電界中における多孔質円筒バーナー拡散火炎の挙動^{*1}

Diffusion Flame Behavior by a Burner of Porous Cylinder in Electrical Fields

山下 清 孝^{*2}・謝 林^{*3}・今 村 宰^{*4}・大 坂 淳^{*2}

Kiyotaka YAMASHITA, Lin XIE, Osamu IMAMURA, Jun OSAKA,

津 江 光 洋^{*2}・河 野 通 方^{*4}

Mitsuhiro TSUE and Michikata KONO

Key Words: Ionic Wind, Counter-Flow Flame, Electrical Field

Abstract: The acetylene/air counter flow flame formed by a porous cylinder in electrical fields was studied experimentally and numerically. The temperature and OH radical distributions in the flame were measured in experiments. The numerical simulation with a detailed reaction model was conducted to explore the effect of ionic wind on the flame behavior. The experimental results show that the temperature and OH radical distribution shifts to the negative electrode side in electrical fields, which is good agreement with the prediction. It is indicated that the shift of flame zone in electrical fields may be due to the change in the bulk flow velocity induced by the ionic wind.

記 号 表

D : 拡散係数	r : 半径方向座標
e : 電気素量	u : 周方向速度
E : 電界強度	v : 半径方向速度
H : 静エンタルピー	Y : 化学種
n : 粒子数	λ : 熱伝導率
p : 圧力	μ : モビリティ
R : 生成速度	ρ : 密度
T : 温度	θ : 周方向座標
Q : 発熱量	Φ : 粘性散逸項
添え字	
i : 化学種	j : イオン化学種

1. 緒 論

電界中における火炎の挙動については、過去多くの研究がなされてきた。それらは、火炎の形状、発光、安定性、すすの生成メカニズムなどと多岐にわたる。火炎の変化は電荷を帯びたイオン粒子が中性ガスを介して流体に運動量を与えて生じる流れ（イオン風）に起因すると考えられているが、火炎中における荷電粒子発生に起因するローレンツ力および電場の変化、電荷を持ったすす粒子の影響など複数の要素が密接に関連すると言われる。また、燃焼速度に関して電界の影響はあるとする意見^{1, 2)}、無いとする意見³⁾

もあるなど現象解明はまだ不十分な点が多い。一方、火炎に対して電界を印加すると挙動が変化するという性質を利用することで能動的な火炎の制御への適用が考えられる。また燃焼器の燃焼効率の改善や、すすの生成の抑制にもつながる。これより、環境負荷を低減させることができる。

従来より燃焼挙動に及ぼす電界の影響に関する実験的な研究は数多く行われてきたのに対して、数値計算による解析はほとんど行われていない。解析されたモデルも数十式程度の反応式による一次元対向噴流火炎⁴⁾や二次元平行噴流火炎⁵⁾が見られる程度である。燃焼に関する問題は他にも多くの実用機器に則したモデルが考えられるが電界下での挙動に関する解析についてはほとんど報告されていない。

そこで、本研究では電界中での燃焼について複数ある因子の中でも最も影響が大きいとされるイオン風の影響のみを考慮した解析を行う。扱うモデルは、比較的流れが安定でかつ解析が容易という特徴を持つ多孔質円筒バーナー火炎である。アセチレンを燃料として火炎を形成させ、ここに電界を印加し、その挙動の変化を観測する。同時に電界の影響と考えられるイオン風を加味した方程式を離散化したモデルで数値計算を行い、詳細な各輸送変数の分布の推移より、実験との比較を合わせて電界下でのイオン風の火炎への影響について考察する。

多孔質円筒バーナーは、辻らのものを元に作成された⁶⁾。またイオン風の影響としては Hu らのイオン化学種のドリフト速度、運動量保存式の体積力項を加味する手法⁵⁾を採用した。

