メタン・空気層流予混合火炎の反応帯において 高空間分解能測定された自発光スペクトル* (自発光強度比 OH^*/CH^* と当量比の相関)

小嶋 潤^{*1}, 池田 裕二^{*2}, 中島 健^{*3}

Spatially and Spectrally Resolved Measurement of Chemiluminescence in Laminar Methane/Air Premixed Flames (Correlation between Emission Intensity Ratio of OH^*/CH^* to the Equivalence Ratio)

Jun KOJIMA^{*4}, Yuji IKEDA and Tsuyoshi NAKAJIMA^{*4} Kobe University, Dept. of Mechanical Engineering, Rokkodai 1-1, Nada, Kobe, Hyogo, 657-8501 Japan

Spatially resolved chemiluminescent spectra were obtained in the reaction zone in a laminar premixed methane/air flame ($\phi=0.9-1.5$) using local flame emission measurements with a new Cassegrain mirror system and spectrometers. The distributions of the OH^* , CH^* , and C_2^* emission intensities in the flame front were obtained at atmospheric pressure using this method. C_2^* was found to have the thinnest reaction zone. Highly spectrally resolved OH^* , CH^* and C_2^* emission were obtained at the local flame front. The linear correlations between the peak intensity ratios of OH^*/CH^* , C_2^*/CH^* , and C_2^*/OH^* in the reaction zone to the equivalence ratio could be used to investigate the local flame stoichiometry. OH^*/CH^* could be used to determine the local flame stoichiometry in the reaction zone of premixed flames for a wider range of equivalence ratios.

Key Words: Combustion, Laminar Premixed Flame, Chemiluminescence, Spectroscopy, Spatially Resolved Measurement, Cassegrain Optics, OH^* , CH^* , C_2^* , Radicals

1. はじめに

層流及び乱流予混合火炎の非接触の燃焼診断法として古くより自発光が用いられてきた^(1,2)。自発光強度は基底ラジカル濃度と直接的に比例関係はないが、反応強度を示唆する物理量として扱うことができ、定性的な燃焼特性の把握に用いられてきた。燃焼騒音⁽³⁾や燃焼振動制御⁽⁴⁾の分野では、熱発生率と相関が高いとして CH^* 自発光の観測が行われ、また OH^* , CH^* , C_2^* 自発光画像データは乱流火炎構造⁽⁵⁻⁷⁾の解明の一手段として用いられた。

近年、自発光は各種物理量の時系列的な情報量として再び重要視され、 OH^*/CH^* ^(8,9), C_2^*/CH^* ⁽¹⁰⁾, OH^* ⁽¹¹⁾と当量比の相関、希薄域での CO_2^* と熱発生率の相関⁽¹²⁾, さらに OH^* スペクトルと温度の相関⁽¹¹⁾や C_2^* スワン帯による温度計測^(13,14)に関する研究が報告されている。また、内燃機関⁽¹⁵⁻¹⁷⁾や噴霧燃焼^(18,19)等の実用燃焼器においても、 OH^* , CH^* , C_2^* 自発光が燃焼特性の観察や解析に用いられている。さらに、定常及び非定常な層流火炎を対象に自発光画像計

測と詳細反応動力学を組み込んだ数値計算が行われ、励起ラジカル濃度の定量的な解析も進められている^(12,20,21)。

しかし、これらの自発光計測の多くは単純なレンズ光学系を用いて集光しており、約0.1mmの予混合火炎帯内のラジカル分布を検出できるレベルの空間分解能がなかったため、火炎の局所的な微細構造の解析は困難であった。この自発光が高空間分解計測できれば、従来報告されてきた自発光強度と各種物理量との相関を火炎帯の微細構造の把握に適用できる。

現在、層流火炎での自発光画像測定と Abel 変換法の併用により、自発光強度の空間分布を得る手法が進められているが⁽²⁰⁾、空間分解能が不十分なため、火炎帯の内部構造の議論には至っていない。

