

ラマン散乱法による輝炎内の燃料濃度分布測定*

林田和宏*¹, 天谷賢児*²
佐藤桂司*³, 新井雅隆*²Measurement of Fuel Concentration Distribution in a Sooting Flame
through Raman ScatteringKazuhiro HAYASHIDA, Kenji AMAGAI,
Keiji SATOH and Masataka ARAI*⁴*⁴ Department of Mechanical System Engineering, Gunma University,
1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma, 376-8515 Japan

Raman scattering technique with KrF excimer laser was applied to obtain a fuel concentration distribution in a sooting flame. In the case of sooting flame, fluorescence from polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and laser-induced incandescence (LII) from soot particles appeared with Raman scattering. These background emissions overlapped on the Raman scattering. In order to separate the Raman scattering and the background emissions, polarization property of laser-induced emissions was utilized. Since the background emissions were depolarized whereas the Raman scattering was highly polarized, it is possible to subtract the background emissions from the overlapping signal of the Raman scattering and the background emissions. Subtracting the emission signals for the electric vector of the laser light perpendicular and parallel to the direction of observation allows to extract the precise Raman signals. By using this technique, detailed fuel concentration distribution in sooting flames could be obtained based on Raman scattering.

Key Words: Spectroscopic Measurement, Laser, Flame, Combustion, Raman Scattering

1. 結 論

ラマン散乱法は、 N_2 , O_2 , H_2O , CO_2 や炭化水素分子等の燃焼場における主要化学種を、非接触で定量的に計測することができるという極めて優れた特徴を有する⁽¹⁾。このため、ラマン散乱法は燃焼解析に有力な計測手段として、これまでに水素火炎⁽²⁻⁴⁾や予混合火炎^(5,6)などの基礎的な火炎を中心に広く適用されてきた。また、近年では実用燃焼装置における計測^(7,8)に適用された例も見受けられる。

しかしながら、従来のラマン計測のほとんどが火炎内にすす粒子を含まない不輝炎を測定対象としており、

輝炎のラマン計測は困難とされてきた。これは、測定場にすす粒子が存在すると、目的とするラマン散乱光に加えてすすのレーザ誘起赤熱発光⁽⁹⁾ (LII: Laser-Induced Incandescence) が発生するためである。また測定位置によっては、すすの前駆物質とされる多環芳香族炭化水素 (PAH: Polycyclic Aromatic Hydrocarbon) の蛍光⁽¹⁰⁾も発生し、これらの光 (まとめてバックグラウンド光と呼ぶ) がラマン散乱光に重畳して検出されるために、輝炎内の正確なラマン散乱光強度を求めることは困難とされてきた。

近年、レーザ光の偏光特性を利用し、過濃予混合火炎のラマン計測で問題となる PAH 蛍光成分の除去を行った例が報告されている^(11,12)。これは、ラマン散乱光強度がレーザ光の偏光に強く依存するのに対し、PAH 蛍光強度は偏光に拠らずほぼ一定であることから、偏光方向の異なる二つのレーザ光を用いることで PAH 蛍光成分を差し引くという原理である。輝炎の場合は、

* 原稿受付 2004年9月2日。

*¹ 正員, 木更津工業高等専門学校 (〒292-0041 木更津市清見台東2-11-1)。*² 正員, 群馬大学工学部 (〒376-8515 桐生市天神町1-5-1)。*³ 正員, 群馬大学大学院工学研究科。

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

PAH 蛍光に加え LII の発生も問題となるが、LII の発光強度もレーザー光の偏光に抛らず一定であるならば、同様の手法でラマン散乱光の検出の可能性が考えられる。

本報では、各種炭化水素燃料による輝炎を対象として、ラマン計測を試みた結果の詳細について報告する。特に、すす生成メカニズムを考察する上で極めて重要な燃料分子に注目し、燃料分子からのラマン散乱光より未燃領域における燃料成分の詳細な濃度分布を求め、さらに、同じ火炎内の PAH とすすの濃度分布も明らかにし、火炎内における燃料、PAH およびすすの位置関係を明確にする。

2. 実験装置および方法

2.1 ラマン散乱光解析装置

本研究で使用したラマン散乱光解析装置の構成を図 1 に示す。光源には 248nm のレーザー光が得られる KrF エキシマレーザー (Lambda Physik 社, LPX-150T) を使用した。レーザー光の線幅は 3pm (FWHM)、パルス幅は 17ns で、247.8 ~ 248.8nm の範囲内で発振波長を変化させることができる。この波長範囲には OH⁽¹³⁾, hot-O₂⁽¹³⁾, NO⁽¹⁴⁾ の励起バンドが存在するため、レーザー光の波長はこれらの励起波長より外れる 248.469nm に設定した。

ラマン計測では、レーザー光の偏光の純度が高いほどラマン散乱光強度が強くなり計測に有利であるため、レーザーは偏光度の高いシングルパスモード⁽¹⁵⁾で発振を行った。電場ベクトルで規定したレーザー光の偏光方向 (以降単に偏光と呼ぶ) は、複屈折板の機能を有する MgF₂ 板をレーザー光路上に設置し、レーザー光の MgF₂ 板への入射角 (MgF₂ 板の法線とレーザー光軸のなす角) をステッピングモーターでコントロールすることで変化した。MgF₂ 板は水平方向に照射されるレーザー光の光軸に対して垂直に設置し、鉛直上方を軸として MgF₂ 板を回転させた。