2. 実 験

2.1 実験装置と方法 過去に著者らの一部が製作した

^{*1} © 2006 日本航空宇宙学会

平成 18 年 3 月 16 日原稿受理

^{*2} 東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻

^{*3} (株)ノーリツ・基礎研究所

^{*4} 東京大学新領域創成科学研究科

装置⁷⁾を用いて実験を行う。第 1 図に実験装置の概要を示す。一様流条件を得るために風洞に連結された測定部に多孔質円筒バーナーを設置した。この装置の特徴としては淀み点近傍の流れが極めて安定しており、火炎の形状が二次元的であるため、測定結果の解析が比較的容易であることが挙げられる。

バーナーは、外径 60 mm 奥行き 44 mm 全長 50 mm となっており、表面から燃料と不活性ガスが噴出する。円筒の両端に軟鋼製の蓋が取り付けられており、その一端はバーナー支持棒を兼ねた燃料供給用のパイプが取り付けられた一体構造となっている。バーナーは石綿パッキンを介して 2 枚の蓋にはさまれた状態で、バーナー支持棒に固定されている。不活性ガスは火炎がバーナー表面に付着するのを防ぐために使われた。

一様流はコンプレッサーから出た圧縮空気をサージタンクで一度溜めて精密減圧弁、面積流量計を通過して風洞内に送り込まれる。

風洞は入り口部、拡大管、整流部、縮流管で構成されておりバーナーが設置されている測定部に繋がっている。入

り口部は内径 70 mm、拡大管は広がり角が 90 度で断面形状は正方形である。整流部は内側寸法 440 mm × 440 mm で高さが 450 mm あり、10 段分割され、中にはハニカム層・アルミニウム多孔板が設置されている。縮流管は測定部まで円弧状に接続されている。

また燃料はアセチレンガス、不活性ガスは窒素を用いて同様に流量計をはさんでバーナーに送り込まれた。アセチレンは浮遊式流量計、窒素は差圧式流量計である。いずれも独立のニードルバルブで調節された。流量は空気が 225 l/min、アセチレンが 0.73 l/min、窒素が 8.9 l/min で行った。

電界を印加するための電極には金網電極を用い、バーナー表面から 10 mm の位置に設置された。金網は外径 0.3 mm の管で作られた格子 (ピッチ 2×4 mm、外寸 27 mm、5×50 mm) でできており、格子状電極が持つ静電容量をおさえるためにステンレスパイプ (外径 0.3 mm) を使った。電界はバーナーを陽極、金網電極を陰極となるように電圧を与えることで印加された。実験方法を示す。一様流 (空気) を流した状態でバーナー表面より燃料と不活性ガスを噴出させることにより、バーナー表面近傍に不輝炎の火炎を形成させた。

実験条件は、酸化剤流量 235 l/min・燃料 (アセチレン) 流量 0.73 l/min・不活性ガス (窒素) 8.9 l/min で、印加電圧は DC 200 V とした。

計測装置の概要を第 2 図に示す。温度分布は LIFS⁸⁾ を用いて測定された。装置は主として 3 つの部分より構成されている。波長可変レーザー光発生装置、蛍光受光装置、遅延パルス発生器である。

波長可変レーザー光発生装置は、10 Hz のパルス Nd:YAG レーザ光の第二高調波 532 nm レーザ光で色素レーザーをポンピングした。出力波長を 618 nm とするため、色素はサルフォードミン 640 を用いた。色素レーザーから出力されたレーザー光を波長倍波装置に入射し、装置中の結晶でレーザー光には入射光の 618 nm も含まれているため、UV 透過フィルタにより 618 nm のレーザー光もカットした。レーザー光は焦点距離 500 mm の石英レンズで火炎中の測定点に入射された。蛍光はレーザー光と直角方向において焦点距離 120 mm の石英レンズを用いて集光された。その後、UV 透過レンズで可視光をカットし、オプティカルファイバを介して分光器

