

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820069

研究課題名(和文)二波長干渉計を利用したマイクロ波プラズマ支援燃焼場の診断に関する研究

研究課題名(英文)A Study on Diagnosis on Microwave Plasma Supported Combustion Field Using Two-Color Interferometer

研究代表者

今村 宰 (IMAMURA, Osamu)

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：50436515

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：総合的なエネルギー効率の向上と環境汚染物質の低減を目的に、マイクロ波が燃焼現象に及ぼす影響について実験的に調べた。マイクロ波放電が燃焼に及ぼす影響を理解する上で重要となると思われる電子分布の計測について、エタノール液滴火炎を用いた検証試験を実施した。二波長干渉計の構築を行い電界印加時において電子分布が高い領域があることを実験的に示した。また対向流拡散火炎にマイクロ波を印加することで輝度分布および発光に変化があることを実験的に示した。これらはマイクロ波によってすす粒子が選択的に加熱されていることを示唆している。また分光計測の結果からマイクロ波放電時の加熱過程について考察を行った。

研究成果の概要(英文)：Effect of microwave on combustion is studied experimentally. Since information of electron density distribution is expected to be important for effect of microwave discharge on combustion, verification test for electron density measurement using fuel droplet combustion in direct current electric field. The separation method of fringe images with two wavelengths was developed and the separation images were analyzed. Qualitative information of electron density distribution was successfully analyzed. Secondly, the experiment of counter flow diffusion flame was carried out in microwave. Methane-Air diffusion flame was observed directly and through interference filters and the flame position did not change regardless of microwave application in the observation. The flame intensity of luminous flame increased with microwave application though that of blue flame had no change with it. These results indicate only soot temperature increases with the microwave application.

研究分野：熱工学

キーワード：燃焼 マイクロ波 干渉計 電子 対向流拡散火炎

1. 研究開始当初の背景

昨今の環境問題に対する諸策とし、エネルギー変換の過程の改善、特に燃焼反応を含むシステムにおける効率の向上や環境適合性への対応が必須となっている。これに対する要素技術の一つとしてマイクロ波を用いることを検討した。電磁場を燃焼反応に適用するという意図であるが、まずは点火を行う際に放電が生じた際にイオンや電子が生成していること、さらに燃焼反応にはイオン反応が含まれており、火炎にイオンや電子が含まれていることは、そしてすす粒子も一般には帯電していることなどから、電磁波を燃焼反応に適用させることで、いわゆる燃焼の改善が期待できる可能性があると考えた。また多くの場合、熱機関は発電機を備えているので、発電機によって生じた電気エネルギーを燃焼の制御に用いることによって、全体としての効率改善や環境適合性の向上に繋がる可能性があると思われ。

本研究の具体的な対象であるが、本研究の範囲内においては実際の熱機関内を用いたプラズマ支援燃焼の挙動確認は行わず、燃焼の基礎研究として多く行われている対向流拡散火炎を基本的な対象と、マイクロ波が燃焼現象に及ぼす影響について調べるものである。それに際して、電子分布を見積もるにあたって二波長干渉計を用いて計測することを試みるものである。これらを通してマイクロ波が燃焼現象に与える影響について考察を行う。

2. 研究の目的

上述のとおり本研究はマイクロ波が燃焼現象に与える影響について基礎的な知見から、調査、検討したものである。本研究の目的は主として以下の2点である。

(1) 電子分布の計測手法として二波長干渉計を構築し、電子分布の計測の可能性について検討、評価した。

(2) 対向流拡散火炎にマイクロ波を印加可能な実験装置を構築し、マイクロ波が対向流拡散火炎に及ぼす影響について検討、評価した。

またこれらの実験結果から、マイクロ波が燃焼現象に及ぼす影響について考察を行った。

3. 研究の方法

(1) 電子分布計測に関する検討

ここでは二波長の干渉計を用いて電子の分布を計測することを目的としている。これは屈折率と密度の関数として表した場合、ガス種毎の異なる比例定数(グラッドストーン・デール定数)が波長に依存することを利用するものである。表1にグラッドストーン・デール定数(GD定数)の各ガス種における波長依存性を示す。多くのガス種においては波長依存性は認められるものの、ここで示す波長域においては3%程度である。それに対

