

■原著論文／ORIGINAL PAPER■

OH^{*}, CH^{*} ラジカル自発光を用いた予混合火炎の燃焼診断法についての考察An Approach to Combustion Diagnostics of Premixed Flame by Chemiluminescence of OH^{*} and CH^{*}瀬尾 健彦^{1*}・赤松 史光¹・芝原 正彦¹・香月 正司¹SEO, Takehiko^{1*}, AKAMATSU, Fumiteru¹, SHIBAHARA, Masahiko¹, KATSUKI, Masashi¹¹ 大阪大学大学院工学研究科 〒565-0871 吹田市山田丘2-1
Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

2005年10月29日受付; 2006年3月23日受理 / Received 29 October, 2005; Accepted 23 March, 2006

Abstract : Combinations of optical interference band-pass filter and photomultiplier are often used for detecting OH^{*} and CH^{*} chemiluminescences in examining the correlation between chemiluminescent intensities and the combustion quantities, such as equivalence ratio and temperature. Since we consider that the influence of continuous background emission on chemiluminescent emission intensities should not be ignored, we propose a technique for removing those influences on OH^{*} and CH^{*} chemiluminescent emission intensities measured by the combination of optical band-pass filters and photomultipliers. Moreover, the correlation between the actual chemiluminescent emission intensities without the influence of continuous background emission and the physical quantities has been investigated in the present study. By separating chemiluminescent emission intensities of OH^{*} and CH^{*} from continuous background emission intensities, it becomes possible to measure equivalence ratio using chemiluminescent emission intensities at any positions of a flame. This technique holds wider applicability than the conventional methods.

Key Words : Combustion, Spectroscopic measurements, Chemiluminescence, Temperature measurements, Rayleigh scattering, Continuous background emission

1. 緒言

火炎中のラジカル自発光, 特に OH^{*}, CH^{*}, C₂^{*} 自発光は, 計測が容易で時間連続的な計測が可能のため, 燃焼反応の強度や進行段階を示す指標として古くから用いられてきた[1-3]. また, ラジカル自発光強度を用いて層流ガス火炎[4,5], 乱流火炎[6], 噴霧火炎[7]の詳細構造の議論がなされている. ラジカル自発光強度は当量比, 温度や圧力といった物理量に強い影響を受けることが知られており, 各ラジカル自発光の強度比と予混合気の当量比には強い相関があることが報告されている[1,2,4,5]. また, 筆者らも温度とラジカル自発光強度の相関に関する報告を行なった[8].

これらの研究では, 分光計測のために狭帯域光干渉フィルタが用いられている. この手法は, 時系列計測が可能であり, 時間変動のある火炎の計測に対しては有効な手段となる. しかし, 炭化水素火炎のラジカル自発光強度を計測

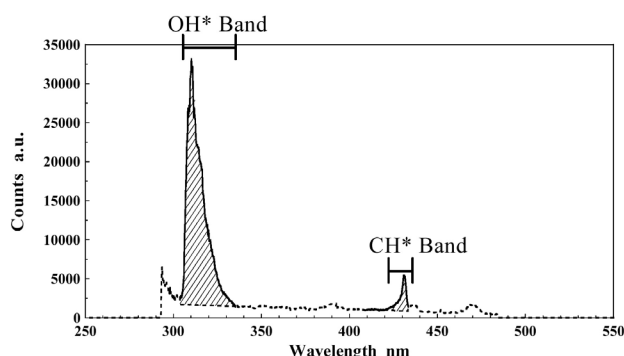


Fig.1 Example of emission spectrum of laminar premixed flame.

した場合, 図1の回折格子分光器を用いて得られた層流予混合火炎の自発光スペクトルの一例に示すように, 計測対象とするラジカル自発光に重畳する連続スペクトルも同時に計測することとなる. 特に OH^{*}, CH^{*} に着目すると, OH^{*}, CH^{*} 由来の自発光強度は図1中の斜線領域に相当するが, いずれも連続発光スペクトルによって底上げされて

* Corresponding author. E-mail: seo@combu.mech.eng.osaka-u.ac.jp

いる。この連続発光は 250 ～ 450 nm の波長範囲にみられる CHO の発光 (Vaidya Band) 及び 350 ～ 500 nm の波長範囲にある CO - O 再結合スペクトルによるものと考えられている。この連続発光スペクトルの影響を取り除くことは困難であり、とりわけ複数の自発光を同時に計測する研究においては考慮されていない。しかしながら、数値シミュレーション結果との定量的な比較に用いる実験データを取得する場合や、ラジカル自発光強度を用いて燃焼状態の議論をする場合には、連続発光を考慮することが必要不可欠である。

そこで本研究では、回折格子分光器を用いて火炎からのラジカル自発光強度と連続発光の火炎帯内での分布を調べた。そして、ラジカル自発光に重畳する連続発光強度の割合を見積もった結果、ラジカル自発光計測において連続発光の影響は無視できないことがわかった。そこで、時間的に変動のある火炎に対する計測を視野に入れ、回折格子分光器を用いて見積もった連続発光強度の割合を元に、高時間分解能を有する狭帯域光干渉フィルタと光電子増倍管によって得られる自発光強度を、OH*, CH* 由来のラジカル自発光強度と連続発光強度に分けることを試みた。また、連続発光強度をパラメータに用いることで従来よりも実用性の高い火炎診断法を提案した。

