

平成21年5月8日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560191

研究課題名（和文）電界による燃焼火炎から排出される粒子状物質の抑制メカニズムの解析に関する研究

研究課題名（英文）Research of suppression mechanism of particulate matter generated from a flame by applying electric field

研究代表者

斉藤 正浩（SAITO MASAHIRO）

群馬大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：50170527

研究成果の概要： 燃焼火炎に電界を直接印加することで、火炎から生成されるPMを燃焼段階で抑制する研究を実施した。その結果、電界印加で発生するイオン風により燃料と周囲空気の混合が促進され、電界強度が150 kV/m以上で電界無印加時のPM生成量を90%抑制することができた。また、PMの粒径分布測定により、印加電圧の増加とともに粒径30～500nmの粒子数が大幅に減少し、逆に印加電圧が10kV以上では10～20nmの粒子数が増加することがわかった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：火炎，粒子状物質，電界，燃焼

1. 研究開始当初の背景

燃焼装置やディーゼル機関から排出される粒子状物質(PM)に対する規制が強化され、100nm以下の超微粒子は肺胞内に蓄積するといわれ喘息、気管支炎、肺ガンなどを引き起こす疑いがあることが指摘されている。近年、電界やプラズマなどの放電現象を利用した燃焼改善やPM除去に関する研究が国内外において多く報告されている。しかし、従来の研究は排出されたPMを処理する

後処理技術がほとんどである。また、電界が数100 μ m以下のナノPMやその構成成分に及ぼす影響などを調べた研究はほとんどないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、燃焼火炎から生成されるPMを燃焼段階で抑制するために、電界を燃焼火炎に直接印加する方法を採用した。PM除去特性

に及ぼす印加電圧、電極間距離、極性、電界強度などの影響を定量的に調べ、さらに、PMの粒径分布や構成成分、火炎の温度分布を測定することで、電界によるPM抑制のメカニズムを解析することを目的とする。

3. 研究の方法

実験装置の概略を図1に示す。燃料にはアセチレンを使用し、フローメーターで流量を調整した。ノズル電極（外径2.2mm、内径1.6mmのステンレス管）から燃料を噴出させて層流拡散火炎を形成して火炎からPMを発生させた。本研究ではアセチレンの流量を $Q_f=30\text{mL/min}$ （PM生成量 $M_{s0}=6.55\text{mg/min}$ ）一定の条件で実験を行った。一方、アース電極には真鍮製リング（外径76mm、内径52mm）を用いた。ノズル先端より形成される層流拡散火炎を外乱から防ぐために、周囲を石英ガラス板で囲った。ノズル電極に直流高電圧供給装置を用いて、 $E=0\sim\pm 15\text{kV}$ を印加した。電極間高さは $h=0, 25, 50, 100\text{mm}$ と変化させた。

4. 研究成果

(1) 火炎挙動に及ぼす電界の影響

燃焼火炎の挙動をデジタルカメラ、Nikon-D80で撮影した。電極間高さ $h=50\text{mm}$ の場合における火炎挙動の変化を図2に示す。(a)はノズル電極に正電圧、(b)は負電圧を印加した場合である。ノズル電極に正電圧を印加した場合、印加電圧が $E=3\text{kV}$ までは火炎形状の変化はみられないが、 $E=4\text{kV}$ 以上になると火炎先端部が広がり始める。印加電圧の増加に伴い火炎先端部はさらに広がり火炎長さは短くなる。そして、 $E=10\text{kV}$ 以上になると火炎先端部において火炎に尖状の部分が現れた。正電圧を印加した場合、PMの発生は火炎先端部からであり、印加電圧が高くなるにしたがってPM排出量が少なくなる様子が目視で観察された。このように、ノズル電極に正電圧を印加した場合は、コロナ放電により火炎内の正イオンがノズル電極から対極に向かって移動するので、火炎が加速されて周囲

