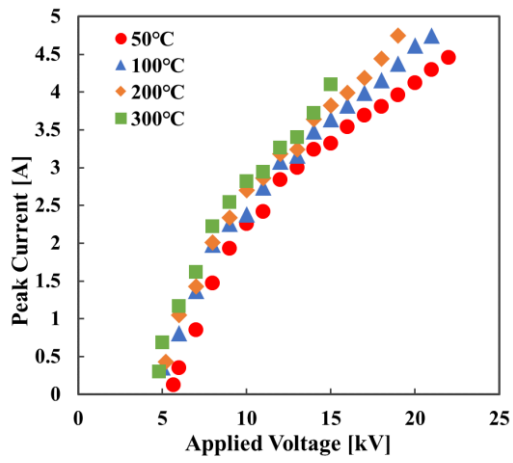
以上の結果から、負極性において、立ち上がり時間 30ns と 3800ns のパルス放電は高温集じんに適応できることを示した。本実験での条件で、どのパルス放電でも高い集じん率が得られなかった。更にパルス繰り返し周波数を増やすことが ESP の高性能化に繋がると考えられる。



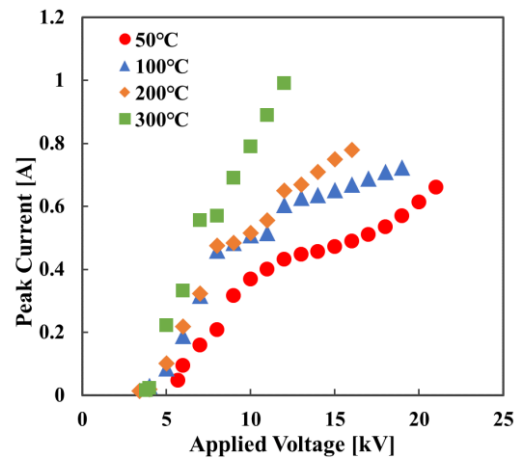
(a) Tr 30 ns



(b) Tr 80 ns



(c) Tr 500 ns



(d) Tr 3800 ns

図 5-4. 電流電圧特性に対する温度の影響
(負極性)

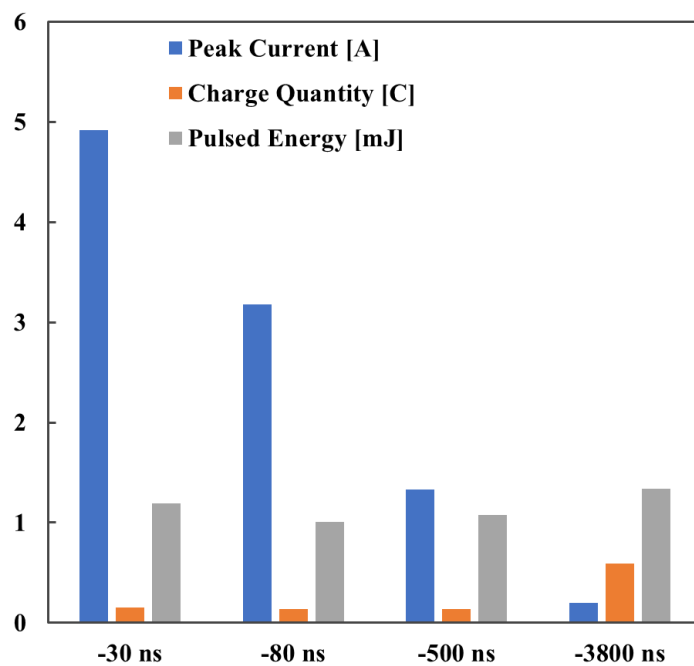


図 5-5. ピーク電流, 放電電荷量と 1 パルス当たりの放電エネルギー特性図
(-11kV, 300°C, 15L/min)

