

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21560201

研究課題名（和文） マイクロ波加熱による火炎中のすす粒子低減技術の検討

研究課題名（英文） A Study on Reduction of Soot Particle in a Flame by Microwave Heating

研究代表者

津江 光洋（TSUE MITSUHIRO）

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：50227360

研究成果の概要（和文）： マイクロ波を火炎に照射することにより、火炎中のすす濃度を低減させることを試みた。レーザー計測手法を用いて、火炎中のすす濃度分布およびすす粒子径を計測し、種々の火炎においてすす生成過程に及ぼすマイクロ波照射の影響を調べた。その結果、マイクロ波を照射させることで火炎中のすす濃度が最大約 20%低減する傾向が観察された。一方、すす粒子径にはほとんど変化が見られなかった。

研究成果の概要（英文）： The reduction of soot concentration in flames is tried by the irradiation of microwave. The soot volume concentration and the diameter of soot particles in the flame are measured by the laser diagnostics, and the effects of irradiation of microwave on the soot formation process are discussed. As results, it is observed that the about 20% reduction of soot volume concentration in maximum is occurred. On the other hand, the diameter of soot particle is little affected by the irradiation of microwave.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
2010 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：燃焼・マイクロ波・すす粒子，レーザー誘起赤熱法

## 1. 研究開始当初の背景

ディーゼルエンジンはあらゆる熱機関のうちでも優れた高い燃料経済性を持っており、省エネルギーや地球温暖化抑制の立場から注目されている。しかし現状では微粒子状物質（PM）のすすや窒素酸化物（NOx）の排出が多いという問題点を抱えている。ディーゼル機関の低PM排出化という社会の要請に答えるものとして、現在では、空気と燃料との混合制御、燃焼温度の制御、触媒シス

テムやディーゼル燃料の改質・転換等の研究が行なわれている。しかしながら、更なるすすの排出抑制を実現するためには燃焼過程における発生を抑制することが必要となるものと思われる。戸野倉らは層流予混合エチレン火炎にマイクロ波を照射し、すす粒子総体積を減少させることに成功しており、将来のすす抑制技術への展開が期待されており、これをディーゼル燃焼に適用することを試みることにした。

## 2. 研究の目的

マイクロ波照射が火炎に及ぼす影響については、これまでは主にマイクロ波の照射によって炭化水素の火炎速度が増大するかという点に関して様々な研究が行われてきた。このような研究は数十年にわたって行われている。しかしながら、様々な研究者による研究にも関わらず、未だ決定的な結論は出ていないといえる。

本研究では、このような将来のすす抑制技術の検証を行うために、エチレンの拡散火炎にマイクロ波を照射し、火炎へのマイクロ波照射がすす濃度分布にどのような影響を及ぼすかを2次元的に調べることを目的としている。

## 3. 研究の方法

### 3.1 マルチモードマイクロ波発生装置

マイクロ波反応装置として四国計測工業株式会社のSMW-098を用いた。装置の概略を図1に示す。外形寸法は430×459×1340 (W×D×H) mm、マイクロ波照射領域寸法は320×315×220 (W×D×H) mmの箱型となっている。また、本装置の材質はSUS304である。仕様は単相AC100V、消費電力は最大で1.4kWとなっており、発振出力はマグネトロンマイクロ波出力で770Wとなっている。この発振出力はコントロールボックス上において700Wを100%として、1%刻みで調整可能である。すなわち、0%(0W)から110%(770W)まで調整できる。

また、マイクロ波反応装置の上面、右側面、左側面及び下面には電波シールドがそれぞれ3本、1本、2本、1本設けられており、それぞれのシールドパイプを通してノズルを挿入したり、光学的計測、観測を行うことが可能である。

マルチモードは、キャビティ内でマイクロ波を乱反射させることで全領域に均一に照射している。また、この装置はシングルモードの装置に比べて最大出力が大きいことが利点である。

