

# C<sub>2</sub>バンドのスペクトル強度比を用いた火炎局所領域における温度変動計測

## Measurement of Time Resolved Local Temperature in Flame by using C<sub>2</sub> Band Emission Intensities

学 則本 篤史 (阪大院)      学 亀井 宣慶 (阪大工)      正 芝原 正彦 (阪大工)  
 正 赤松 史光 (阪大工)      正 香月 正司 (阪大工)      正 北川 邦行 (名大高工ネ)  
 正 新井 紀男 (名大高工ネ)      正 池田 裕二 (神大機分セ)      正 中島 健 (神大工)

Atsushi NORIMOTO\*, Noriyoshi KAMEI\*, Masahiko SHIBAHARA\*, Fumiteru AKAMATSU\*, Masashi KATSUKI\*,  
 Kuniyuki KITAGAWA\*\*, Norio ARAI\*\*, Yuji IKEDA\*\*\*and Tsuyoshi NAKAJIMA\*\*\*

\*Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan  
 \*\*Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan  
 \*\*\*Kobe University, 1-1 Rokko, Nada, Kobe 657-8501, Japan

Temperature measurement method using C<sub>2</sub> band emission intensity ratio is applied to the measurement of time-resolved local temperature in premixed flames. Local chemiluminescence of premixed laminar flames and turbulent flames of propane and air are measured by Cassegrain optical system and spectroscopy unit. The relationships between temperature by thermocouples and C<sub>2</sub> band emission intensity ratio are investigated and discussed in the present study.

*Key Words:* C<sub>2</sub> radicals, Combustion, Spectroscopic measurement, Measurement of temperature, Flame

### 1. 緒言

火炎の局所的な温度測定は、燃焼現象の詳細な解明に不可欠である。そのため、非接触測定が可能な光学計測法の研究が数多くなされてきた。それらの研究のひとつとして、火炎からの自発光を用いた温度計測法がある。炭化水素を燃料とした火炎中に生成する主なラジカルとしてはOH, CH, C<sub>2</sub>が挙げられるが、これらのうちC<sub>2</sub>のSwanバンドの強度比は、火炎の温度と相関があるという報告がある<sup>(1,2)</sup>。このような方法によって、火炎中の局所の温度が測定できれば、レーザー光源などの大掛かりな装置を使う必要がないため、多くの分野での応用が期待できる。

本研究では、カセグレン光学系と波長分離器を用いて局所のC<sub>2</sub>自発光強度と温度を計測し、層流および乱流火炎中から得られる局所の自発光が、どのくらいの特異時間で温度と相関を持つかを実験的に調べた。本報では、前報<sup>3)</sup>より時間分解能を上げた場合について、計測法およびデータ処理法を検討した。

### 2. 実験装置および方法

#### 2-1. C<sub>2</sub>ラジカル自発光

C<sub>2</sub>に起因する自発光は、振動準位の遷移によって473.7nm, 516.5nm付近にピークを持つ。(473.7nm, 516.5nmに存在するピークをそれぞれS1, S2とし、その発光強度をI<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>とする。) 励起C<sub>2</sub>ラジカルの振動準位がボルツマン分布に従うとすると、S1とS2の発光強度比は火炎の温度と関係があることが理論的に示されている<sup>(1,2)</sup>。発光強度比I<sub>1</sub>/I<sub>2</sub>は2線法を用いて以下の式で表される。

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\sum_i h\nu_i A_i N_0 g_i \exp(-E_i/kT)/Q(T)}{\sum_j h\nu_j A_j N_0 g_j \exp(-E_j/kT)/Q(T)} \quad (1)$$

