

炭化水素火炎の電子注入による PAH 抑制

○ 鈴木順也（東海大・院），松澤佑哉（東海大・院）
堀澤秀之（東海大・工），木村逸郎（東大・名誉教授）

Abstract

Computational and experimental investigations on the mechanism of the soot emission control through electron injection for hydrocarbon flames were conducted. It was shown that reaction of $C_6H_5^+ + e^- \Rightarrow c-C_6H_4 + H$ was intensified and more effective on soot precursor reduction through the low temperature electron injection. The intensified reaction contributed to convert ionic species into neutral non-soot-precursors. From the mechanism, reduction for emission of soot precursors including poly-aromatic hydrocarbon (PAH) species were achieved and further reduction of soot could be expected. In addition, to investigate the effect of electron injection (a corona discharge) in a hydrocarbon flame, changes of concentrations of PAHs were measured with the laser induced fluorescence (LIF) method. LIF spectra from PAHs for fuel-rich propane flames with $\phi = 4.0 \sim 8.0$ measured at cathode side showed much smaller intensities with discharged flames than normal flames. Especially in the cathode side, where electron emission must be active, the reduction of LIF signals of PAHs, or namely PAH concentrations, was significant.

1. まえがき

火炎中のすす生成機構は、燃焼関連研究分野において長年にわたり研究されてきたにもかかわらず、その詳細が解明されていない重要な問題である。Weinbergらは、すす粒子の成長には帯電した化学種の挙動が関与すると仮定し、電場による抑制を試み実証した¹⁾⁻²⁾。我々は過去の研究において、乱流拡散火炎のすす排出量が、低電力のコロナ放電の適用によって顕著に減少することを明らかにした³⁾。同時に、直流コロナ放電の場合、コロナ風で火炎中に空気が導入されることも確認した。しかしながら、その効果はすす排出量の減少を説明するためには十分ではなく、特に交流コロナ放電（14 kHz）の場合、コロナ風は顕著ではないため、コロナ放電の化学的効果があり得ることを指摘した。

また、M.S.Cha⁴⁾らは炭化水素火炎に誘電体バリア放電(D.B.D.)を印加する実験をおこなっている。彼らはその実験結果から、放電の炭化水素イオンへの影響を指摘している。しかし一方で、Y.Kim⁵⁾らは、火炎に放電を印加する実験から、放電の free radical への影響が大きいと指摘している。

このように、放電のすす抑制効果は知られるようになってきているが、そのメカニズムは未だ解明されておらず、多くの研究者が注目している課題である。

現在、初期すす粒子の生成機構において、中性フリーラジカルをもとにした生成機構は広く受け入れられている⁶⁾⁻⁹⁾。一方、化学イオン反応で始まる生成機構も提案されている⁸⁾⁻⁹⁾。本研究では、帯電した化学種がすす生成に及ぼす化学的影響を検討するために、イオン種を含む数値計算、および実験を行った。

2. すす生成火炎の化学反応モデル

近年、すす前駆物質と考えられる多環芳香族炭化水素(PAH)の、詳細な反応機構に関する研究が活発になっている⁷⁾⁻⁸⁾。これらの研究の多くは、2~4環サイズの芳香族までに限られている。いくつかの研究グループは、この反応機構に対してすす粒子動力学を含む詳細な機構におよぶ拡張を試みた。この中では、気相からすす粒子までの遷移について、ピレンとより大きな芳香族あるいはベンゼンとの衝突に伴う核生成を仮定して説明している。表面成長反応については実験的に、あるいは芳香族反応の化学的推算に基づいて扱っている。また、すす粒子の凝集は離散的方法、あるいはモーメント法を用いてモデル化している。

3. 化学イオン反応を含んだ反応機構

火炎内の化学イオン反応は、火炎イオン検出器やロケット排気ブルームによるレーダ信号の減衰など、多くの燃焼現象において重要である¹⁰⁾⁻¹¹⁾。また、化学イオン反応は活性化学種や、火炎内でのすす形成などの非平衡反応に関係していると考えられている。

Eraslan と Brown は希薄、および過濃アセチレン火炎について化学イオン反応を考慮した数値計算を行った¹⁰⁾⁻¹¹⁾。その結果、希薄火炎と過濃火炎でイオン構造が異なることを示した。希薄な火炎においては、陽イオン種が作る正味電流は $C_2H_3O^+$ と H_3O^+ によって支配されることを示した。一方、過濃火炎においては、 $C_3H_3^+$ や、酸化した多環芳香族イオン種が支配的なイオン種となることを示した。また、すす生成における臨界当量比に達すると、軽イオン種の消費によって、重イオン種の濃度が増大することを示した。また、電子励起

したCH (CH*) の振る舞い, すなわち



が, 過濃火炎における化学イオン反応において重要であることを示した。

4. すず抑制におけるコロナ放電の効果

大久らは, プロパンと空気の自由噴流拡散火炎に低電圧のコロナ放電を印加することで, すず排出量が抑制されることを実証した³⁾。また, DC コロナ放電の場合, コロナ風によって空気が火炎内に流入したが, そのすず排出抑制効果は顕著なものではなく, 一方, AC コロナ放電 (14kHz) の場合では, その効果は見受けられなかった。このことから, DC コロナ放電を印加した場合は, 針状電極先端部付近で生成される無機イオン (N^+ , N_2^+ , O_2^+ など) および電子, 空気などが主としてコロナ風によって火炎に注入されたと考えられる。また, AC コロナ放電を印加した場合は, 無機イオンおよび電子は拡散によって火炎に注入されたと考えられる。火炎に注入されたイオン及び電子は, 初期すず粒子の帯電, すず排出に直接関係するすず前駆物質の抑制に影響を及ぼすと考えられる。