して電子は符号が異なり、またその波長による変化も200%程度である。そのため多くの電子が存在していれば、二波長で干渉画像を観察した際に僅かな差異が生じることが予想され、ここではこの現象を燃焼場において観察、確認することとした。実験装置(燃焼部)の概要を図1に示す。ここでは過去の行った液滴燃焼火炎を対象としており、燃料はエタノールである。エタノール液滴は大気圧ではほとんどすすを生じないため光学計測への影響が小さいものと想定されるために選択した。なお液滴は直径125 μm の石英線にて支持されている。液滴火炎の上下に平行に金網状の電極が設置されており、この金網に直流電圧を印加することで鉛直電界中における燃焼実験を行う。金網(電極)間隔は50mmであり、電圧の印加については、鉛直下側の電極を設置し、鉛直上側の電極に-6kVから+6kVの電圧を印加して実験を行った。なお液滴を懸垂している石英線は不導体であるため、仮に燃焼によって電子が生成したとしても、その電子が石英線を通して電界外部へと移動することはない。通常ガス火炎を用いると金属製のバーナー端から電子の流入が想定されるが、本報ではその効果は考えなくよい。

表1 GD定数の波長依存性

Gas Species	635nm	415nm
C ₂ H ₅ OH	19.10	19.60
N ₂	6.68	6.80
O ₂	6.05	6.20
Ar	6.29	6.41
CO ₂	9.96	10.18
H ₂ O	5.62	5.78
Electron	-108.39	-46.29

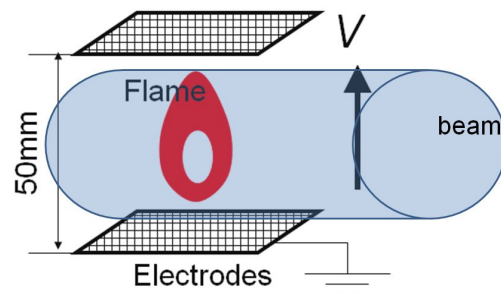


図1 電子分布計測の実験装置模式図

本報においてはこの燃焼装置を観測部とするようにマッハツェンダー干渉計を構築した。概要を図2に示す。光路は電気力線と懸垂線に垂直に液滴の中心を光路軸の中心となるように設定した。ビーム径はおよそ25mm程度であり、青炎の外部の領域も含めて観察することが可能である。光源として波長が415nmおよび635nmの可視半導体レーザー(シグマ光機社製)を用いている。ビームスプリッターによって異なる波長のレーザーを同じ光軸に揃え、干渉画像を構築している。