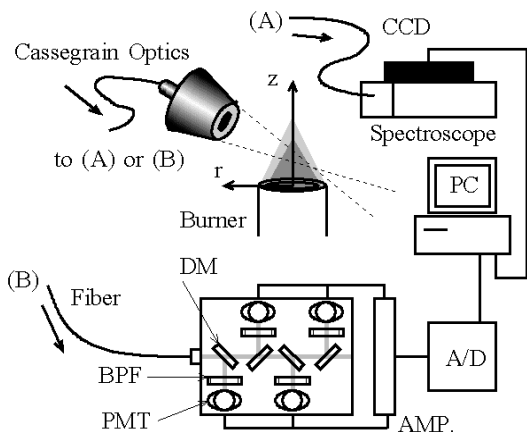


Fig.1 Experimental apparatus

$i, j$  はそれぞれS1, S2バンドに含まれる電子の励起準位の数である。 $h$  はプランク定数,  $\nu$  は周波数,  $A$  は遷移確率,  $N_0$  は全エネルギー準位の化学種数,  $g$  は縮重率,  $E$  は励起エネルギー,  $k$  はボルツマン定数,  $Q(T)$  は分配関数である。このようにI<sub>1</sub>/I<sub>2</sub>は温度のみに依存する関数となるはずである。しかし実際には、これらのSwanバンドの発光は、化学反応に伴うC<sub>2</sub>ラジカルの振動励起に起因するものが多いため、それらの振動準位はボルツマン分布に従わない。さらに、ラジカルの発光強度は当量比の変化等の温度以外の影響も受けることが報告されている<sup>(4)</sup>。そのために単純に式(1)が成立するとは考えられないが、熱的に励起されるC<sub>2</sub>ラジカルも存在すると考えると、場の温度と何らかの相関を持つ可能性がある。本研究ではその相関がどのような関係であり、どのような場合に測定手法が有効であるかを調べることを考えた。

#### 2-2. 実験装置

図1に実験装置の概略を示す。大気圧下で円管ノズルバーナ(内径R=9.5mm)を用い、層流予混合火炎(プロパン-空気, 当量比=0.8-1.9, 空気流量6.0~18.0L/min)を形成した。カセグレン光学系<sup>(5)</sup>によって集光

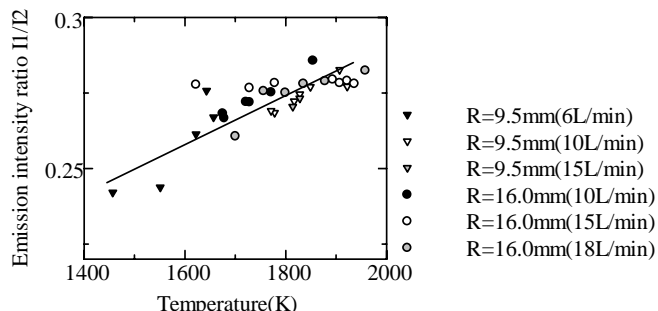


Fig.2 Relationship between temperature and emission intensity ratio measured by spectroscopy<sup>(6)</sup>

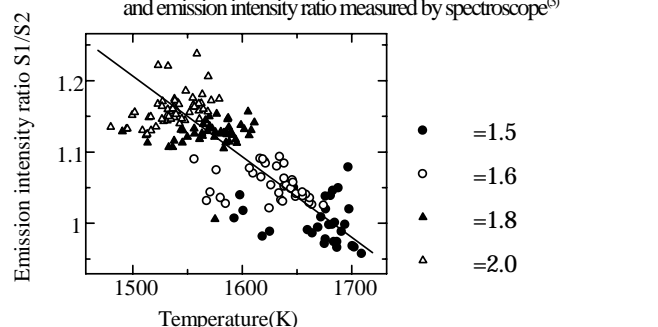


Fig.3 Relation ship between temperature and emission intensity ratio measured by spectroscopy unit

された局所自発光は、石英ファイバ(200 $\mu\text{m}$ )を通して分光器(リッパード光学株式会社製 OMD-25N, 図2中(A))に送光され、分光されて CCD カメラ (PHOTOMETRICS 製 CH220) に記録される。なお、本光学系の測定体積は 0.2 $\times$ 1.6mm と見積もられる<sup>9)</sup>。

変動場での計測を行うため、高速波長分離器(図2中(B))<sup>9)</sup>を用いて実験を行った。層流予混合火炎(プロパン-空気, 当量比 =1.5~2.0)を用いて当量比, 気体の総流量(11.0L/min)を一定としながら, 火炎温度を変化させるため窒素希釈を行った。高速波長分離器はダイクロイックミラー, 干渉フィルタ, 光電子増倍管からなっており, カセグレン光学系で集光された Swan バンドの自発光はこの波長分離器で S1 と S2 に分離される。信号はアンプで増幅し, ローパスフィルタをかけてノイズを除去した後, AD 変換器 (NEC 三栄製 DL2300) で記録した。