火炎熱分解領域に流入した無機陰イオンや自由電子は, すず生成機構におけるイオン反応での前駆物質と考えられるイオンの成長を抑制する。しかも, 火炎熱分解領域に流入した無機陽イオンは, 電荷移動によって, 帯電した初期すず粒子を増加させ, それらの凝集を抑える効果をもたらすと指摘した。

5. 数値計算

電子注入によるすず生成に及ぼす化学的影響を検討するために, イオン種を含む予混合一次燃焼の数値計算を実行した。すず生成火炎の反応機構は 19 のイオン種を含み, 81 組のイオン素反応式を含んだ。Eraslan と Brown¹⁰⁻¹¹⁾ による 205 組の素反応式を持つ反応機構を使用した。

今回の計算では反応ガス組成に電子を注入することにより生じる化学種モル濃度, 及び反応速度の変化より, すず抑制の反応経路について検討した。

5.1. 計算方法

計算モデルは, 1 次元の層流予混合アセチレン火炎を対象とした。本モデルは CHEMKIN を使い, 化学種の質量保存式, 状態方程式を連立させて解いた。

層流予混合火炎モデルに必要な輸送係数は, 複数成分の拡散係数, 熱拡散係数, および熱伝導率を含んでいる^{9)-10), 15)-19)}。イオンの拡散係数は, それぞれに対応する中性化学種と等しいと仮定した。この仮定は, 低イオン密度における簡単な Langevin 理論によって正しいことが確認されている。また, 両極性拡散は無視している。

熱化学データは, 各化学種の生成熱, 生成エントロピー, および比熱を含む。中性化学種に関するこれらのデータは, 主に JANAF の熱化学データ表²⁰⁾と, 参考文献²¹⁾⁻²⁴⁾から引用した。イオン種に関する熱化学データの収集は特に困難で, 例えば, 定圧比熱はほとんどの場合与えられていない。しかしながら, 一個の電子が分子種の比熱におよぼす影響は小さいと考えられるので, イオン種の比熱はそれに対応する中性化学種の比熱と同等であると仮定できる。さらに, 電子は単原子の理想気体として扱えると仮定した。すなわち, その標準生成熱はゼロで, 標準エンタルピーは温度に対して直線的に増加すると仮定した。

5.2. 反応機構の検証

現時点においては, コロナ放電を印加した火炎の化学種分布に関する実測データがないので, 印加しない火炎での中性化学種やイオン種に関する実測データと我々の計算結果を比較した。実測データは, Westmoreland らの $\text{C}_2\text{H}_2\text{-O}_2$ 火炎のデータ¹²⁾⁻¹³⁾を引用した。火炎の条件は, 圧力 20 torr, 流速 0.5 m/sec, 混合ガスの組成は $\text{C}_2\text{H}_2:46.5\%$, $\text{O}_2:48\%$, $\text{Ar}:5\%$ で当量比 2.4 である。また, この実測データは, Eraslan, Brown により化学イオン反応を含む数値計算⁷⁾⁻⁸⁾と比較・検討がなされているので, 本計算においてもこれらの結果と比較し, 本モデルの妥当性について検討した。

Fig. 1 にすず生成経路において重要なイオン種 C_3H_3^+ , C_5H_3^+ , C_7H_3^+ , C_9H_3^+ の分布を示す。図より, 上流側で立ち上がり 1 cm 付近でピークに達するといった傾向は実測データをよく模擬している。しかし, C_5H_3^+ イオンのピーク位置が, 実測データより 0.5 cm 程度上流側にある点に違いが見られる。また, 実測データではどのイオンも火炎下流で速やかにモル分率が減少しているが, 計算値ではピーク後緩やかに減少しているという違いも見られる。これらの相違の原因については, 実測データの妥当性も含め検討中である。

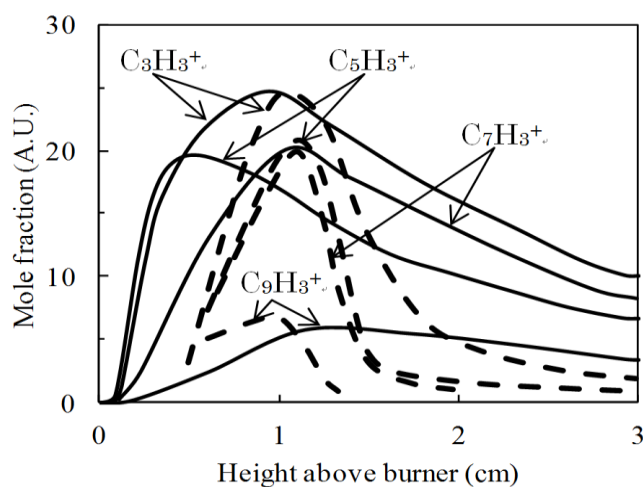


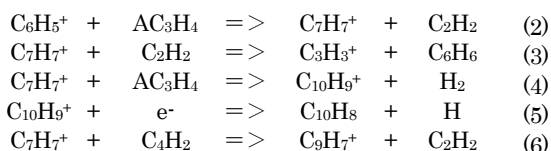
Fig.1 Concentration distributions of C_3H_3^+ , C_5H_3^+ , C_7H_3^+ and C_9H_3^+ . Solid lines are calculation data and dashed lines are experimental data.