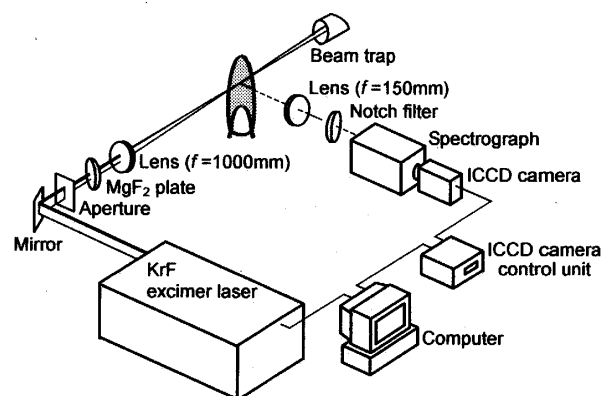


Fig. 1 Experimental setup

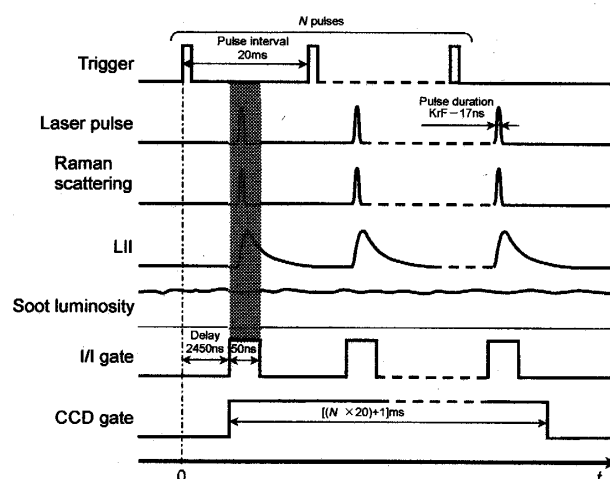


Fig. 2 Timing chart of the data acquisition

レーザー光は焦点距離 $f=1000\text{mm}$ のレンズで集光して火炎に照射した。高エネルギーのレーザー光によるブレイクダウン⁽¹⁶⁾やすすの蒸発⁽¹⁷⁾を避けるために、測定対象火炎はレンズの焦点より 50mm 手前に設置し、レーザー光のエネルギーは 1 パルスあたり約 70mJ に設定した。ラマン散乱光や蛍光などレーザー光の照射に伴う発光は分光器 (Chromex 社, 250IS) でスペクトルに分解し、ICCD カメラ (La-Vision 社, FlameStar II) で撮影した。分光器は Czerny-Turner 型の回折格子分光器で、1200grooves/mm (ブレイズ波長 250nm) の回折格子を有する。なお、分光器の入射スリット幅は 50 μm で、この時の分解能は約 0.2nm である。また、輝炎部にレーザー光を照射する際には、すすに起因する非常に強度の強いミー散乱光が発生するため、ICCD カメラの保護を目的として 248 \pm 4nm の光をカットするノッチフィルタを分光器の手前に設置した。

拡散火炎の計測では、LII や火炎自発光の影響を抑えるために ICCD カメラのイメージインテンシファイア (I/I : Image Intensifier) のゲート時間を適切に設定する必要がある。図 2 にレーザーのトリガーパルス、各種発生光、ならびに ICCD カメラのタイミングの関係を表したタイミングチャートを示す。まず、任意の数 N (本研究では $N=20$ に設定) のトリガーパルスが、解析用コンピュータよりエキシマレーザーと ICCD カメラにそれぞれ送られる。このトリガーにより、 N パルスのレーザー光が 20ms の間隔 (発振周波数 50Hz) で照射される。I/I のゲートは火炎自発光の検出を最小限に抑えるために、レーザー光が測定場に届くわずか手前でゲートが開くように Delay を設定した。本研究では、レーザーと測定系が持つ時間遅れ (およそ 2430ns) に、レーザーから測定場までの光路長による時間遅れ (20ns)

を加味して Delay を 2450ns とした。図中模式的に示すように、LII の緩和時間は数百 ns と LIF よりもかなり長い⁽¹⁸⁾、VI のゲートが短いほど LII の影響を押えることができる。このため、本研究ではレーザーのジッター (± 20 ns 程度) を考慮してゲート時間を 50ns に設定した。また、CCD のゲートは VI の作動中は常時開放とした。

2.2 測定対象火炎 本研究における測定対象火炎は、メタンとプロパンを燃料とする拡散火炎とアセチレン/空気予混合火炎である。図 3 に火炎を形成するために用いたバーナの概略図と火炎の直接写真を示す。燃料は内径 6mm のステンレス製円管より鉛直上方に噴出させ、メタン (燃料流量 0.08L/min) およびプロパン拡散火炎 (燃料流量 0.05L/min) は火炎長さ L_f が 30mm となるように形成した。一方、アセチレンを燃料とした場合、拡散火炎にするとすすの生成量が極めて多く、計測が不可能なレベルであったために予混合火炎を用いることとした。アセチレン予混合火炎は、内炎高さ 9mm、当量比 $\phi=2.7$ (燃料流量 0.34L/min, 空気流量 1.5L/min) の層流火炎とした。いずれの火炎も安定化を図るために、火炎周囲に四分円ノズルで整流した空気流を形成した。空気流の温度 T_a は室温 (300K) で、四分円ノズル出口における空気流の噴出速度は 0.5m/s とした。