次に, パイロットバーナを有した円管ノズルバーナ(内径 R=16.0mm)を用いて乱流予混合火炎(プロパン-空気, 空気流量 50.0L/min, 当量比 =1.1~1.4)を形成した。上述の計測方法を用いて,  $I_1, I_2$  と熱電対(素線径 25 $\mu\text{m}$ )を用いた温度計測値を AD 変換器に記録した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3-1. 層流予混合火炎

以前に分光器を用いて, 層流予混合火炎における温度と  $\text{C}_2$  ラジカル発光強度比 ( $S1/S2$ ) の関係について考察した<sup>9)</sup>。その結果を図2に示す。

次に, 高速波長分離器と AD 変換器を用いて強度比と温度の関係を計測した。バーナにはノズル径 16.0mm の円管ノズルバーナを用い, 当量比を =1.5, 1.6, 1.7, 1.8 と変化させた。温度を変化させるため, それぞれの当量比において窒素を 0~1.6L/min, 0.2L/min 刻みで混合気に混入した。気体の総流量は 11.0L/min で一定になるようにした。発光強度を計測した後, カセグレン光学系の測定ポイントと同ポイントに熱電対(素線径 100 $\mu\text{m}$ )をセッティングした。高速波長分離器の光電子増倍管の励起電圧を 1100V とし, S1, S2 の発光強度, 熱電対の起電力を AD 変換器に入力, 設定をサンプル時間 50ms で 5 秒間計測した。発光強度, 温度は 5 秒間の平均値として求めた。その結果を図3に示す。温度と発光強度比との相関は図2と異なり, 負の相関になっているが, これは, 高速波長分離器のバンドパスフィルタの減衰率が, S1, S2 バンドの各波長によって異なるため, 得られた結果を, 単純に各バンドの発光強度とすることができなくなったためと考えられる。しかし発光強度比と熱電対で計測された温度との間には一定の線形の相関があるようにみえる。

これらの結果をもとに, 乱流予混合火炎にこの計測法を適用した。

#### 3-2. 乱流予混合火炎

ノズル径 16.0mm のバーナを用いて乱流予混合火炎を形成した。実験条件として, 主流の流速を 4.0m/s とし, 当量比を =1.2, 1.3, 1.4 と変化させた。火炎温度を熱電対計測可能温度に下げるため, 窒素(5.0L/min)で希釈した。 $\text{C}_2$  ラジカル測定ポイントは, 火炎のチップ付近を捉えるように, 熱電対の測定点はその 0.5mm 下流に設置した。S1, S2 の発光強度, 熱電対の起電力を AD 変換器を用いて, サンプル時間を 20 $\mu\text{s}$  で 1

秒間計測した。その際, 波長分離器の設定により信号を増幅して, 5kHz のローパスフィルタをかけた。S1, S2 の発光強度と熱電対で計測された温度の結果の時系列データを図4に示す。S1, S2 の発光強度がともに弱いとき, カセグレン光学系の測定ポイントが正確に火炎帯を捉えていない場合と考え, 発光強度が十分に強いデータのみを抽出した結果を図5(a)に示す。温度変動と S1, S2 の強度比変動の関係は, 層流で調べた温度と強度比の関係がそのまま成立しているとは考えられないが, 温度の上下変動とラジカル強度比の上下変動が, 層流での結果にみられる負の相関をもって相似している箇所がある。以前の試験で, 微小測定体積からの発光であっても, ある程度時間平均をすれば熱電対温度と強度比が相関をもつという知見を得た<sup>9)</sup>。図5(a)から, 測定ポイントを火炎が通り過ぎるたびに最大 50 点程のデータ群を形成している。データ群ごとの平均値を火炎が通り過ぎたときの代表点とした結果を図5(b)に示す。このような処理により図5(a)と比較して, 熱電対計測結果と S1, S2 の発光強度比の相関はより強くみられるようになることが分かる。

本研究は平成 12 年度科学研究費補助金 (No.12355010, No.12875042) の補助を受けた。ここに謝意を表す。

#### 参考文献

- (1) 小西・他3名, 第37回燃焼シンポジウム論文集(1999), 207.
- (2) 小西・名古屋大学大学院工学研究科修士論文(2000).
- (3) 則本・他7名, 第38回燃焼シンポジウム論文集(2000), 391.
- (4) 小嶋・他2名, 機論, 66-647B(2000), 1871.
- (5) 若林・他6名, 機論, 64-619B(1998), 925.
- (6) 久保・他2名, 第38回燃焼シンポジウム論文集(2000), 389.