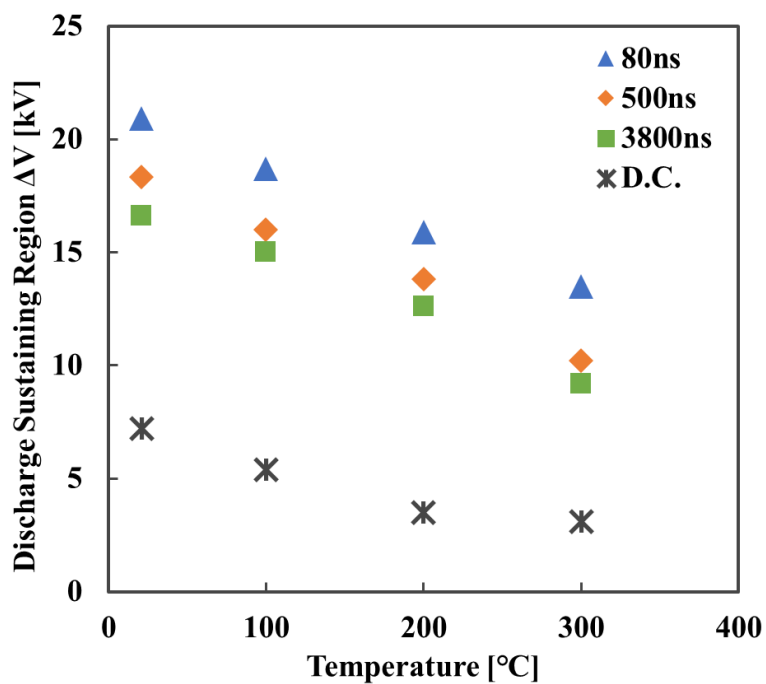


図 5-6. 放電安定領域に対する温度の影響

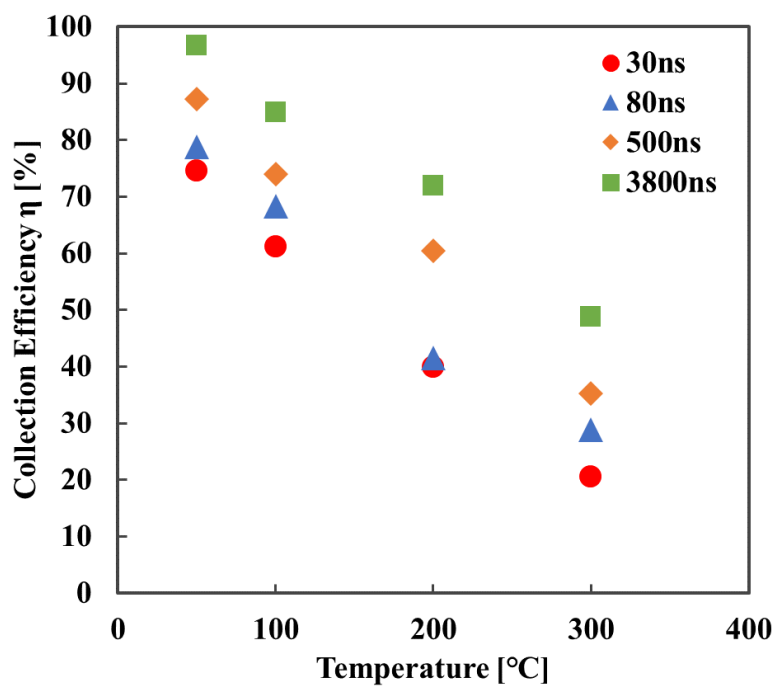


図 5-7. 集じん率の温度特性
(30L/min, 負極性)

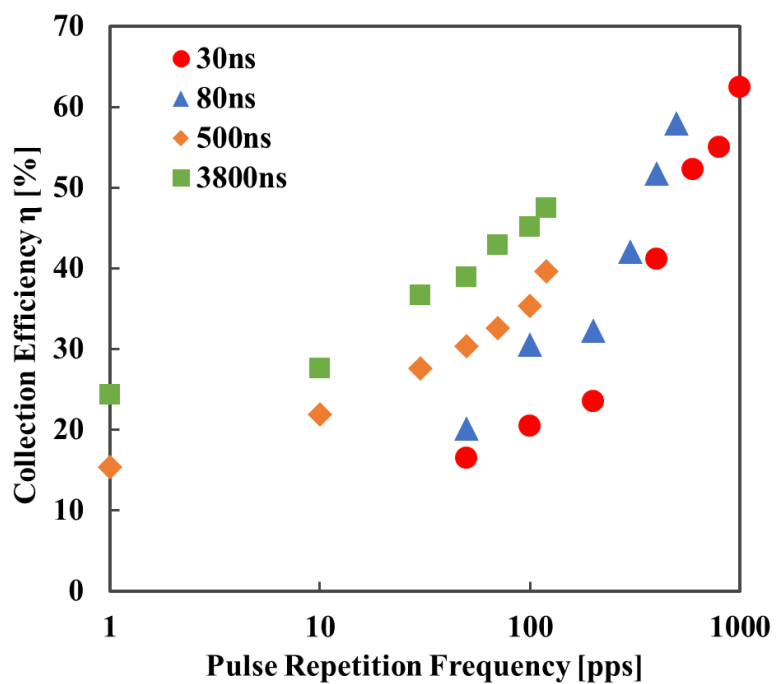


図 5-8. 集じん率のパルス繰り返し周波数特性
(30L/min, 300°C, 負極性)