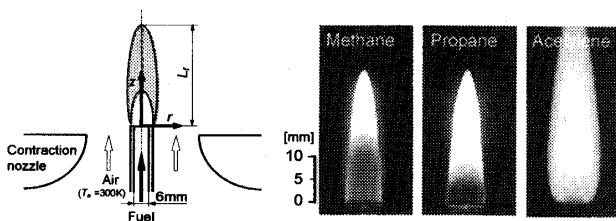


Fig. 3 Photographs of the test flame

3. 実験結果および考察

3.1 各種発光強度の偏光依存性 本研究で使用したレーザー光は高い直線偏光性を有しており、 MgF_2 板に対するレーザー光の入射角 θ を変化させることで、レーザー光の偏光をレーザー光軸まわりに回転させることができる。火炎長さ $L_f=30$ mm のメタン拡散火炎のノズルからの高さ $z=6$ mm の位置にレーザー光を照射し、レーザー光の偏光によるラマン散乱光と LII, PAH-LIF の発光強度の変化を調べた。その結果を図 4 に示す。横軸の入射角 θ は、 MgF_2 板の法線とレーザー光軸が一致する場合が 0° を表し、その前後でなす角を \pm で区別した。なお、ラマン散乱光については、火炎の外側に現

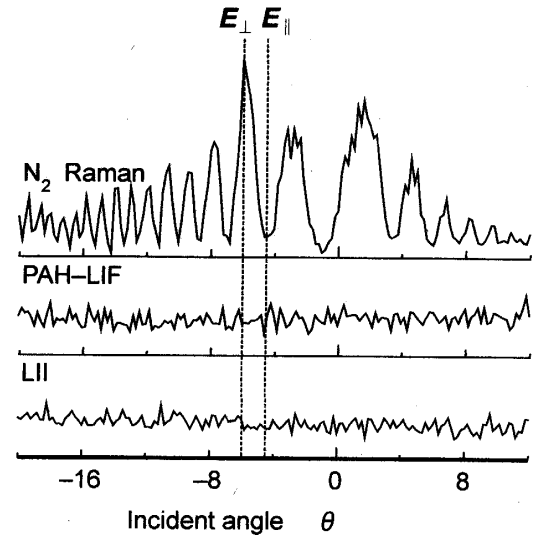


Fig. 4 Polarization property of laser-induced emissions

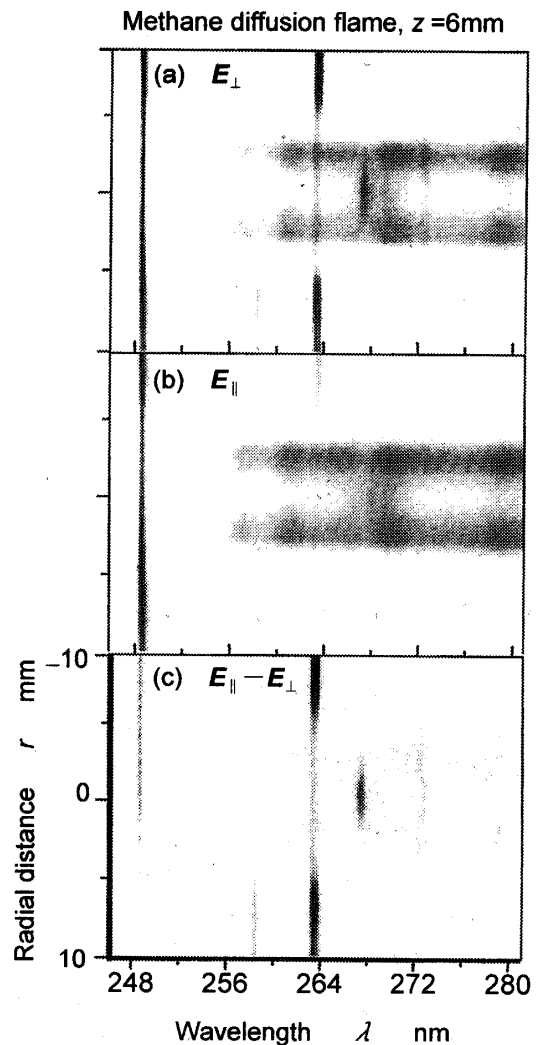


Fig.5 Averaged raw images from the methane diffusion flame ($z=6$ mm)

れる周囲空気の N_2 からのラマン散乱光の強度変化を例に示した。また、LII の強度変化は PAH-LIF の存在しない 800nm において、PAH-LIF は LII がほとんど存在しない 260nm において測定を行った。この図より、ラマン散乱光強度はサインカーブに似た変化をするのに対し、PAH-LIF と LII の強度はほぼ一定の値となっていることが分かる。

分子の振動運動において分子対称性が保存される場合、ラマン散乱光はレーザー光の偏光の影響を強く受けて偏光して発生する。ラマン散乱光の偏光方向はレーザー光の偏光方向に依存し⁽¹⁹⁾、散乱方向は偏光方向に依存するため、図 4 のような結果が得られる。これに対し蛍光は、本来はラマン散乱光と同様に偏光して発生するものの、大気圧下では原子・分子の衝突が頻繁に行われ偏光が解消されるために⁽²⁰⁾、その強度に変化が見られなかったと考えられる。また、LII はすす粒子が高温となり発光するものであるため、その発光強度はレーザー光の偏光に無関係であると考えられる。ラマン散乱光の強度は、レーザー光の偏光方向が発光の観測方向に対して垂直 (E_{\perp}) のときに強く、平行 (E_{\parallel}) のときに弱くなる。以降、ラマン散乱光強度が最大となる θ が -6° と、これに近い角度で極小値を取る -4.6° に MgF_2 板の角度を設定し計測を行うこととした。

