

二波長干渉計を用いた鉛直直流電界場における燃焼液滴の観察

日大生産工 ○今村 宰 小泉 賢人 山崎 博司

1 まえがき

世界において現状では1次エネルギーのおよそ9割を化石エネルギーが占めており、それらのエネルギー変換は主として燃焼プロセスによって化石エネルギーが熱エネルギーへと変換され、その後に動力エネルギーへと変換されている。環境への影響を考える際には、このエネルギー変換プロセスにおいて、有効利用できないエネルギー量を減少させることが有意である。これにはいわゆる廃熱の低減による総合的なエネルギー効率の向上による排出CO₂の低減という効果の他に、燃焼温度の低減による窒素酸化物の減少というような観点も含められると考えている。しかしながら、これらを達成するための希薄燃焼などにおいては、燃焼が不安定になることも想定される。

著者らの研究フループにおいては、このようなエネルギー変換プロセスにおいてプラズマを有効に使うことをその一手法として想定している。例えば自動車などの内燃機関は発電機を備えているのが通常であるから、電気エネルギーを用いて内燃機関の燃焼の制御を行うことは環境適合技術となりえる可能性がある。特に非平衡プラズマを有効に用いることができれば、電子にだけ選択的にエネルギーを注入してガス温度を上昇させない状況で、高いエネルギーを持った電子によって、ラジカルの生成や連鎖分枝反応などが期待され、安定した化学反応、燃焼反応が生じることが想定される。これは燃焼の安定化にしつつ、廃熱の増加を抑制することができる手法として期待される。

このような技術の確立を目指して、本研究においては燃焼場における電子密度の計測を試みる。実際には放電場などプラズマが火炎と干渉している状態における電子密度の計測

場所を規定するために、直流電界中における液滴燃焼を行い、液滴燃焼周りの電子密度の測定を行ったので、その進捗について以下に述べる。

2 実験方法および測定方法

実験装置（燃焼部）の概要を図1に示す。この図に示されているように、本報では過去の行った液滴燃焼火炎¹⁾を対象とする。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。なお液滴は直径125 μ m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、上川の電極に-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。通常のガス火炎を用いると金属製のバーナー端から電子の流出入が想定されるが、本報ではその効果は考えなくてよい。

図2には本報にて構築した二波長干渉計の概要を示す。この図に示されるように基本的な構成はマッハツェンダー干渉計となっており、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-c, シグマ光機）を持ちいて、二波長の画像を同時に一台のカメラにて撮影している。

Observation of Burning Fuel Droplet in Vertical DC Electric Field
Using Two Color Interferometer
Osamu IMAMURA Kento KOIZUMI and Hiroshi YAMASAKI