空気を巻き込み燃料との混合・燃焼を促進す

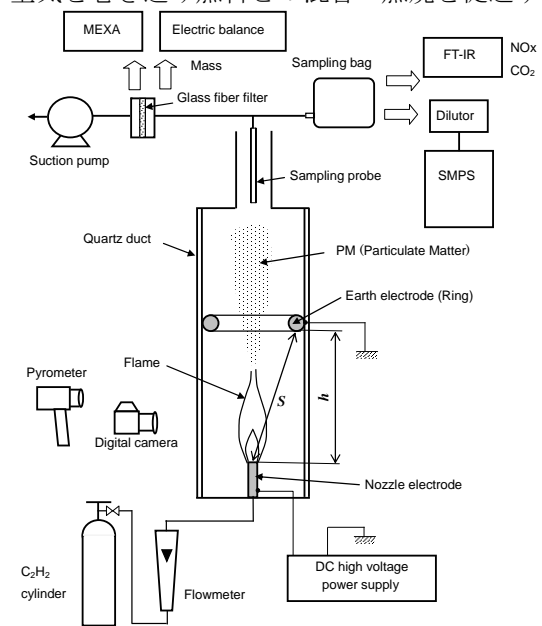


図1 実験装置

るものと考えられる。

一方、ノズル電極に負電圧を印加した場合は、 $E=-3\text{kV}$ までは正電圧を印加した場合と同様、火炎形状に大きな変化はなかったが、写真からわかるように負電圧を印加するとPMの凝集塊が火炎基部（ノズル先端）に付着・堆積していくのが観察された。印加電圧が $E=5\text{kV}$ 以上になるとノズル先端へのPMの付着・堆積が急速になり、ノズル閉塞による消炎やスパーク放電を引き起こすようになった。ノズル電極に凝集PM塊が堆積する理由として、ノズル電極に負電圧を印加した場合には、イオン風の向きが正電圧の場合と逆になり、正イオンがノズル電極側に引き寄せられる。したがって、火炎内で生成したPMが凝集しながらノズル電極先端に向かって逆流し堆積したと考えられる。このことから、以後はノズル電極に正電圧を印加した場合について述べることにする。