3.2 輝炎内のラマン散乱光の検出 レーザ光をメタン拡散火炎のノズルからの高さ $z=6mm$ の位置に照射して得られる発光スペクトル像を図 5 に示す。スペクトル像の横軸は発光波長 λ を表し、縦軸は火炎半径方向の距離 r (火炎中心軸が $r=0mm$) に対応している。スペクトル像は、20 パルス分の積算強度を 100 回平均して求めた。(a) はレーザー光の偏光を E_{\perp} に設定して得られたスペクトル像で、ラマン散乱光、PAH-LIF、および LII 等のバックグラウンド光より構成されている(ただし 248nm 付近の光はレイリー散乱光である)。

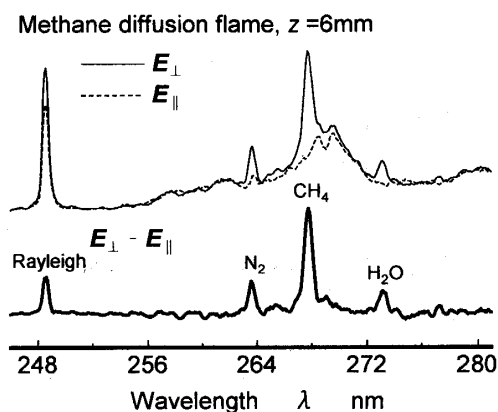


Fig. 6 Spectral profiles of the flame axis ($r=0mm$) in Fig. 5

(b) は E_{\parallel} のレーザー光で得られたスペクトル像で、このスペクトル像はバックグラウンド光と偏光が解消された若干のラマン散乱光より構成されている。(a)と(b)の計測で使用したレーザー光は、偏光が異なるのみで、波長とエネルギー密度は同一であるため、(b)のバックグラウンド光は(a)にも同じ強度分布で存在していると考えられる。したがって、(a)から(b)を差し引くことにより、目的とするラマン散乱光のみを抽出することが可能となる。その処理を行ったスペクトル像が(c)である。(c)を見ると、(a)と(b)の 256nm 以上の波長域に現れていた連続スペクトル成分が除去され、ラマン散乱光のみが残る様子が分かる。

図 5 の火炎中心軸 $r=0mm$ の位置における発光強度のプロファイルを図 6 に示す。このプロファイルより、 E_{\parallel} のバックグラウンド成分の強度は E_{\perp} と同レベルであり、差し引きの処理によるラマン散乱光の抽出は妥当であると判断できる。ピーク波長より判断すると⁽²¹⁾、このスペクトルには N_2 、 CH_4 、および H_2O のラマン散乱光が現れていることが確認できる。

図 5 のスペクトル像の縦軸は火炎半径方向に対応しているため、各ラマン散乱光の縦軸のプロファイルは火炎半径方向の一次元の分子濃度分布を表す。図 7 に CH_4 のラマン散乱光のピーク波長 (267.3nm) における火炎半径方向のプロファイルを示す。図 6 と同様に、 E_{\perp} より E_{\parallel} のバックグラウンド成分を差し引くことで、 $(E_{\perp} - E_{\parallel})$ で表される火炎半径方向の一次元のメタン濃度分布を求めることができる。これを火炎の測定高さを変えて測定を行うことで、輝炎内の二次元状の燃料濃度分布を求めることができる。また本研究では実施していないが、散乱光強度より定量的な濃度を求める方法の一つとして、既知の濃度の校正用ガスからの散乱光強度と、これと同一のレーザー光強度・光学系で得られる散乱光強度との強度比より、定量的な濃度が求められる可能性が考えられる。