第 1 図 バーナー（陽極）と金網電極（陰極）

第 2 図 光学系測定装置の概略

第3図 拡散火炎の直接写真

第4図 実験結果（温度分布）

に通され SMA (Spectrometric Multichannel Analyzer) で測定した。

これらの装置を用いて得られた蛍光強度より、温度分布を測定した。なお、電圧を印加していない場合において熱電対により温度分布を測定した結果は本手法の測定値とよく一致していることを確認した。また OH 濃度分布はレーザ飽和蛍光法を用いて測定された。なお、本研究では OH ラジカルの分布形状を見るために、電界を印加しない場合の拡散火炎におけるバーナー表面より 2.5 mm の位置での濃度を 1 とした時の相対値で OH 濃度分布を求めた。

2.2 実験結果と考察 電界を印加した場合と印加しない場合のバーナー近傍の火炎の直接写真を第3図に示す。また第4図には半径方向に対する温度分布、第5図には OH 分布を示す。横軸はバーナー表面からの距離を表す。第4図から火炎帯がバーナー表面から 3.0 mm 程度の位置に形成されていることがわかる。電圧を印加した場合、印加していない場合よりも空気側に移動している。

これについて以下に考察を与える。すなわち電圧が印加され一様電界が形成されたことにより火炎面の陽イオンは

第5図 実験結果（OH 分布）

クーロン力を受け加速される。同様に陰イオンや電子も力を受け陽イオンとは逆方向に加速されるが、火炎中では陽イオンに比べてはるかに衝突頻度が低いことが知られており⁹⁾ 体積力としては無視される。陽イオンが中性ガス粒子と衝突した結果、流体に対して運動量が与えられ、全体が陽極から陰極の方向へと移動したと考えられる。なお、第3図から電界中では火炎発光帯幅が若干狭くなっており、また第4図から火炎の最高温度は約 10 K 低くなっていることがわかる。この火炎温度低下は Heinsohn ら¹⁰⁾ も報告しているように電界による火炎発光帯幅が狭くなった結果、体積あたりの発熱量が減少したためであると考えられる。しかしながら、その詳細なメカニズムは未だ不明である。第5図より温度分布同様に電界印加により OH 濃度分布が空気側に移動していること、濃度のピーク値が電界印加により小さくなっていることがわかる。

OH 濃度の減少については火炎温度の低下がその要因の一つと考えられるが、火炎温度の低下は高々 10 K であり、火炎温度低下のみで説明することはできないように思われる。

3. 計 算

3.1 計算方法と条件 実験を模擬した数値計算を行った。基礎方程式を以下に示す。

・質量保存式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v)}{\partial \theta} = 0 \quad (1)$$

・運動量保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) \\ = \text{div}(\rho \nu \text{grad } u) - \text{grad } p + B_r \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho u v) \\ = \text{div}(\rho \nu \text{grad } v) - \text{grad } p + B_\theta \end{aligned} \quad (3)$$

・エネルギー保存式

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \text{div}(\rho u H)$$

$$= \text{div}(\lambda \text{grad } T) + \frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad } p + \Phi + Q \quad (4)$$

・化学種保存式

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} Y_i - \rho D_i \text{grad } Y_i) = R_i \quad (5)$$

また、第6図に計算領域を示し、第1表に計算概要を示す。基礎方程式を有限体積法により計算した。対象とする流れ場および座標系は、二次元円筒座標系で領域下部から一様空気流が流入しているものとする。特に実験との比較をするべきバーナー表面近傍の流れ場のみに注目するため、円筒座標のうち右下1/4のみの計算領域としている。格子については火炎帯付近が高解像度になるよう不等間隔で配置し、また紙面垂直方向は周期境界条件として扱っている。よどみ点位置は点線で囲ったあたりになる。電極の配置については、格子の性質上円周に沿った配置にせざるをえないため、図に示すように実問題とほぼ同じ位置でかつ曲率が小さくなるように配置してある。しかし注目すべき部分はよどみ点を通る流線であることから、全体の流れ場が実験同様に形成されていれば特に問題が無いものと判断した。