そこで、我々は火炎帯内部のラジカル分布計測を目指して、自発光強度の高空間・時間分解能計測を可能にするカセグレン光学系⁽²²⁾を試作した⁽²³⁻²⁵⁾。本光学系を用いて、火炎帯内部の局所的な自発光の分光測定を行い、反応帯近傍における物理量の定量的な解析を行うことを目的とした。

本研究では、カセグレン光学系を用いた自発光の空間分解計測法を提案し、これを用いて層流予混合火炎の反応帯近傍における局所的な自発光スペクトルの詳細な分光特性を報告する。さらに、 OH^* , CH^* , C_2^*

* 原稿受付 2000年1月20日。

^{*1} 正員, 神戸大学大学院自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台1-1)。^{*2} 正員, 神戸大学機器分析センター。^{*3} 正員, 神戸大学工学部。

E-mail: kojima@ms-5.mech.kobe-u.ac.jp

ラジカル自発光の当量比依存性に注目し、局所的な反応帯における発光強度比 OH^*/CH^* 及び C_2^*/CH^* と当量比の定量的な相関を明らかにする。

2. 実験装置及び方法

2-1. 集光光学系

カセグレン光学系の概略を図1(a)に示す。光学系は互いに向き合った凹面鏡 ($\phi 150\text{mm}$) と凸面鏡 ($\phi 50\text{mm}$) および紫外透過型光ファイバ (三菱電線工業製, $\phi 100\mu\text{m}$) から構成される。光学系の作業距離 WD は 300mm である。本カセグレン光学系の ry 平面の集光率分布に関する数値計算結果^(23,24) と実験的評価を図1(b)に示す。実験結果はカセグレン光学系の光ファイバ側から照射した参照光 (ハロゲンランプ) の集光強度分布を CCD カメラで画像測定することにより得た⁽²⁶⁾。結果は焦点位置 ($r=0, y=0$) を中心とした集光率の鋭いピークを示している。通常のレーザービームの定義と同様に、集光率ピーク値の $1/e^2$ 倍をしきい値として求めた測定体積は $\phi 0.1 \times 0.8\text{mm}$ となる。このように本光学系は高い空間分解能を有する。さらに、ミラー光学系のみで構成されているため、測定体積形状及び測定位置に対して波長依存性がない。

2-2. 実験装置

図2に本研究に用いた実験装置を示す。実験では大気圧下で円管ノズルバーナ (半径 $R=5\text{mm}$) 上に安定

形成された層流予混合火炎を用いた。燃料はメタン、酸化剤は乾燥空気をい、混合気流量を $6.7\text{cm}^3/\text{s}$ 一定とし、当量比 $\phi=0.9\sim 1.5$ の範囲で変化させた。測定は r - z 面上、高さ $z=4\text{mm}$ の直線上で行った。

カセグレン光学系で集光したラジカル自発光は光ファイバにより回折格子分光器 (Mcpherson 製, 2035) に導き、イメージンテンシファイヤ (I.I.) 付 CCD (Princeton 製, ICCD-576G) で検出した。回折格子は $150, 300, 1200\text{ lines/mm}$ の3種類を用いた。波長分解能はそれぞれ $0.42, 0.22, 0.05\text{nm}$ である。I.I. のゲインは各測定で一定とした。露光時間は $1\sim 5\text{s}$ の間で任意に設定し、各図では 1s 当たりの強度に校正にした。

また、干渉フィルタによる分光装置 (以後、波長分離器とする) を併用した。 $\text{OH}^*(0,0)$, $\text{CH}^*(0,0)$, $\text{C}_2^*(0,0)$ 帯の発光を抽出するために、中心波長・半値幅・ピーク透過率がそれぞれ $306.4\text{nm} \cdot 10\text{nm} \cdot 61\%$, $431.4\text{nm} \cdot 1.5\text{nm} \cdot 40\%$, $516.5\text{nm} \cdot 2\text{nm} \cdot 58\%$ の干渉フィルタを使用した。自発光は干渉フィルタ後方に配置した光電子増倍管 (浜松ホトニクス製, R6357) で検出し、 I/V アンプで電流電圧変換を行った後、多チャンネル同時 AD 変換器 (NEC 三栄製, DL2300) により取り込んだ。