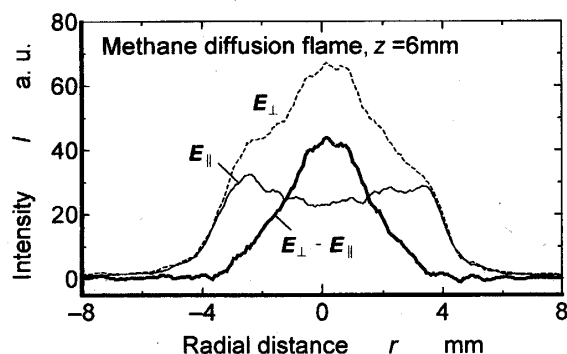


Fig. 7 Radial profiles at 267.3nm in Fig. 5

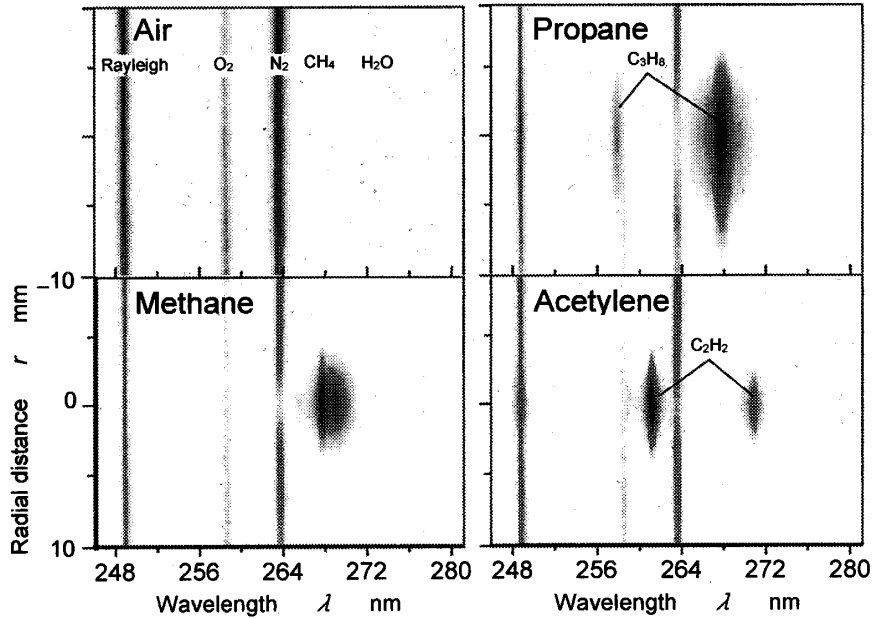


Fig.8 Spectra of Raman scattered lights from methane, propane, and acetylene gases

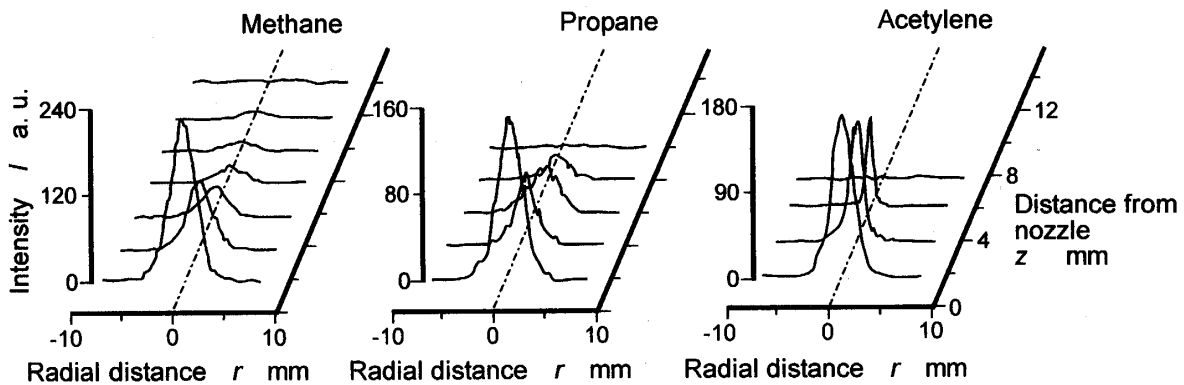


Fig.9 Fuel concentration distributions in the flames

3・3 輝炎内の燃料、PAH、すす濃度分布 本研究で使用した燃料であるメタン、プロパン、アセチレンのラマン散乱光の発光波長を確認するために、バーナノズルより噴出させた燃料ガスにレーザー光を照射し、燃料分子のラマン散乱計測を行った。得られたスペクトル像を図8に示す。比較のために室内空気にレーザー光を照射して得られたスペクトル像も合わせて示す。空気のラマン計測では、258nmにO₂、263.2nmにN₂、そして272.7nmにH₂Oのラマン散乱光が確認できる。メタンのラマン散乱光は267.5nm付近にピークを持つ分布で検出され、プロパンも同じ波長に強いピークが現れている。プロパンはその他に260nm付近にも弱いピークが確認できる。アセチレンは261nm付近に強いピークが、271nm付近に弱いピークが現れている。

メタンおよびプロパンの267nm、アセチレンの

261nmに現れるラマン散乱光のピークについて、火炎半径方向のプロファイルを火炎の各高さにおいて求め、燃料濃度分布を測定した結果を図9に示す。いずれの火炎もノズル出口より下流に行くに従い燃料濃度が減少する様子が分かる。メタンはノズル出口からの距離 $z=14$ mm、プロパンは $z=10$ mm、アセチレンは $z=8$ mmでラマン散乱光が検出されなくなった。なお、メタンおよびプロパン拡散火炎とともにすす生成過程でアセチレンが形成されることから、アセチレンのラマン散乱光が発生することが予想されたが、その発光が極めて微弱であったためか確認することはできなかった。また、プロパン拡散火炎中ではラマン散乱光がプロパンとメタンのラマン散乱光より構成される可能性があるが、プロパンとメタンのラマン散乱光の検出波長は同一であることから、それらの分離はできなかった。