5.3. 結果および考察

火炎の条件は、圧力 20 torr, 混合ガスの組成は C_2H_2 : 47.5 %, O_2 : 47.5 %, Ar : 5 % で当量比 2.5 である。また、電子を計算モデルに組み込むことで放電による電子注入を模擬し、その有無における化学種とイオン種のモル濃度変化と、各素反応の速度変化を比較した。なお、電子の注入量は、炭化水素火炎の反応帯に通常含まれる 0.01%程度と仮定した。

Fig. 2,3 に化学種(C_6H_4 , C_6H_6 , $C_{10}H_8$) ($C_6H_5^+$, $C_7H_7^+$, $C_9H_7^+$, $C_{10}H_9^+$)とイオン種のモル濃度の時間履歴を示す。実線は通常の燃焼を模擬した結果、点線は反応ガスに電子を注入した結果を示している。電子注入によってイオン種及び C_6H_6 , $C_{10}H_8$ のモル濃度は減少し、 C_6H_4 のモル濃度は増加していることが分かる。この結果より、 C_6H_6 などの芳香族炭化水素やイオン種などのすす前駆物質が電子注入により減少することですす生成が抑制されると考えられる。

Fig. 4 に反応速度の時間履歴を示す。(a)は通常の燃焼を模擬した結果、(b)は反応ガスに電子を注入した結果を示している。電子注入により



の反応速度が減少していることがわかる。この結果、注入した電子が直接的あるいは間接的にこれらの反応に関与していることが考えられる。また、電子注入により



の反応速度が増加していることが分かる。これらのことから電子注入が特定の反応を抑制あるいは活性化することを示している。

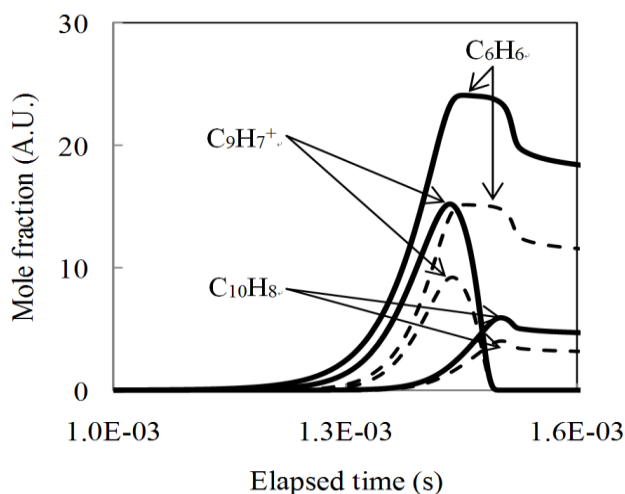


Fig.2 Mole fraction profiles of soot precursors such as C_6H_6 , $C_{10}H_8$ and $C_9H_7^+$. Solid lines are normal prediction and dashed lines are discharged prediction.

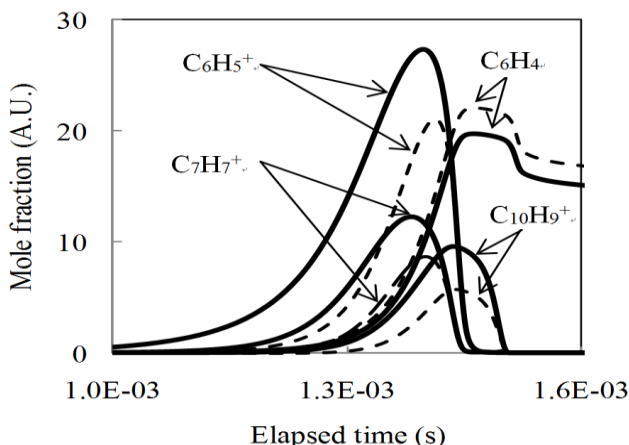
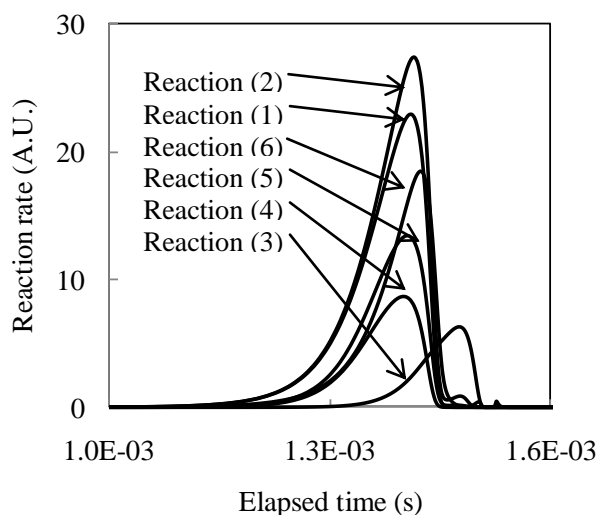
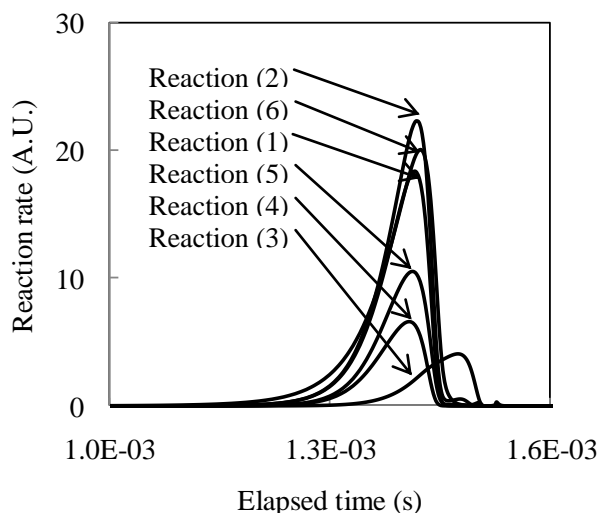