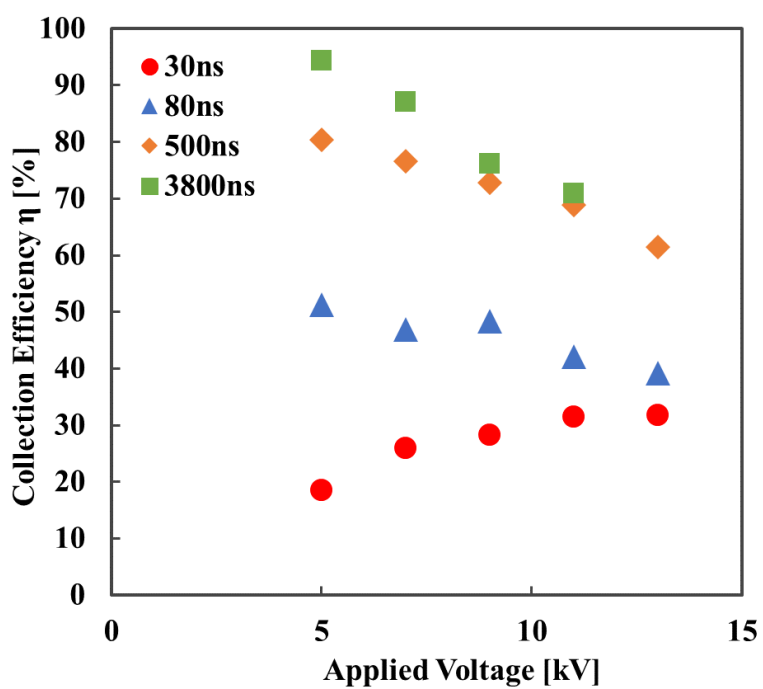


図 5-9. 集じん率のパルス印加電圧特性
(15L/min, 300°C, 100pps, 負極性)

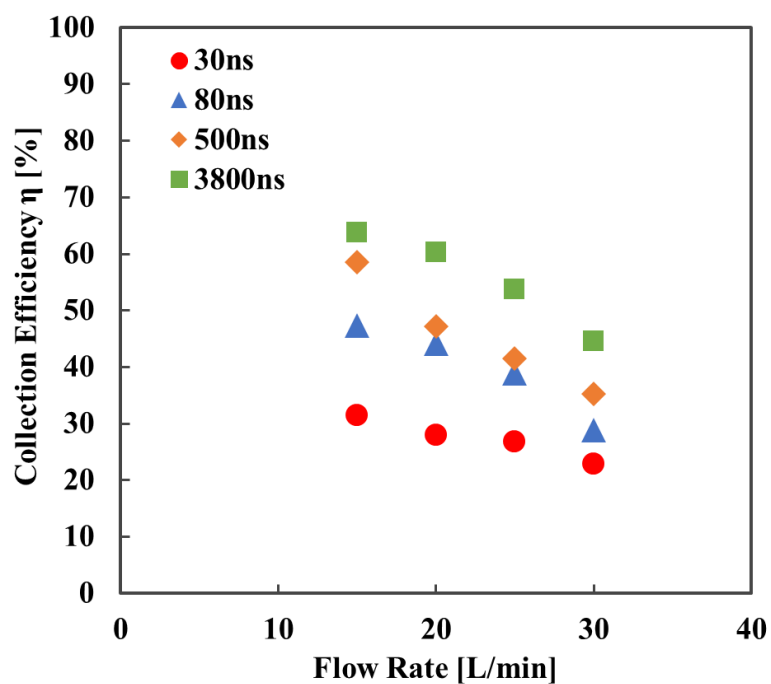


図 5-10. 集じん率の排ガス流量特性
(300°C, 100pps, 負極性)

5-4 正極性パルス型 ESP の集じん特性

- 高温ディーゼル排ガスにおけるパルス放電特性

図 5-11 に正極性パルス電流電圧特性を示す。図 5-9 の結果を踏まえ、印加電圧高すぎると集じん率が減少する可能性がある。そのため、パルス電圧は高く調整し、実験を行わなかった。全ての正極性パルス放電におけるピーク電流は図 5-4 の負極性より高かった。これは 4 章で述べたストリーマの進展が原因と考えられる。80ns 立ち上がり時間のパルス放電のピーク電流が非常に高いことを示した。

同様に、電圧一定にした時のピーク電流、放電電荷量と 1 パルス当たりの放電エネルギーを図 5-12 に示す。実験条件は図 5-5 と同じである。ピーク電流が一番高いのは 80ns である。負極性と同様に立ち上がり時間の長い 3800ns のピーク電流が一番低かった。放電電荷量とエネルギーは立ち上がり時間に依存し、立ち上がり時間が長いほど大きくなる。80ns の放電電荷量とエネルギーが低い理由は図 5-3(b)に示すように、オーバボルテージで、実際に放電した時の電圧が低いことが原因と考えられる。3800ns が高い理由は 1 パルス当たりで 2 回放電したため、時間で積分する時のエネルギーや放電電荷量の値が大きくなる。

- 温度の影響

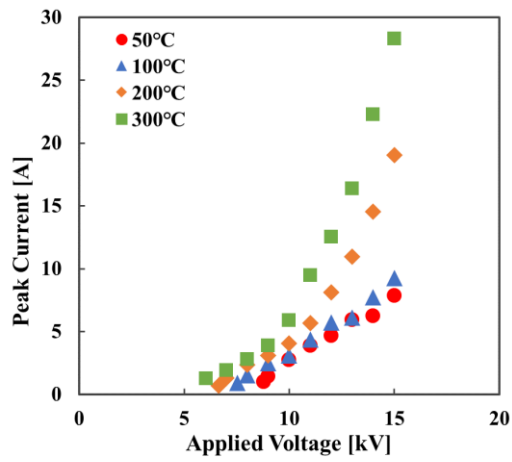
図 5-13 は集じん率に対する排ガス温度の影響を示す。パルス印加電圧は 11 kV とした。他の実験条件は図 5-7 と同じである。負極性と同様な傾向を示し、温度が上昇するにつれて、すべてのパルス放電の集じん率が低下した。しかし、3800ns のパルス放電では負極性のように 300°C になると 50%以下の集じん率にならなかった。正極性は負極性パルスより放電領域が広く、電流も高い。その結果、3800ns のパルス放電の集じん率が大幅に減少しなかった。