観測にはカラーCCDカメラ(SK-N63SCJ, シグマ光機)を用いて,二波長の画像を同時に一台のカメラにて撮影している。

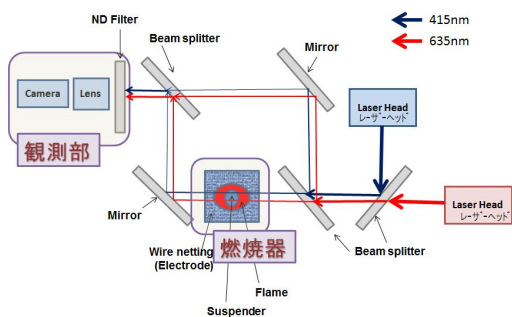


図2 二波長干渉計の概要図

(2) 対向流拡散火炎に及ぼすマイクロ波の影響

対向流拡散火炎にマイクロ波を印加して対向流拡散火炎に及ぼすマイクロ波の影響について検討した。実験装置の概要を図3に示す。本報においては断面は27mm×96mmの断面を有する導波管を用いて,その内部にマイクロ波を定在波として発生させる。この定在波の腹の部分に,図3に示すように燃料ガスおよび酸化剤ガスを供給して対向流拡散火炎を生じさせることができるようになっている。これによって,青炎および輝炎におよぼすマイクロ波の影響について,検討できるようになっている。このマイクロ波の導波管の規格から酸化剤側,燃料側のバーナー端の距離は27mmであり,各ガス出口は30mmとなっている。燃料および酸化剤流量についてはマスフローコントローラーにて制御可能である。本実験においては燃料としてメタン,酸化剤として空気を用いている。マイクロ波の印加装置であるが,マイクロ波の周波数は2.45GHzであり,出力は最大で200Wとなっている。なお,この出力条件下ではマイクロ波放電が生じなかったため,マイクロ波放電を生じさせる際には導波管内に活性コークスを挿入しマイクロ波放電を発生させた。計測にはカラーCCDカメラ(SK-N63SCJ-c,シグマ光機)による撮影の他,分光器(Steller net社製,EPP2000-UVN-SR-25)による分光計測を行った。

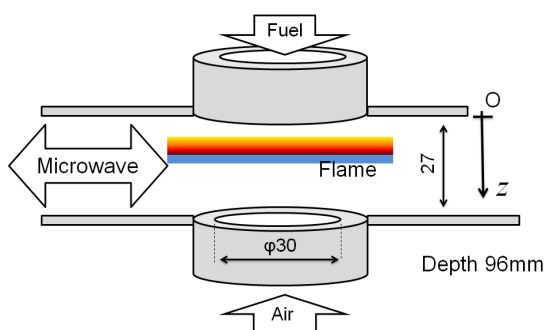


図3 対向流拡散火炎バーナーの概要図

4. 研究成果

(1) 電子分布計測に関する検討

干渉画像を解析に先立って,その原理について概観しておく。一般に屈折率は数密度の関数であり,ガス種および波長が決まれば,

$$n = 1 + K \quad (1)$$

のように屈折率 n は表すことができる。ここで K はグラッドストーン定数と呼ばれる。光学厚みを L とすると,光路長は nL と記載できるから,光路長の差 $K \cdot L$ が波長の正整数 N 倍のとき,すなわち

$$K \cdot L = N \quad (2)$$

のときに干渉縞が観察できる。すなわち干渉画像から K および L を適切に見積もってやれば,密度変化を算出できることを示している。グラッドストーン定数のガス種,波長の依存性についてはすでに表1に示した。(2)式において,仮にグラッドストーン定数の波長依存性がないとすると左辺はある計測点については,異なる波長における干渉画像にあっても一定であるから,右辺も等しくなるはずである。すなわち具体的な波長を代入すると,

$$N_{(635\text{nm})} \times 635\text{nm} = N_{(415\text{nm})} \times 415\text{nm} \quad (3)$$

仮に(3)式の左辺と右辺が異なるということになる。(3)式の左辺から右辺を引いた値は,表1から特に電子密度が大きい場合には負の値となるものと予測される。これから(3)式の左辺から右辺を引いた値(以下では N として示している)が負となる領域が,電子密度が大きい領域であると二波長の干渉画像を比較することで想定することが可能である。

図4には火炎の様子を示している。このように電界の印加によって,火炎は下方方向に引かれるように変形している。とくに図において負の電圧を印加した場合に火炎が下方方向に変形するのは電子に起因するところが大きいと予想されたため, $V=-4\text{kV}$ を印加し火炎の下方について詳細に調べた。図5には本報で得られた干渉画像の様子を示す。設備構成上,単一のカメラにて観察しているが,得られた画像のRGB値を調整することで,図5に示されるように415nm(青),635nm(赤)の各波長に対応する干渉画像を得ることが可能であった。図5のような干渉画像の燃焼前後の縞の移動本数について検討するため,縞の空間位置を数値化したものが図6である。(図6は青画像の場合である。)この図6に示されているような各波長の干渉画像において燃焼前後の画像の差分を取ることで縞の移動本数について検討した。なお縞の本数の小数点第一位以下は線形補間によって得ている。各点における縞の本数は(3)式に示すように,グラッドストーン定数の波長依存性を認めなければ,移動本数に波長を乗じたものがたとえ波長が異なっていたとしても同じになるはずである。このような観