(a) Schematic of Cassegrain optics

(b) Spatial resolution

Fig. 1 Developed Cassegrain optics

Fig. 2 Experimental setup

自発光測定結果に及ぼす空間分解能の影響を評価し、局所計測の有用性を確認するために、カセグレン光学系による集光と、単一芯ファイバ ($\phi 100\mu\text{m}$, $N.A.=2.0$) による集光 (図2) を比較した。ファイバ集光ではファイバ開口角内に収まる火炎からの発光を計測しており、火炎先端及びバーナリム近傍を除くほぼ内炎全体からの発光を集光している。

3. 実験結果及び考察

3-1. 自発光スペクトルに及ぼす測定領域の影響

図3にカセグレン集光及びファイバ集光により測定された自発光スペクトル (当量比 $\phi=1.2$, 回折格子 300 lines/mm) を示す。カセグレン集光及びファイバ集光の中心位置は火炎面位置近傍の $r/R=0.75$ とした。発光強度は最大値で正規化した。ファイバ集光による発光スペクトルは火炎からの連続スペクトルと思われる背景光の上に、 OH^* ($A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$), CH^* ($A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$), C_2^* ($A^3\Pi_g \rightarrow X^3\Pi_u$: スワン帯) の発光スペクトルが観測されている。ファイバ集光では、主な素反応が行われる反応帯からの自発光に加えて、残存する燃料の化学反応や高温に起因した外炎部からの発光の影響がでている。これは火炎帯におけるラジカル分布等の構造を把握する上で誤差要因となり得る。

しかし、カセグレン集光では各発光スペクトルが明瞭に観測されており、背景光がファイバ集光に比べて大きく減少している。カセグレン光学系の光路上には外炎も含まれるにも関わらず、このような明瞭なスペクトルが得られることは、光路上の背景光の寄与が極めて小さく、測定体積内の発光を高空間分解能で集光できていることを示している。次にカセグレン集光による自発光スペクトル (以後、局所自発光スペクトル) について考察を進める。

Fig. 3 Comparison between local flame spectra and spectra from the entire flame region

3-2. 空間分解測定された自発光スペクトル

バーナ半径方向 $r/R=0.5 \sim 1.5$ の各点において局所自発光スペクトルの測定を行い、各位置での $\text{OH}^*(0,0)$, $\text{CH}^*(0,0)$, $\text{C}_2^*(0,0)$ 帯の発光強度ピーク値をプロットしたものを図4に示す。まず $r/R=0.72 \sim 0.8$ の約 $400\mu\text{m}$ (r/R にして 0.08) の範囲に各ラジカルの発光は分布しており、ここが火炎面位置に当たる。 CH^* 及び C_2^* の自発光はこの領域内ではほぼ同様の発光強度分布を示し、共に $r/R=0.76$ でピークとなる。この二つのラジカル自発光分布は未燃側の立ち上がり位置はほぼ同じであるが、既燃ガス側では C_2^* が先に減少しており、 C_2^* が最も狭い領域に分布することがわかる。 OH^* 分布も火炎面近傍で他のラジカルと同様にピークを持つが、未燃側では CH^* , C_2^* から先に内側から立ち上がり、 $50\mu\text{m}$ (r/R にして 0.01) 未燃側の位置でピークを持つ。測定体積径が $100\mu\text{m}$ であるにも関わらず、強度分布や $50\mu\text{m}$ の位置ずれを検出できるのは、図1(b)で示したようにカセグレン光学系の測定体積が、その内部で鋭い集光率のピークを持っているためである。火炎面近傍 $r/R=0.72 \sim 0.8$ の自発光スペクトル ($\phi 1.1$, 150 lines/mm) を図5(a)に示す。本図では明瞭な $\text{OH}^*(0,0)$, $\text{CH}^*(0,0)$, $\text{C}_2^*(0,0)$ 及び $\text{C}_2^*(1,0)$ 発光スペクトルが観測できる。