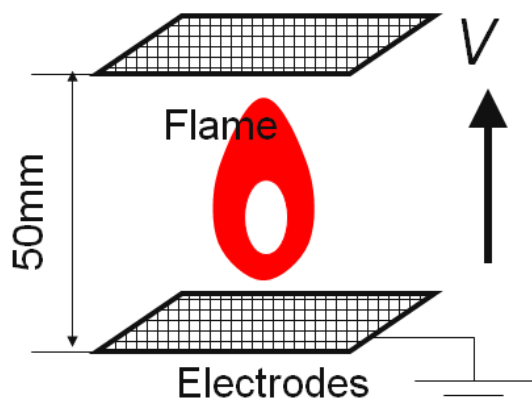


図1 実験装置（燃焼部）の概要図

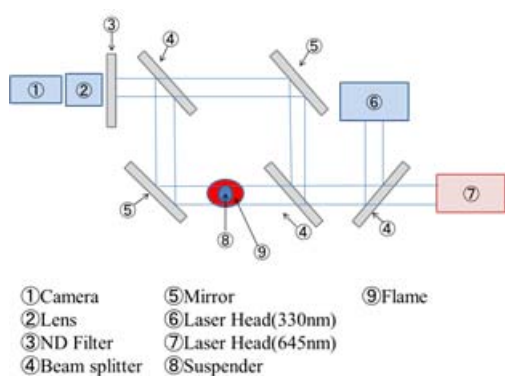


図2 構築した二波長干渉計の概要図

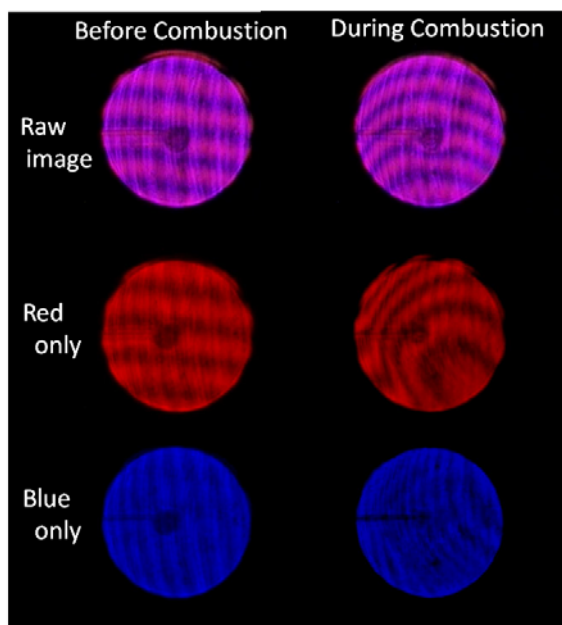


図3 撮影された干渉画像と
信号分離をした干渉画像

表1 グラッドストーン・デイル定数の
波長依存性 (単位 m^3/kg)

Gas Species	635nm	415nm
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	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_2O	5.62	5.78
Electron	-108.39	-46.29