(2) PM排出量に及ぼす電界の影響

火炎から生成されるPMの生成量は、ガラス繊維フィルタを装着したPM捕集装置を用い、精度 0.01mg の電子天秤で計測した。

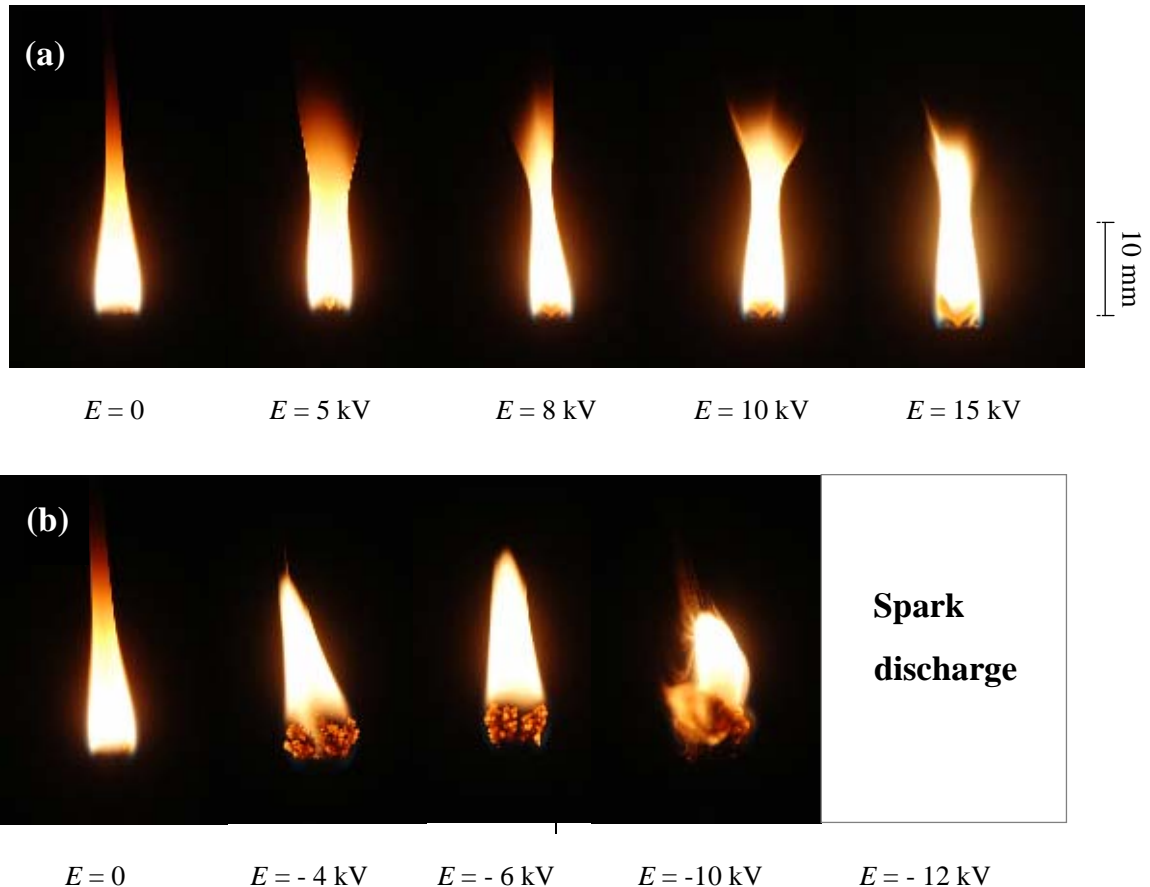


図2 印加電圧による火炎挙動の変化 (a) 正電圧印加, (b) 負電圧印加

ノズルに正電圧を印加した場合のPM排出量に及ぼす印加電圧、電極間高さの影響を図3に示す。縦軸は電圧印加時に排出されるPMの質量 M_s を電圧無印加時のPM質量 M_{s0} で無次元化した値である。図より、印加電圧の上昇とともにPMの生成量が急激に減少する。また、同一の印加電圧では電極間高さ h が大きくなるほどPMの生成量が多くなることわかる。

次に、図3の結果を横軸に電界強度として整理したものを図4に示す。電界強度 F は次式のように定義した。

$$F = E/S \quad [\text{kV/m}]$$

ここで、 E は印加電圧、 S はノズル先端からリング電極までの直線距離である。図から、PM排出量は電界強度で良く相関され、正電圧印加の場合、電界強度が増加するにつれてPM

生成量は急激に減少し、電界強度が $F = 150 \text{ kV/m}$ 以上では90%以上のPM抑制効果が達成されることがわかった。

(3) 火炎温度に及ぼす電界の影響

電界印加による火炎温度の変化を非接触かつスポット測定が可能な高温放射温度計(LAND Instruments International, CYCLOPS-100)で測定した。一例として、電極間高さ $h=50\text{mm}$ の場合における印加電圧と火炎軸方向の火炎表面温度を図5に示す。横軸は火炎長さ L_f 、縦軸は火炎表面温度 T_f である。電圧無印加時($E=0$)では火炎長さは $L_f=32\text{mm}$ であり火炎の基部(ノズル先端から4mm付近)で火炎表面温度が $T_f=1250^\circ\text{C}$ でピーク値となり、火炎先端へいくにしたがって火炎温度は低くなり先端部では $T_f=600^\circ\text{C}$ であった。これに対して、印加電圧を増すと火炎長さは短くなり、 $E=15\text{kV}$ では火炎基部で $T_f=1300^\circ\text{C}$ 、

火炎先端部でも $T_f = 850^\circ\text{C}$ と電界無印加に比べて火炎全体にわたって温度上昇がみられた。このように、電界印加によるPM生成量の減少は、発生したイオン風によって火炎への空気導入量が増加し燃料と空気の混合が促進されて火炎温度が上昇し、PMの酸化が行われるためと考えられる。

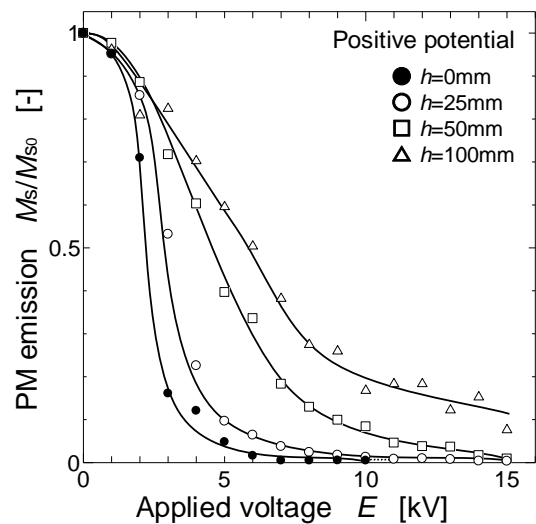
(4) PM 構成成分に及ぼす電界の影響

火炎から排出される PM をサンプリングバッグで捕集し、微量 PM 分析装置で測定を行った。電極間高さ $h=25\text{mm}$ の場合における PM 中の構成成分として Dry soot, SOF (Soluble Organic Fraction) の割合と印加電圧 E の関係をそれぞれ図6に示す。印加電圧を増加するにつれて Dry soot の割合が SOF に対して少なくなった。Dry soot の割合は $E = 7\text{kV}$ 以上の範囲で急激に低下し、 $E = 15\text{kV}$ では電界無印加時(93%)と比べて15%程度まで低下した。