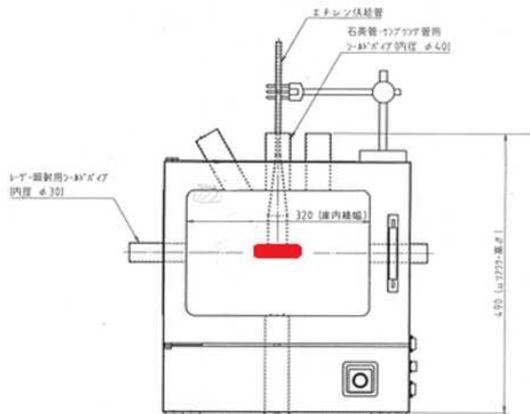


図1 マルチモードマイクロ波発生装置

マルチモードでは、負荷が小さいとマイクロ波が発振されない。そのため、キャビティ内の負荷を上げることと、マイクロ波を火炎の近くに集中させる目的で、本実験では市販の焼成キットを流用し、サセプターを作製、使用した。その概略を図2に示す。焼成キットは、外径Φ170×高さ87mm、内径Φ110×45mmであり、上面に穴を開けている。また、カメラでのモニター用に側面にもスリットを入れている。そして、内部にマイクロ波高吸収の部材であるSiCを塗布している。マイクロ波高吸収体(ここではSiC塗布部分)を火炎の近くに置くことで、マイクロ波をできるだけ火炎の近くに集中させることを狙っているが、実際にどれだけマイクロ波を集中できるかは不明である。

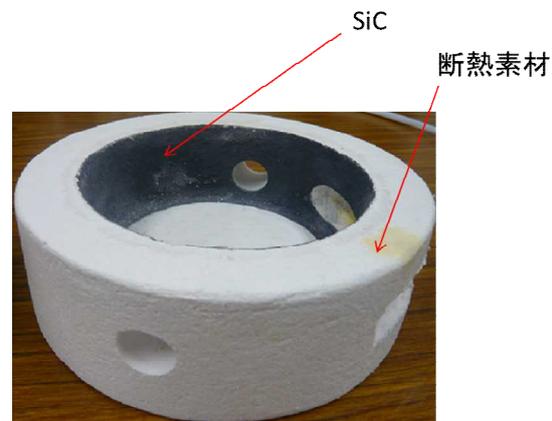


図2 サセプター

### 3.2 LII法

レーザ光をすす粒子(粒径 $d_p$ )に照射すると、すす粒子は瞬時に蒸発温度付近まで熱せられる。この時すすが放射するLII強度 $SL_{II}$ は、すす粒子温度が最大( $dT/dt=0$ )となる時、Meltonにより

$$S_{LII} \propto N_p d_p^x \quad (1)$$

$$x = 3 + \frac{154}{\lambda_{em}} \quad (2)$$

が導かれている。ここで $N_p$ はすすの一次粒子数密度、 $\lambda_{em}$ は検出波長である。一方で、すす粒子体積濃度は、

$$f_v = \frac{1}{6} \pi N_d d_p^3 \quad (3)$$

と表される。つまり、(2)式で検出波長を410nmとしたとき $x=3.38$ となり $SL_{II}$ はおおよそすす粒子体積濃度 $f_v$ に比例することになる。本実験では、この式より近似的に $SL_{II}$ はすす粒子体積濃度に比例するとして解析を行っている。

### 3.3. 二色法

二色法は二つの波長の光を計測することで温度を求める方法である。λ<sub>1</sub>, λ<sub>2</sub> に対して計測を行う時、温度 T<sub>p</sub> は

$$T_p = \frac{hc}{k} \frac{\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)}{\ln\left(\frac{LII_S(\lambda_1)^N(\lambda_2)\lambda_1^6}{LII_S(\lambda_2)^N(\lambda_1)\lambda_2^6}\right)} \quad (4)$$

によって得られる。

### 3.3 実験装置概要

図3に実験装置の概略図を示す。マイクロ波照射装置内に後述の各種バーナーを設置し、拡散火炎を形成させた。532nm ND3+:YAG レーザをシリンドリカルレンズによりシート状にして計測対象に入射させる。レーザーシートは高さ20mm 幅0.5mm で強度は0.5J/cm<sup>2</sup>とし、中心部分の10mmのみを観察に用いた。LII信号は532nmバンドストップフィルタと410nm(FWHM10nm)の干渉フィルタを通してICCDカメラにて検出した。ICCDカメラのゲートタイミングはレーザー発振後20ns後、ゲート時間は50nsとした。