点から、(3)式の左辺と右辺との差を N と定義して、その空間分布をグラフ化したものが図7である。横軸は図5における観測部の中心をとり、水平右方向への距離である。すなわち液滴付近から右方向の様子が示されていることになる。横軸は画像左端からの距離であり、6.5mm 以下のところでは N すなわち式(3)の両辺の差は小さいが、8mm 付近では(3)式の左辺から右辺を引いた値が負となっていることがわかる。干渉縞の計測の精度から考えると、このような N の変化は上記に述べてきたようにグラッドストーンデイル定数の波長依存性に起因するものと思われる。液滴を通る電気力線に対して分布が軸対象であると仮定すれば、電子密度を算出することが可能であり、その結果を合わせて図7に示している。このように二波長干渉計を用いることで電子分布を計測できる可能性があることを実験的な検証から示すことができた。

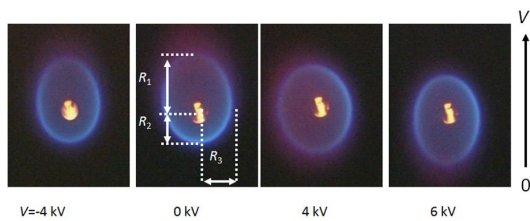


図4 エタノール火炎の変形の様子

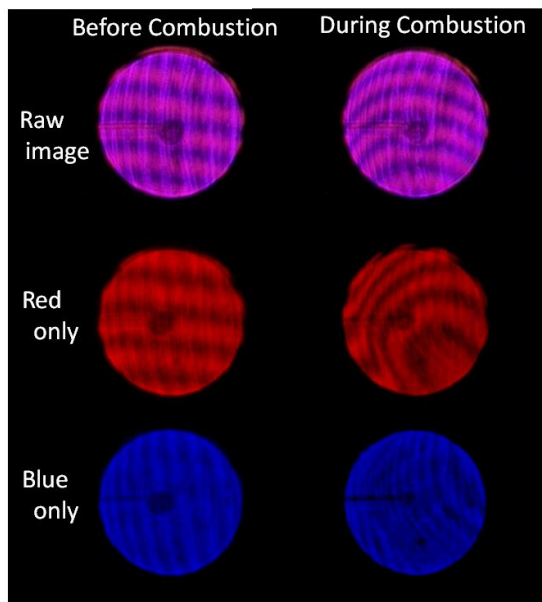


図5 干渉画像と分割した画像

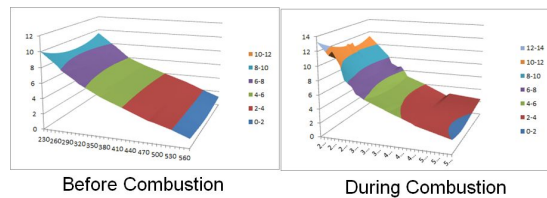


図6 干渉画像より得られた次数分布

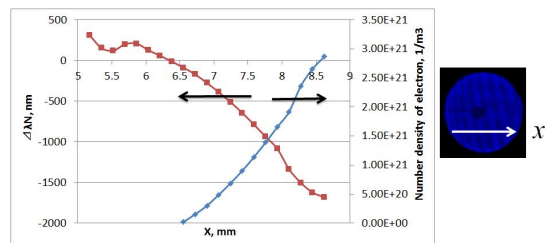


図7 推定される電子密度の分布

(2) 対向流拡散火炎に及ぼすマイクロ波の影響

図3に示される実験装置を用いて得られた研究成果について以下に述べる。図8に典型的な火炎写真を示す。燃料流量、酸化剤流量は各々0.5SLM、5.0SLMであり、カラーCCDカメラにより直接火炎像を観察したものである。マイクロ波出力は120Wでこの条件では放電していない。この図に示すようにマイクロ波の印加による差異は明瞭には観察されなかった。