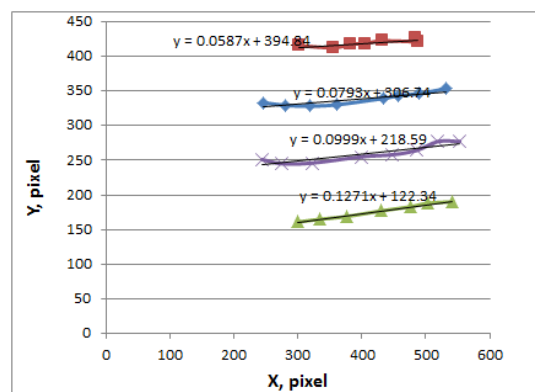


図4 燃焼前画像のR信号からの干渉縞の抽出

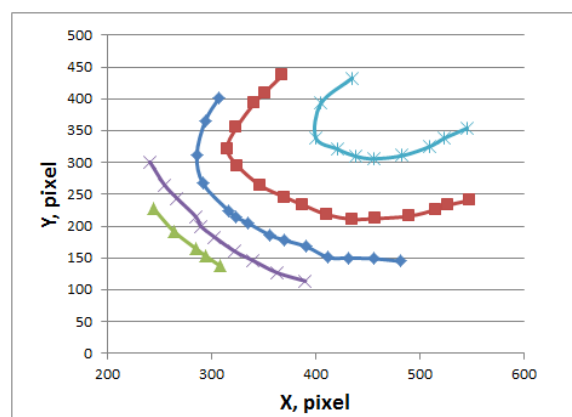


図5 燃焼中画像のR信号からの干渉縞の抽出

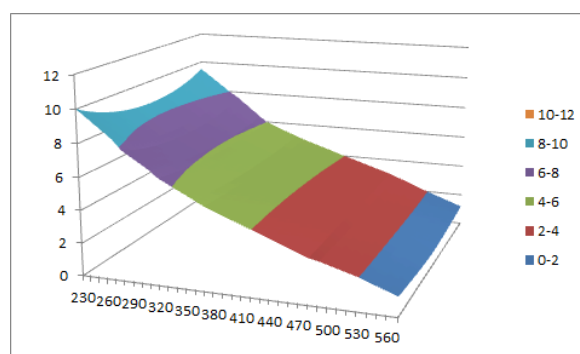


図6 燃焼前画像のB信号より算出した干渉縞
の空間分布

3 実験結果および検討

3-1 画像の撮影と分離

図3は本実験で得られた燃焼前と燃焼後の干渉画像を示している．実験条件は上側の電力に -4 kV の電圧を印加した場合である．まず最上段がカメラで撮影された生の画像データである．双方とも中心部にエタノールの液滴が観察できる．左側の燃焼前の干渉画像に比べて右側の燃焼中の画像では干渉縞が大きく変化していることが観察できるとともに，同心円上の干渉縞となっており，これは火炎の存在によって液滴近傍で高温の領域が存在すること，火炎の軸対称性から液滴近傍でのレーザー光方向における有効な光学厚みが大きいことが要因として考えられる．しかしながら単一のカメラで計測しているため，画像の判別は困難である．そのため本報では， 635nm および 415nm がおおよそ赤，青に相当することから，得られた画像のRGB値を調整することにより，一枚の画像から 635nm および 415nm 各々の波長における干渉縞を分離した．その結果，図3の中段および下段に示されるような画像データが取得できた．このような分離手法は光学フィルターを用いないため一つのカメラで情報を得ることができることから，廉価に実験装置を組み上げる手法の一つであるといえる．図3中に示されるように分離後の2枚の画像は，干渉縞の角度が異なっている．すなわち本手法においては二波長における干渉縞の向きを調整することで，2方法に感度のよい干渉計測が行えるといえる．

3-2 干渉画像の解析

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 ρ の関数であり，ガス種および波長が決まれば，

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

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 $K\Delta\rho L$ が波長 λ の正整数 N 倍のとき，すなわち

$$K\Delta\rho L = N\lambda \quad (2)$$

のときに干渉縞が観察できる．すなわち図3に示された干渉画像から，これは K および L を適切に見積もってやければ，密度変化 $\Delta\rho$ を算出できることを示している．

次にグラッドストーン定数のガス種，波長の依存性を考慮してみる．文献(2)には $n-1$ を $a/(b-\lambda^{-2})$ という波長 λ の関数として各ガス種におけるパラメーター a ， b の値がまとめられている．この文献をもとに本報で用いた波長および想定されるガス種におけるグラッドストーン定数をまとめると表1のようになる．表1に示されるように，まず屈折率は

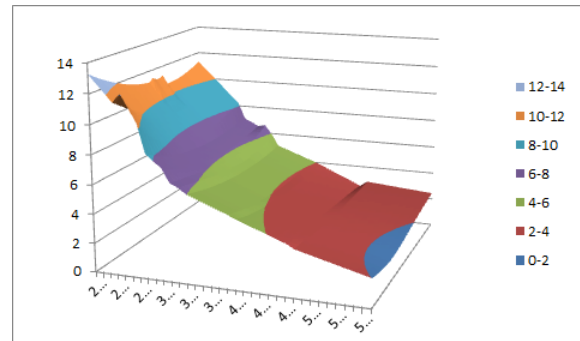


図7 燃焼中画像のB信号より算出した干渉縞の空間分布

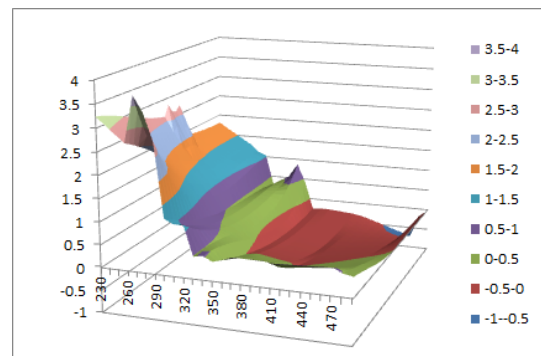


図8 燃焼前および燃焼中画像のB信号より算出した干渉縞の変化の空間分布

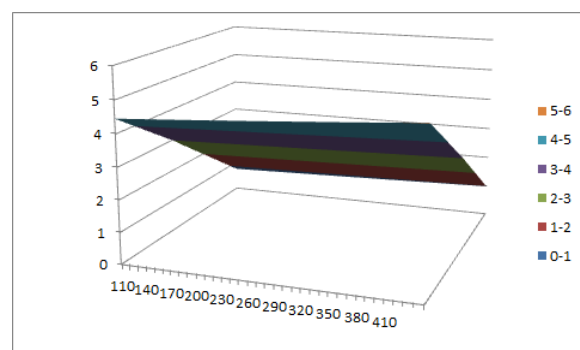


図9 燃焼前画像のR信号より算出した干渉縞の変化の空間分布

ガス組成，すなわち本報においては空間の燃料のモル分率などに依存して大きく変化することが考えられる．グラッドデイルストーン定数の波長依存性については，ほとんどのガス種において2～3%程度の変化しかない．しかしながら，電子についてはその波長依存性は大きい．(2)式において，グラッドデイル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，図3で示した2枚の画像については一定であるから，右辺も等しくなるはずである．