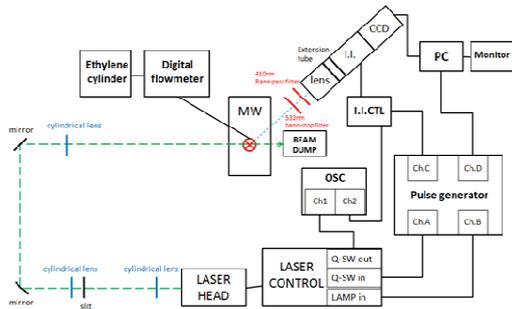


図3 実験装置概要

### 3.4 火炎



図4 火炎A

図5 火炎B

実験では、以下の2種類の拡散火炎を使用した。火炎Aは内径6(or8)mmのノズルを用いてキャビティ下部から生成した拡散火炎である。火炎Bは内径29mmのノズルを用いて生成した火炎であり、上方のノズルからエチレンと窒素の混合燃料を噴出させ、下方の

ノズルから空気を噴出させた対向流火炎である。それぞれの火炎の様子を図4, 5に示す。

### 4. 研究成果

まず、サセプターを設置しない条件において実験を実施した。火炎Aについて、マイクロ波を0, 250, 500, 700Wで照射し、それぞれ10回ずつ撮影した。また、二色法による温度変化の観察も行った。LII信号から求めたすす粒子体積濃度と二色法による温度分布を可視化したものを図6に示す。マイクロ波照射によって発光強度が下がっているとは認められず、またすす粒子温度に有意な影響があるとも認められないことがわかる。

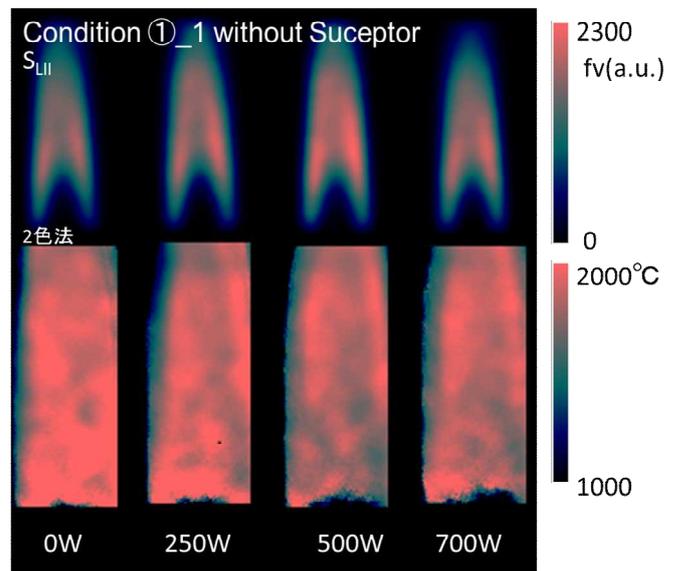


図6 すす体積濃度および温度分布

図7は火炎Bを対象として、上記と同様にサセプターを設置しない条件で実施した結果である。火炎Aの場合と同様に、マイクロ波照射によって発光強度が下がっているとは認められず、またすす粒子温度に有意な影響があるとも認められないことがわかる。

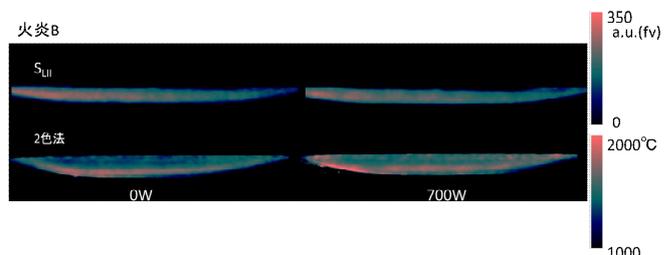


図7 すす体積濃度および温度分布

次に、火炎の周囲にサセプターを設置した実験を行った。図8に示すようにサセプターの内部に対抗流拡散火炎(火炎B)を形成させ、

LII によるすす濃度分布およびすす粒子温度の計測を行った。内径 29mm のノズルを対向させ、上方のノズルからエチレンと窒素の混合気、下方のノズルから空気を噴出させた。各流量を表 1 のように変化させた。

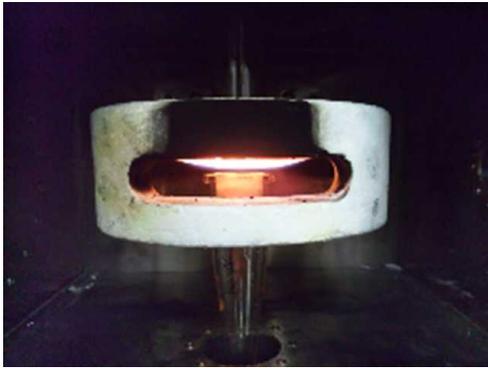


図 8 サセプターを設置した実験概要

表 1 対向流火炎の流量条件

	Flame	Ethylene	N2	Air	Suceptor
③	C	0.6	0.0	2.0	with
④	C	0.6	0.25	2.0	with
⑤	C	0.6	0.5	2.0	with
⑥	C	0.6	0.7	2.0	with
⑦	C	0.8	0.0	2.0	with
⑧	C	1.0	0.0	2.0	with