化学反応機構は GRI-MECH3.0¹¹⁾ の素反応式 325 式および第2表に示す 13 イオン反応式を用いた。この反応式は Pedersen ら¹²⁾ の手法を参照した。

第6図 計算領域

また、電界の影響を加味した体積力項は次式の通りである。

$$B_r = E e n_+ = E e A_0 \rho \left(\sum_j \frac{\rho_j}{W_j} \right) \quad (6)$$

ここで n_+ は陽イオンの粒子数、 A_0 はアボガドロ数であり、 n_+ はセルあたりの質量分率と数密度から求めている。体積力項は(2)式に付加される。

またイオン化学種のドリフト速度は次式の通りである。

$$v_i = \mu E \quad (7)$$

ドリフト速度項は(5)式の数値項に付加される。これらの手法は Hu らにより、その妥当性が示されている⁵⁾。

また、本計算では以下の仮定をした。

- ① イオン分布による電界の変化は考慮していない。
- ② 陽イオンの体積力は r 方向のみを考える。
- ③ 電子や陰イオンの体積力は無視する。
- ④ 磁界による流体への体積力は考えない。
- ⑤ すずの生成・流れ場への影響も考慮していない。

なお本研究での実験は一般的にすずの生成を伴うアセチレンを燃料としているが、不活性ガスを大量に混合させ充分

第1表 計算概要

計算方法	
空間離散化	有限体積法
時間離散化	完全陰解法
圧力速度	Simplest 法
格子数	$\theta: 40, r: 40$
格子間隔	$\theta: \pi/80 \text{ rad}, r: \text{不等間隔}$
時間間隔	$\Delta t = 0.01 \text{ s}$
計算ステップ	1000 step
境界条件	
燃料温度	298 K
燃料流量	0.73 l/min
不活性ガス温度	298 K
不活性ガス流量	8.9 l/min
酸化剤温度	298 K
酸化剤流量	235 l/min
化学反応式	338
化学種	60
印加電圧	200 V
印加方法	一様電界

第2表 イオン化学種反応式とアレニウス係数 ($k = AT^b \exp(-E_a/RT)$)

Reaction	A	n	E_a [cal/mol]
(1) $\text{CH} + \text{O} = \text{CHO}^+ + \text{e}^-$	2.51E11	0.0	7110
(2) $\text{CH}^* + \text{O} = \text{CHO}^+ + \text{e}^-$	5.01E14	0.0	7110
(3) $\text{CHO}^+ + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_3\text{O}^+ + \text{CO}$	1.00E16	-0.0897	0
(4) $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{C}_2\text{H}_2 = \text{C}_2\text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}_2$	8.39E15	0.0	0
(5) $\text{CHO}^+ + \text{CH}_2 = \text{CH}_3^+ + \text{CO}$	5.62E14	-0.060	0
(6) $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{CH}_2 = \text{CH}_3^+ + \text{H}_2\text{O}$	6.17E14	-0.060	0
(7) $\text{CH}_3^+ + \text{C}_2\text{H}_2 = \text{C}_3\text{H}_3^+ + \text{H}_2$	7.24E14	0.0	0
(8) $\text{C}_3\text{H}_3^+ + \text{H}_2\text{O} = \text{C}_2\text{H}_3\text{O}^+ + \text{CH}_2$	7.24E14	0.0	0
(9) $\text{CH}_3^+ + \text{CO}_2 = \text{C}_2\text{H}_3\text{O}^+ + \text{O}$	7.24E14	0.0	0
(10) $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{e}^- = \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	2.29E18	-0.5	0
(11) $\text{C}_3\text{H} + \text{O}_2 = \text{CH}^* + \text{CO}_2$	4.50E15	0.0	25000
(12) $\text{CH}_3^+ + \text{e}^- = \text{CH}_2 + \text{H}$	2.29E18	-0.5	0
(13) $\text{C}_2\text{H} + \text{O} = \text{CH}^* + \text{CO}$	7.10E11	0.0	0