一方、図4の $r/R=0.8 \sim 1.5$ で CH^* と C_2^* はほぼゼロに近づくが OH^* は依然検出される。既燃ガス領域で CH^* と C_2^* はほとんど生成されないが、 OH^* は既燃ガス領域においても存在することがわかる。この領域の自発光スペクトル ($\phi 1.1$, 150 lines/mm) を図5(b)に示す。 OH^* 発光スペクトルは $r/R=0.9$ でも観測されており、高温既燃ガス領域での熱解離による発生と関連している可能性が高い⁽²⁾。これに対し、 CH^* , C_2^* 発光

Fig. 4 OH^* , CH^* and C_2^* chemiluminescence intensity distributions in the reaction zone

(a) Reaction zone

(b) Burned gas region

Fig. 5 Spatially resolved methane/air premixed flame spectra ($\phi=1.1$)

スペクトルは次第に背景光と識別できないレベルまで弱まり、相対的に CO_2^* 等からの連続スペクトル¹²⁾と思われる背景光が強くなる。

なお、図4で本来火炎が存在しない $r/R=0.5\sim0.7$ の未燃領域においても信号が検出されている。これは前述の測定体積外の光路上に位置する内炎及び外炎からのラジカル発光が検出されているためである。内炎の外側の縁、つまり火炎帯近傍から既焼ガス側にかけての領域では測定体積の背後に火炎面がほとんど存在しないため、この領域の自発光強度ピークと発光スペクトル特性に関する議論は可能と考えている。通常、円管ノズルバーナでの発光強度の積分値測定では Abel 変換²⁰⁾を用いて強度分布が推定されるが、カセグレン光学系では Abel 変換の適用が困難なため、本稿では火炎帯近傍に限って議論を進める。

3-3. 局所自発光の高波長分解スペクトル

図6に異なる当量比における局所自発光スペクトル (300lines/mm) を示す。各当量比で内炎高さが変化し、火炎面位置が異なるため、 CH^* 発光強度が最大となる位置でのスペクトルを代表として示す。

まず OH^* スペクトル強度は当量比の変化に比較的低鈍感であるのに対して、 CH^* 及び C_2^* スペクトル強度

は当量比の変化に対して敏感で、 $\phi 0.9\sim1.3$ の間で大きく変化する。しかし、各スペクトルの発光強度が最大となる当量比は異なっており、この当量比範囲内では OH^* は $\phi 1.1$ 、 CH^* は $\phi 1.2$ 、 C_2^* は $\phi 1.3$ で最大となる。また、 $\phi 0.9$ の希薄域においても OH^* 及び CH^* はかなり明瞭に観測されるが、 C_2^* は (0,0) 帯、(1,0) 帯共にほとんど検出されていない。

次に自発光強度の当量比依存性をより高い波長分解能のスペクトルで調べた。図7に回折格子 1200 lines/mm を用いて分光測定した局所自発光スペクトル ($\phi=0.9, 1.1, 1.2, 1.3$) を示す。測定は図6と同様に各当量比で CH^* 発光強度が最大となる位置で行った。

波長範囲 305 ~ 315nm のスペクトルでは、 $\text{OH}^*(0,0)\text{R1}$: 306.4nm, (0,0)R2 : 306.8nm, (0,0)Q1 : 307.8nm, (0,0)Q2 : 309.0nm, (1,1)R1 : 312.2nm, (1,1)R2 : 312.6nm, (1,1)Q1 : 313.5nm, 及び (1,1)Q2 : 314.7nm のブランチが明瞭に観測される。当量比の変化に対してスペクトルの分布形状はほとんど変化せず、各ブランチは $\phi 0.9$ においても十分観測できる。

波長範囲 425 ~ 435nm では、極めて強い $\text{CH}^*(0,0)\text{Q}$: 431.4nm とその裾野に非常に弱い (2,2)Q : 432.3nm が観測される。 $\text{CH}^*(0,0)$ の強度は $\phi 0.9$ でかなり弱くなるが、十分に観測可能である。

波長範囲 465 ~ 475nm では、 C_2^* スワン帯である (5,4), (4,3), (3,2), (2,1), (1,0) 帯のみが明瞭に観測される。過濃側の $\phi 1.3$ で各発光強度は非常に強くなり、希薄側の $\phi 0.9$ では背景光ノイズから区別できないレベルまで弱くなる。