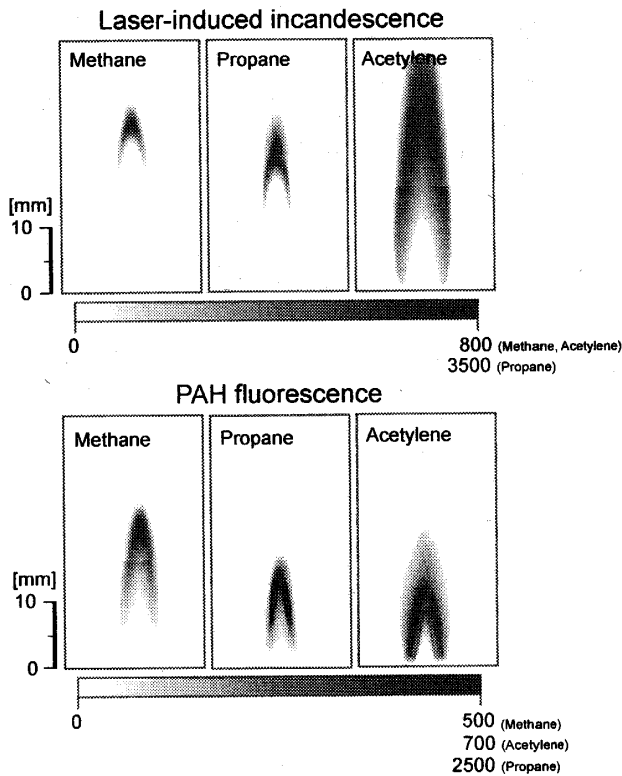


Fig. 10 Concentration distributions of LII and PAH

PAH やすすの生成メカニズムを議論するために、既報⁽²²⁾で示した PAH 計測法を用いて火炎内の PAH 蛍光強度分布を求めた。また、LII 発光強度分布も合わせて図 10 に示す。まず、PAH 蛍光強度分布について見ると (図 10 下段)、メタンおよびプロパン拡散火炎の場合は PAH 蛍光がノズル出口近傍より検出されており、PAH が未燃領域に広く分布している様子が伺える。また、メタンよりもプロパン拡散火炎の方が、ノズル出口により近い位置で PAH 蛍光が現れている。火炎中心軸上の両者の最大蛍光強度について比較すると、プロパン (発光強度 $I=2240$ a.u.) はメタン ($I=489$ a.u.) よ

りも約 4.6 倍大きな値を示しており、プロパン拡散火炎の方が火炎内の PAH が高い濃度で存在することが分かる。またこれらの火炎では、PAH は輝炎発光の見える火炎内にしか存在しないことが分かる。一方、アセチレン予混合火炎の場合、PAH は火炎面近傍において急激に生成され、その後下流に行くに従い徐々に濃度が減少する様子が伺える。次に、LII 強度分布についてみると (図 10 上段)、メタンおよびプロパン拡散火炎では、PAH の蛍光が消える辺りより LII が発光しているように見える。なお、火炎中心軸上の LII 発光強度の最大値を比較すると、メタンは $I=823$ a.u.、プロパンは $I=3615$ a.u. とプロパンはメタンの約 4.4 倍で、PAH 蛍光強度と同程度の倍率であった。また、アセチレン予混合火炎の LII 強度分布についても、メタンおよびプロパン拡散火炎と同様に、PAH 蛍光の下流で LII が発光していることが分かる。

燃料、PAH およびすすの位置関係を詳細に議論するために、火炎中心軸上の各発光のプロファイルについてまとめた。その結果を図 11 に示す。まずメタン拡散火炎について見ると、ラマン散乱光で示される燃料濃度はノズル出口直後では急激に、その後 $z=8$ mm 付近より緩やかに減少する様子が分かる。PAH は燃料が減少するにつれて増加し、 $z=20$ mm 付近でピークを迎える。さらに、このピーク付近で LII が現れ始め、PAH が消滅する $z=26$ mm 付近でピークを迎え、火炎高さである $z=30$ mm 付近で LII は検出されなくなる。プロパン拡散火炎もメタン拡散火炎とほぼ同様の傾向を示すが、PAH とすすのピーク位置はメタン拡散火炎よりも上流に位置している。そして、未燃領域が狭くなる反面、すすの領域が広がっている。