希釈しており、すすの影響を考慮しない計算で模擬しようとする。

3.2 計算結果と考察 これ以降の諸量の分布は特に断らない限り、第5図の $\theta = 90^\circ$ の軸上の分布を表す。まず、第7図(a), (b)に定常状態に至った時の流れ場の温度等高線分布および速度ベクトル分布を示す。温度場は300, 500, 1000, 1500, 1800 Kで等高線を引いている。これより高温部、すなわち火炎帯がバーナー近傍に形成されていることがわかる。また速度ベクトル分布の結果より、円筒バーナー表面に沿った流れ場が形成されていることがわかる。次に第8図に、電界を印加した場合 ($V = 200$ V) と印加しなかった場合 ($V = 0$ V) の温度分布を示す。まず、0 V について $r = 2.70$ [mm] 付近に最高温度の分布が見られる。これに対して $V = 200$ V の場合 $r = 2.72$ [mm] の位置に分布形状を保ったまま移動している。すなわち、電界の印加により火炎位置が移動していることがわかる。なお最高温度については実験結果と異なり、電界を印加された場合もほとんど変化が見られない。また火炎帯位置も実験値に比べてやや燃料側に寄っている。この原因としては本計算においては、電界による火炎への影響はイオン風のみしか考慮しておらず、火炎が存在することによる電場の変化などの他の因子が影響を及ぼしていることが考えられる。

第9図に、OH ラジカルの濃度分布を示す。上述の通り最高温度の減少はほとんど見られなかったが、電界印加時の OH 濃度は低下している。したがって、本計算結果から、火炎温度の低下が OH 濃度減少の主たる要因であるとは言えないものと思われる。他の要因としては、電界印加によ

るイオン粒子の挙動の変化およびそれに伴うイオン反応以外の化学反応挙動の変化等が考えられる。また上述のように、火炎の存在による電場の変化が何らかの影響を及ぼしていることも推察されるが、いずれにしても本計算においては明確な根拠は見出せなかった。また印加による分布位置の空気側への移動が見られたが、ピークよりも空気側では印加前よりも燃料側に移動していた。しかし、実験値に見られるような第二ピーク ($r = 3.8$ mm 付近) のような分布は見られなかった。これについても、上述のようなイオン風以外の要因が関係しているものと思われる。また、計算に用いられた素反応式についても解析モデルによって最適条件が変わりうるため、本計算の反応モデルとして最適なものとは言えないことも考えられる。特に、イオン反応式については、不明な点が多く残されている。

しかし、本計算の主旨であるイオン風の影響は温度場ならびに OH ラジカルの分布の空気側への移動から定性的には、ほぼ正しく模擬されていたと言える。

さらに、現象を詳細に見るため、電界の影響を担ったイオンの分布と半径方向の速度分布を第10図および第11図に示し、これについて考える。

第10図にイオン化学種の中で最も質量分率の大きかった $C_2H_3O^+$ イオンの濃度分布を示す。電界印加後では、印加前よりもイオン総量が増えている。これは、 $C_2H_3O^+$ イオ

(a) バーナー近傍の温度場

(b) バーナー近傍の速度場

第7図 定常状態の流れ場の形成

第8図 計算結果 (温度分布)

第9図 計算結果 (OH 分布)

第 10 図 計算結果 ($C_2H_3O^+$ 分布) 第 11 図 計算結果 (C_2H_2 分布)

ンの生成を示す第 1 表の (4), (8), (9) 式の反応が促進されたことによると考えられる。また, (4) 式の反応物であり, かつ (8) 式の反応物の $C_3H_3^+$ イオンを (7) 式において生成するために使われる C_2H_2 の濃度分布は第 11 図に示す通りイオン風により空気側に移動している。これより火炎帯に近づき活発に反応したことで $C_2H_3O^+$ イオンの生成量が増えたという機構が考えられる。また質量分率のピーク値を示す半径方向位置は印加後わずかに空気側に移動している。これはクーロン力によりイオン自体が陽極から陰極に向かって移動していることを示している。第 12 図に火炎帯近傍における半径方向速度分布を示す。電界を印加すると, 火炎温度が最も高い $r = 2.7$ mm 付近において印加前よりも速度が増大することが示されている。この結果は, 電界の印加がイオン風を誘起し, それにより空気側 (負極側) への流速を増大させていることを示しているものと考えられる。

