

## Original Paper

Spectroscopic Study on Luminous Counterflow Propane-Air Diffusion  
Flames: Measurement of Local Emissive Properties from Soot Cloud  
-2nd Report: Local Emissive Properties in C1-C4 FlamesYuji NAKAMURA \*<sup>1</sup>, Shinichi TAKAHASHI \*<sup>2</sup>, Yuichi KAMATA \*<sup>3</sup>, and Taro HIRASAWA \*<sup>4</sup>

(Received June 1, 2006)

## 対向流拡散火炎を用いた輝炎の局所放射特性に関する分光学的検討

## — 2 : 輝炎構造と局所放射率との関係

中村祐二\*<sup>1</sup>, 高橋真一\*<sup>2</sup>, 鎌田祐一\*<sup>3</sup>, 平沢太郎\*<sup>4</sup>

Spectroscopic study on local radiative properties of luminous flame, i.e. emission from soot could, with various hydrocarbon fuels (methane, ethane, propane, butane) are performed by utilizing 1-D counterflow burner. Emission from soot from counterflow diffusion flames is analyzed and bulk emissivities of soot cloud by different kind of fuels are obtained. Model parameter of emissivity,  $\alpha(\epsilon_{LF} = \epsilon_{LF}(\lambda^{-\alpha}))$ : wavelength dependency to the bulk emissivity, is calculated in different locations. Various fuel types and imposed flow velocities are considered as experimental parameters in the present study. As the carbon number of the fuel is increased, the produced soot cloud tends to be optically thick and the wavelength dependency parameter,  $\alpha$ , becomes smaller. This trend suggests that the luminous flames provided by high-carbon contained fuel is close to gray-body emitter. An engineering model parameter,  $\xi$ , is introduced for precise prediction of the universal local soot condition and it works fairly well in the wide range of the fuel (C1 ~ C4) under the conditions considered in the present study.

## Key Words

Radiation, Emissivity, Soot, Flame

## 1. はじめに

## 1.1 前報との関係

煤(すす)の放射特性は、火炎からの伝熱量に直接影響するだけでなく、それを積極的に利用する計測概念(例えば放射温度計測システムなどで応用されている)に深く関わる。従来、工学的には煤には灰色体近似が使えることを前提としており(例えば<sup>1)~3)</sup>、この仮定が成立すれば輝炎の「明るさ」はそのまま温度を表すことになる。前述の単色放射温度計では、放射体の放射率を与えさえすれば、その放射体の温度計測が可能である。しかし、気相に浮遊する微小な煤粒子群からの光

に灰色体近似を用いるのは、厳密には不適當である。

煤とは、燃焼場中の燃料過多(酸素不足)状態で発生する、炭素を主成分とした粒子状浮遊物質(Particulated Matter:PM)である。その形状は一定しておらず数十ナノメートルの一次粒子が鎖状につながり、大きさが数百ナノメートル程度であることが知られている。我々が普段目にする輝炎からの光とは、燃焼性生物として気相に浮遊する煤が高温にさらされた際に発する電磁波である。もしも煤粒子同士が密集し、あたかも一つの塊となって存在すれば、炭素の塊からの熱放射と同等の輻射特性を持つと考えて差し支えない(=灰色体近似

\* 1 Hokkaido University  
N 13 W 8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-8628, Japan  
\* 2 Nagoya University  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8603, Japan  
\* 3 Noritake Co., Limited  
3-1-36, Noritake, Nishi-ku, Nagoya, Aichi 451-8501, Japan  
\* 4 Chubu University  
1200 Matsumoto, Kasugai, Aichi 487-8501, Japan

\* 1 北海道大学大学院工学研究科  
〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目  
\* 2 名古屋大学大学院工学研究科  
〒464-8603 愛知県名古屋千種区不老町  
\* 3 ノリタケカンパニーリミテド  
〒451-8501 愛知県名古屋市西区則武新町3-1-36  
\* 4 中部大学工学部  
〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200

が適用できる)。しかしながら、実際には煤粒子はその大きさに比べて大きな隙間を持って「まばら」に存在する。観察方向に煤の光学的厚さが十分に厚ければ、隙間の存在はさほど重要ではなく灰色体の近似を適用できるが、そうでない場合は放射に寄与しない「隙間」の影響を考慮しなくてはならない(例えば3)4)。従って、特に輝炎の光学的厚さが薄い場合には放射体としての灰色体近似が保証されず、ひいては局所的に異なる煤状態を考慮する必要が生じる<sup>5)</sup>。隙間が占める割合が多い(=煤がまばらに存在する)程、その影響が強くなることは想像に難くない。

我々は前報にてプロパン空気拡散火炎(対向流拡散火炎バーナを用いる)にて輝炎の分光計測を行い、主に煤からの放射光における波長依存性について検討を行った<sup>6)</sup>。灰色体からのずれは、放射率として用いられる以下のモデル関数<sup>7)</sup>

$$\varepsilon_{LF, \lambda} = 1 - C \exp \lambda^{-\alpha} \quad (1)$$

を参考にし、モデルパラメータである $\alpha$ の値により依存性の大小を決定した。その結果、放射率の波長依存性パラメータ $\alpha$ はゼロではなく、輝炎には灰色体近似が適用できないことを示した。さらに $\alpha$ は、火炎垂直方向の位置によって変化し、煤粒子径が小さく単体粒子で存在する程小さくなる、すなわちその状況下の輝炎は灰色体へと近づくことを示した。このように $\alpha$ を知ることによって定性的な局所の煤状態を間接的に判定し、分光法が局所煤状態の診断に有効であることを明らかにした。