次に、PM の各構成成分の生成量と電界強度 F の関係を図7に示す。図中の Total PM は Dry soot と SOF の和である。図より、電界強度が $F = 50\text{kV/m}$ 以上で Dry soot の生成量が顕著に減少し、電界無印加($F = 0\text{ kV/m}$)のとき、Dry soot は約 0.11mg/s であるのに対して、 $F = 150\text{ kV/m}$ 以上では約 0.01mg/s へと減少していることがわかる。一方、SOFは $F = 0\text{ kV/m}$ のとき 0.007mg/s から $F = 150\text{ kV/m}$ で 0.001mg/s へと減少した。しかし、Dry soot および SOF の減少量を絶対量で比較すると、Dry soot の減少量は SOF の減少量に比べて1桁大きいことから、電界印加は Dry soot に対する影響が強いと考えられる。

(5) PM粒度分布に及ぼす電界の影響

走査型移動度粒径測定装置 (SMPS) を用いて、電界印加による PM 粒径分布への影響を調べた。電極間高さ $h = 25, 50\text{mm}$ の場合における PM の粒径分布を SMPS で測定した結果をそれぞれ図8, 図9に示す。横軸は粒径、縦軸は単位体積当たりの粒子個数濃度を表す。図より、電界無印加では粒径 $d_p = 80 \sim 90\text{nm}$ 付近にピークを持つ分布となり、 $50 \sim 500\text{nm}$ の粒子数が多いことがわかる。これに対して、電界を印加した場