Fig.3 Mole fraction profiles of C_6H_4 , $C_6H_5^+$, $C_7H_7^+$ and $C_{10}H_9^+$. Solid lines are normal prediction and dashed lines are discharged prediction.



(a) Normal reaction

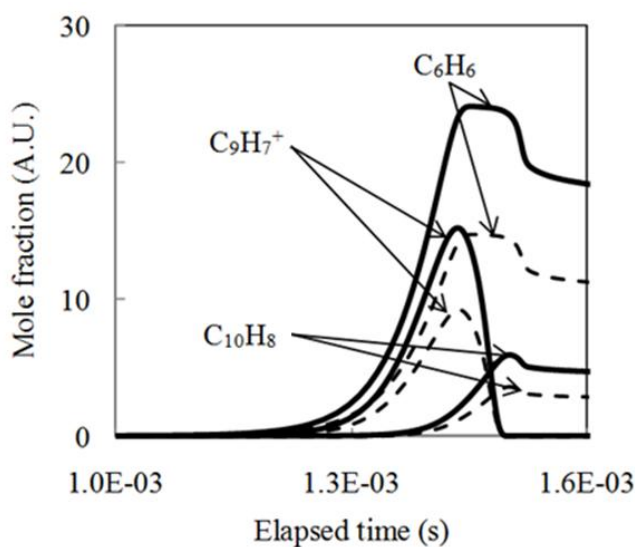


(b) Electron injection

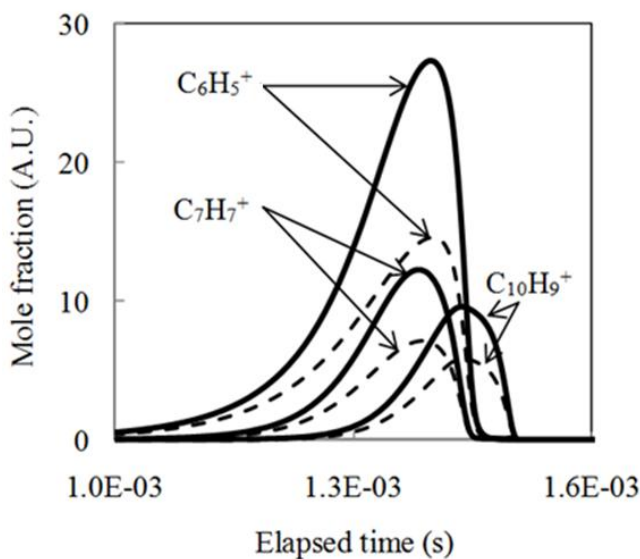
Fig.4 Reaction rate

モル濃度が減少した C_6H_6 , $C_{10}H_8$, $C_9H_7^+$ はすすの前駆物質であり, これらの抑制は電子注入により生じると考えられる. 以下に, 計算結果を基にすすの前駆物質抑制の機構を簡単まとめた.

Fig. 5 に反応(7)の反応速度定数を 1000 倍したときの化学種とイオン種のモル濃度の時間履歴を示す. ここで, 速度定数を増加させ, 反応速度を疑似的に増加させたときに生じるモル濃度変化に, 電子注入時と同様の変化が見られた. この結果から, 電子注入時に生じる各値の変化には, (7)の反応が強く関与していることが確認された. さらに, (7)の反応の活性化による $C_6H_5^+$ のモル濃度減少がすす前駆物質抑制の前段階として生じていることがわかる. それにより反応(2)の反応速度の減少が生じ, 反応(3), (6)に関与している $C_7H_7^+$



(a) Soot precursor such as C_6H_6 , $C_{10}H_8$ and $C_9H_7^+$



(b) Other species such as C_6H_4 , $C_6H_5^+$, $C_7H_7^+$ and $C_{10}H_9$

Fig.5 Mole fraction profile. Solid lines are the normal prediction and dashed lines for augmented reaction rate of (7) by 1000.

のモル濃度減少が生じる. このモル濃度減少から反応(3), (6)の反応速度が減少することで, C_6H_6 と $C_9H_7^+$ のモル濃度減少につながることを確認された.