2. 実験装置および方法

図 2 に実験装置の概略図を示す。本研究で対象とした火炎は、スロットバーナ (□40 mm × 8 mm) によって大気圧下で安定に形成されたもので、当量比が 1.0 ～ 1.2 までの層流予混合火炎である。燃料には、すすの発生が少なく、また、レーリ散乱断面積が空気と等しく、燃焼過程における散乱断面積の変化が無視できる Dibble Fuel[9] (混合体積比: CH₄: H₂ = 37.9: 62.1) を用いた。この燃料は純メタンよりも燃焼速度が速いため、火炎形成のためには断面平均流速をあげる必要がある。しかし本実験で用いたバーナでは、そのような条件下では火炎を安定に形成することができなかった。そこで、窒素希釈 (体積分率で総流量の 23.3 %) を行ない、燃焼速度を下げることで火炎を安定して形成した。計測の際、背景光の影響と外気の流動の影響をできる限り除去するために、バーナ周囲に黒い隔壁を設けた。

受光系にはカセグレン光学系を基本に、新規に開発された、集光特性が最適化され、紫外から可視領域にわたって色収差の全くない集光光学系 (以降、MICRO と呼ぶ) [10,11] を用いた。しかし、MICRO をそのまま用いると、光路上に存在する火炎からの発光をも受光してしまい、自発光強度分布を広く見積もることになる。そこで、できる限り光路上からの光を排除するため、MICRO の前面にスリットの入ったマスクを付けた。火炎の局所自発光は MICRO によって集光され、紫外透過型光ファイバケーブル (三菱電線工業製, ST-U200D-SY, NA = 0.2, コア径 200 μm) によって回折格子分光器 (ORIEL 製, MS257) に送光さ

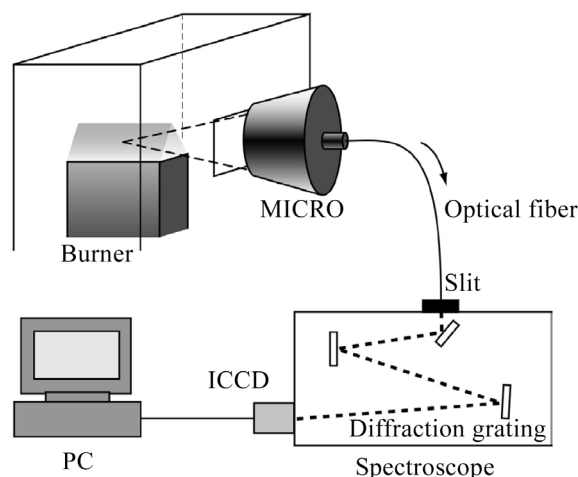


Fig.2 Experimental system with spectroscopy.

れる。回折格子分光器によって分光された局所火炎自発光スペクトルを ICCD カメラ (ANDOR 製 DH520 - 18F - 04) で検出し、PC によってスペクトルデータを記録した。なお、用いる回折格子の格子定数は 300 Line / mm であり波長分解能は 0.32 nm である。露光時間は 21 ms、積算回数は 300 回である。ICCD カメラのゲインは 0 としている。

座標系は、バーナの短軸方向に x 軸、長軸方向に y 軸、火炎下流方向に z 軸をとった。計測は、バーナを電動トラバサにより x 軸方向に離散的に移動させ、行なった。これは、手動で移動させた場合、外気の流動が起こり分光計測に影響が出ることを考慮したためである。計測位置を離散的に移動させるため、電動トラバサには 10 μm 程度のバックラッシュによる計測点のずれが生じる。そのためバーナの移動距離を 20 μm とし、さらにバックラッシュなどによるズレを分解能 1 μm のダイヤルゲージ (Mitsutoyo 製, 2119F) を用いて補正した。

3. 回折格子分光器による計測と処理方法

3.1. 火炎面とスリット角

本研究では、前述したように、できる限り測定体積部以外から光を受光しないようにするために、MICRO の開口部にスリット入りのマスクを設けた。スリット幅が細いほど測定体積部以外からの光を受光しにくくなり、空間分解能が高くなるが、同時に計測される自発光強度も弱くなる。特に、後述のレーリ散乱を用いた温度計測では、高温になるほどレーリ散乱光強度が弱くなるために、火炎帯において SN 比が悪くなり、温度計測の正確性を欠くこととなる。また、火炎のわずかな揺らぎにも敏感になるために、自発光を時系列計測した場合と離散的に計測した場合の自発光強度の短軸方向分布にずれが生じる。本研究における実験条件では、マスクがない場合でも、火炎の揺らぎの影響により、当量比が 1.0 ～ 1.4 の条件でしか計測できないため、

マスクを設けた場合のスリットの幅は実験条件から決定するしかない。そこで、量論から、CH* 自発光強度が最大となる当量比 1.2 までの火炎を対象として、スリットの幅は 20 mm と決定した。また、正確な火炎中の自発光強度分布を得るためには、火炎面とスリットが平行となっている必要がある。そのために、本研究ではスリットの傾きを一定として、供給混合気の流量を変化させることにより火炎面の傾きをかえることとした。火炎面の傾きは、火炎の直接写真から求めた。なお、一定としたスリットの設置角度は、水平方向から 71 度である。

3.2. 回折格子分光計測装置の感度校正

分光計測装置を構成する受光装置、光ファイバ、回折格子や CCD などの機器は、厳密にはそれぞれ反射・透過・回折・検出の特性に波長依存性を有するものが多い。これらの特性から、実験毎に計測装置が変われば、異なった発光強度比を評価してしまうこととなる。そこで本実験では、自発光スペクトル強度比をより厳密に求めるために、スペクトル校正用標準光源を用いて分光計測実験装置全体の感度の校正を行なった。スペクトル校正用標準光源の光源には 50 W のハロゲン・タングステン電球を使用した。

分光計測装置による検出感度の波長依存性は、以下の式 (1) で校正される。

$$I_{abs}^{flame}(\lambda) = I_{measured}^{flame}(\lambda) \frac{I_{abs}^{light}(\lambda)}{I_{measured}^{light}(\lambda)} \quad (1)$$