- パルス印加電圧の影響

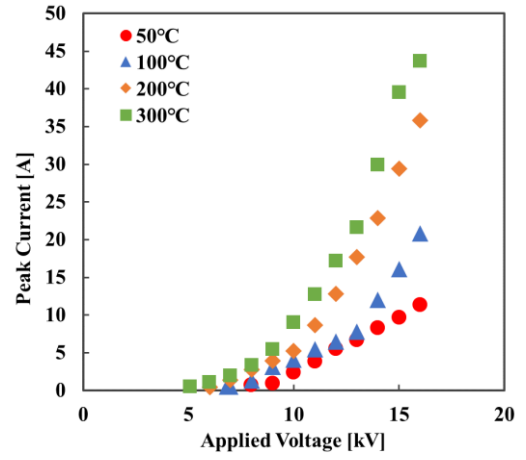
実験条件は図 5-9 と同じ、正極性パルス放電における集じん率の印加電圧特性を図 5-14 に示す。3800ns 以外のパルス放電では温度を 50 から 300°Cまで上昇すると、集じん率が 50%以下になった。3800ns のパルス放電の集じん率が 300°Cでも 80%ぐらいで、温度が上昇し、僅かに減少したが、大きな差が見られなかった。これは正極性の広い放電領域と高い電流が影響していると考えられる。

- 極性による立ち上がり時間の影響

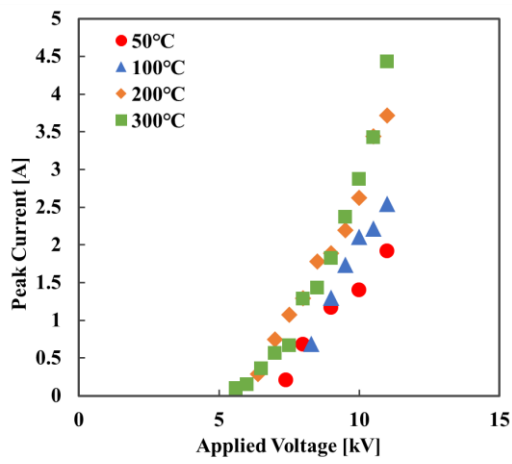
排ガス流量 15 と 30L/min での正負極性における、集じん率の立ち上がり時間特性を図 5-15 に示す。全体として、立ち上がり時間が長いほど集じん率が高く得られる。立ち上がり時間の短いパルス放電の集じん率がバラついているが、一番長い立ち上がり時間の 3800ns のパルス放電では ESP の集じんに適すると考えている。



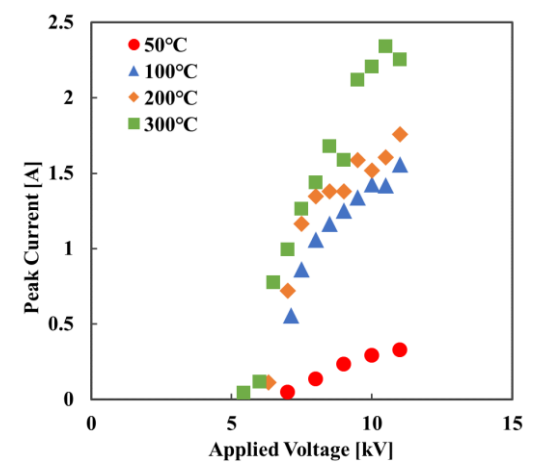
(a) Tr 50 ns



(b) Tr 80 ns



(c) Tr 500 ns



(d) Tr 3800 ns

図 5-11. 電流電圧特性に対する温度の影響
(正極性)

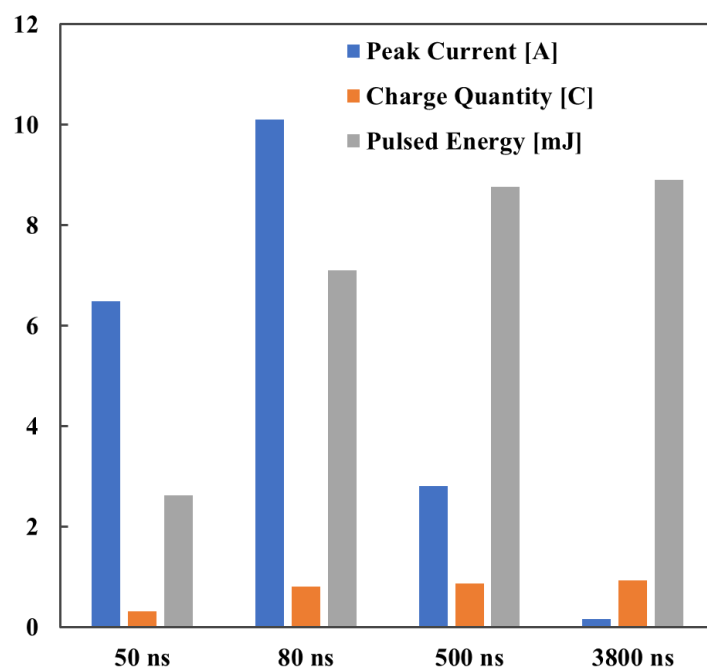


図 5-12. ピーク電流, 放電電荷量と 1 パルス当たりの放電エネルギー特性図
(11kV, 300°C, 15L/min)

