イオン風を伴う電界中における拡散火炎の挙動*

新居利洋^{*1}, 斉藤正浩^{*2}, 新井雅隆^{*2}Behavior of Sooting Diffusion Flames under Electric Fields
with Ionic WindsToshihiro ARAI, Masahiro SAITO and Masataka ARAI^{*3}^{*3} Dept. of Mechanical System Engineering, Gunma University,
Tenjin-cho 1-5-1, Kiryu, Gunma, 376-8515, Japan

This paper reports the effects of applying methods of electric field on a sooting diffusion flame. Essentially, two types of electric fields were tested in this experiment. One is a uniform electric field formed between parallel plate electrodes. The other is a non-uniform field formed between needle and plate electrodes. In the uniform field, the flame shape was changed by positive ions moving in the fields. Soot emission was suppressed with increasing the applied voltage, because an increase of the flame surface temperature promoted the soot oxidation. In the non-uniform field, on the contrary, ionic wind was formed by corona discharge. The ionic wind blew from a needle electrode toward a plate electrode, irrespectively of the polarity of the needle. The flame was inclined toward the plate electrode by this ionic wind. As the result, the surrounding air was entrained in the flame, and the surface temperature of flame also increased with increasing applied voltage. The soot suppression efficiency of the non-uniform electric field was higher than that of the uniform one.

Key Words: Diffusion Flame, Soot, Electric Field, Ionic Wind, Flame Surface Temperature, Soot Oxidation

1. 緒 言

すすは火炎内において酸素不足の状態が発生するので、その抑制のためには、酸素不足状態を解消させることが最も重要であると考えられる。すす抑制技術にはいろいろな手法が研究されているが、ここではその中で電界を用いた抑制技術に着目する。電界が火炎の燃焼速度⁽¹⁾ やすす抑制^{(2)~(7)} に影響を与えることはよく知られている。特にすすの核生成及びすすの核からの微粒子の成長には炭化水素のイオン反応が深く係っているため、強い電界を与えてすすの生成を抑制することが行われ、ブンゼン火炎規模の燃焼ではこの効果が大きいことが確認されている。電界がすすの生成及び成長過程に及ぼす影響に関しては、Weinbergら^{(2)~(5)}の研究がある。彼ら是对向流拡散火炎に電界を印加し、火炎から排出されるすすの量が減少することを見出している。また、大きさや質量で決まるカーボン粒子の成長割合は、熱分解領域での滞留時間および生成過

程の早い段階で帯電するので電界強度によって支配される。カーボン成長が表面で起こるが、その表面を急速に取り除くことによって、粒子径と火炎発光の減少を相関させることで生成したカーボンの総量を90%以上減少させることができる可能性を示した。大久ら^{(6),(7)}は直流コロナ放電によるすす抑制の研究を行い、火炎からのすす排出量を大幅に抑制できることを示した。また、直流コロナ放電によるすす抑制の要因としてはコロナ風による空気導入効果が大きいと報告している。

筆者らは、前報^{(8),(9)}において電極を兼ねたノズルに高電圧を印加することによって、拡散火炎から排出するすす抑制に関する報告を行った。ノズルに高電圧を印加した場合にはノズルから噴出している火炎自体が高電位となり、かつ火炎先端部に電界が集中することでイオン風が起り、その結果として燃料ガスと空気の混合が促進されて火炎温度が上昇してすすが酸化されることがわかった。

本報では、火炎周囲に電極を配置する方法で電界を印加し、その印加方式の相違による影響について調べた。また、平等電界および不平等電界中におけるアセチレン拡散火炎の挙動を観察するとともに、発生するすす排出量に及ぼす極性およびイオン風の影響を調べることを目的とした。

* 原稿受付 1999年5月20日。

^{*1} 群馬大学大学院 [現:自動車機器(株)]。^{*2} 正員, 群馬大学工学部 (☎ 376-8515 桐生市天神町1-5-1)。

E-mail: arai@me.gunma-u.ac.jp

2. 記 号

E : 印加電圧	[kV]
F : 電界強度	[kV/m]
h : 電極間距離	[mm]
I_+ : 正電源側の電流	[μ A]
I_- : 負電源側の電流	[μ A]
I_N : アース側の電流	[μ A]
L_F : 各電圧印加時の火炎長さ	[mm]
M_f : 燃料の質量流量	[mg/s]
M_s : すずの排出量	[mg]
M_{s0} : 電圧無印加時のすずの排出量	[mg]
T_f : 火炎表面温度	[$^{\circ}$ C]
Z : ノズル先端からの距離	[mm]