ただし、 $I_{abs}^{flame}(\lambda)$: 波長 λ における火炎自発光スペクトル強度の較正值、 $I_{measured}^{flame}(\lambda)$: 計測された火炎自発光スペクトル強度値、 $I_{abs}^{light}(\lambda)$: 波長 λ における標準電球の基準スペクトル強度値、 $I_{measured}^{light}(\lambda)$: 本計測系における標準電球のスペクトル計測値である。式 (1) の分数の部分が分光計測装置の感度校正係数となる。図 3 に本研究で用いた光学系の感度校正係数の波長依存性を 387 nm の値で規格化したものを示す。この感度校正係数と本研究で用いた分光計測装置で計測された火炎の自発光スペクトル強度とを掛け合わせることで、厳密な自発光スペクトルを得ることができる。なお、波長 300 nm 付近に感度校正係数の変動が見られるが、これはスペクトル校正用標準光源の紫外域での放射強度が弱いために、SN 比が悪くなるためであると考えられる。得られた感度校正係数には ICCD のピクセル感度や、光ファイバの波長依存性などを含んでいるため、近似などをせず、得られた値自体を用いることとした。ICCD の仕様により 260 nm 以下の波長領域と 485 nm 以上の波長領域で急激に感度がなくなるため、この領域の感度校正係数は 0 としている。また、293 nm 以下の波長領域は、後述の狭帯域光干渉フィルタの透過波長以下となるため 0 としている。これを見ると、本研究で用いた実験系では、校正波長範囲の中央付近がその前後と比較して校正定数が高く、ICCD 中央付近のピクセルの検出感度がその周囲よりも比較的弱いことがわかる。本研究では、この校正定数

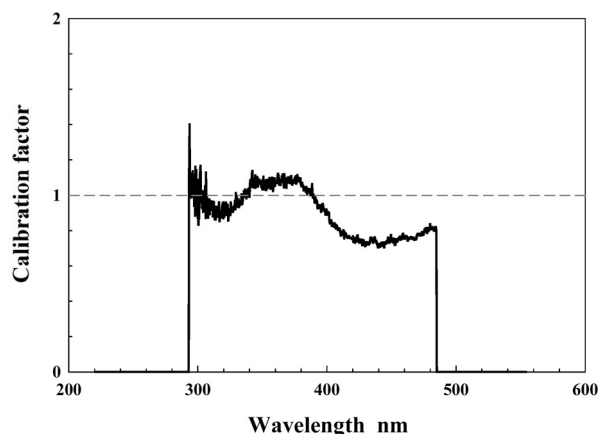


Fig.3 Calibration factor in functions of wavelength.

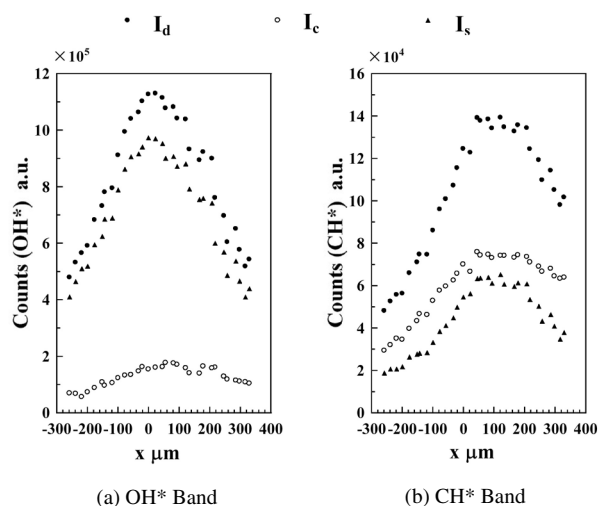


Fig.4 X-axis profile of chemiluminescent emission intensities measured by spectroscopy.

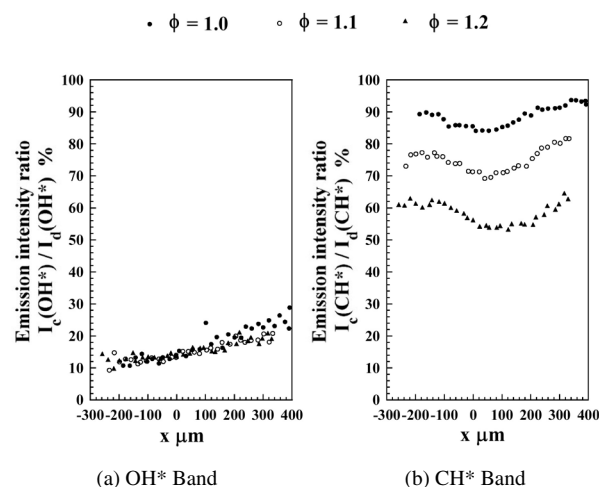


Fig.5 X-axis profile of I_c / I_d ratio.

を用いて自発光強度の較正を行なうものとする。

3.3. 分光計測

本研究での連続光の除去手法については、文献[3]で議論されている手法を取り入れる。バンド内の連続発光強度は、バンドの短波長側および長波長側の状態からの算出した。本研究においては、OH*(0,0)R, OH*(0,0)Q, OH*(1,1)R, OH*(1,1)Q を含む 303.7 nm ~ 335.3 nm の波長範囲を「OH* バンド」、CH*(0,0)を含む 416.6 nm ~ 442 nm の波長範囲を「CH* バンド」と呼ぶこととする。各バンドの波長範囲の短波長側を λ_1 、長波長側を λ_2 とする。OH* バンドの場合、長波長側の 335.3 nm ~ 344.8 nm の範囲で直線近似を行ない、その直線を OH* バンド内に延長し連続スペクトルとみなした。CH* バンドの場合、412 nm ~ 416.6 nm, 442 nm ~ 446.6 nm の範囲で直線近似を行ない、その直線を連続スペクトルとみなした。