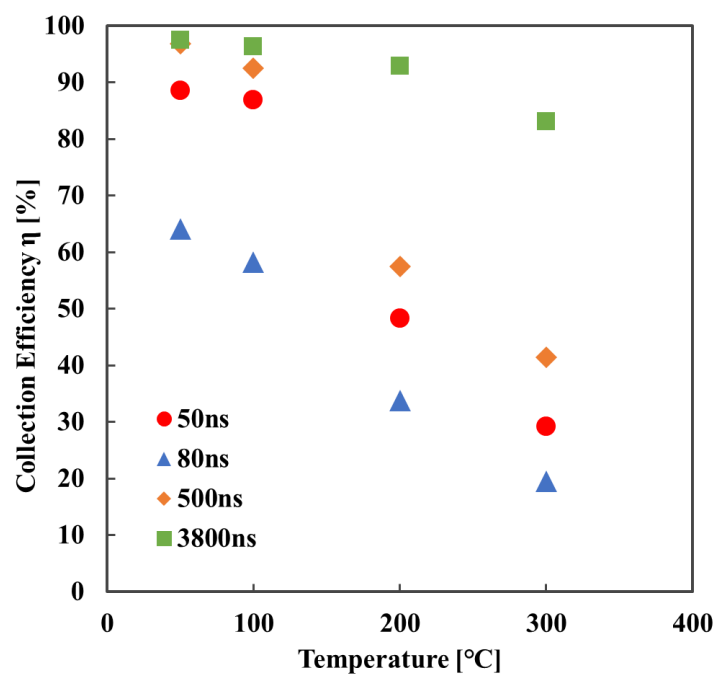


図 5-13. 集じん率の温度特性
(30L/min, 正極性)

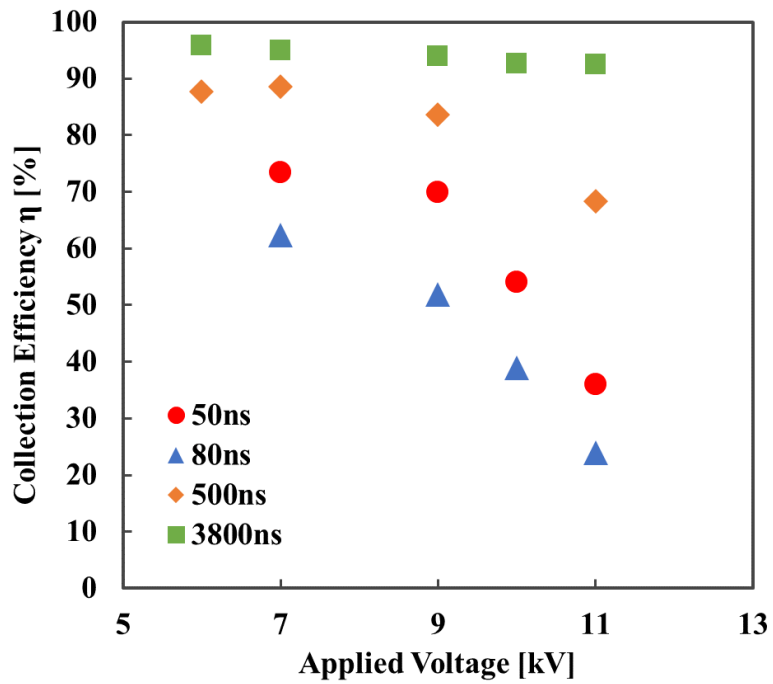


図 5-14. 集じん率のパルス印加電圧特性
(15L/min, 300°C, 100pps, 正極性)

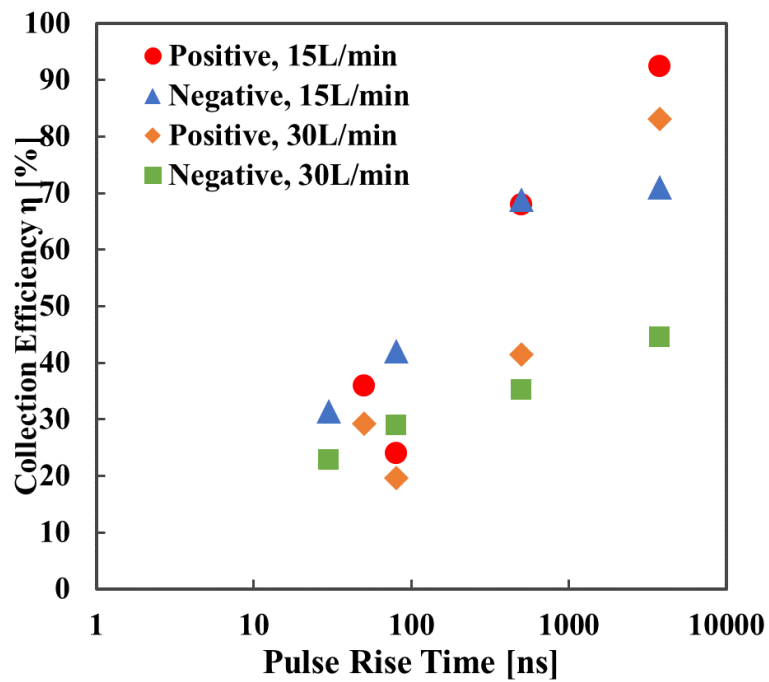


図 5-15. 集じん率のパルス立ち上がり時間特性
(300°C, 100pps, 正と負極性)