合は、PM の粒子数が電界無印加に比べて相対的に減少した。また、印加電圧の増加に伴って粒

図3 PM 排出量に及ぼす印加電圧の影響

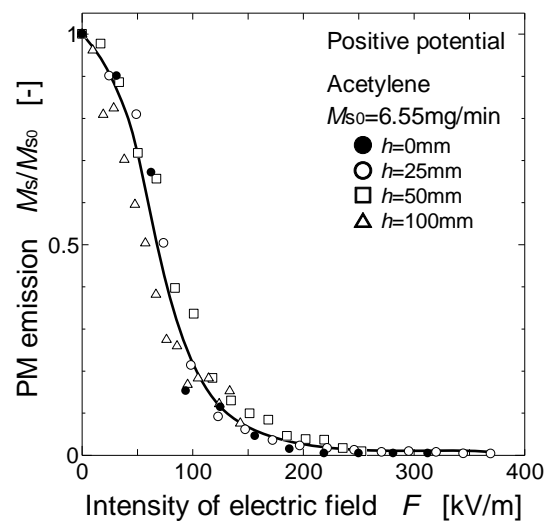


図4 PM 排出量と電界強度の関係

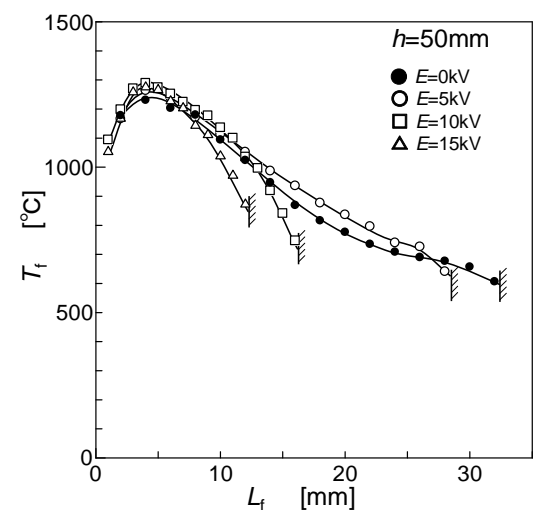


図5 印加電圧による火炎表面温度の変化

径30~500nmの粒子数が大幅に減少したのに対

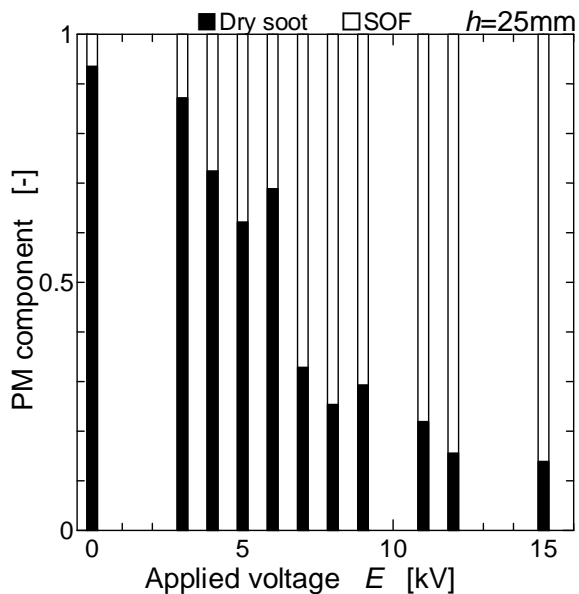


図6 印加電圧によるPM成分割合の変化

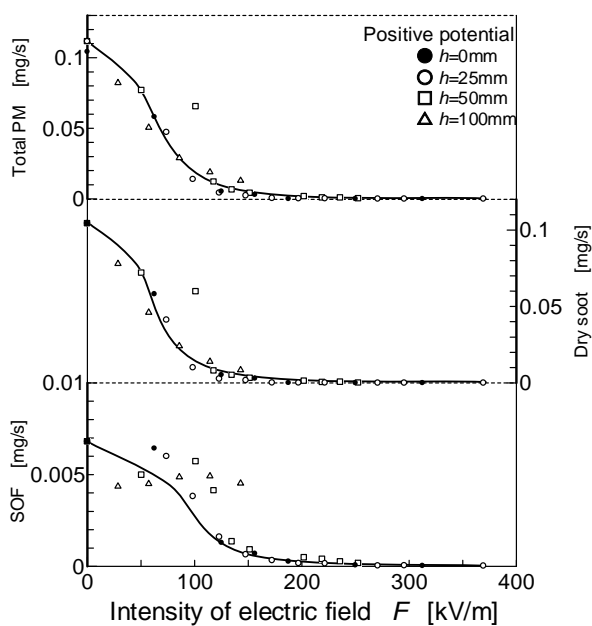


図7 電界強度に対する各PM成分量の変化

して、 $E=10\text{kV}$ 以上になると粒径 $10\sim 20\text{nm}$ の粒子数が増加する傾向を示した。これは、ノズル電極に電界を印加することでイオン風が生じ、燃料と周囲空気の混合が促進されて火炎先端部での燃焼が活性化し火炎温度が上昇する。その結果、火炎内で生成したPMの前駆物質が火炎後流に移動する際に凝集せずにそのまま火炎外へ排出されたためと考え

られる。

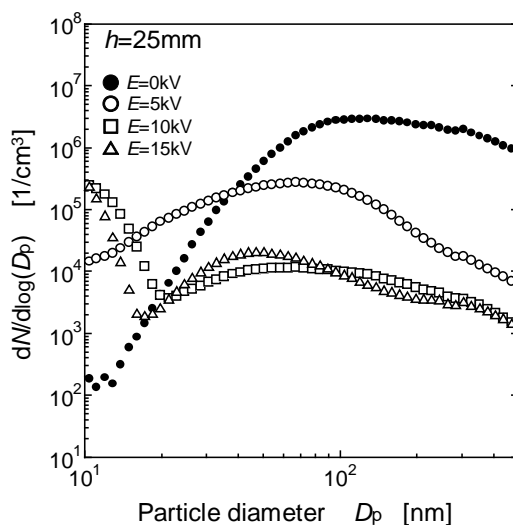


図8 印加電圧によるPM粒度分布の変化 ($h=25\text{mm}$)

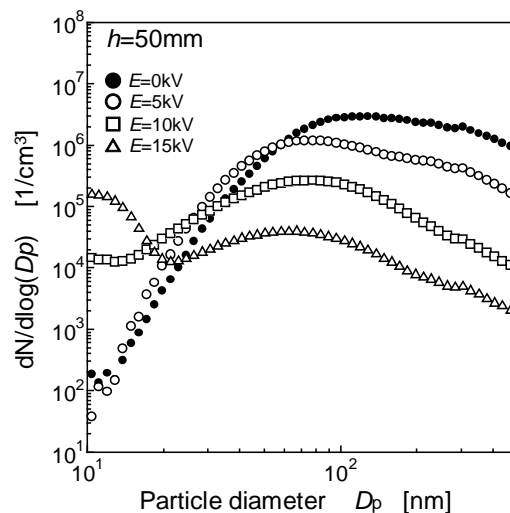


図9 印加電圧によるPM粒度分布の変化 ($h=50\text{mm}$)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計1件)

- ① 川田智也, 拡散火炎より排出されるPMに及ぼす電界印加の影響, 第46回燃焼シンポジウム, 2008. 12. 3, 京都

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊藤 正浩 (SAITO MASAHIRO)

群馬大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号 : 50170527