図 4 に回折格子分光器を用いて得られた自発光スペクトルをもとに算出した火炎の計測自発光強度（以降 I_d とする）、連続発光強度（以降 I_c とする）および連続発光を除去した自発光強度（以降 I_s とする）の x 軸方向分布の一例を示す。自発光強度は、各バンド内でのスペクトル強度を積算した値とし、回折格子分光器を用いて得られたスペクトルの波長 λ での強度を $S_d(\lambda)$ 、連続スペクトルの波長 λ での強度を $S_c(\lambda)$ 、連続発光を除去したスペクトルの波長 λ での強度を $S_s(\lambda)$ とすると、以下の式 (2) で算出される。なお化学種別の発光強度は I_d (OH*) のように表すこととする。

$$I_d = \sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} S_d(\lambda)$$

$$I_c = \sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} S_c(\lambda) \quad (2)$$

$$I_s = \sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} S_s(\lambda)$$

また、 $S_d(\lambda) = S_c(\lambda) + S_s(\lambda)$ であることから I_d 、 I_c 、 I_s の間には式 (3) の関係が成り立っている。

$$I_d = I_c + I_s \quad (3)$$

スリットを設けた MICRO の集光率分布は複雑な形状となっており、計測した自発光強度から火炎帯を定義することは困難である。そこで I_d (OH*) が最大となる位置を原点 $x = 0$ とし、その未燃側と既燃側で $x = 0$ 位置での I_d (OH*) の 1/2 となる位置の間を議論の対象とした。x が負の領域は未燃側、正の領域は既燃側となっている。図 4(a) より I_c (OH*) のピークは $x = 0$ ではなく既燃側にずれている。またこのピーク位置は、図 4(b) に見られるように、 I_d (CH*) のピーク位置とほぼ一致している。 I_c (CH*) については、 I_d (CH*) とはピーク位置は一致しているが、既燃側に向かうにつれて、 I_d (CH*) と比べ緩やかに減少している。これは、火炎帯の中で CH* 自発光の分布よりも連続発光の分

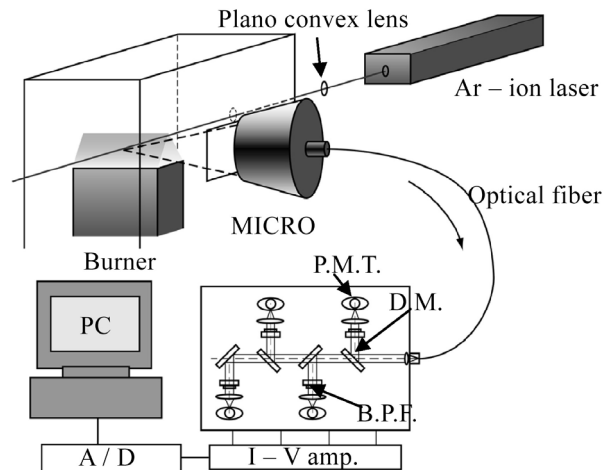


Fig.6 Experimental system with D.M. and B.P.F.

Table 1 Characteristics of D.M. and B.P.F.

(nm)		OH*	CH*	Ar ⁺
CH.1	D.M.(307.5)	97.0	97.5	93.5
CH.2	D.M.(431.5)		93.0	96.0
CH.3	D.M.(488.0)			46.0
B.P.F. transmit rate(%)		52.8	54.3	44.6
C.W.(nm)		306.6	431.1	488.1
FWHM(nm)		9.3	3.0	1.0
Total transmit rate(%)		51.2	49.2	18.4

*Italic Font means Reflection rate(%)

布のほうが既燃側に向かって広がっていることを意味している。

図 5 に当量比を変えた場合の、 I_c と I_d の比の x 軸方向分布を示す。図 5(a) に見られるように OH* バンドでは、当量比が変化しているにも関わらず I_c / I_d 分布にはそれほど大きな違いが見られず、また一様に未燃側から既燃側になるにつれ、計測される OH* 自発光強度に対しての連続発光強度の影響が大きくなるのがわかる。一方、図 5(b) に示す CH* バンドでは当量比が大きくなるにつれて、 I_c / I_d 分布の形状には変化があまりないが、全体として下方にシフトしている。つまり、当量比が大きくなるにつれて、得られた信号に対する連続発光の寄与割合が小さくなっているのがわかる。特に当量比が 1.0 の場合、得られた自発光強度のうち、CH* に起因するものは最大でも 20 % 程度しかないことが分かった。

4. 時系列計測システムへの適用

4.1. 実験装置及び方法

回折格子分光器を用いて見積もった連続発光の影響を、狭帯域光干渉フィルタを用いた温度とラジカル自発光の時系列計測システム（以降、高速波長分離器と呼ぶ）に適用す

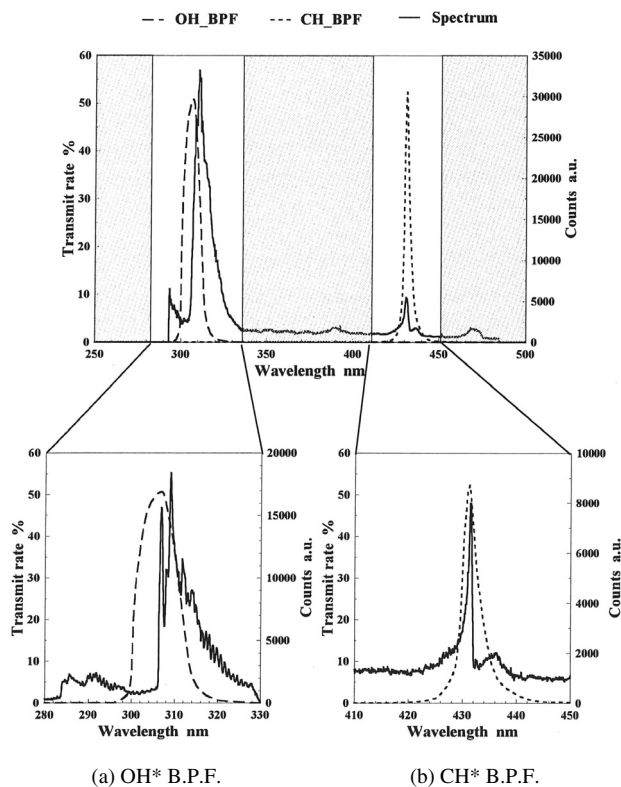


Fig.7 Profile of transmit rate of B.P.F.