5-5 結言

高温のディーゼル排ガスを ESP に流入させ、8 種類のパルス放電を用いた集じん率に及ぼす諸特性の影響を調べた。この研究では、以下のことを明らかにした。

1. 集じん率は温度上昇に伴い低下した。
2. 温度が上昇すると、集じん率が低下する。
3. パルス繰り返し周波数を上げると、集じん率が向上する。
4. ガス流量が増加すると、集じん率が下がる。
5. パルス放電の立ち上がり時間が同じ場合、正極性の方が負極性より集じん率が高くなる。立ち上がり時間の長い 3800ns の正極性パルス放電の集じん率が一番高い。負極性の場合でも同じ傾向であった。

以上の結果から、3800ns の集じん率が高かったが、それ以上のパルス立ち上がり時間になると、スパークオーバーしやすくなると考えられる。したがって、本研究の目的である高温排ガス処理に適するパルス放電型 ESP に対して、3800ns 以下の立ち上がり時間のパルス放電を使用することが重要である。

参考文献

- (1) 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学会誌, Vol.50, No.3 pp.354-359 (2015)
- (2) 西田 修身, 藤田 浩嗣, 原野 亘, 他 4 名:「船用 NO_x, SO_x, および PM の 80% 低減のための新システム」, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.44, No.1, (2009)
- (3) 袁 振東, 南雲 幹太, 江原 由泰:「ディーゼル排ガス浄化におけるパルス放電荷電の高温集じん特性」電気学会 誘電・絶縁材料/放電・プラズマ・パルスパワー/高電圧 合同研究会, DEI-22-011,EPP-22-011,HV-22-036, (2021)
- (4) 中山 信義, 山下 尚, 園田 憲一, 神社 洋一, 桜井 秀明:「水エマルジョン燃料の実用化試験研究-A 重油と C 重油の特性比較試験」日本船用機関学会誌, Vol.30, No.9, P.661-667, (1995)
- (5) 柴山 信三, 小泉 睦男, 青木 功:「重油燃焼におけるすすの燃焼」日本機械学会論文集, Vol.34, No.260, P.769-775, (1968)

第6章 結論

船舶のディーゼルエンジン機関からの高温排ガスを処理するにあたって、高温高湿状態でも浄化できる装置が求められている。そこで、幅広い粒子径に対応できる電気集じん装置が適する。しかし、ESP に向けた高温雰囲気での基礎研究は少ないため、実用化が難しくなっている。また、船舶内部の空間が限られているので、ESP の小型化、高性能化や安定化が必要としている。したがって、著者は高温高湿でも安定性があり、かつ集じん性能が高い ESP を開発することを目的とし、研究を行った。その結果、以下の結論がまとめた。

2章では、船舶からの排ガスに向けた高温高湿雰囲気に適する従来の直流放電型 ESP で実験を行った。直流放電が不安定になる原因は電離係数が増加し、電子とガス分子の非弾性衝突により、より多くの電子が生成されることを意味する。ガスの相対密度は高温で減少し、それによって電子とガス分子の平均自由行程が増加する。初期の電離で生成された自由電子は、電界により加速され、電子エネルギーは増加する。同じ電界でも、電離係数は E/P の減少とともに増加する。したがって、電離係数は、温度上昇による圧力の低下とともに増加する。直流電圧を印加する際、ESP が高温状態でも安定した放電が発生できるように、新たな棘電極と円板電極を作成し、電極構成の最適化について研究を行った。棘1本あたりの放電電流が小さいほど、電極の摩耗が少なくなり、電極の寿命が長くなる。これは海上で長時間稼動する条件の一つである。また、棘の数が多いほど、放電ギャップ内で放電が均一に発生する。棘12本の電極は放電電流が高く、棘1本あたりの放電電流が他に比べて低い。粒子の帯電が放電電流に大きく依存するという事実を考慮すると、この研究でテストされた4つの電極の中で、棘12本の電極がESPに最も適すると考えている。要するに、直流放電を用いた場合は、 400°C において放電安定領域をある程度広げたが、 10kV 以上の電圧を制御できる安定したコロナ放電が発生出来なかった。