## 1.2 本報での狙いと目的

前報<sup>6)</sup>では、プロパン-空気拡散火炎において噴出速度を固定した単一の条件のみを用いて、分光により煤特性量の測定が可能であることを示したが、適用条件(例えば燃料種による影響)については未検討のままである。燃料が異なると、燃焼に伴って発生する煤の量が異なるのは周知の事実である。もしも前報で煤パラメータになると推測された $\alpha$ の値が、例えば異なる燃料種に共通に定義できる物理量などで整理することができれば、我々が提案する「分光法による煤状態の診断」に汎用性を与えることになる。

本研究で放射源として考える煤は、炭化水素燃料が熱分解して生成する多環芳香族炭化水素(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, 以下PAHsと表記する)の多環化により生成すると言われている(例えば8)~17)。そのPAHsは、反応物である炭化水素系燃料の熱分解および水素脱離などを経て生成する。例えば燃焼場中で一番存在量が多いPAHsであるベンゼン(ナフタレン, フェナンスレンなど, PAHsの多環化の元となる物質)は、プロパギラジカルなどのC3系, あるいはC2またはC4系の結合によってもたらされることが知られている<sup>8)~13)</sup>。燃料である炭化水素(メタン, エタン, プロパンなど)は、加熱に伴う脱水素および結合過程によってC(炭素原子)の数を増加してゆくため、ベンゼン形成過程で重要となるC2~C4系の分布に影響を与える。このように、煤に至る経路は燃料種や外部条件(例えば予熱や酸化剤濃度など)によって変化し得る。しかし、その逆、すなわち煤を観察することでそれ

がどの燃料からどのようにして生成したものなのか判別することはできない。我々が感じる「燃料種による煤生成の違い」とは、単に生成量とそのサイズ分布の違いにすぎず、それは上記に示した燃料の熱分解過程(脱水素反応, 多環化など)と密接な関係を持つ。つまり、観察される局所の煤の放射特性値(式(1)の $\alpha$ )は、燃料種, 特に燃料中の炭素・水素の量に加え、拡散火炎の構造を決めるのに重要となる速度勾配(対向流装置では噴出速度とバーナ間距離にて定義される)(例えば18)などを反映しているものと考えられる。

そこで本報では、燃料としてメタン(CH<sub>4</sub>), エタン(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), プロパン(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)およびブタン(C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)の4種類を用い、前報と同様の手法で対向流燃焼器を用いて分光計測を行い、輝炎の「みかけの放射率」における波長依存性について調べた。具体的には、燃料種の違い, 噴出速度, 燃料のモル分率をパラメータとすることで、燃焼面への投入燃料量, 滞在時間を変化させ、各々の場合における放射率の波長依存性を表す $\alpha$ の値がどのような影響を受けるのかを調べた。得られた値を整理することで、本質的に $\alpha$ の値を支配するパラメータを提示し、我々が提案する煤診断手法の汎用性について検討した。

## 2. 実験装置および実験方法

### 2.1 燃焼器

Fig. 1に本研究で用いた対向流燃焼器の概略図を示す。燃焼器に関する詳細は前報<sup>6)</sup>で述べているので、ここでは要点のみにとどめる。燃焼器は上下一対の軸対称ノズルより構成されており、上部ノズルより酸化剤流(O<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>)を、下部ノズルより燃料流(Fuel+N<sub>2</sub>)を供給する。各混合ガス流は、整流ビーズおよびノズル出口部の焼結金属円板を通過して一様な速度分布となり、ノズルから噴射される。各ノズルより噴射されたガスの衝突面近傍に平面状の拡散火炎が形成される。火炎を周囲雰囲気における外乱から隔離するため、上下ノズル

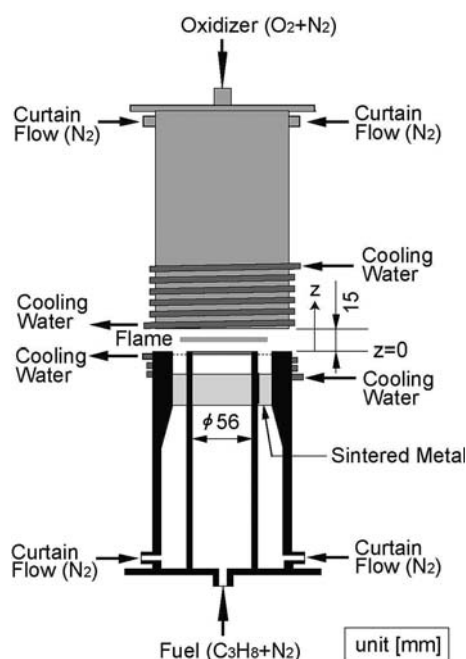


Fig. 1 Schematics illustration of counterflow burner

ル出口部外周から周囲流 (Curtain flow) として窒素を流す。火炎からの輻射などによるノズル出口部の温度上昇を防ぐため、燃焼器の外周に水冷式の冷却装置が取り付けられている。ノズル間距離は火炎の安定性を考慮して  $L = 15\text{mm}$  に固定する。また、燃料流と酸化剤流の速度比は 1 に固定する。燃料流出口における軸中心を原点とし、垂直上向きに  $z$  軸をとる。