波長範囲 505 ~ 520nm において、同じく C_2^* スワン帯の一部である (0,0), (1,1) 帯が明瞭に観測されており、(0,0) が最も強い発光強度を示し、(2,2) は観測が困難である。発光強度は過濃側の $\phi 1.3$ で非常に強くなり、希薄側の $\phi 0.9$ ではほとんど背景光に埋もれており、発光スペクトルの強度変化は (1,0) をバンドヘッドとする C_2^* スペクトルと同様の傾向である。以上より、本条件下での自発光スペクトルは、当量比に強く依存しており、同一ラジカル種であれば振動や回転準位が異なっても当量比依存性は同一傾向にあることがわかった。

3-4. 自発光強度の当量比依存性

次に図7に示した OH^* 、 CH^* 、 C_2^* の各ブランチのピーク強度と当量比の関係を詳細に調べた。図8(a)に $\text{OH}^*(0,0)\text{R}$, (0,0)Q, (1,1)R 及び (1,1)Q の発光強度ピークと当量比の関係を示す。分布特性の比較のため、縦軸の発光強度は正規化して表示した。ブランチが異なる4つの OH^* 発光のピークは当量比に対して $\phi 1.1$ 近傍

Fig. 6 Spatially resolved flame spectra at different equivalence ratios

Fig. 7 Spatially and spectrally resolved flame spectra obtained within the reaction zone

で最大値となり、希薄側より過濃側で強度の低下が著しいという同様の当量比依存性を呈している。よって、OH*スペクトルの当量比依存性はこれらのブランチをすべて包含した発光帯（図7矢印で示した波長範囲）として評価できる。そこで波長範囲 306.0~315nm の発光スペクトルの面積積分値を算出し、これを「OH* Band」として図8(a)に重ねて表示した（以後、「Band」は特定の発光スペクトルの面積積分値を意味する）。OH* Band は OH*発光帯 ($A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$) の各ブランチの当量比依存性を示す代表的特性になっていることがわかった。

図8(b)に CH*(0,0)のピーク強度と、CH*(0,0)及び(2,2)を包含する波長範囲 430.0~433.0nm の発光スペク

トルの面積積分値：CH* Bandと当量比の関係を示す。CH* Band は CH*(0,0)の分布とほぼ一致しており、共に $\phi 1.2 \sim 1.25$ の間で最大値を持つ山型の分布となっている。希薄側 $\phi 0.9$ 及び過濃側 $\phi 1.5$ では、同程度の値まで発光強度が低下している。

図8(c)に $C_2^*(4,3)$, (3,2), (2,1), (1,0)の発光強度ピークと当量比の関係を、図8(d)に $C_2^*(1,1)$, (0,0)の発光強度ピークと当量比の関係を示す。スペクトル上で隣接する(4,3), (3,2), (2,1), (1,0)帯のピーク強度、あるいは同じく隣接する(1,1), (0,0)帯のピーク強度については、互いにほぼ同様の分布となり、 $\phi 1.3$ 近傍で最大となることがわかった。しかし、隣接しない C_2^* 発光帯の間には、強度分布が最大となる当量比に若干ずれがあり、希薄側の分布にも差が生じている。この差は当量比毎に異なる火炎温度が、 C_2^* の各振動準位への分配に影響を及ぼしているためと思われる⁽¹³⁾。本稿では詳細に言及しないが、今後、空間分解測定された C_2^* の振動スペクトルと火炎温度の関係についても検討したい。

前述同様に、 $C_2^*(4,3)$, (3,2), (2,1), (1,0)帯を包含する波長範囲 467.5~474.0nm の発光スペクトルの面積積分値： $C_2^*(1,0)$ Band 及び、 $C_2^*(1,1)$ (0,0)帯を包含する波長範囲 512.0~517.0nm の発光スペクトルの面積積分値： $C_2^*(0,0)$ Band を求めた。結果を図8(c), (d)に重ねて示す。 $C_2^*(1,0)$ Band 及び $C_2^*(0,0)$ Band は、各々が包含するブランチの分布特性を代表していることがわかる。