3章では、ワイヤ対平板、針対平板電極で構成されたスモール ESP モデルに、パルス放電を印加し、粒子挙動の解析を行った。正極性放電のストリーマ範囲は負極性放電より広く、粒子挙動はストリーマの進展に深く関係することを明らかにした。電圧が高くなり、ストリーマがGND電極まで進展すると粒子が下から上に向かう移動することがある。逆に負極性パルス放電は電極近傍で放電しているため、粒子挙動は比較的安定している。いずれ粒子全体が帯電されたと考えられ、ESPの電源として使用可能であることを明らかになった。また、立ち上がり時間の長いパルス放電は短いパルス放電より粒子移動速度が速く、集じんに適すると考えた。パルス放電は間欠的な放電であり、直流より放電時間が短い。そのため、主流体速度の影響は直流より大きいと考えられ、ESPにパルス放電を応用する場合、主流体速度の制御が重要であると考察した。

4章では、ワイヤ対同軸円筒構造におけるパルス放電の電流特性と放電安定性を測定し、高温条件下での放電処理に適したパルス立ち上がり時間と放電ギャップ長を調べた。その結果、パルス放電はDCより放電安定領域が広く、高温時の運用に適する。負極性立ち上

がり時間 30ns と正極性立ち上がり時間 80ns のパルス放電といった短いパルスのピーク電流が高い。比較的の高い電子のエネルギーが必要となる、NO_x などのガス分解処理に適している。放電エネルギーの結果から、極性を問わず、立ち上がり時間の長い 3800ns のパルス放電はディーゼルエンジン排ガス中のカーボンブラックなどの粒子を、電気集じんするのに適すると考えている。

5 章では、高温ディーゼル排ガスを用いた実機集じんを行った。結果、正極性の立ち上がり時間 3800ns の集じん率は他のパルス放電より高いことを明らかにした。温度が 50°C の場合は 98%，300°C になると 90% 近くの集じん率が得られた。パルス印加電圧による影響も他のパルスより少ない。続いて集じん効率が高いのは負極性立ち上がり時間 3800ns のパルス放電である。3、4 章での推測と一致した。短いパルスの放電時間は短いため、集じん率は低かったが、放電安定領域が非常に広く、高温状態での放電制御が容易になる。仮に短いパルス放電を ESP に利用しようとしても、高いパルス繰り返し周波数が必要とする。一方、正極性パルス放電のピーク電流は負極性より高いため、電極の寿命に影響する。よって、負極性で 1000pps 以上の高周波パルス電源が開発されたら、負極性のパルス放電が高温ディーゼル排ガス処理にも適応すると考えられる。放電特性について、ディーゼル排ガスを媒体とした場合と空気を媒体とした場合が違ふことを明らかになった。ディーゼル排ガスの場合は電極の汚れや水分の電子付着により電流が下がるためである。

以上の結果から、放電安定領域 10kV 以上かつ集じん率 90% 前後の本研究の目標が達成出来た。よって、パルス放電型 ESP を船舶のディーゼル排ガス処理に応用できるといえる。しかし、本研究での排ガス流量は大型のディーゼル機関からの排ガス量に比べると大きくなかったが、その排ガス浄化において、適切なパルス繰り返し周波数とパルス立ち上がり時間の選別が非常に重要である。また、300°C 以上の排ガスに対して、立ち上がり時間 3800ns 以下のパルス放電にする必要がある。

パルス放電型 ESP は高温状態での集じんに適すると結果から、大型の貨物船やクルーズ船などのディーゼルエンジン排ガス処理に適用することを期待している。その場合、排ガス流量を考慮すると本実験で使用した 1 ユニットの ESP でなく、複数ユニットを並列に組み合わせて、排ガスを処理することが、効率を向上すると考えている。

● 今後の展望

本実験で使用されたパルス放電の立ち上がり時間は正負とも 4 種類であり、パルス繰り返し周波数も限られていた。そのため、立ち上がり時間の長い 3800ns の集じん率が高い結果が得られた。しかし、この研究の目的は高温のディーゼル排ガス処理であるため、短いパルス放電の集じん率が低いが、放電安定領域が非常に広い。今後パルス繰り返し周波数 1000pps 以上のパルス電源が開発され、ESP に応用すると帯電効率が上昇し、集じん率も向上できると予想できる。

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、野平博司博士、同教授、岩尾徹博士、同教授、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教授、和多田 雅哉博士、同教授、澤野憲太郎博士に深く御礼申し上げます。

研究生生活でお世話になりました大電流エネルギーDX 研究室の皆様に感謝致します。

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鈴木菖平氏、藤井厚希氏、大和田葵氏、下田正也氏、田中直輝氏、大久保旬氏、杉山諒氏、日比野晃久氏、南雲幹太氏に謝意を表し、御礼申し上げます。

最後に、今までの人生を全ての面で支えてくれた、両親と叔父に深く御礼申し上げます。

研究歴

学術論文

- (1) ZhenDong Yuan, Kouta Suzuki, Yoshiyasu Ehara, “Visualization and analysis of a Re-entrained particle with an electrostatic precipitator using PIV method”, Journal of Electrostatics, Vol.119, September 2022, 103751
- (2) 袁 振東, 南雲 幹太, 日比野 晃久, 岩尾 徹, 江原 由泰:「高温度パルス放電における立上がり時間の影響」電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌), Vol.142. No.8, P347-353, (2022)
- (3) Zhendong Yuan, Kouta Suzuki, Yoshiyasu Ehara, Jun Ikeda, Keisuke Yamashiro, Tetsumi Takano, “Corona Discharge Characteristics in Electrostatic Precipitator under High Temperature”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.58, Issue.2, March-April 2022
- (4) 南雲 幹太, 袁 振東, 江原 由泰, 野崎 優介, 永吉 健太郎;「カーボンブラシ電極を用いた低オゾン電気集じん装置の開発」電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌)、Vol.141, No.11, p.622-627, (2021)