マイクロ波の印加の影響について調べるため、中心波長が632.8nmおよび420-460nmを透過波長とする干渉フィルターを用いて観察を行った。火炎はバーナーの中心軸に対しておよそ軸対称であるため、中心軸付近のおよそ2mm程度の範囲において輝度を平均化した。このようにして得られて輝度を、上方のバーナー端からの距離の関数として示したものが図9および図10である。なお火炎輝度はマイクロ波を無印加時の最大輝度で無次元化している。図9からマイクロ波の印加によって、632.8nmの干渉フィルターを用いた場合には火炎輝度の上昇が見受けられること、火炎位置は大きく変化していないことがわかる。マイクロ波の影響はみられるものの出力による大きな差異は見受けられなかった。図10には透過波長が420nmから460nmのバンドパスフィルターを用いた場合が示してあり、火炎位置およびその輝度ともほとんど影響を受けていないことがわかる。420nmから460nmのバンドパスフィルターで確認している火炎は、およそ図8の青炎部分に相当するため、青炎はマイクロ波の影響をほとんど受けていないことが想像される。他方で、632.8nmの干渉フィルターを用いた場合に観察している火炎は、およそ図8の輝炎部分に相当するため、輝炎がマイクロ波の影響を受けて輝度上昇していると考えられる。

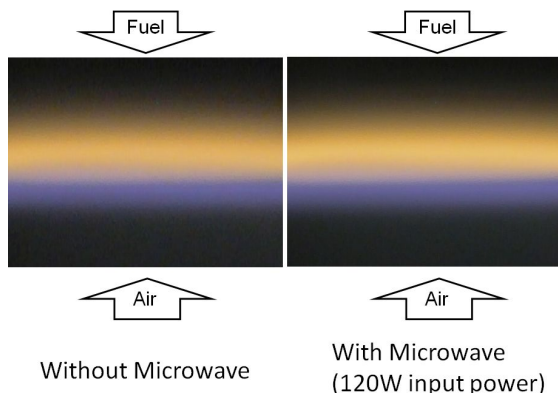


図8 マイクロ波印加における火炎の様子

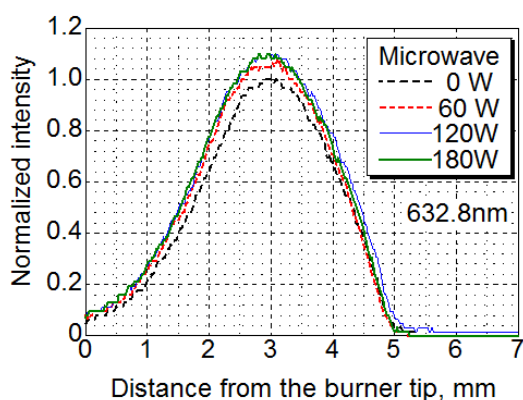


図9 火炎輝度の空間分布

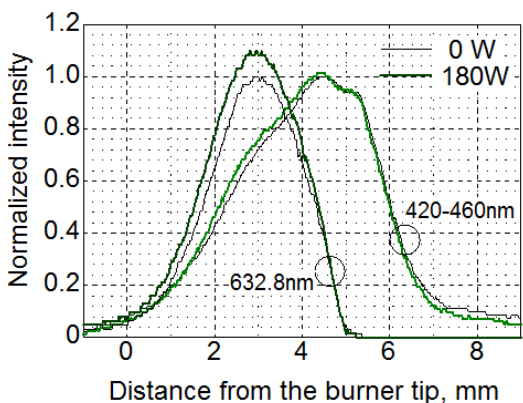


図10 各波長における火炎輝度の分布

この輝度上昇の理由について簡単に考察する。マイクロ波によって影響を受けるものとして、電子、イオン、すすの荷電粒子、極性分子が考えられる。電子等は電場の時間変化に依存して移動するものと考えられるが、本報用いるマイクロ波の周波数(2.45GHz)と電気移動度(すす $\sim 10^{-6}$ m²/sV, イオン $\sim 10^{-3}$ m²/sV, 電子 ~ 100 m²/sV,)からして、電場の変化に完全に追従したとしてもすすおよびイオンの振幅は10nm以下のオーダーとして