3. 実験装置および方法

3-1 実験装置 前報⁽⁸⁾では火炎軸と電界の方向が平行の場合について報告したが、本報では火炎軸に対して電界の方向が直角の場合について調べた。電界の形成には正と負の二つの電源を使用し、その実験装置の概略を図1に示す。燃料はアセチレンを使用し、ニードルバルブで流量を調整した後、電極間の中央に置いたノズル(外径2.0mm, 内径1.4 mmのSUS管)から噴出し拡散火炎を形成した。ノズルは噴出燃料自体の帯電を避けるために接地した。左右それぞれの電極に直流高電圧供給装置(SPELLMAN, SL-150)を用いて印加電圧 $E = 0 \sim \pm 15$ kVを印加した。電極としてRogowski⁽¹⁰⁾電極を参考とした平板電極($\phi = 80$ mm)および針状電極の2種類を使用し、これらの組み合わせにより平等電界及び不平等電界を形成した。正および負電極とアース電極(ノズル)に電流計を取り付けて、電圧/電流特性を測定した。また、電界印加による火炎形状の変化はビデオカメラで撮影し、モニター画面上で火炎寸法を計測した。さらに、すす排出量の測定は実験前にあらかじめ乾燥(110 $^{\circ}$ Cで1.5 hr)させたガラス繊維フィルタ(東洋, GB-100R)を装着したすす捕集器を用いて、火炎の下流部で一定時間(1 min)サンプリングし、ガラス繊維フィルタの質量を精度0.01 mgの電子天秤(島津製作所, AEG-45SM)を用いて測定し、捕集前後のフィルタの質量差からすすを定量した。また、火炎表面温度の測定には、自動二色式温度計(シグマ電子, C-120)を用いた。測定精度 ± 10 $^{\circ}$ C, 空間分解能1 mmである。また、この二色式温度計で採用している波長は $\lambda_1 = 610$ nmと $\lambda_2 = 750$ nmである。

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

3-2 電極形状と配置 本実験では、平板電極と針状電極の2種類の電極とその極性の組み合わせにより、次の4つの電界パターンが得られる。

- (1) Type A (平板電極(+)/平板電極(-))
- (2) Type B (平板電極(+)/針状電極(-))
- (3) Type C (針状電極(+)/平板電極(-))
- (4) Type D (針状電極(+)/針状電極(-))

すなわち、Type A は正および負の両電極に平板電極を使用することで平等電界となる。また、Type B~C は不平等電界で、Type B は平板電極を(+), 針状電極を(-)とし、逆に Type C は針状電極を(+), 平板電極を(-)とした。Type D は両電極を針状電極とした場合である。とくに、不平等電界 (Type B~D) においては、電極間で電界強度がある値を超えると、電界の集中した針状電極先端部で電離が起こり多量のイオンが発生して、電界の作用によって対極に向かう。その際、中性分子との衝突によりすイオンの運動エネルギーを中性分子に与えて、イオンならびに中性分子の両方が対極に向かって移動する。これらのイオンおよび中性分子の移動がイオン風と呼ばれており、針状/平板電極のような著しい不平等電界では比較的低い電圧でも局部的に高い電界が発生するから、針状先端部分でイオン風が生じる。

Fig.2 Variation in flame shape with applied voltage for uniform electric field

Fig.3 Variation in flame shapes with applied voltage for non-uniform electric fields

4. 実験結果および考察

4.1 各電界パターンにおける火炎挙動 図2および図3に4つの電界パターンにおける火炎挙動を示す。図2は平等電界、図3は不平等電界の場合である。実験条件はアセチレン流量 $M_f = 0.98 \text{ mg/s}$ 、電極間距離 $h = 100 \text{ mm}$ 、 $z = 10 \text{ mm}$ である。