このように OH*, CH*, C_2^* 発光スペクトルにおける各ブランチのピークを用いた場合と「Band」を用いた場合で、当量比依存性にはほとんど違いがない。以上より、当量比と発光強度比の相関を求めるには、相対的に光量が増加し SN 比が高くなる「Band」法（すなわち、従来より用いられている光学フィルタによる発光測定法）を用いても問題ないことが明らかになった。

次に特定波長域の発光強度を積分測定することができる波長分離器（図2）を用いて、OH*, CH*及び C_2^* 「Band」の発光強度比と当量比の関係を調べた。干渉フィルタの半値幅は図7をもとに算出した。光電子増倍管からの電圧信号を 5kHz でサンプリングした。

3-5. 局所自発光強度比と当量比の相関

従来より、OH*/CH*あるいは C_2^*/CH^* のラジカル発光強度比による当量比予測の可能性が提案されてきた⁽⁸⁻¹⁰⁾。この提案は図8で示したように3種のラジカル発光強度が当量比の変化に対して敏感で、かつ固有の相関を持つことに基づいている。さらに発光強度比

Fig. 8 Relationship between chemiluminescent emission intensities and equivalence ratio.

を取ることは温度や圧力、あるいは測定方式による発光の受光範囲の依存性を相殺できる可能性がある⁽¹⁰⁾。これらの議論の多くは、火炎面に対して垂線方向から発光を測定した実験や、広範囲にわたる火炎からの発光を空間積分した実験に基づくものであった。しかし、急激な温度と濃度の勾配が存在する火炎帯の構造を議論するためには、火炎帯内部を空間分解した発光強度比による詳細な考察が必要である。

そこで、カセグレン光学系と波長分離器から構成した計測システムを用いて測定した自発光強度比 $\log[C_2^*/CH^*]$, $\log[C_2^*/OH^*]$ 及び $\log[OH^*/CH^*]$ と当量比の相関を求めた。図9に結果を示す。ここで、自発光測定は火炎面近傍の r 軸上を $20\mu\text{m}$ 間隔で行い、 CH^* 発光強度が最大となる r/R の位置で各相関値を求めた。

$\phi 0.9 \sim 1.3$ の範囲では C_2^*/CH^* と C_2^*/OH^* は単調増加し、 OH^*/CH^* は単調減少する。この結果から自発光強度比による局所当量比予測が実験的に可能であることが示された。ただし、 $\phi 1.45 \sim 1.5$ では発光強度比の変化率が低下するため当量比の算出精度は下がる。本手法を用いて計測可能な当量比範囲は $\phi 1.4$ 以下となる。

$\phi 1.4$ 以下で当量比感度が一番高いのは C_2^*/OH^* で、続いて C_2^*/CH^* , OH^*/CH^* である。しかし、 C_2^* は図7で示したように希薄領域でかなり発光強度が減少し SN 比が低下するため、メタン空気予混合火炎においては、 C_2^* を用いた当量比予測は希薄側で精度が下がると思われる。

一方、 OH^* は図4、5で示したように反応帯外側の燃焼ガス領域でも存在するため、計測の範囲と空間分解能が自発光強度と当量比の相関に大きく影響する可能性が高い。しかし、図4の通り OH^* は反応帯内部で

Fig. 9 Correlation of chemiluminescent emission intensity ratios to equivalence ratio

は CH^* , C_2^* と同様に鋭いピークを伴って分布している。この反応帯における OH^* のピーク強度を局所自発光計測により検出することで、既焼ガス領域に存在する OH^* からの影響を排除できる。さらに、 OH^* は図6、7で示したように $\phi 0.9$ の希薄域でもスペクトルが明確に観測できる。また CH^* も反応帯近傍にのみ存在し、かつ $\phi 0.9$ の希薄域においてもスペクトルが十分に観測できる。以上から、局所的な自発光強度 OH^*/CH^* を用いることにより、希薄域を含む広い範囲で有効な当量比相関を得ることができることがわかった。