$N_{(635nm)} \times 635nm = N_{(415nm)} \times 415nm$ (3)
仮にこれが異なるということは左辺の波長依存性を示していることになる．(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，図5には図3で得られた干渉縞をピクセル単位で読み取り数値化した様子を示している．図5のような場合には1次変換を施し，適切な形状に縞を変形した後で，多項式近似を行い，縞の形状を数値化した．図6から図10にはこのようにして数値化した縞を線形補間することで，縞の空間分布を算出したものを示している．特に干渉縞の移動に関しては，図7に示されるように各点における値を算出することが可能であった．

図10はこれらをもとに干渉縞の移動量の空間分布について，R信号から得られたものとB信号から得られたものを比較したものである．また式(3)の左辺と右辺との差の空間分布をグラフ化したものが図11である．このようにX=300pixel付近では式(3)の両辺の差は小さいが，X～500pixel付近では(3)式の左辺から右辺を引いた値が負となっており，この領域には多くの電子が存在しているのではないかと推測される．

4. 結言

二色干渉計の設計設置を用い，燃焼場の干渉縞の観察を行った．単一のカメラ画像を画像処理することで，異なる波長が画像が得られた．二波長にて撮影された干渉縞の移動量の空間分布について示し，その差異が空間一によって異なることから，その差異が大きいところでは，電子が多く存在している可能性が示唆された．

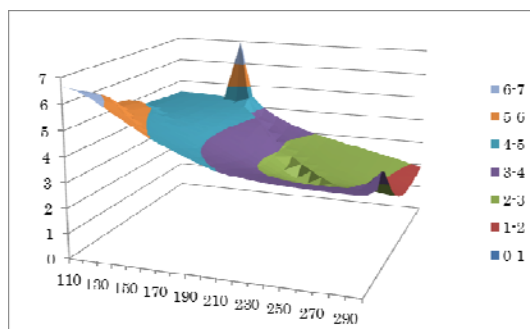


図9 燃焼中画像のR信号より算出した干渉縞の空間分布

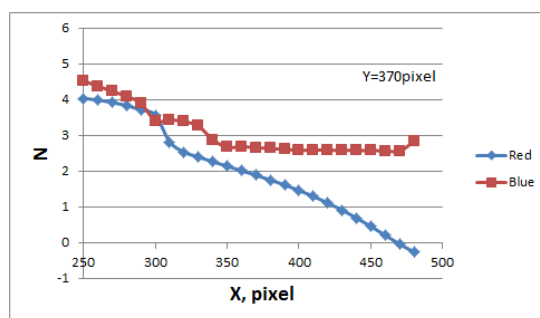


図10 R信号画像およびB信号画像から算出した干渉縞の空間分布の比較

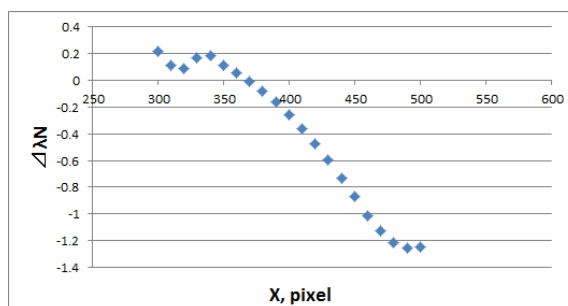


図11 R信号画像およびB信号画像から算出した干渉縞の空間分布の差異

謝辞

本研究は，学術研究助成基金助成金(課題番号:25820069)による支援を受けて行われた．ここに記して謝意を表する．

参考文献

- (1) Osamu IMAMURA, et al., Journal of Environment and Engineering, Vol. 6, No. 1, pp.210-219 (2011)
- (2) W.C.Gardiner, Jr., et al., Combust. Flame, 40, pp.213-219 (1981)