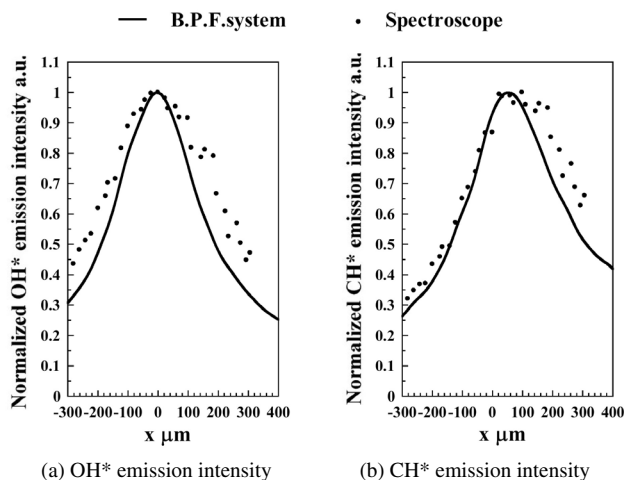


Fig.8 X-axis profile of chemiluminescent emission intensities measured by B.P.F. and the spectroscope.

ることを試みる。温度計測手法としては、非接触かつ時系列計測の可能であるレーリ散乱法[9]を採用した。対象とした火炎は、前述の回折格子分光器での計測と同じものである。レーリ散乱光の光源として波長 488 nm のアルゴンイオンレーザ (Spectra Physics 社製, BeamLok2080, 有効出力 8 W) を用い、平凸レンズによってビーム径を絞ることで測定体積におけるレーザ光強度を上げ、SN 比を向上させた。実験装置の概略図を図 6 に示す。火炎からの OH*, CH* の各自発光, およびレーリ散乱光は回折格子分光器を用いた前述の実験と同一の受光系および光ファイバにより高速

波長分離器へと導かれ、内部の光電子増倍管により電流信号に変換される。OH*, CH* の各自発光, およびレーリ散乱光 (488 nm) の分離に用いたダイクロイックミラー (D.M.) と狭帯域光干渉フィルタ (B.P.F.) の仕様を表 1 に示す。表中の C.W. は狭帯域光干渉フィルタの透過中心波長, FWHM は半値幅を表している。また, OH*, CH* の自発光分離に用いた狭帯域光干渉フィルタの波長透過特性を図 7 に示す。左縦軸に狭帯域光干渉フィルタの透過率, 右縦軸にスペクトル強度 (counts) をとった。OH* 用の狭帯域光干渉フィルタは主に (0,0)R, (0,0)Q, (1,1)R ブランチを包含する透過特性, CH* 用の狭帯域光干渉フィルタは (0,0) ブランチに鋭いピークを有する透過特性を有している。

各発光の電流信号は, I/V 変換の後増幅され, ローパスフィルタにより高周波ノイズを除去されてサンプリングレート 100 Hz で A/D コンバータ (NEC 三栄製, DL2300) により 12 bit でデジタル記録される。また, FFT を用い計測装置の電気的ノイズ等の影響を除去した。計測の際には, バーナは電動トラバースにより, 一定速度 1.0 mm/s で x 軸方向にトラバースされ, x 軸 (短軸) 方向の火炎の局所温度と自発光強度分布を得る。この際, 計測の間隔は 10 μm となる。

高速波長分離器の第 3 チャンネル (3 ch, 中心波長 488.0 nm) で検出される発光には, 計測対象であるレーリ散乱光のほかに, 微弱ではあるが, 火炎からの連続発光が重畳している。この影響に関して, レーザ光を火炎に入射した場合のレーリ散乱光強度から, レーザ光を入射しない場合の計測電圧値をさしひくことにより取り除いた。

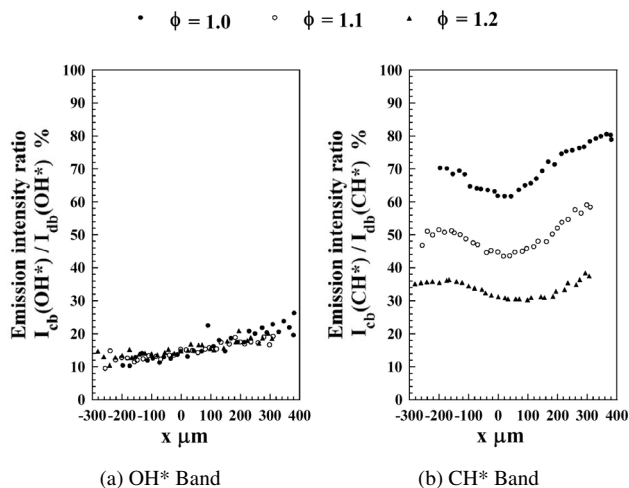
4.2. 適用手法

図 7 中の実線は火炎からの自発光スペクトルを示している。火炎からの自発光を, 狭帯域光干渉フィルタを透過させて光電子増倍管を用いて検出した場合, 計測される自発光強度は狭帯域光干渉フィルタの透過率に依存する。つまり, 波長 λ nm における, 自発光スペクトル強度を $S_d(\lambda)$, 狭帯域光干渉フィルタの透過率を $T(\lambda)$ (図 7 中の破線で表示) とすると, 狭帯域光干渉フィルタと光電子増倍管を用いて計測される自発光強度 I_{db} は, 自発光スペクトル強度と透過率の積 $S_d(\lambda) \times T(\lambda)$ を積算した値となり, 以下の式 (4) のように表される。

$$I_{db} = \sum_{\lambda_i}^{\lambda_s} \{S_d(\lambda) \times T(\lambda)\} \quad (4)$$