4. 結論

新規に開発したカセグレン光学系を用いて、メタン空気層流予混合火炎の反応帯近傍において自発光スペクトルを高空間分解能測定した。以下に知見をまとめる。

- 1) カセグレン光学系を用いて、反応帯における自発光強度の高空間分解能計測に成功した。本計測により、反応帯外部からの発光の影響を十分に排除した状態で、反応帯における詳細なスペクトル特性を把握することできた。
- 2) 反応帯近傍の自発光強度分布を計測した結果、 CH^* , C_2^* 分布はほぼ同じ位置で最大値を迎えるが、 OH^* 分布はその約 $50\mu\text{m}$ 未燃ガス側で最大となった。
- 3) 各自発光スペクトルのピーク強度と面積積分値を用いて、反応帯での自発光強度と当量比の関係を明らかにした。 OH^* は $\phi 1.1$, CH^* は $\phi 1.2$, $C_2^*(0,0)$ は $\phi 1.3$ 近傍で発光強度が最大となった。
- 4) 反応帯近傍において高空間分解能で測定されたラジカル自発光の強度比 OH^*/CH^* , C_2^*/CH^* , C_2^*/OH^* は当量比 ($\phi 0.9 \sim 1.4$) と強い相関を持つことがわかった。

本研究は文部省科学研究費補助金（課題番号 10305019）の助成を受けた。ここに謝意を表する。

5. 参考文献

- (1) Gaydon, A. G., "The Spectroscopy of Flames," Chapman and Hall, (1974).
- (2) 水谷・佐伯・中部, 機論, **54**-504(B), (1988), 2219-2227.
- (3) Hurler, I. R., et al., *Proc. Roy. Soc. A.*, **303** (1968), 409-427.
- (4) Poinot, T., et al., *Phys. III* **2** (1992), 1331-1357.
- (5) Summerfield, M., et al., *Jet Propulsion* **25** (1955), 377-384.
- (6) 鈴木ら・ほか3名, 機論, **44**-386(2), (1978), 3534-3542.
- (7) 吉田ら・ほか3名, 機論, **59**-560(B), (1993), 1401-1407.
- (8) 加藤・橋本, 第29回燃焼シンポジウム講演論文集, (1991), 487-489.
- (9) Roby, R. J., *Proc. the 1998 International Joint Power Generation Conference* **1**, (1998), 593-602.

- (10) 伊藤ら・ほか3名, 機論, **52**-481(B), (1986), 3362-3371.
- (11) Dandy, D. S. and Vosen, S. R., *Combust. Sci. Tech.* **82** (1992), 132-150.
- (12) Samaniego, J. M., et al., *Combust. Sci. and Tech.* **109** (1995), 183-203.
- (13) Ishiguro, T., et al., *27th Proc. Symp. Combust.*, (1998), 3205-3213.
- (14) 小西・北川・新井, 第37回燃焼シンポジウム講演論文集, (1999), 207-208.
- (15) 飯田ら・ほか3名, 機論, **59**-568(B), (1993), 314-321.
- (16) 伊東ら・ほか3名, 機論, **59**-562(B), (1993), 2084-2089.
- (17) Shoji, H., et al., SAE Paper No.972139, (1997).
- (18) 中部ら・ほか5名, 機論, **58**-548(B), (1992), 1337-1342.
- (19) 赤松ら・ほか3名, 機論, **60**-577(B), (1994), 382-384.
- (20) Walsh, K. T., et al., *Proc. 27th Symp. Combust.*, (1998), 615-623.
- (21) Najm, H. N., et al., *Combust. Flame* **113** (1998), 312-332.
- (22) Kauranen, K., Andersson-Engels, S. and Svanberg, S., *Appl. Phys. B53*, (1991), 260-264.
- (23) Akamatsu, F., et al., *Meas. Sci. Technol.* **10** (1999), 1240-1246.
- (24) 若林ら・ほか6名, 機論, **64**-619(B), (1997), 925-930.
- (25) Ikeda, Y., et al., *Proc. COMODIA98*, (1998), 411-416.
- (26) Kojima, J., et al., AIAA 99-2784, *35th AIAA / ASME / SAE / ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, (1999).