同様に反応(7)の反応速度増加によって生じる $C_7H_7^+$ のモル濃度減少は反応(4)の反応速度を抑制し, $C_{10}H_9^+$ のモル濃度減少に作用する. その結果, 反応(5)で生成される $C_{10}H_8$ のモル濃度減少につながることを確認された.

6. 実験

$C_2H_2-O_2$ 燃焼反応シミュレーションより, 注入した電子がすす前駆物質である PAH の抑制に寄与する結果が示された. そこで, 炭化水素火炎の電子注入による PAH の抑制を確認するためにレーザー誘起蛍光法 (laser induced fluorescence method) を利用し, 放電印加時の火炎中 PAH 濃度の挙動を調査した. LIF 法は非接触で計測が可能で高い空間分解能と時間分解能を持っている.

6.1. 実験装置

LIF 法による PAH 計測に使用した装置構成図を Fig.6 に示す. 使用した装置は Nd-YAG レーザ(NEW WAVE RESEARCH, Tempest), ディレイパルスジェネレータ(Stanford Research Systems, DG-535)(以下 DG), ICCD カメラ(ORIEL, InstaSpec V)と分光器(SOLER III, MS3504i)である. Nd-YAG レーザは励起源として第三高調波(355 nm)を使用し, Q スイッチの内部トリガを計測同期のための開始トリガとして使用した. DG は ICCD カメラのインテンシファイヤの起動時間とタイミングを制御し, ICCD カメラと分光器で蛍光データを取得した. バンドルファイバが接続された分光器に微弱な蛍光を導入するため, 二枚のレンズを用いてファイバに結像している. また PC は ICCD カメラと分光器を制御し, 測定波長領域,

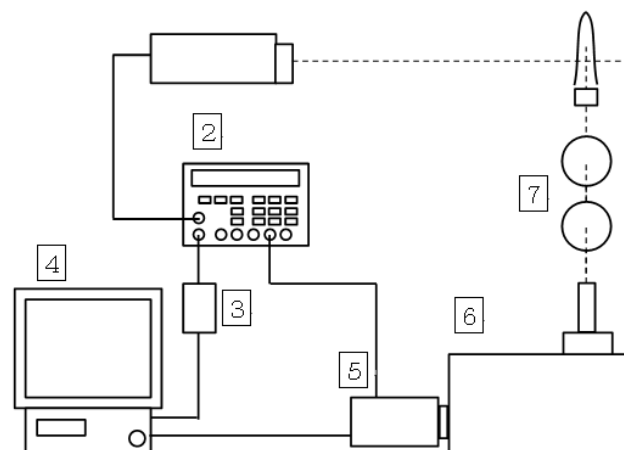


Fig.6 Schematic of measurement apparatus consists. 1.Nd-YAG laser (355 nm), 2.Delay pulse generator, 3.Multi I/O box, 4.Control PC, 5.ICCD camera, 6.Spectroscope, 7.lens.

積算回数, ゲイン等の設定に使用する.

火炎に印加する AC コロナ放電は, オシレータ, 電源, フライバックトランスで構成した放電装置より生成される. 放電周波数は 14kHz に設定し, 電流値は装置回路に直列に挿入した μ アンメータから直接読み取る. また, 放電を安定化させるため $1M\Omega$ のセメント抵抗を直列に挿入し, 電極には $\phi=1$ mm の銅線を使用した.

測定対象となる炭化水素火炎はプロパン-空気の燃料過濃予混合火炎とし, 常温常圧下で計測を行った. バーナは口径 10 mm \times 10 mm で, 素材に SUS303 を選択した.

6.2. 実験方法

本研究では PAH の励起源に Nd-YAG レーザの第三高調波(355 nm)を用いた. ベンゼン環の数が少ない PAH の吸収バンドは紫外領域に存在する²⁵⁻²⁷ ため, 取得した LIF-signal に関与する PAH をおおまかに絞ることが可能となる. Fig7 に代表的な PAH の常温・液相での吸収, 蛍光波長を模擬的に示したものを示す. このほかの数多くの PAH もそれぞれ固有の吸収, 蛍光波長とスペクトル形状を持つことが知られている²⁷. 図からわかるように分子量の小さい PAH は吸収, 蛍光波長が短波長側に, 大きい PAH は長波長側に持っている. 図より本研究で使用する Nd-YAG レーザの第三高調波(波長 355 nm)ではベンゼン環の数が 3~6 環程度が励起され波長が 300~500nm 程度の蛍光が観測されると考えられる. そのため, 波長が 300~500nm の範囲で測定を行った.

PAH の蛍光寿命は 100ns オーダである²⁵ ため, レーザ照射と計測系の動作タイミングの正確な同期を必要とする. そのため, Nd-YAG レーザの Q スイッチの内部トリガ(10 Hz)を計測開始トリガとした. 蛍光開始のタイミングはレーザー照射後から若干の遅れ