λ_s は狭帯域光干渉フィルタの透過率が 0 となる短波長側の波長, λ_i は長波長側の波長を表している。このようにして, 回折格子分光器で計測された自発光スペクトルを元に, 狭帯域光干渉フィルタを擬似的に適用した場合の自発光強度と高速波長分離器を用いて計測された自発光強度との比較を行なう。

図 8 の (a) に OH* 自発光強度, (b) に CH* 自発光強度の x 軸 (短軸) 方向分布の一例を示す。OH*, CH* とともに, 各自発光強度の最大値で正規化している。これらの結果から,


 Fig.9 X-axis profile of I_{cb}/I_{db} ratio.

両手法で計測された OH*, CH* とともに自発光強度の x 軸方向分布の形状はほぼ一致していることが分かる。しかしながら、回折格子分光器を用いて計測し得られた自発光強度分布の方が、高速波長分離器を用いて得られたものよりも若干広く分布していた。これは、回折格子分光器を用いた場合の積算中のノイズや火炎のわずかな火炎の揺らぎによるものであると考えられる。

図 9 に回折格子分光器によって計測されたスペクトルを元に狭帯域光干渉フィルタを擬似的に適用した場合の計測自発光強度 (以降 I_{db} とする), 連続発光強度 (以降 I_{cb} とする) の比 I_{cb}/I_{db} の x 軸方向分布を示す。なお、化学種別の自発光強度を I_{db} (OH*) のように表すこととする。

OH* の領域では、当量比が変化しても、分布形状には大きな違いは見られなかった。また、狭帯域光干渉フィルタを用いない場合の I_c/I_d 分布と比較しても分布形状および値に変化がほとんどないことがわかる。これは、対象とした OH* の波長領域全域で、特定の波長における計測自発光強度と連続発光強度の比の x 軸方向分布が、 I_{cb}/I_{db} (もしくは I_c/I_d) の分布の特性と同じであることを意味している。

一方、CH* の領域では、擬似的に狭帯域光干渉フィルタを用いない場合の I_c/I_d 分布と比べ分布形状にはさほど変化は見られないが、値に関しては大きく低下していることがわかる。つまり、計測自発光強度における CH* 自発光強度の割合が増えていることがわかる。これは狭帯域光干渉フィルタの透過特性によるもので、連続発光の割合が少なくなるバンドヘッド周辺の波長域での自発光を主に捕らえているからである。これは OH* にも言えることであり、OH* 領域で値に変化がみられなかったのは狭帯域光干渉フィルタの透過特性によるものである。したがって、本研究では、図 9 に示した OH*, CH* の比 I_{cb}/I_{db} の x 軸方向分布を OH* は対数、CH* は $x = -200 \mu\text{m}$ と $x = 200 \mu\text{m}$ の間で二次関数を用いてカーブフィットし補間する。このようにして補間した比 I_{cb}/I_{db} を、高速波長分離器を用いて計測されたラジカル自発光強度に適用することとする。

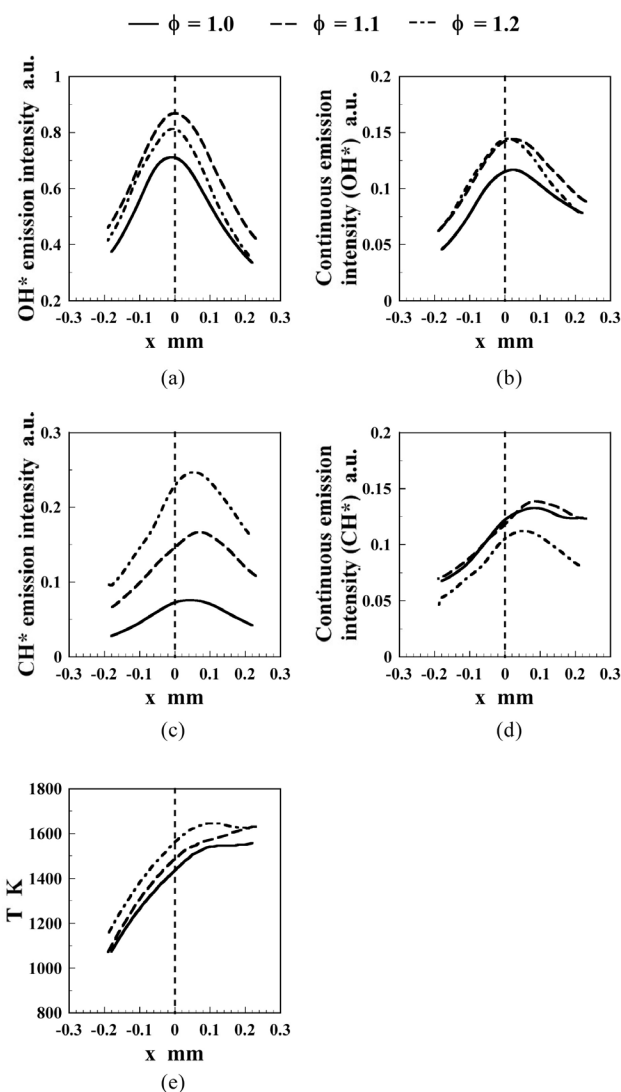


Fig.10 X-axis profile of chemiluminescent emission intensities and temperature in case of different equivalence ratio.