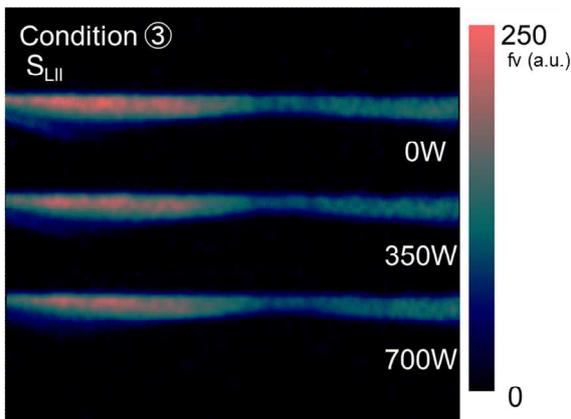


図 9 すず濃度分布 (条件③)

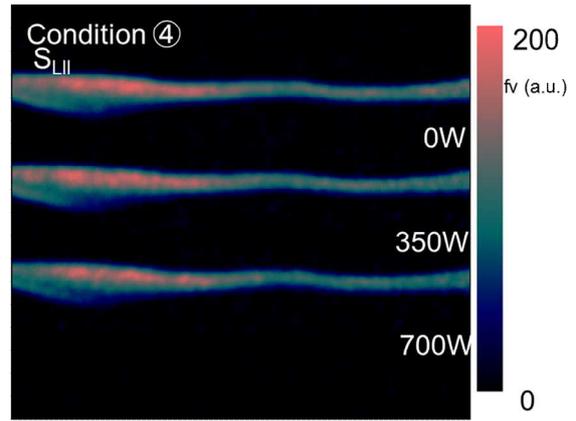


図 1 0 すず濃度分布 (条件④)

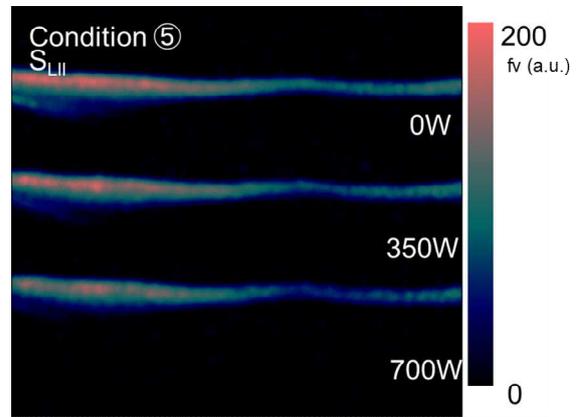


図 1 1 すず濃度分布 (条件⑤)

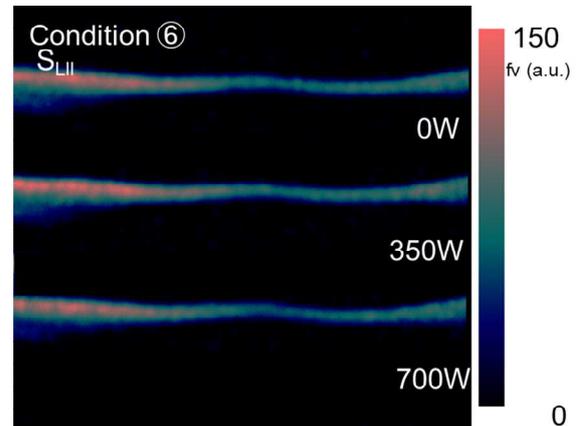


図 1 2 すず濃度分布 (条件⑥)

図 9—1 2 は、表 1 中の条件③から⑥における火炎中のすす濃度分布を可視化した結果である。条件③は上方ノズルからエチレンのみを噴出させたものである。条件④から⑥はエチレンを窒素で希釈した混合気体を噴出させたものであり、窒素の希釈率を変化させている。図からわかるように、マイクロ波を照射すると、火炎中のすす濃度が変化して