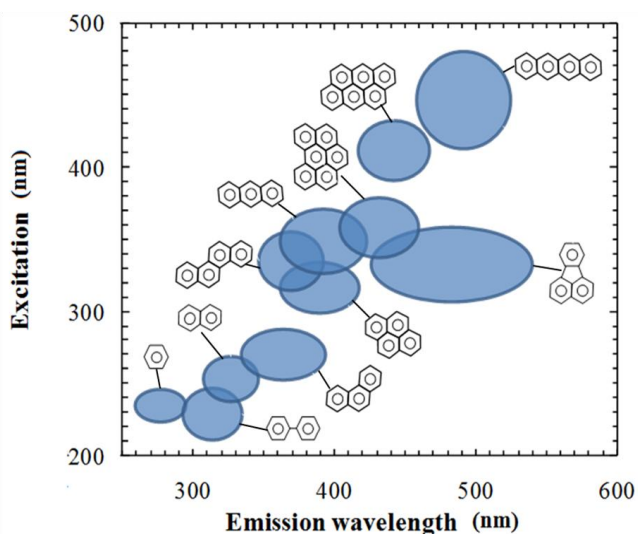


Fig.7 Schematic Excitation - Emission of representative PAHs in liquid phase at room temperature²⁷.

があるものの, 高強度なレーザー光がすず粒子により散乱するため, 取得信号から励起光の散乱光を取り除くため数十 ns の遅延を設ける必要がある²⁷. ゲート幅は, ns オーダの蛍光寿命を考慮し 100 ns とした.

取得データの積算回数と計測回数は, S/N 比をなるべく高くするために実験に応じて設定している. また, 起動タイミングおよびレーザーエネルギーのばらつきを評価するため, 蛍光強度を波長で積分した値を算出した.

火炎に対し放電を印加した際, 電極部から放出されるイオンが中性粒子と衝突することでコロナ風が発生する. この現象より, 燃焼ガス外部から導入した空気流中に含まれる酸素が局所的な予混合燃焼をもたらすことが懸念される. そのため, 火炎に印加する放電に低電流の直流コロナ放電を選択した. 事前の調査において, 放電印加による火炎形状の変化はほとんど確認されなかったため, 外部から導入されると考えられる酸素量は極めて少ないものと考えられる.

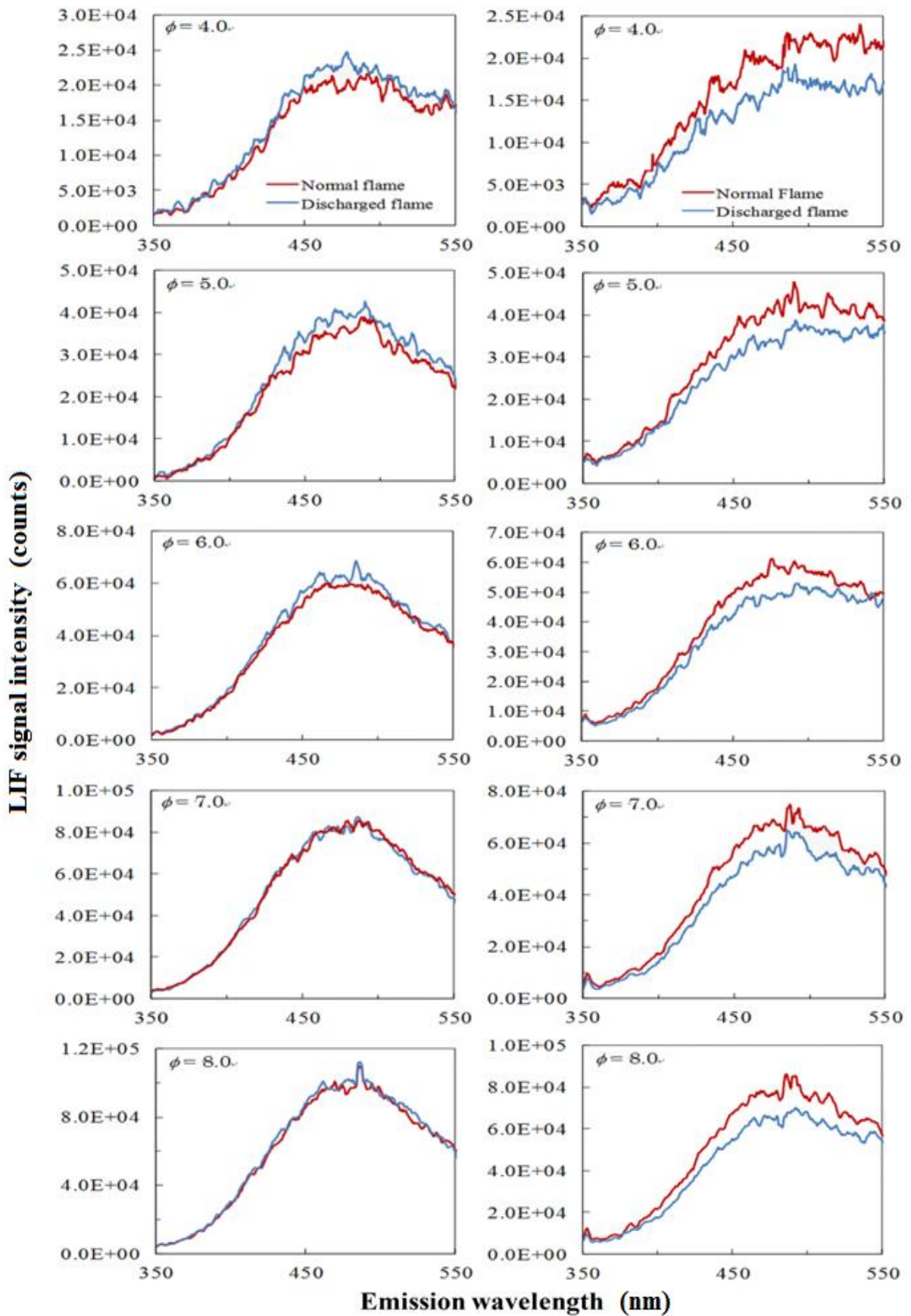
火炎に印加する放電の電流値は, 火炎形状が変化しない範囲($< 20 \mu A$)で可変させた. 電極間隔は火炎の厚みに応じて設定し, 火炎上流部での放電印加がすず抑制に対して有効であることから, バーナ上端から 5 mm 上方に電極を設置した. コロナ放電を印加する対象は, プロパンと酸素の燃料過濃な予混合火炎 ($\phi=4.0 \sim 8.0$) とした.