Type A (平板/平板)の平等電界では、印加電圧が増加し、 $E = \pm 3 \text{ kV}$ (電極間の電位差は 6 kV)で火炎先端部が広がり始め、 $E = \pm 6 \text{ kV}$ 以上では、火炎が負極側に引き寄せられるように膨らんでいき、印加電圧 $E = \pm 15 \text{ kV}$ では電界の方向(負電極の方向)に扁平な火炎となった。ただし、電界を高めても電極に平行すなわち上方に向う火炎も、火炎の正電極側の側面には観測され、火炎内には負電極に引き寄せられる部分とそうでない部分のあることが判明した。平等電界ではイオン風のような流れは発生しないため、火炎の変形は火炎自体が電界の作用で変形したと考えられる。火炎中には正、負イオン及び電子が存在することが知られている。これらのイオンおよび電子は電荷を持っているため、電界の作用によって正または負極の方向へ引き寄せられる。正イオンは負極側に移動するとき火炎中の他のイオンまたは原子や分子に衝突して運動量を付与し、火炎を負極側方向へ曲げる効果を有するため、火炎が負極側に大きく変形するものと考えられる。一方、電子は原子、分子よりはるかに小さいので、原子、分子との衝突確率は小さく火炎を変形させる力は小さいと考えられる。また、負イオンには正極方向の運動量が与えられるが、その数は正イオンに比べて少ないので、火炎の変形に与える影響は小さい。以上のことから、平等電界中では火炎内の正イオンの移動が火炎変形の要因であると考えられる。

図3に示したType B (平板/針)では負極の針状電極から対極の正極へイオン風が吹くため、火炎全体が平等電界と逆方向である正極側に傾いた。平等電界と不平等電界では火炎に対する電界の影響の機構が異なり、不平等電界の場合はイオン風の影響が大きいと考えられる。印加電圧が増加するとイオン風も強くなるため、火炎の傾きは大きくなり、 $E = \pm 15 \text{ kV}$ では傾いた火炎が正極に接触し火花放電を生じた。Type C (針/平板)では正極の針状電極からイオン風が吹くため、印加電圧の増加とともに火炎の負極側への傾きは大きくなった。また、火炎先端では負極に向かって尖った形をした火炎が観測された。Type D (針/針)では、正負の針状電極からのイオン風が電極間中心付近で互いに衝突する。このため、印加電圧が $E = \pm 9 \text{ kV}$ 以上と高い場合には火炎が上下左右に激しく揺れた。以上のことから、針状電極による不平等電界においては発生するイオ

Fig.4 Conception of electric current measurement

ン風の影響が非常に大きく、火炎挙動の写真からも針状電極の極性にかかわらず火炎の傾く方向がイオン風の方向により支配されていることがわかった。

4.2 印加電圧と電流の関係 電圧/電流特性を調べるための電流測定回路系を図4に示す。正電極とノズル(アース電極)間に流れる電流を I_+ (正電流)、負電極とノズル(アース電極)間に流れる電流を I_- (負電流、実際の電流の向きは矢印とは逆で値は負となる)、およびノズル(アース電極)に流れる電流を I_N とすると、これらの間には次式のような関係がある。

$$I_N = I_+ + I_- \quad (1)$$

平等電界 (Type A) の場合の電圧/電流特性を図5に示す。図5 (a) は電極間に火炎が無い場合、図5 (b) は電極間に火炎が存在する場合、図5 (c) は火炎が存在するときの電流値から火炎が無いときの電流値を差し引いた値である。図中の記号 Δ 、 $\circ$ 、 $\square$ は、それぞれ I_+ 、 I_N 、 I_- の実測値、また、 $\bullet$ は(1)式から求めた I_N の計算値である。図5～8において、火炎が存在する場合の実質的な電圧/電流特性として(c)で評価を行うことにする。

図5 (a) からわかるように、火炎が無いときの電流値はほとんど流れないが、火炎が存在する場合(図5 (c))では印加電圧の増加とともに電流も増加する。これは火炎中に含まれた正負イオンによる電気的性質によると考えられる。すなわち火炎中の電子は正極側に向かうことで正電流 I_+ が流れ、一方、正イオンは負極側に向かって移動するとき火炎分子に衝突して火炎を変形させ、また火炎のもつ導電性によって負電流 I_- が流れると考えられる。

Fig.5 Voltage/current characteristics for uniform electric field (Type A)