4. 結 論

本研究では, 電界中における対向流拡散火炎の挙動をイオン風の影響という観点から調べた。そのため多孔質円筒バーナーを用いて形成された火炎を対象とした実験および二次元円筒座標を利用した数値計算が行われた。その結果, 得られた結論は以下の通りである。

1. 直流 200 [V] の電界を印加することにより火炎帯が陽極側から陰極側へと移動することが観察された。また, 温度

第 12 図 計算結果 (半径方向速度分布)

分布および OH 濃度分布も同様に移動することがわかった。

2. 数値計算から, 電界印加により火炎帯が陰極側へ移動することが認められた。電界印加による温度分布および OH 濃度分布の移動が良く再現されていることがわかった。また半径方向速度は陰極側へ向かって 1 cm/s 程度増大することが示された。

3. 詳細な陽イオン分布および半径方向速度分布から, イオン風による火炎挙動の変化を説明することができた。

参 考 文 献

- 1) Fox, J. S. and Mirchandani, I.: Influence of Electric Fields on Burning Velocity, *Combust. Flame*, **22** (1974), pp. 267-268.
- 2) Jagers, H. and Engel, A.: The Effect of Electric Fields on the Burning Velocity of Various Flames, *Combust. Flame*, **16** (1971), pp. 275-285.
- 3) Bowser, R. S. and Weinberg, F. J.: The Effect of Direct Electric Fields on Normal Burning Velocity, *Combust. Flame*, **18** (1972), pp. 296-300.
- 4) Jones, F. L., Becker, P. M. and Heinsohn, R. J.: A Mathematical Model of the Opposed-Jet Diffusion Flame: Effect of an Electric Field on Concentration and Temperature Profiles, *Combust. Flame*, **19** (1972), pp. 351-362.
- 5) Hu, J., Rivin, B. and Sher, E.: The Effect of an Electric Field on the Shape of Co-Flowing and Candle-Type Methane-Air Flames, *Exp. Thermal Fluid Sci.*, **21** (2000), pp. 123-133.
- 6) Tsuji, H. and Yamaoka, I.: The Counterflow Diffusion Flame in the Forward Stagnation, *Eleventh Symposium (International) on Combustion*, 1967, pp. 979-984.
- 7) Xie, L., Kishi, T. and Kono, M.: Investigation on the Effect of Electric Fields on Soot Formation and Flame Structure of Diffusion Flames, *Twenty Fourth Symposium (International) on Combustion*, 1992, pp. 1059-1066.
- 8) Eckbreth, A. C.: *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*, Abacus Press, Tunbridge Wells, 1987, pp. 301-361.
- 9) James, L. and Felix, J. W.: *Electrical Aspects of Combustion*, Clarendon Press, Oxford, 1969, pp. 315-340.
- 10) Heinsohn, R. J., Thillard, S. V. and Becker, P. M.: Temperature Profiles of an Opposed-Jet Diffusion Flame Subjected to an Electric Field, *Combust. Flame*, **13** (1969), pp. 442-445.
- 11) Smith, G. P., Golden, D. M., Frenklach, M., Moriarty, N. W., Eiteneer, B., Goldenberg, M., Bowman, C. T., Hanson, R. K., Song, S., Gardiner, W. C., Lissianski, V. and Qin, Z.: GRI-Mech 3.0 Web site, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/, 1999.
- 12) Pedersen, T. and Brown, R. C.: Simulation of Electric Field Effects in Premixed Methane Flames, *Combust. Flame*, **94** (1993), pp. 433-448.