計測地点は, 火炎の状態が層流に保持されている上流部に設置した電極部より下流部にて行った. また, 火炎中心軸から横方向に ± 5 mm 離れた 2 点で計測を行い, 陽極側と陰極側における影響の違いを調査した.

6.3. 結果および考察

Fig.8 にパルスコロナ放電を燃料過濃な予混合火炎上流部に印加した際の PAH の蛍光スペクトルを示す. (a) は陽極側, (b) は陰極側における LIF-スペクトルの計測結果である (図中の青線). なお, 比較のため放電なしの場合の LIF スペクトルも示す (図中の赤線). 計測は互いにバーナ上端から 15 mm 上方, かつ火炎中心軸から ± 5 mm それぞれの電極側に近接し地点で実行した. 印加する放電の電流値はすべて $20 \mu A$ とした.

Fig.8 (a) (陽極側) より, 燃料過濃な予混合火炎では, コロナ放電を印加した場合, PAH の LIF スペクトルは, 放電なしの場合と比べて変化がほとんどみられないことがいえる. 特にその傾向は, 当量比 $\phi=6.0 \sim 8.0$ の場合において顕著に示された. 当量比 $\phi=4.0, 5.0$ の場合, 放電印加時の LIF スペクトル強度がピーク値付近 (450~500 nm) において, 放電なしの場合よりも大きいことが確認できる. しかしながら, これらにおける蛍光強度の差はスペクトルを持つノイズ成分と同等の大きさを持つため, PAH の濃度変化があったとしてもかなり微少なものと考えられる.



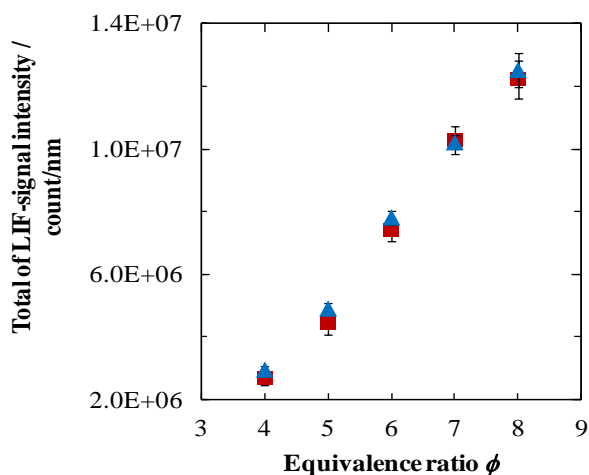
(a) Anode side

(b) Cathode side

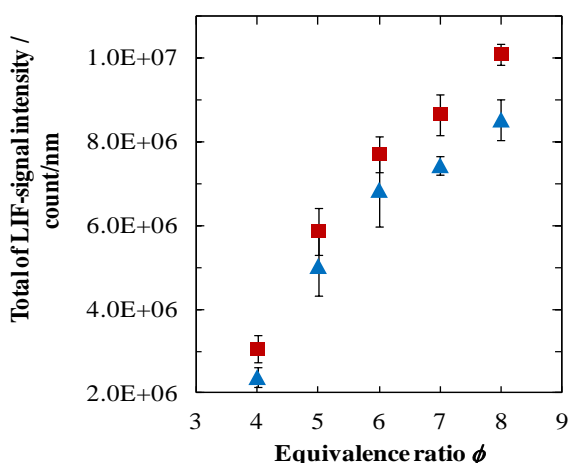
Fig.8 LIF spectra from PAHs for fuel-rich propane flames with $\phi = 4.0 \sim 8.0$

一方, Fig.8 (b) (陰極側) より, 放電印加時の PAH の LIF スペクトル強度は, 放電なしの場合と比較すると, 小さい値をとることが確認された.

Fig.9 は, Fig.8 で示した LIF スペクトルを波長で積分した総蛍光強度と火炎の当量比の関係を示している. 図中の赤色のプロットは放電なしの場合の結果で, 青色のプロットは放電印加時の結果を示す. Fig.9 (a) (陽極側) では, 放電なしの予混合火炎から取得した蛍光強度は放電印加時の結果とほぼ一致することが再現された. Fig.9 (b)において, 放電なしの場合よりも蛍光強度が小さくなるのがわかる. 本実験の場合のように放電印加の有無で火炎形状に変化がない場合, 局所的な火炎温度にも変化がないといえる. すなわち, この場合における PAH の LIF 強度の変化は, 局所的な PAH の濃度変化を反映しているといえる. 従って, 本実験条件で放電を印加した場合における PAH の LIF 強度の減少は, この場合における PAH 濃度が減少したことによるといえる.