## 2.2 実験条件

燃料には、メタン、エタン、プロパンおよびブタンを考慮する。本研究では 4 種類の実験 (それぞれ Case(1)-(4) と呼ぶ) を行った。Case(1) および (2) において燃料種の違いによる影響、Case(3) において流速による影響、Case(4) で燃料のモル分率による影響を検討した。各場合における条件設定値を Table 1 にまとめる。

## 2.3 温度測定

温度測定法についても詳細は前報<sup>6)</sup> に記載しているので、ここでは要点のみを述べる。計測装置は Pt/Pt-13%Rh 熱電対 (ニラコ製、素線径 0.1mm, 接合部径約 0.35mm, 氷浴にて零接点を設ける) を用いる。白金の触媒作用を防ぐために、熱電対の表面に二酸化ケイ素 ( $\text{SiO}_2$ ) の被覆を施す<sup>19)</sup>。測定は熱電対の接合部をノズル中心軸上に 0.5mm 間隔で移動させて行った。熱電対は素線が火炎面に対して平行となるように挿入した。二つの素線の間に生じる起電力をデジタルマルチメータ (アドバンテスト製, TR6846) を用いて測定し、熱起電力表<sup>20)</sup> によって温度に換算した。なお、輻射による熱損失の補正は、Kaskan の補正法<sup>21)</sup> に基づいて行う。前報と同様に、輻射補正には無限遠への輻射を仮定しており、煤や表面との輻射熱交換は考慮していない。

## <SIDE VIEW>

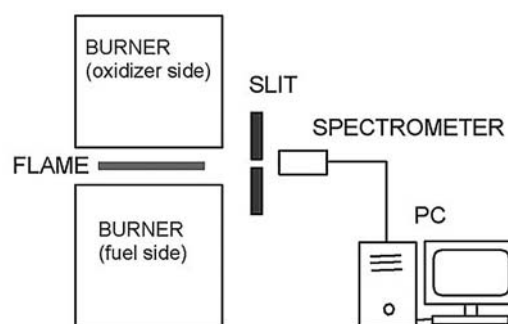


Fig. 2 Schematics of experimental apparatus

## 2.4 分光計測

Fig. 2 に本研究で用いた実験装置の概略図を示す。式(1)の  $\alpha$  の値を求めるために、輝炎からの単色放射能を分光器 (Ocean Optics 社製, USB2000) によって計測した。分光器の集光レンズの手前にスリット (幅 0.3mm) を置き、測定波長域  $0.6\mu\text{m} \sim 0.9\mu\text{m}$  の範囲を測定した。得られたデータは、高温標準黒体炉 (チノー製, IR-R8) を同分光器で測定した黒体の単色放射能との比、すなわち単色放射率を求め、波長の関数としてプロットし、式(1)で近似して指数  $\alpha$  の値を求めた。また、あらかじめ各条件において、カセットメータ (最小目盛り 0.1mm) によって輝炎の存在領域を計測し、その存在範囲を目安として分光計測を行った。Table 2 に分光計測範囲を示す。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 燃料種の違いによる輝炎の違い (火炎の直接写真)

Fig. 3 に、各燃料種による火炎の直接写真を比較して示す。これらの燃焼条件 (燃料濃度および噴出速度) は全て同じものである (それぞれ  $X_f = 0.55$  および  $V = 4.0\text{cm/s}$ )。図からわ

Table 1 Experimental condition

Conditions	Fuel	Outlet velocity	Fuel mole fraction
Case (1)	Methane, Ethane, Propane, Butane	4.0 cm/s	0.55
Case (2)	Methane, Ethane, Propane	5.5 cm/s	0.55
Case (3)	Methane	4.0, 5.5, 7.0, 8.5 cm/s	0.55
Case (4)	Propane	4.0 cm/s	0.50, 0.55, 0.60

Table 2 Observed range

Case (1)				
Fuel	Methane	Ethane	Propane	Butane
Observed range, $z$ [mm]	8.0 ~ 10.0	8.0 ~ 10.0	8.0 ~ 10.5	8.5 ~ 11.0
Case (2)				
Fuel	Methane	Ethane	Propane	
Observed range, $z$ [mm]	7.0 ~ 9.5	7.5 ~ 9.5	7.0 ~ 10.0	
Case (3)				
Outlet velocity, $V_{\text{Fuel}} = V_0$ [cm/s]	4.0	5.5	7.0	8.5
Observed range, $z$ [mm]	8.0 ~ 10.0	7.0 ~ 9.5	7.5 ~ 9.5	7.5 ~ 9.5
Case (4)				
Fuel mole fraction, $X_{\text{Fuel}}$ [-]	0.50	0.55	0.60	
Observed range, $z$ [mm]	7.5 ~ 11.0	8.0 ~ 10.5	8.0 ~ 11.5	