Fig.6 Voltage/current characteristics for non-uniform electric field (Type B)

Fig.7 Voltage/current characteristics for non-uniform electric field (Type C)

Fig.8 Voltage/current characteristics for non-uniform electric field (Type D)

次に、不平等電界の Type B の場合の電圧／電流特性を図 6 に示す。不平等電界の場合には針状電極からの放電により放電電流が発生するので、電極間に火炎が無いときでさえも I_+ と I_- は印加電圧の上昇とともに増加した(図 6 a)。また、火炎が存在する場合(図 6 c)、印加電圧が増加すると I_+ および I_- は増加するが I_+ の方が相対的に高い値となっている。これは針状電極から発生するイオン風によって火炎が正電極側に曲げられ、火炎の導電性により電流値が高くなるものと考えられる。

Type C の場合の電圧／電流特性を図 7 に示す。Type C は Type B の極性を逆にした場合であるが、その電流値は Type B に比べて若干小さくなっている。これは針状電極側で発生するイオン風の大きさが極性によって異なるためと考えられる。大気中では針状電極が負の方が正のときよりもイオン風が大きいと言われている⁽¹¹⁾。この電流値の測定結果からも、Type C のように針状電極が正のときに生じるイオン風は、Type B のような負のときのイオン風よりも小さいということが推測される。

Type D の場合の電圧／電流特性を図 8 に示す。Type B および Type C と比べて、火炎が無いときの電流値(図 8 a)がかなり大きくなっている。これは正負一対になった針状電極からの放電電流によるものと考えられる。また、電極間に火炎が存在する場合(図 8 c)においても、印加電圧の増加とともに電流値は非常に高くなり、これは正負両電極からのイオン風により、火炎が左右に激しく揺れるためと考えられる。

4.3 すす排出量 図 9 にすす排出量と電界強度の関係を示す。縦軸は電圧印加時のすす排出量 M_s を電圧無印加時 ($E = 0$) のすす排出量 M_{s0} で規格化した値 (M_s / M_{s0}) であり、横軸は電界強度 F ($= 2 |E| / h$ [kV/m]) として整理した。図中の白抜き記号は平等電界、黒塗り記号は不平等電界のデータを表わしている。

図より、電界強度 $F = 60$ kV/m 以下ではすすはほとんど抑制されない。60 kV/m より高くなるとすすの抑制効果が現れ、平等電界では徐々にすすが減少し、 $F = 300$ kV/m ですす抑制率が約 85% となる。一方、不平等電界では急激にすすが減少し、 $F = 300$ kV/m で 90% 以上のすす抑制率が達成される。この結果から分かるように、平等電界と不平等電界ではすす抑制特性に差異があることがわかる。

平等電界におけるすす抑制の効果は、電界の作用で変形した火炎への空気導入が主因であると考えられる。また、すすの生成および成長には炭化水素のイオン反応が関係するので、すす粒子が成長する過程で正に帯電するイオンとして存在すると仮定すると、この正イオンが電界作用により負極に引き寄せられてしまうために、火炎から排出される以前のすす生成・成長過程の段階ですすの生成が抑制さ

Fig.9 Relation between soot emission and electric field intensity

れている可能性がある。一方、不平等電界ではイオン風により電極間に流れが生じるので火炎への空気導入の促進効果は平等電界よりも大きいと考えられる。

以上の結果より、すす抑制に対して平等電界と不平等電界の場合を比較すると、電界強度 100 kV/m 以下の領域ではいずれの場合もすすの減少はみられなかったが、100 kV/m 以上では顕著なすす抑制効果が得られ平等電界と不平等電界で差異がみられた。すなわち、同一電界強度では平等電界の場合より不平等電界の方がすす抑制率が高く、不平等電界において発生するイオン風がすす抑制に対して寄与していることがわかった。

4.4 火炎表面温度 すす抑制のメカニズムを解明するために火炎表面温度を測定した結果を図 10 に示す。縦軸は火炎表面温度 T_f 、横軸はノズル先端から火炎表面温度の測定点までの距離 Z を各印加電圧における火炎長さ L_{fe} で無次元化した値 (Z / L_{fe}) として火炎軸方向の温度分布で示した。