(a) Anode side



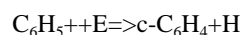
(b) Cathode side

Fig.9 Signal intensity of fluorescence by PAH vs equivalence ratio. The vertical axis in two graphs means value which integrated the fluorescence spectra by emission-wavelength

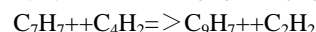
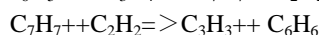
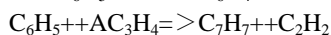
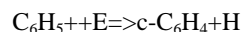
7. まとめ

本研究ではコロナ放電を火炎に印加した際のすす抑制機構の詳細を解明するため, 数値解析と燃焼生成物計測の2つのアプローチから調査を実行した.

数値解析においては, 荷電粒子による燃焼反応の初期段階における影響を模擬するため, イオン化反応を含んだ反応機構をもとに計算した. その結果, 電子注入によりすす生成に重要なベンゼン, ナフタレンといった前駆体のモル濃度減少が, 放電の注入電子によって生じることが示された. また, 計算の初期条件に電子を加えず, 特定の反応速度パラメータを操作することで, 抑制機構の一番重要な素反応を抽出した. その結果,



の再結合反応が注入電子により速度増加を示すことで, すす前駆体の生成に寄与する化学種を消費し, すす生成に寄与しない別の種を生成する作用が抑制効果に対して重要な役割を持つことが示された. ほかに複数の素反応が影響することも考慮すべきではあるが, 反応速度とモル濃度の値が支配的なものから選択し, 抑制機構を構築している. この予測により, 後に生成される炭素数の多い化学種の濃度が減少するという結果が生じ, 最終的にすすの排出量減少という結果に至るであろうことが予想される. つまり, 下記のような生成機構の流れが, 注入電子の影響を受けることで, すす生成が抑制されると考えられる.



レーザ誘起蛍光法を用いた燃焼生成物計測では, プロパン-空気の等量比が 4~8 の燃料過濃な予混合火炎を測定対象とし, 反応領域付近への低電流コロナ放電による PAH 抑制の詳細を調査した. その結果, 陰極側で PAH 蛍光強度が減少することが確認された. つまり, 電子注入により火炎中の PAH 濃度が減少することが確認された.

参考文献

- 1) F. J. Weinberg et al., Proc. Roy. Soc. (London), A289, pp.192-205, 1965.
- 2) F. J. Weinberg et al., Proc. Roy. Soc. (London), A319, pp.351-371.
- 3) H. Ohisa et al., Combust. Flame 116, pp.653-661, 1999.
- 4) M.S.Cha et al., Combust. Flame 141, pp.438-447
- 5) Y.Kim et al., IEEE Transaction on Plasm Science, 34-6, pp.2532-2536

- 6) I. Glassman, Combustion, Second Edition, Academic Press, 1987.
- 7) M. Frenklach et al., 20th Symposium on Combustion, pp.887-901,1984.
- 8) M. Frenklach et al., Combust. Flame 110, pp.173, 1997.
- 9) J. Appel et al., Combust. Flame 121, pp.122-136, 2000.
- 10) R. C. Brown et al., Combust. Flame 73, pp.1-21, 1988.
- 11) R. C., Brown et al., Combust. Flame 74, pp.19-37, 1988.
- 12) P. R. Westmoreland et al., in Tenth Symposium (International) on Combustion, pp.773-782, 1986.
- 13) P. R. Westmoreland, Experimental and Theoretical Analysis of Oxidation and Growth Chemistry in Fuel Rich Acetylene Flame, Ph.D. Dissertation,
- 14) R. J. Kee et al., Sandia National Laboratories Report No. SAND 85-8240, 1985.
- 15) http://www-cms.llnl.gov/combustion/nc7_2_tran.dat
- 16) <http://web.mit.edu/anish/www/tranmitsymp2004.dat>
- 17) <http://web.mit.edu/anish/www/transhrjbh1101.dat>
- 18) <http://web.mit.edu/anish/www/transymp2002.dat>
- 19) <http://maemail.ucsd.edu/~combustion/cermech/sandiego20021001.trans>
- 20) M. W. Chase, Jr., NIST-JANAF Thermochemical Tables, 4th ed., National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, 1985.
- 21) <ftp://ftp.technion.ac.il/pub/supported/aetdd/thermodynamics/BURCAT.THR>
- 22) <http://www.ca.sandia.gov/HiTempThermo/cgi-bin/bldMlist.cgi>
- 23) <http://web.mit.edu/anish/www/thermhrjbh1101.dat>
- 24) http://www-cms.llnl.gov/combustion/nc7_2c_therm.txt
- 25) K.Satoh, et al. *Transactions of the Japan Society of mech. Engineers*, SeriesB, Vol.70, No.692, pp.221-227.
- 26) K.Satoh, et al. *Transactions of the Japan Society of mech. Engineers*, SeriesB, Vol.70, No.696, pp.281-288.
- 27) T.Aizawa, et al. *Transactions of the Japan Society of mech. Engineers*, SeriesB, Vol.70, No.690, pp.194-200.