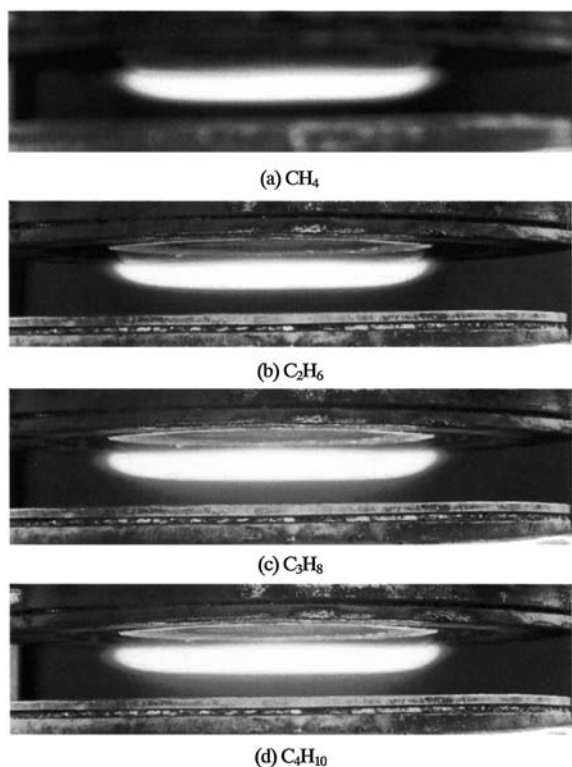


Fig. 3 Direct photographs of Fuel-Air counterflow diffusion flames. (a) Methane, (b) Ethane, (c) Propane, (d) Butane. Ejected velocity is 4.0cm/s with unity Fuel/Air flow ratio and Fuel mole concentration is 0.55 (Case (1) in Table 1).

かるように、燃料種の違いは、輝炎の厚さおよび明るさに違いをもたらす。輝炎の輝度は、煤生成量以外に局所温度の関数であるので、直接写真の輝度からだけで「燃料中の炭素数が増加すると煤量が増加する」とは判断できない。

### 3.2 温度分布および単色放射能分布 (0.8 μm)

Figs. 4(a)-(c)に各条件 (Case(1)(3)(4)) における温度分布および単色放射能分布 (観測波長: 0.65 μm ± 0.04 μm) を

示す。Fig. 4(a)はCase(1)を例に取り、燃料種の影響について調べたものである。図より燃料種の種類に依らず、温度はほぼ青炎の位置でピークを示すことがわかる。また、分子中の炭素原子が多い燃料ほど温度ピークの位置が酸化剤側へ移動する。これらの傾向は、図には示していないがCase(2)でも同様である。拡散火炎における火炎面 (通常青炎の位置と定義される) とは、そこに向かう燃料と酸素の拡散輸送量が量論比を保つ位置として決まる。同じ直鎖系の炭化水素燃料では、完全燃焼に必要な酸素のモル数は、燃料に含まれる炭素数の増加に伴い増加する。これが温度ピーク位置の変化をもたらす。温度ピークよりも燃料側 ( $z < 11.0\text{mm}$ ) では、分子中の炭素原子が多い燃料ほど温度が低い。一方、Fig. 3による火炎輝度およびFig. 4中の放射能強度分布は燃料側で大きいため、(炭素数が多いほど)燃料側にて放射伝熱量は顕著となる。本研究で考慮する流れ場は比較的小さいため (数cm/sのオーダー)、流れによる熱輸送量は少ない。このような条件下では、放射による伝熱量が相対的に増加する。このことは、対流が抑制された微小重力環境にて放射伝熱過程が相対的に重要となることと原理は同じである (例えば<sup>22)23)</sup>。煤発生量の多い炭素数の多い燃料では燃料側で温度分布の歪みが見られるが、この歪みの原因は上記の理由によるものと考えられる。

Fig. 4(b)はCase(3)を例に取り、噴出速度の影響を調べたものである。本研究では速度比は1、バーナ間距離は常に一定 ( $L = 15\text{mm}$ ) に固定しているため、この図は速度勾配 ( $dV/dz \sim 2V/L$ ) の影響を表しているともいえる。図によれば、温度のピークの位置は、噴出速度の増加に従い酸化剤側へ移動することがわかる。また、噴出速度が増加するとピーク付近の温度は低くなる。これは、例えばSungらによる結果に等しい<sup>24)</sup>。なお、放射能強度分布は、この程度の噴出速度の変化では殆ど影響を受けないことがわかる。

Fig. 4(c)はCase(4)を例に取り、燃料濃度の影響を調べたものである。図によれば、温度分布の形状およびピーク位置は燃料モル分率の変化によってほとんど影響を受けない。それと呼応するように、放射能強度分布も燃料濃度に対する依存