4.3. 適用結果

図 10 (a), (c) に連続発光による影響を取り除いた OH*, CH* の自発光強度, (b), (d) に OH*, CH* バンドに重畳する連続発光強度, (e) にレーリ散乱法により計測された温度を示す。なお、x 軸 (短軸) 方向の原点 ($x = 0$) は各当量比において計測された OH* 自発光強度が最大の位置とした。前述したように、 x が負の領域は未燃側、正の領域は既燃側を表している。OH* 自発光強度分布はピーク位置 ($x = 0$) を対称軸として、未燃側と既燃側で対称な形状となっている。しかし OH* バンドの連続発光強度は $x = 0$ でピーク値をとらず、またピーク位置より既燃側で次第に減少していく。CH* 自発光強度分布のピークは、 $x = 60 \mu\text{m}$ 付近に存在する。ピーク位置よりも未燃側での自発光強度の増加の割合は当量比の増加に伴い大きくなり、自発光強度自体も強くなることがわかる。CH* バンドの連続発光強度分布の未燃側での増加の割合は当量比によってほとんど変化が見られず、当量比が 1.2 になると強度自体も弱くな

る。このことから、CH* バンドの連続発光は、CH* ラジカル自発光とはまったく独立な挙動を示すと考えられる。

4.4 自発光強度を用いた物理量の推定

4.4.1 当量比の推定

自発光を用いた当量比の推定の可能性について調べる。当量比の推定は過去に自発光強度比を用いた手法[4,5]が報告されている。しかし、この手法は自発光強度の最大値を計測する必要があるため、最大値をとる計測位置以外からの自発光を用いて火炎の当量比を推定することはできない。実燃焼器内の火炎や時間変動のある火炎を対象とした場合、火炎帯内での計測位置が、いつも自発光強度が最大となる位置となるとは限らない。時間変動のあるような火炎の燃焼診断を行なう場合、火炎帯のどの位置を計測しても当量比が推定できる手法が必要となる。

図 9(a) より、OH* の波長領域での I_{cb} / I_{db} の分布には当量比による変化がないので、カーブフィットすることで以下の式 (5) のように定式化できる。

$$\frac{I_{cb}(\text{OH}^*)}{I_{db}(\text{OH}^*)} = 14.6e^{9.84E-4x} \quad (5)$$

式中の x は、火炎帯内での計測位置が OH* 自発光強度のピークをとる位置からどれほどずれているかを表すものである。左辺は計測から得られ、その値に相当する x が推算できる。そして、図 9(b) で示した当量比依存性の高い CH* の波長領域での I_{cb} / I_{db} と推算した x を用いることで当量比が推定できると考えられる。これは、少なくとも当量比が 1.0 ~ 1.2 においては火炎帯の任意の位置からの自発光強度を用いての当量比が推定可能となることを示している。今回は、本研究で用いた特殊な燃料および限られた条件下で計測した結果をもとに定式化したものであり、必ずしも他の燃料を用いた場合や異なる実験条件において式 (5) が成り立つわけではない。しかしながら、連続発光強度を新たにパラメータとして取り入れるといった手法を用いることで、従来では自発光強度の最大値を用いてのみ当量比の推定が可能であったが、本手法により、火炎帯の任意の位置における自発光強度を用いて、実用的な当量比の推定が可能となると考えられる。現在では式 (5) 中の x を、時系列計測に不利な回折格子分光器を用いて得られたスペクトルから求めているが、今後、現在の時系列計測システムを改良し、連続発光強度を同時に計測可能なシステムを新たに構築予定である。また、当量比の推定に絞って、メタンやプロパンなどの異なる燃料を用いた場合や他の実験条件においても、本手法の実用性の検証を行なっていく予定である。

4.4.2 温度の推定

自発光を用いた火炎の温度推定の可能性について調べる。図 11 にそれぞれの最大値で正規化した OH* と CH* の自発光強度を示す。(a) に連続発光除去後のもの、(b) に

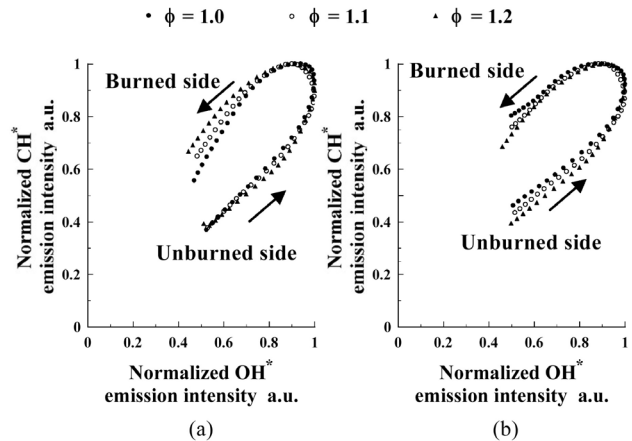


Fig.11 Correlation between normalized OH* and CH* emission intensities.

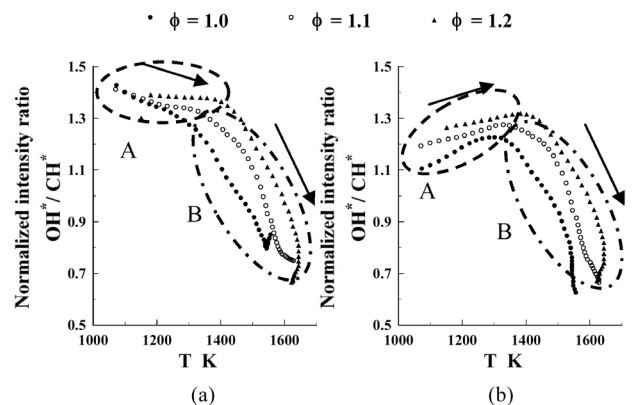


Fig.12 Correlation between temperature and normalized emission intensity ratio OH* / CH*.