一方アセチレン予混合火炎では、燃料濃度は内炎の火炎面までほぼ直線的に濃度が減少している。PAH は内炎の火炎面上流においても検出されており、反応帯

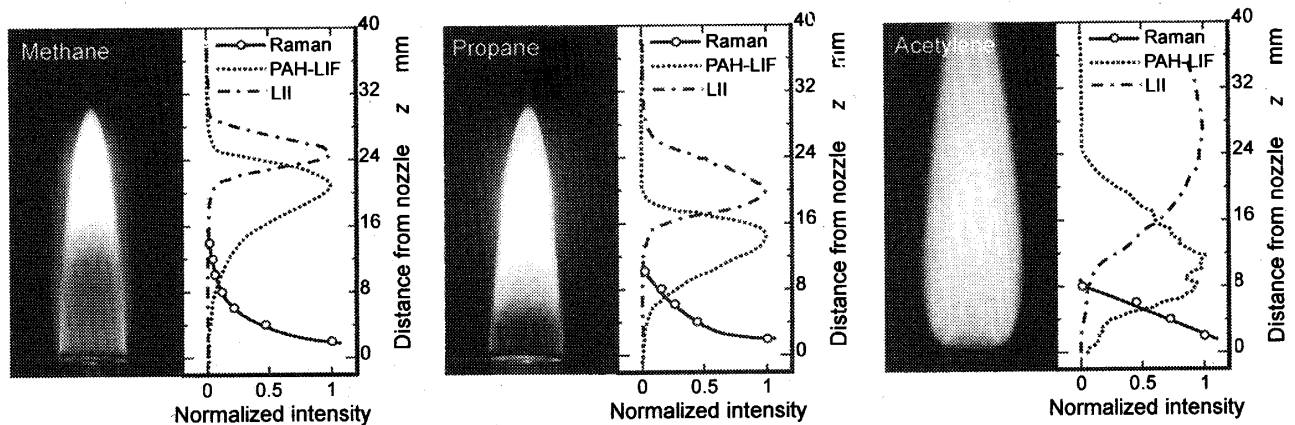


Fig. 11 Axial distributions of fuel, PAH, soot

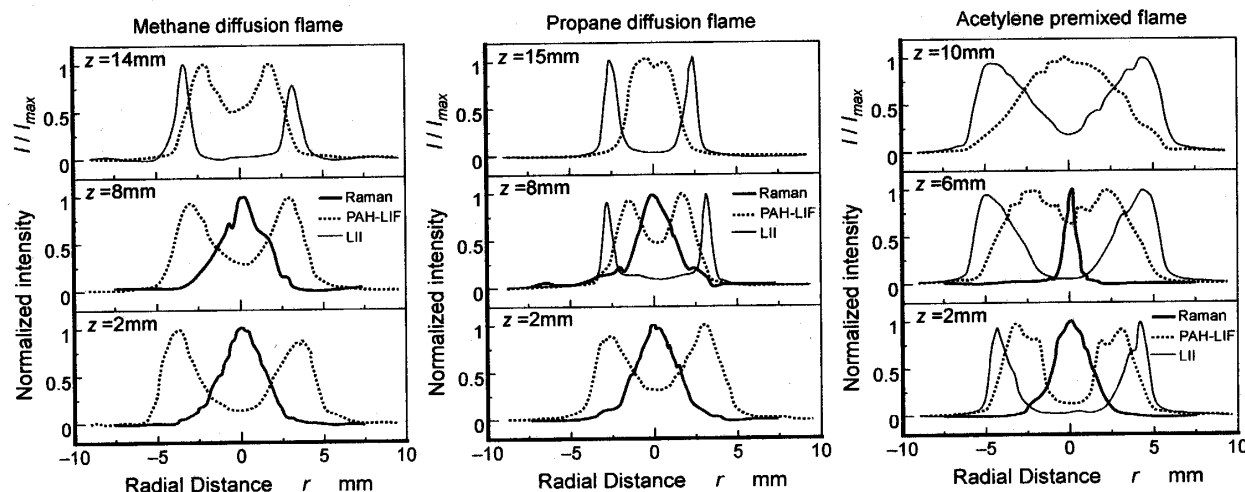


Fig.12 Radial distributions of fuel, PAH, and soot

からの予熱によってすでに PAH が形成されることが分かる。PAH 濃度は $z=8\text{mm}$ においてピークを迎え、その後わずかに減少してから $z=11\text{mm}$ 付近において再びピークを迎える。 $z=9\text{mm}$ における濃度の減少については再現性が確認されており、この位置は内炎高さと一致していることから、反応帯上流で生成した PAH の一部が反応帯において燃焼したために濃度が減少した可能性が考えられる。PAH は $z=11\text{mm}$ 以降緩やかに減少していき、 $z=24\text{mm}$ あたりで消滅する。これに対し LII は、拡散火炎の場合と同様に、PAH 濃度のピーク付近より現れ始め、PAH が無くなる位置において最大値を取る。

図 12 に、火炎半径方向の各発光のプロファイルを示す。いずれの火炎も、図 11 に示した火炎中心軸上のプロファイルと同様の傾向を示している。すなわち、燃料濃度の減少に伴い PAH 濃度が上昇し、燃料が無くなる位置付近において PAH 濃度がピークとなる。また、PAH 濃度が減少を始める位置よりすす濃度が立ち上がり、PAH が無くなる位置付近においてすす濃度が最大値を取る。図 11 および図 12 より、従来提唱されているように^(23,24)、PAH は燃料分子の熱分解に続く諸反応によって形成され、PAH が前駆体となってすすが形成される様子を明確に読み取ることができる。

4. 結 論

レーザ光の偏光特性を利用し、輝炎内のラマン散乱光を検出して燃料濃度分布測定を行った。以下に得られた主な結果を示す。

1. ラマン散乱光はレーザ光の偏光特性により、その強度が変化するものの、PAH 蛍光と LII の強度はレーザ光の偏光特性に依存しない。

2. 偏光特性の異なる二つのレーザ光を用いることにより、輝炎においてもラマン散乱光とバックグラウンド光の分離を行うことができた。
3. メタンおよびプロパン拡散火炎では、燃料濃度の減少率はノズル出口に近いほど高かった。また、アセチレン予混合火炎では、燃料濃度はほぼ直線的に減少し、反応帯付近において零となった。
4. いずれの火炎も、燃料濃度が減少するにしたがって PAH 濃度が上昇し、PAH 濃度の減少するにしたがってすす濃度が上昇した。

謝辞 本研究は、平成 16 年度双葉電子記念財団「自然科学研究助成」の援助のもとに実施されたものである。ここに心より謝意を表す。また、一部は、鉄道建設・運輸施設整備支援機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」、および平成 15 年度科学研究費補助金 (15560169) を利用させて頂いた。なお、本研究の遂行には本学学生松井亮太郎氏 (現：日本電産トソク株式会社) に協力を頂き、群馬大学工学部特別設備である瞬間画像解析装置を利用させて頂いた。合わせて謝意を表す。

参考文献

- (1) Eckbreth, A. C., *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species Second Edition*, (1988), 209, Gordon and Breach Publishers.
- (2) Reckers, W., Hüwel, L., Grünfeld, G., and Andresen, P., Spatially Resolved Multispecies and Temperature Analysis in Hydrogen Flames, *Appl. Opt.*, **32-6** (1993), 907-918.
- (3) Nandula, S. P., Brown, T. M., and Pitz, R. W., Single-Pulse, Simultaneous Multipoint Multispecies Raman Measurements in Turbulent Nonpremixed Jet Flames, *Opt. Lett.*, **19-6** (1994), 414-416.