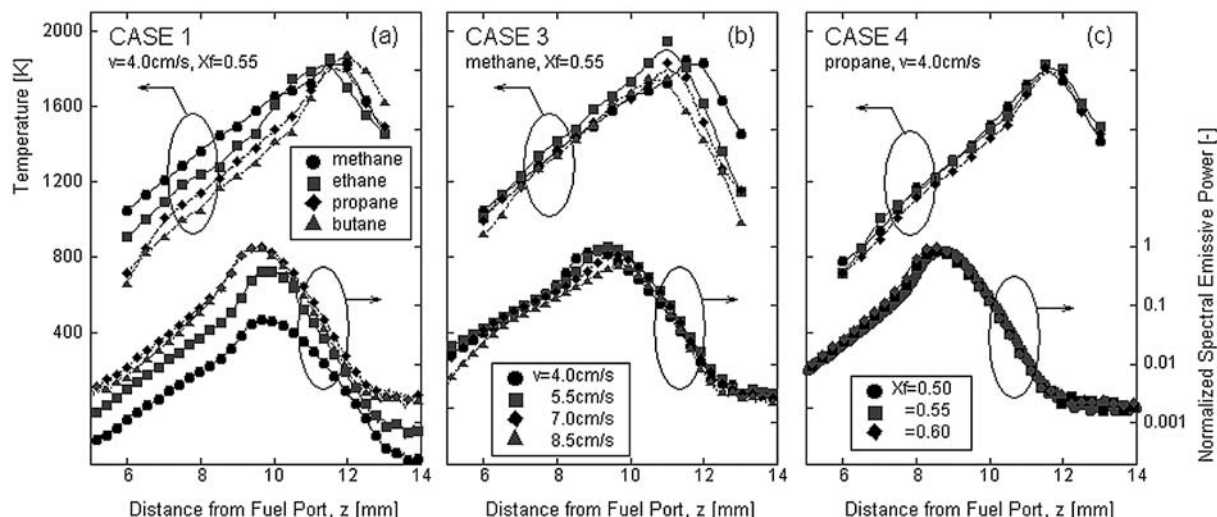


Fig. 4 1-D profiles of temperature and spectral intensity of 0.65 μm from luminous flames. (a) Case (1), (b) Case (3), (c) Case (4)

性は弱い。今回の燃焼条件では、燃焼にあずかる酸素の量が絶対的に少ないため、投入された燃料のうち大部分は燃焼せずに外へ流れる。よって酸素濃度を増加させればこの状況は変わり得ると考えられる。

### 3.3 $\alpha$ の一次元分布および温度と $\alpha$ の関係

Fig. 5に、Case(1)-(4)における $\alpha$ の一次元分布を示す。 $\alpha$ の値の算出方法については前報<sup>6)</sup>と等しいのでここでは省略する。なお、本報では $\alpha$ は全波長域(0.6 $\mu\text{m}$ ~0.9 $\mu\text{m}$ )で評価したものである。図よりいずれのパラメータを変化させても、観察位置の増加に対して $\alpha$ はほぼ線形に減少することがわかる。 $\alpha$ の勾配はどの条件においてもほぼ等しいのに対し、切片の値は条件によって様々であるため、ある位置における $\alpha$ の値は幅広い範囲を占める。これは、 $\alpha$ を調べることにより燃焼条件に依存した煤発生量を推測できることを暗示する。一般に煤およびその前駆体であるPAHsの存在量は局所温度と強い相関があることが知られている<sup>例えは<sup>25)</sup>26)</sup>。そこで、次に局所の温度を用いて $\alpha$ を整理することを試みる。

Fig. 6に、Case(1)-(4)における局所温度と $\alpha$ との関係を示す。図より、全ての条件において、温度が高くなると $\alpha$ の値

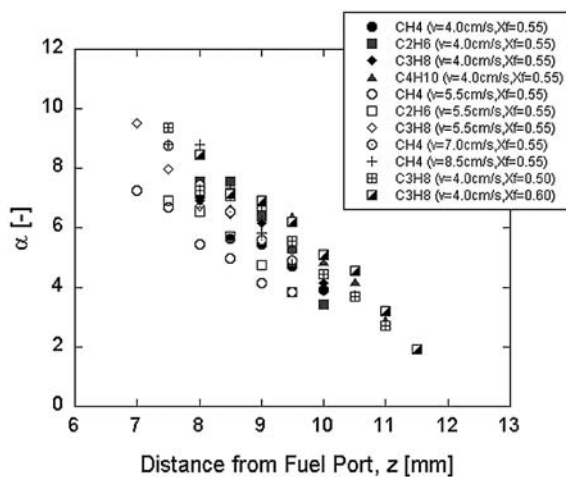


Fig. 5 1-D profiles of  $\alpha$  in Eq.1 in various imposed conditions

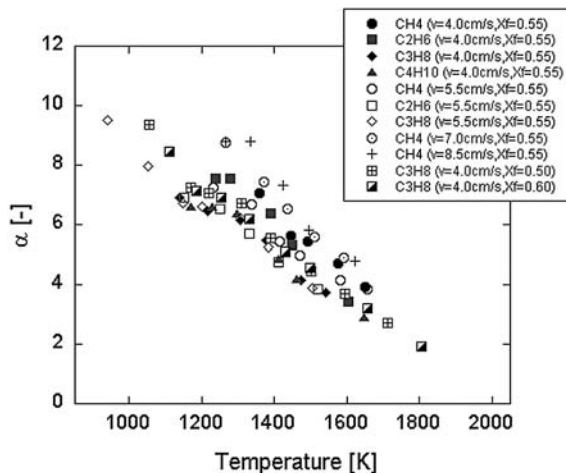


Fig. 6 Dependency of  $\alpha$  on local temperature in various imposed conditions

はほぼ線形に減少することがわかる。これより、多少のばらつきはあるものの、局所温度と $\alpha$ には相関関係があることがわかる。つまり本研究で変化させた条件範囲においては、煤の放射特性は局所温度によりある程度推測が可能であると言える。PAHsの存在量は局所温度と相関関係があることを鑑みれば、これはPAHsの生成量が煤生成量に直接関係することを示唆している。同一局所温度内における $\alpha$ のばらつきは、PAHs生成過程で説明した通り、局所の組成に依存したものと考えられる。煤放射特性を類推する際、局所温度以外の要素がどのように関係するのか知ることは、煤放射の制御が望まれる工学的にも価値のあることである。そこで、代表的な局所温度において、各パラメータ(燃料種、噴出速度、燃料濃度など)による $\alpha$ の値の変化を調べることで、局所温度以外の影響が煤放射特性にどのように現れるのかを検討する。