研究発表

- (1) 袁 振東, 岩尾 徹, 江原 由泰:「パルス放電を用いた電気集じん装置内における粒子挙動のPIV解析」電気学会基礎・材料・共通部門大会, 13-D-a1-5, 2022
- (2) 袁 振東, 岩尾 徹, 江原 由泰「パルス放電を用いた電気集じん装置内のイオン風解析」第46回静電気学会全国大会、8aB-3, 2022
- (3) Zhendong Yuan, Toru Iwao, Yoshiyasu Ehara, “High Temperature Diesel Exhaust Gas Treatment of Electrostatic Precipitator using Pulsed Discharge”, ISNTP-12 and ISEHD 2022, Otaru, Japan (O-48)
- (4) 袁 振東, 南雲 幹太, 岩尾 徹, 江原 由泰;「高温ディーゼル排ガス処理におけるパルス放電型電気集じん装置の開発」、電気学会全国大会、令和4年3月
- (5) 袁 振東, 南雲 幹太, 江原 由泰;「ディーゼル排ガス浄化におけるパルス放電荷電の高温集じん特性」、電気学会 誘電・絶縁材料/放電・プラズマ・パルスパワー/高電圧 合同研究会、DEI-22-011,EPP-22-011,HV-22-036、令和4年1月
- (6) 袁 振東, 南雲 幹太, 江原 由泰, 山城 啓輔, 佐久間 義弘, 金子 貴之;「ディーゼルエンジン排ガス処理におけるパルス放電型電気集塵装置の研究」、第91回 マリンエンジニアリング学術講演会、322、令和3年9月

- (7) 袁 振東, 南雲 幹太, 日比野 晃久, 江原 由泰; 「パルス放電における温度の影響に関する研究」、静電気学会全国大会、22pA-4、令和3年9月
- (8) 袁 振東, 南雲 幹太, 江原 由泰; 「パルス型電気集じん装置の集じん特性に及ぼす電圧波形の影響」、電気学会基礎・材料・共通部門大会、3-B-p2-4、令和3年9月
- (9) ZhenDong Yuan, Kanta Nagumo, Yoshiyasu Ehara, Keisuke Yamashiro, Sakuma Yoshihiro, Takayuki Kaneko, “Development of Pulse Discharge type Electrostatic Precipitator under High Temperature”, European Aerosol Conference– EAC 2021, No.326, 令和3年8月
- (10) 袁 振東, 南雲 幹太, 江原 由泰, 山城 啓輔, 佐久間 義弘, 金子 貴之; 「パルス放電を用いた電気集塵装置の高温集塵特性」、1-124、電気学会全国大会、令和3年3月
- (11) 袁 振東, 鈴木 洸太, 江原 由泰, 池田 洵, 山城 啓輔, 高野 哲美; 「高温排ガス処理における電気集塵装置のコロナ放電特性の研究」、第90回 マリンエンジニアリング学術講演会、233、令和2年10月
- (12) ZhenDong Yuan, Yoshiyasu Ehara, “Analysis of Particles Behavior in Electrostatic Precipitator with One Pulse Discharge”, European Aerosol Conference– EAC 2020, No.419, 令和2年10月
- (13) ZhenDong Yuan, Kouta Suzuki, Yoshiyasu Ehara, Jun Ikeda, Keisuke Yamashiro, Tetsumi Takano, “Corona Discharge Characteristics in Electrostatic Precipitator under High Temperature”, IEEE IAS Annual Meeting 2020, 2020-EPC-1098 令和2年10月
- (14) 袁 振東, 江原 由泰; 「単一パルス放電を用いた電気集塵装置内の粒子挙動解析」、電気学会全国大会、No.1-130、令和2年3月
- (15) ZhenDong Yuan, Atsuki Fujii, Kouta Yanagawa, Yoshiyasu Ehara, Takayuki Kaneko, “Visualization and Behavior Analysis of Re-entrainment Particle in Electrostatic Precipitator”, IEEE IAS Annual Meeting 2019, 2019-EPC-0946, 令和元年10月
- (16) ZhenDong Yuan, Atsuki Fujii, Kouta Yanagawa, Yoshiyasu Ehara, Takashi Inui, “Velocity Analysis of Re-entrainment Particle in Electrostatic Precipitator”, Proceedings of the International Workshop on Environmental Engineering 2019(IWEE 2019), PE316, P158, 令和元年8月
- (17) 袁 振東, 宮下 皓高, 江原 由泰; 「ホール型電気集塵装置における電極構造の検討」、電気学会全国大会、No.1-111、平成31年3月

学会等での表彰

- (1) 「学生論文奨励賞」東京都市大学、令和4年2月
- (2) 「林俊一賞」日本マリンエンジニアリング学会、令和3年3月