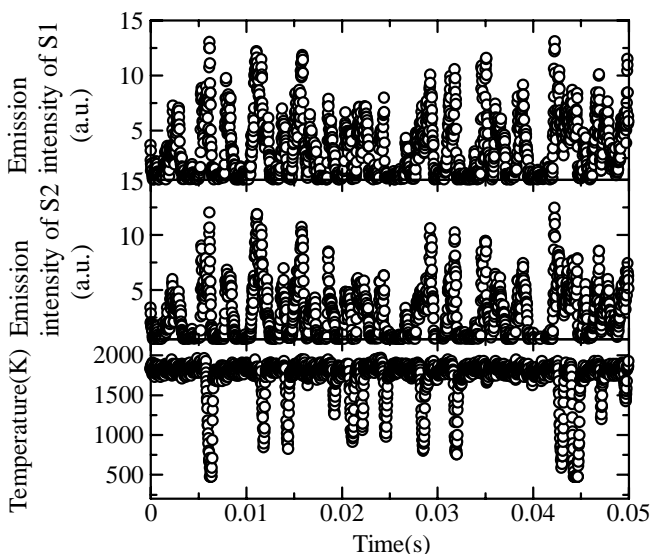
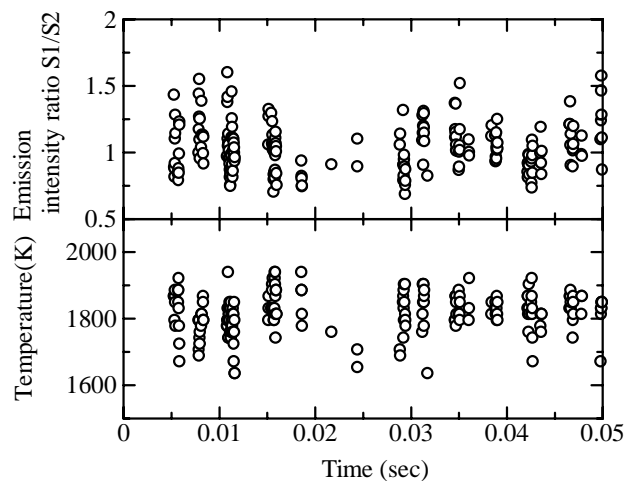
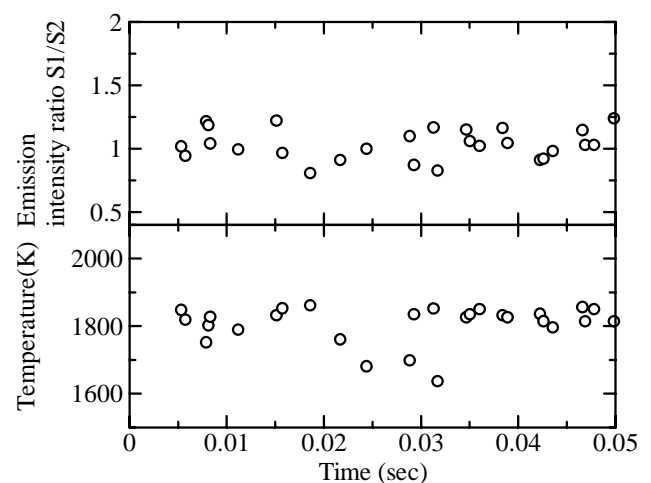


Fig.4 Emission intensity of S1, S2 and temperature (raw data)



(a) Picked out data with strong emission intensity



(b) Averaged data of (a)

Fig.5 Time history of emission intensity ratio and temperature by thermocouple