### 3.4 温度以外のパラメータが $\alpha$ の変化に与える影響

ここでは、代表的な局所温度において、燃料の種類、噴出速度および燃料のモル分率を変化させた際の $\alpha$ の応答について調べる。なお、燃料の種類を表すパラメータとして、分子中の炭素原子数と水素原子数の比であるC/H比を用いた。Case(1)-(4)の結果をFigs. 7(a)-(d)に示す。

Figs. 7(a)(b)では、Case(1)とCase(2)においてC/H比が $\alpha$ に与える影響について調べた。図に示すように、C/H比が大きくなると $\alpha$ の値はほぼ線形に減少することがわかる。すなわち、炭素数の多い分子ほど、その燃焼過程で発生する煤の放射特性は $\alpha = 0$ (灰色体)に近づくことを示唆する。この結果は前報<sup>5)</sup>で得られた結論と矛盾しない。また、炭素数の多いヘプタンなどの燃焼では輝炎に灰色体近似を適用することが適切とされており<sup>例えは<sup>27)</sup></sup>、これまでの経験則にも合致する。燃料中の炭素成分を増加させると、一般に発生する煤量が増加する。電磁波を発する源が多いほど、互いに散乱しあって波長依存性がなくなる傾向がある。逆に、煤量の小さな燃料では散乱が十分に行えず、灰色体から大きくずれる場合が存在する。このことは、前報において煤の数密度に依存して $\alpha$ の値が変化することと基本的に同じである。

Fig. 7(c)には、Case(3)における噴出速度と $\alpha$ の関係を示す。図より、流速の増加に伴い $\alpha$ の値も増加することがわかる。流速が変化することにより、火炎中における煤の滞留時間が変化する。一般的に、火炎中の滞留時間が長くなるほど、煤粒子は鎖状につながり、凝集して大きな塊を形成する<sup>9)~11)</sup>。噴出速度が速くなると、煤粒子は火炎中での滞留時間が短くなり、粒子が十分に成長する前に火炎から放出、または青炎で酸化、分解される。そのため、噴出速度が遅い場合と比較して、火炎中での煤粒子の粒径や体積分率は小さくなり、放射率の波長依存性が大きくなるものと考えられる。

Fig. 7(d)には、Case(4)における燃料のモル分率と $\alpha$ の関係を示す。図より、モル分率の変化に対して $\alpha$ の値はほとんど変化しないことがわかる。今回設定した条件ではモル分率の変化が小さく、煤への成長経路には大きく作用しなかったものと考えられる。

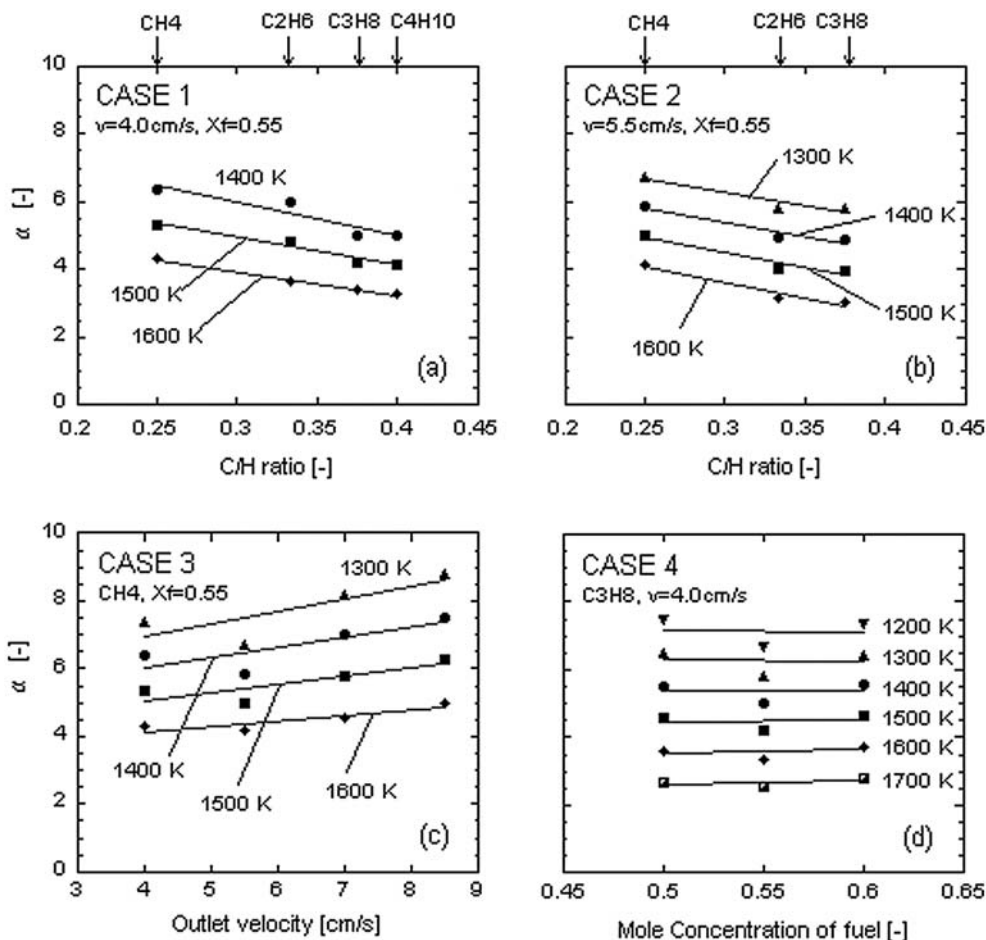


Fig. 7 Changes of  $\alpha$  in various experimental parameters; (a)-(b) C/H ratio, (c) Ejected velocity, (d) Mole concentration of Fuel