図から、電圧無印加時 ($E = 0$) のときは火炎基部で $T_f = 1850$ °C であるが火炎先端にいくにしたがって火炎表面温度は徐々に低下し、火炎先端部では $T_f = 1200 \sim 1300$ °C となる。すなわち火炎軸方向の温度差は約 600 °C ある。また、印加電圧を増加すると、Type A (平等電界) では火炎先端で表面温度が上昇し、 $E = \pm 15$ kV では火炎全域にわたって $T_f = 1800$ °C 以上の高温に保たれた。一方、不平等電界の場合、Type B と Type C では高電圧時の傾向が異な

Fig.10 Surface temperature distribution along a flame axis

ることがわかる。図3の火炎写真で比較すると、Type Cでは印加電圧の増加に伴って火炎先端が広がっていくが、これに伴い火炎先端部の温度上昇が顕著になる。これは、電界による火炎の傾きとイオン風の方が一致しているため、電界印加により火炎への空気導入による燃料と空気の混合が促進されたためであると考えられる。

さらに、図10のType Aにおける $E = \pm 15 \text{ kV}$ は $F = 300 \text{ kV/m}$ 、またType Cにおける $E = \pm 10 \text{ kV}$ は $F = 200 \text{ kV/m}$ に対応し、両者は図9よりほぼ同じすすの減少率を示している。その火炎表面温度の特徴として、平等電界 (Type A, $E = \pm 15 \text{ kV}$) では火炎全体が 1900°C となり、一方、不平等電界 (Type C, $E = \pm 10 \text{ kV}$) では火炎の基部が 2000°C 、先端部が 1700°C のレベルである。これは平等電界中の火炎ではすすの酸化が一様に行われ、不平等電界中ではイオン風による火炎基部でのすす酸化とイオン風による部分予混合がすすの減少を支配しているためと考えられる。

5. 結 言

平等電界および不平等電界中におけるアセチレン拡散火炎の挙動および発生するすす排出量に及ぼす印加電圧と極性の影響を定量的に調べ、以下のような結果を得た。

(1) 平等電界では、火炎内に多量に存在する正イオンが電界の作用で負極側に移動するときに火炎分子と衝突して、火炎は負極側に曲げられるように変形した。一方、不平等電界では、火炎の傾く方向は針状電極より発生するイオン風によって支配された。

(2) 電界によるすすの抑制率を電界強度で整理すると、平等電界と不平等電界では傾向が異なり、平等電界では90%のすす抑制率を達成するのに電界強度 $F = 300 \text{ kV/m}$ を必要とするのに対して、不平等電界では約 200 kV/m で達成

されることがわかった。

(3) 電界印加によるすす抑制のメカニズムとして、平等電界では火炎中の正イオンが電界の作用により負電極側に移動するときに火炎の変形を起こし、火炎先端が広がってすすの酸化が行われる。また、不平等電界の場合では、イオン風による火炎への空気導入が促進され、その結果火炎表面温度が上昇することですが再燃焼し抑制されるものと考えられる。

文 献

- (1) 岸武行, 謝林, 津江光洋, 河野道方, 機論, 64-621, B(1998), 1512-1516.
- (2) E.R.Place and F.J.Weinberg, *Proc. 11th Symp. (Int.) on Comb.*, (1967), 245-255.
- (3) K.G.Payne and F.J.Weinberg, *Proc.Roy.Soc.* **A250** (1959), 316-336.
- (4) J.Lawton P.J.Mayo and F.J.Weinberg, *Proc.Roy.Soc.* **A303** (1968), 275-298.
- (5) P.J.Mayo and F.J.Weinberg, *Proc.Roy.Soc.Lond.* **A319** (1970), 351-371.
- (6) 大久博通, 堀沢秀之, 木村逸郎, 機論, 63-611, B(1997), 2515-2521.
- (7) H.Ohisa, I.Kimura and H.Horisawa, *Combust. & Flame*, **116** (1999), 653-661.
- (8) 新居利洋, 齊藤正浩, 新井雅隆, 機論, 64-627, B(1998), 3881-3887.
- (9) M.Saito, T.Arai and M.Arai, *Combust. and Flame*, **119** (1999), 356-366.
- (10) 電気学会編, 放電現象, (1952), 42, 49-54, 学献社.
- (11) 本多侃士, 気体放電現象, 94, 東京電機大学出版部.