- (4) Brockhinke, A., Andresen, P., and Kohse-Höinghaus, K., Quantitative One-Dimensional Single-Pulse Multi-Species Concentration and Temperature Measurement in the Lift-Off Region of a Turbulent H_2 /Air Diffusion Flame, *Appl. Phys. B61*, (1995), 533-545.
- (5) Stephenson, D. A., Non-Intrusive Profiles of Atmospheric Premixed Hydrocarbon-Air Flames, *Proc. Combust. Inst. 17*, (1978), 993-999.
- (6) Barlow, R. S., and Miles, P. C., A Shutter-Based Line-Imaging System for Single-Shot Raman Scattering Measurements of Gradients in Mixture Fraction, *Proc. Combust. Inst. 28*, (2000), 269-277.
- (7) Grünefeld, G., Beushausen, V., Andresen, P., and Hentschel, W., Spatially Resolved Raman Scattering for Multi-Species and Temperature Analysis in Technically Applied Combustion Systems: Spray Flame and Four-Cylinder In-Line Engine, *Appl. Phys. B58*, (1994), 333-342.
- (8) Richter, M., Axelsson, B., Nyholm, K., and Aldén, M., Real-Time Calibration of Planar Laser-Induced Fluorescence Air-Fuel Ratio Measurements in Combustion Environments Using *in situ* Raman Scattering, *Proc. Combust. Inst. 27*, (1998), 51-57.
- (9) Shaddix, C., and Smyth, K. C., Laser-Induced Incandescence Measurements of Soot Production in Study and Flickering Methane, Propane, and Ethylene Diffusion Flames, *Combust. Flame*, **107** (1996), 418-452.
- (10) Petarca, L., and Marconi, F., Fluorescence Spectra and Polycyclic Aromatic Species in a *N*-Heptane Diffusion Flame, *Combust. Flame*, **78** (1989), 308-325.
- (11) Grünefeld, G., Beushausen, V., and Andresen, P., Interference-Free UV-Laser-Induced Raman and Rayleigh Measurements in Hydrocarbon Combustion Using Polarization Properties, *Appl. Phys. B61*, (1995), 473-478.
- (12) Knapp, M., Luczak, A., Beushausen, V., Hentschel, W., Manz, P., and Andresen, P., Polarization Separated Spatially Resolved Single Laser Shot Multispecies Analysis in the Combustion Chamber of a Realistic SI Engine with a Tunable KrF Excimer Laser, *Proc. Combust. Inst. 26*, (1996), 2589-2596.
- (13) Andresen, P., Bath, A., Gröger, W., Lülff, H. W., Meijer, G., and ter Meulen, J. J., Laser-Induced Fluorescence with Tunable Excimer Lasers as a Possible Method for Instantaneous Temperature Field Measurements at High Pressures: Checks with an Atmospheric Flame, *Appl. Opt.*, **27-2** (1988), 365-378.
- (14) Schulz, C., Yip, B., Sick, V., and Wolfrum, J., A Laser-Induced Fluorescence Scheme for Imaging Nitric Oxide in Engines, *Chem. Phys. Lett.*, **242** (1995), 259-264.
- (15) Grünefeld, G., Schlüter, H., Andresen, P., Rothe, E. W., Operation of KrF and ArF Tunable Excimer Lasers without Cassegrain Optics, *Appl. Phys. B62*, (1996), 241-247.
- (16) Bengtsson, P.-E., Aldén, M., Soot-Visualization Strategies Using Laser Techniques (Laser-Induced Fluorescence in C_2 from Laser-Vaporized Soot and Laser-Induced Soot Incandescence), *Appl. Phys. B60*, (1995), 51-59.
- (17) Bengtsson, P.-E., Aldén, M., Optical Investigation of Laser-Produced C_2 in Premixed Sooty Ethylene Flames, *Combust. Flame*, **80** (1990), 322-328.
- (18) Mewes, B., and Seitzman, J. M., Soot Volume Fraction and Particle Size Measurements with Laser-Induced Incandescence, *Appl. Opt.*, **36-3** (1997), 709-717.
- (19) 濱口宏夫・尾崎幸洋・寺前紀夫・尾鍋研太郎・堀田和明, レーザ分光計測の基礎と応用, (1992), 329, アイピーシー.
- (20) 幸田清一郎・田久保嘉隆, 火炎の分光学的計測とその応用, (1990), 38, 学会出版センター.
- (21) Rothe, E. W., and Andresen, P., Application of Tunable Excimer Lasers to Combustion Diagnostics: a Review, *Appl. Opt.*, **36-18** (1997), 3971-4033.
- (22) 佐藤桂司・林田和宏・天谷賢児・新井雅隆, 火炎中に生成される多環芳香族炭化水素のレーザー計測 (第1報, 時間分解計測によるレーザー誘起蛍光と赤熱発光の分離), 機論, **70-692**, B(2004), 1051-1057.
- (23) Calcote, H. F., Mechanisms of Soot Nucleation in Flames -A Critical Review, *Combust. Flame*, **42** (1981), 215-242.
- (24) Frenklach, M., and Wang, H., Detailed Modeling of Soot Particle Nucleation and Growth, *Proc. Combust. Inst. 23*, (1990), 1559-1566.