### 3.5 $\alpha$ を制御するパラメータの導入

前節で調べたC/H比，噴出速度（速度勾配）および燃料のモル分率の影響を踏まえ，以下に示す無次元パラメータを用いて $\alpha$ の整理を試みる。

$$\xi = \frac{R_{CH} \cdot X_{Fuel}}{(2V/L)^*} \quad (2)$$

ここで， $R_{CH}$ はC/H比， $X_{Fuel}$ は燃料のモル分率， $(2V/L)^*$ は速度 $V = 4.0\text{cm/s}$ ，長さ $L = 15\text{mm}$ を代表値として無次元表記した速度勾配を表す。この無次元数 $\xi$ は，分子が燃料流にどの程度炭素原子が含まれるかを表し，分母は流速，つまり，煤粒子が火炎中にどの程度滞在できるかを表す。そのため，これらの比は煤粒子の成長のしやすさを示すパラメータと考えることができる。分母に相当する速度勾配は拡散火炎の構造を決める上で極めて重要なパラメータであることは，過去の研究により示されている<sup>例えは18)</sup>。すなわち，この式には，局所の燃焼条件に依存した火炎構造の違いを間接的に含み，その影響が考慮されているものと理解してよい。

この無次元数 $\xi$ を用いて局所温度別に $\alpha$ を整理したものをFigs. 8(a)-(c)に示す。図から明らかなように， $\xi$ と $\alpha$ にはほぼ線形関係が成立し，各局所温度レベル(1400K~1600K)において $\xi$ は $\alpha$ をよく整理できることがわかる。したがって，局所温度と $\xi$ を知ることができれば，煤の状態を表す $\alpha$ が得ら

れることが分かる。すなわち，既知のC/H比，燃料のモル分率に加え，速度勾配と局所温度が分かれば，その位置の煤の状態を $\alpha$ という形で知ることができるということを，この結果は示している。

一般に消炎限界付近を除けば，火炎温度は速度勾配には強く依存せず，生成エンタルピーの差分だけ燃料による火炎温度の違いが存在する。拡散火炎面における速度勾配と煤酸化に重要なラジカルとされるOHやOには負の相関があると報告されているが<sup>24)</sup>，速度勾配の増加に伴い，火炎中で生成したOH，Oなどの強い酸化力をもつラジカルが燃料側に侵入し，煤の生成反応に寄与しはじめる<sup>28)</sup>。そのため，燃料側且つ高温部に存在する煤はそれらにより分解（酸化）してサイズが小さくなり，みかけの放射率が下がるものと予測される。このことは，温度一定の場合における $\xi$ と $\alpha$ の関係をそのまま反映したものと考えられる。つまり，上記の $\xi$ は，極めて単純な関数ではあるものの，煤発生量に対する物理過程の情報を含む。ただし速度勾配とOHラジカルとの関係は常に線形ではなく，消炎限界付近では非線形となる。また，OHラジカルの存在量と煤酸化速度には温度が強く依存する（提案されている活性化エネルギーの値はゼロではなく比較的大きい）<sup>例えは11)</sup>。このように線形関係からずれる範囲においては，上記の式で与えた $\xi$ と $\alpha$ の関係は崩れ，適用対象外となるであろう。し

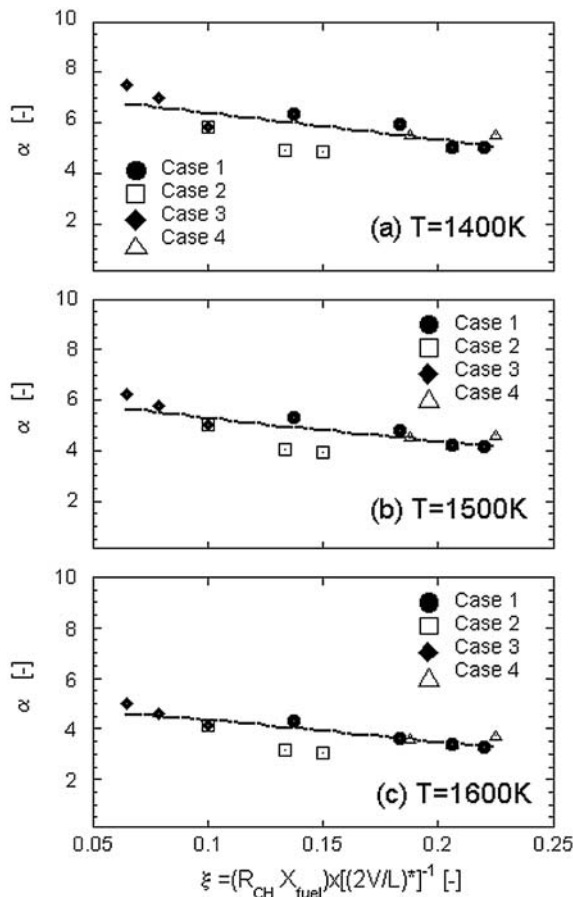


Fig. 8 Correlation of  $\xi$  (engineering parameter proposed in the present study) to  $\alpha$  in constant temperature conditions at which local temperature is (a) 1400K, (b) 1500K, (c) 1600K.