いる様子が観察される。マイクロ波照射がすす濃度場に及ぼす影響をさらに明確にするため、LII 信号値を火炎全体で積分した値を火炎中に存在するすす量の指標と考え、その値をマイクロ波が照射しない条件における値で無次元化した結果を図 1 3 および図 1 4 に示す。図 1 3 から、条件③においては、すす体積量がマイクロ波照射により約 20% 程度減少する傾向がみられる一方、図 1

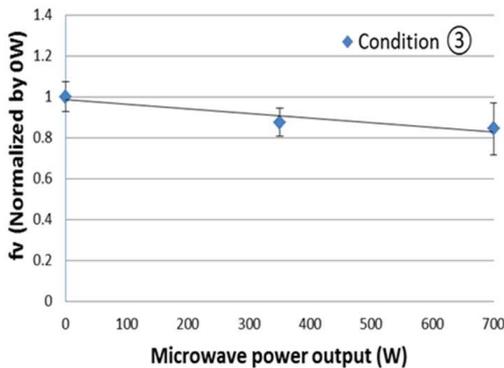


図 1 3 すす体積量の変化

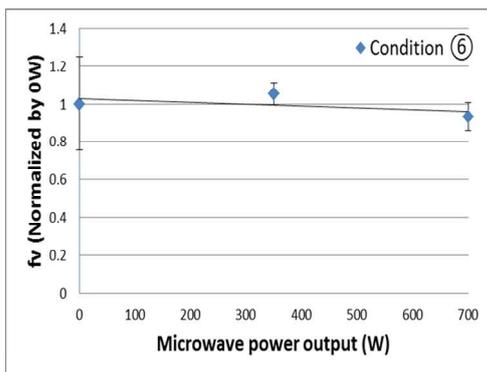


図 1 4 すす体積量の変化

4 の条件⑥では減少傾向がほとんど見られないことがわかる。条件⑥は、エチレン中に窒素を 0.7l/min の流量で希釈しており、希釈をしていない条件③と比較して、火炎中のすす濃度は小さいと考えられる。図 9 と図 1 2 におけるマイクロ波照射なし (0W) のすす濃度分布からも上記傾向を確認できる。このことから、マイクロ波照射によるすす低減効果は、すすが多く存在する火炎において顕著であることが推察される。

図 1 5 は、マイクロ波照射によりすす体積量が減少した条件③におけるすす粒子の粒径分布を示している。図から、マイクロ波照射による粒径分布の明確な変化は見られないことがわかる。すす体積量はすすの数密度とすす粒子径の 3 乗に比例すると考えられるため、条件③におけるすす体積量の減少は

すす粒子径の減少によるものではなく、すす粒子の数密度の減少に起因するものと考えられる。しかしながら、マイクロ波照射が粒子数密度を減少させる要因を現段階では特定することはできなかった。

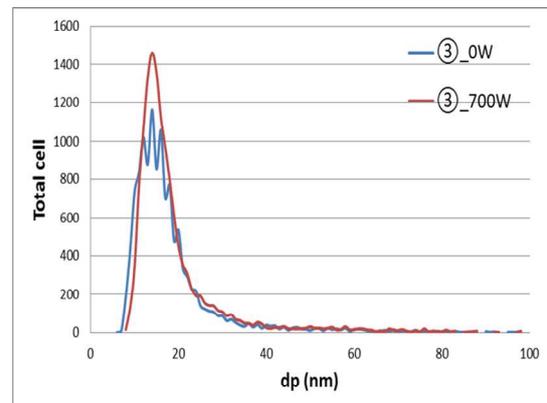


図 1 5 すす粒子の粒径分布

## 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)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 今枝宗矩, 堀内隆史, 津江光洋, 今村幸, 江上雅裕, 河野通方, 2 次元 LII 法を用いたマイクロ波照射が拡散火炎中すす分布に与える影響に関する研究, 第 48 回燃焼シンポジウム, 2010 年 12 月 3 日, 福岡.
- ② 今枝宗矩, 津江光洋, 今村幸, 江上雅裕, L I I 法を用いたマイクロ波照射中の拡散火炎におけるすす体積濃度分布計測, 第 1 9 回日本エネルギー学会大会, 2010 年 8 月 3 日, 東京.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

津江 光洋 (TSUE MITSUHIRO )

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 5 0 2 2 7 3 6 0

(2)研究分担者  
なし

(3)連携研究者  
なし