連続発光除去前のものを示した。除去前のものは未燃側に当量比による若干のずれが見られ、既燃側に向かうほど一致していることがわかる。それに対して、除去後のものでは未燃側では当量比によるずれは見られず、既燃側に向かうほどずれが生じていることがわかる。CH* 自発光とは独立して発光している連続発光の影響を受け、未燃側、既燃側ともに自発光強度を高く見積もっていたことによるものである。

図 11 より、正規化した OH* と CH* 自発光強度の比には、特に未燃側においては当量比依存性が少ないと考えられる。そこで、当量比の影響をほとんど受けないパラメータである、正規化した OH* と CH* 自発光強度の比の値を用いて、温度とラジカル自発光強度の相関を調べる。図 12 に、正規化後の OH* と CH* の自発光強度の比と温度との相関を示す。図 11 と同様、(a) に連続発光除去後のもの、(b) に連続発光除去前のものを示した。これを見ると、温度と自発光強度の比の間には 2 つの傾向が見られる。点線の楕円で囲まれている部分 A と、一点破線の楕円で囲まれている部分 B である。連続発光除去前の (b) では、A では温度に対して自発光強度比が単調に増加し、またこう配も

当量比の変化に対して差異がない。B では逆に温度に対して自発光強度比は単調に減少するが、当量比変化に対してこう配自体には差異が見られない。一方、連続発光除去後の (a) では、A では温度に対して自発光強度比が単調に減少し、こう配は当量比の増加に対して緩やかになっている。B では温度に対して自発光強度比は単調に減少しており、そのこう配は A の部分のこう配よりも大きくなっている。そして、B のこう配自体には当量比による変化は見られず、また、連続発光を除去しない場合 (b) の B 部分のこう配と比較しても差異がみられない。

これらのことから、温度分布は当量比に大きく依存していることがわかる。よって、当量比というパラメータを含んだ温度分布と、当量比の影響を含まないラジカル自発光強度比の関係を定式化することはできず、自発光をもとにした温度の推定は困難であることがわかった。

5. 結言

炭化水素火炎からの発光には OH* や CH* に代表される自発光以外に、それらに重畳する連続発光が存在しており、ラジカル自発光強度を底上げしている。ラジカル自発光強度を用いて燃焼状態を議論する場合、これら連続発光の影響を調べる必要がある。本研究では、回折格子分光器を用いることで連続発光強度の火炎帯内の分布特性を調べ、高速波長分離器によって得られたラジカル自発光強度を、OH*, CH* 由来の自発光強度と連続発光強度に分離することを試みた。そして、連続発光強度を考慮することにより、従来よりも実用性の高い火炎診断法を提案した。その結果、以下の知見を得た。

(1) OH* バンドに重畳する連続発光強度の計測ラジカル自発光強度に占める寄与割合は、反応帯の既燃側になるほど大きくなる。また、その寄与割合の火炎の短軸方向分布は、当量比を変えた場合にも変化することはない。

(2) CH* バンドに重畳する連続発光強度の計測ラジカル自発光強度に占める割合は大きい。このことにより、CH* 自発光を用いた燃焼診断を行なう場合、もしくは数値シミュレーション結果との定量的な比較を行なうための実験データを取得する場合には、連続発光強度の影響を除去することが重要である。

(3) 従来の手法よりも実用性の高い、火炎帯の任意の計測位置からの発光を用いて当量比の推定が可能となる火炎診断法の可能性を示した。これは、火炎の発光強度をラジカル自発光強度と連続発光強度に分離することにより可能となったものである。

(4) 連続発光を除いて正規化した OH* と CH* の自発光強度の相関は、既燃側で当量比の影響を受けている部分はあるが、当量比依存性は小さいと考えられる。

(5) 火炎帯内の温度分布は当量比に大きく依存しており、当量比依存性の小さい正規化した OH* と CH* 自発光強度比との相関を定式化することはできず、自発光をもとにした温度の推定は困難である。

References

1. Itoh, H., Hommo, Y., Noda, K., and Gomi, T., *JSAE Trans.* (in Japanese) 29: 10-17 (1984).
2. Itoh, H., Hommo, Y., Noda, K., and Gomi, T., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 52: 3362-3371 (1986).
3. Mizutani, Y., Saeki, T., and Nakabe, K., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 54: 2219-2227 (1988).
4. Kojima, J., Ikeda, Y., and Nakajima, T., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 66: 1871-1878 (2000).
5. Kojima, J., Ph.D. Thesis, Kobe University (2000).
6. Ikeda, Y., Kojima, J., Nakajima, T., Akamatsu, F., and Katsuki, M., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 67: 204 (2001).
7. Tsushima, S., Saitoh, H., Akamatsu, F. and Katsuki, M., *Proc. Combust. Inst.* 27: 1967-1974 (1998),.
8. Seo, T., Akamatsu, F., Shibahara, M., and Katsuki, M., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 71: 2169-2176 (2005).
9. Dibble, R.W., and Hollenbach, R.E., *Proc. Combust. Inst.* 18: 1489-1499 (1981).
10. Wakabayashi, T., Akamatsu, F., Katsuki, M., Mizutani, Y., Ikeda, Y., Kawahara, N., and Nakajima, T., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 64: 925-930 (1998).
11. Akamatsu, F., Wakabayashi, T., Tsushima, S., Katsuki, M., Mizutani, Y., Ikeda, Y., Kawahara, N., and Nakajima, T., *Meas. Sci. Technol.*, 10: 1240-1246 (1999).