かしながら、上記の単純な表記でも安定燃焼範囲においては十分工学上利用できることは注目に値すると考える。

#### 4. まとめ

メタン、エタン、プロパンおよびブタンを燃料とした対向流拡散火炎燃焼器を用いて分光計測を行い、対向流拡散火炎で生成する煤のみかけの放射率を調べた結果、以下のことが分かった。

1. 局所温度が等しい条件下では、C/H比が大きい、もしくは出口流速（すなわち火炎面での測度勾配）が小さい程、 $\alpha$ の値は小さくなる。
2. 場の局所情報のうち温度さえ与えられれば、煤放射特性 $\alpha$ は無次元数 $\xi$ を介して統一的に表記できる可能性がある。

#### 謝辞

本研究の一部は文部科学省ハイテク・リサーチ・センター整備事業の援助を受けて行われた。ここに記して謝意を表します。

#### 文献：References

- 1) Beer, J. M., Heat Transfer in Flames; Afgan, N. H. and Beer, J. M. Eds., (John Wiley & Sons), p. 30 (1974)

- 2) 辻廣, 燃焼機器工学, (日刊工業), p. 118(1971):Tsuiji, H., Combustor Design Engineering, (Nikkan Kogyo), p. 118 (1971)
- 3) 新岡嵩, 河野通方, 佐藤順一, 燃焼現象の基礎, (オーム社), p. 190-193(2001):Niioka, T., Kono, M., Sato, J., Nensyougensyou no Kiso, (O-musya), p. 190-193(2001)
- 4) 甲藤好郎, 伝熱概論, (養賢堂), p. 365-371(1964):Koto, Y., Fundamentals in Heat Transfer, (Yokendo), p. 365-371 (1964)
- 5) Senftleben, H., Benedict, E., *Ann. Phys. Leipzig.*, **69**, 297(1919)
- 6) 中村祐二, 高橋真一, 鎌田祐一, 平沢太郎, 日エネ誌, **86**, 179-185(2007):Nakamura, Y., Takahashi, S., Kamata, Y., Hirasawa, T., *J. Jpn. Inst. Energy*, **86**, 179-185(2007)
- 7) Siegel, R., Howell, J. R., Thermal Radiation Heat Transfer, 3rd ed, (Taylor&Francis), p. 652-679(1992)
- 8) Haynes, B. S., Wagner, H. G., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **7**, 229 (1981)
- 9) Frenklach, M., Warnatz, J., *Combust. Sci. Technol.*, **51**, 265(1987)
- 10) Backhorn, H., Soot Formation in Combustion., (Springer-Verlag), p. 9-104(1994)
- 11) Kennedy, I. M., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **23**, 95(1997)
- 12) Wang, H., Frenklach, K., *Combust. Flame*, **110**, 173(1997)
- 13) Marinov, N. K., Pitz, W. J., Westbrook, C. K., Vincitore, A. M., Castaldi, M. J., Senkan, S. M., *Combust. Flame*, **112**, 192(1998)
- 14) Ritcher, H., Howard, J. B., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **26**, 565 (2000)
- 15) 新岡嵩, 河野通方, 佐藤順一, 燃焼現象の基礎, (オーム社), p. 287(2001):Niioka, T., Kono, M., Sato, J., Nensyougensyou no Kiso, (O-musya), p. 287(2001)
- 16) Frenklach, M., *Physical Chemistry Chemical Physics*, **4**(11), 2028 (2002)
- 17) D'Anna, A., Kent, J. H., *Combust. Flame*, **132**, 715(2003)
- 18) Tsuiji, H., Yamaoka, I., *Proc. Combust. Inst.*, **12**, 997(1969)
- 19) 金原寿郎, 気体の燃焼物理 (第1版), (裳華房), p. 67 (1985):Kinbara, T., Combustion Phenomena in Gas Phase, 1st ed., (Shokado), p. 67(1985)
- 20) JIS C 1602-1981, 日本規格協会
- 21) Kaskan, W. E., *Proc. Combust. Inst.*, **6**, 134(1957)
- 22) Ju, Y. G., Guo, H. S., Maruta, K., Liu, F. S., *J. Fluid Mech.*, **342**, 315(1997)
- 23) Williams, F. A., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **26**, 657(2000)
- 24) Sung, C. J., Liu, J. B., Law, C. K., *Combust. Flame*, **102**, 481 (1995)
- 25) McEnally, C. S., Pfefferle, L. D., *Combust. Flame*, **129**, 305 (2002)
- 26) Skjoth-Rasmussen, M. S., Glarborg, P., Ostberg, M., Johannessen, J. T., Livbjerg, H., Jensen, A. D., Christensen, T. S., *Combust. Flame*, **136**, 91(2004)
- 27) Siddall, R. G., McGrath, I. A., *Proc. Combust. Inst.*, **9**, 102(1963)
- 28) Du, J., Axelbaum, R. L., *Combust. Flame*, **100**, 367(1995)