見積もられ、平均自由行程よりも短いと見積もられる。他方で、電子の振幅は1 μ m程度であり、空気の平均自由行程よりも十分に長いと想定される。空気に含まれる分子の影響であるが、気体の比誘電率は、空気が1.0006程度、水蒸気でも1.006程度であり、真空の誘電率との差が小さいことから、マイクロ波が吸収されるようなことはほとんど生じていないと考えられる。以上から、青炎に影響を及ぼす因子としては、電子がマイクロ波によって加熱、加速され、それに伴うエネルギー輸送が主として考慮できるが、通常の火炎における電子密度は、中性分子の 10^{-8} 倍程度あり、その数密度の差から電子のエネルギーが注入されたとしても、それが燃焼に影響を及ぼすことは考えづらい。

次に輝炎に及ぼす影響であるが、すす粒子がマイクロ波によって移動し、結果として酸化が促進される可能性がある。しかしながら、上記にて議論したように、すすや分子の振幅は十分に小さく、そのような事象は生じえない。他方ですす自体は固体であるため、1程度の比誘電率を有していると考えられる。以上から、図9で観察されたすすの輝度上昇はマイクロ波によって、すす粒子が選択的に加熱されたために生じた現象であると理解できる。図9から火炎輝度の上昇は、本報にて示したマイクロ波強度においては、最大で10%程度である。すす粒子の濃度が変化していないと仮定すれば、2.5%程度のすす温度が上昇していると想定することができる。以上の考察から火炎にマイクロ波を印加した場合には、すす粒子を選択的に加熱することは可能なものの、電子密度が低いために気相の電子を介してエネルギーの緩和は困難であると推測される。他方で放電が生じている場合には、電子およびイオン密度が上昇するために十分なエネルギーの緩和が可能であると想像される。そのため放電が生じた場合にどのような現象が生じるのか確認するため、活性炭を導入して放電を生じさせて分光観察を行った。その結果550nm付近に特異なスペクトルが確認された。このスペクトルについて精査は必要であるが、O₂+分子のスペクトルに起因しているものではないかと推定している。

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5件)

今村空, 小泉賢人, 福見侑也, 秋濱一弘, 山崎博司, マイクロ波外部印加が対向流拡散火炎の燃焼特性に及ぼす影響, 第52回伝熱伝熱シンポジウム, B215, 福岡国際会議場(福岡, 福岡) 2015年6月4日
今村空, 小泉賢人, 秋濱一弘, 山崎博司, マイクロ波放電が対向流拡散火炎の燃焼

特性に及ぼす影響,第 52 回燃焼シンポジウム, A114,岡山コンベンションセンター(岡山,岡山)2014 年 12 月 3 日

今村宰,小泉賢人,秋濱一弘,山崎博司,マイクロ波中における対向流拡散火炎の燃焼特性,第 23 回日本エネルギー学会大会,講演番号 5-1-2,九州大学 箱崎キャンパス(福岡,福岡)2014 年 7 月 20 日

今村宰,小泉賢人,山崎博司,二波長干渉計を用いた直流電界中における燃料液滴前有の燃焼場の観察,第 51 回伝熱伝熱シンポジウム,アクトシティ浜松コングレスセンター(静岡,浜松)2014 年 5 月 22 日

小泉賢人,今村宰,山崎博司,マイクロ波中における対向流拡散火炎の燃焼特性,熱工学コンファレンス 2013, A144 (講演論文集, pp.35-36), 弘前大学 文京キャンパス(青森,弘前)2013 年 10 月 19 日

〔その他〕

ホームページ等

http://lab.en.cit.nihon-u.ac.jp/o_imamura/index.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

今村 宰 (IMAMURA, Osamu)

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号: 5 0 4 3 6 5 1 5