

Original Paper

Spectroscopic Study on Luminous Counterflow Propane-Air Diffusion Flames: Measurement of Local Emissive Properties from Soot Cloud -1st Report: Non-Gray Body Feature of Luminous Flame & Its Applicability to Soot Diagnostics

Yuji NAKAMURA *¹, Shinichi TAKAHASHI *², Yuichi KAMATA *³, and Taro HIRASAWA *⁴

(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

— 1 : 局所放射率の波長依存性を利用した煤状態診断手法の提案

中村祐二*¹, 高橋真一*², 鎌田祐一*³, 平沢太郎*⁴

Spectroscopic study on local radiative properties of luminous flame, i.e. emission from soot cloud, is performed by utilizing counterflow burner. By means of propane-air counterflow diffusion flames, measurements of one-dimensional (perpendicular to the flame surface) distributions of temperature and radiative quantities in the stationary flame are accomplished. Examined spectral range is in the visible and near-infrared regime (0.6 μm -1.0 μm). It turns out that bulk emissivity from the luminous flame, ϵ_{LF} , shows apparent wavelength dependency in the observed spectral range ($\epsilon_{\text{LF}} = \epsilon_{\text{LF}}(\lambda^{-\alpha})$), and its power-law constant, α , varies along the perpendicular to the flame surface. By taking the longer observed wavelength in the visible regime (eg., 0.9 μm), α closes to the constant irrespective of the observed location. By taking the shorter observed wavelength (eg., 0.7 μm), on the other hand, α tends to be monotonically decreased to the high temperature regime (α has inverse correlation to the flame temperature). This trend is somewhat similar to the particle diameter or volume fraction of the soot cloud according to the previous literatures. It is suggested that non-gray body feature of the luminous flame (i.e. wavelength dependency on bulk emissivity) is pronounced when the large soot fragments are coarsely distributed. Adopting the shorter wavelength may work for better diagnostics on local soot status.

Key Word

Radiation, Emissivity, Soot, Flame

1. 序 論

1.1 はじめに

煤(すす)は、拡散火炎や燃料過多な予混合火炎などの酸素が不足した燃焼状態で生じる固体微粒子である。その主成分は炭素であり、直径がおおよそ数十ナノメートル程度の球形の一次粒子が多数集合し、数百ナノメートルオーダーの鎖状と

なって存在する。これらは総じてPM (particulate matter) と呼ばれており、大気汚染あるいは酸性雨をもたらす元凶としてその排出抑制が求められている。煤の除去には、例えばDPF (diesel particulate filter) などに代表される後処理装置が知られているが、排出ガスの圧力損失を避けるためフィルタの間隙はある程度以下にはできない等の制限がある。そのため、例

* 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

えば最も人体に大きな影響を及ぼすとされるSPMなどの超微粒子(数nm以下)を効果的に除去することが難しい。以上を鑑みれば、一旦生成された煤の排出低減を後処理のみで除去するのではなく、燃焼場において積極的に煤の生成自体を抑制することが望ましい。そのためにはまず、燃焼場において「どこ」に「どのような」煤が「どれだけ」発生しているのかを正しく把握すること、すなわち「局所における煤状態の可視化」が必要である。また、最終的に燃焼装置における煤制御への適用を考慮すれば、局所の煤状態を「手軽」に「その場で」可視化することが望ましい。

これまでの研究では、局所の煤状態を知るために、燃焼場からの煤を直接サンプリングして電子顕微鏡などで観察することが多い(例えば1)2)。この手法は可視化という面では明快であるが、接触法で採取された煤が本当にその場の状態と同一であるかどうか保証することは極めて難しいだけでなく、リアルタイムでの計測には向かない。非接触診断法としては、レーザ誘起赤熱法(LII: Laser-Induced Incandescence)や透過法、散乱法などのレーザ計測手法がある(例えば3)~7)。これらの計測法は、局所の煤状態を知るのに適しているが、常に「観察用光源」を必要とするため、装置は巨大且つ高価となり手軽さに欠ける。これらの欠点は、例えば煤発生状況を常時モニタリングして燃焼を制御するといった現場への応用を難しくする。

以上から、現場での応用に耐え得る手軽さを有した煤の非接触計測にはレーザを利用しないものがよい。その一つの案として「輝炎からの放射光(主な放射媒体は煤である)を利用する方法」が挙げられよう。もしも煤からの放射特性を解析することによって、局所の煤情報を抽出することができれば「非接触」で「手軽」な煤状態のモニタリングが可能となる。本研究が目指すところはここにある。

1.2 煤からの放射とは

燃焼過程で生成した煤は、前述の通り大きさが数百ナノメートルの鎖状物質であり、それらが燃焼場中の高温にさらされ、場の温度に応じた熱振動に伴う電磁波(=熱放射)を発する。しかしながら、煤は空間中に「まばら」に存在するため、よく用いられる「輝炎における熱放射」とは、正しくは「(発光体の存在しない空間も含んだ)煤群からの放射」である。したがって、普段我々が輝炎から受ける「煤(群)からの放射量」とは、場の温度のみならず、放射源である煤の状態、すなわち一次粒子の集合度、数密度、総表面積などの関数となる筈である。放射エネルギー(放射能)を定式化する場合、温度以外の寄与は黒体からのずれである「放射率」に含まれる。そのため「煤(群)からの放射率」とは、密集度などの空間情報を含んだ「バルク(全体)で評価した」ものであり、煤の原料である炭素そのもの放射率(=1)とは明らかに異なる。この意味で、我々が普段目にする炎の放射率とは、「煤の放射率」ではなく「輝炎の放射率」あるいは「煤粒子群の“みかけの”放射率」と呼ぶほうがふさわしい。以後、単に「煤からの放射率」と記すが、特に注釈のない限り、

これは「“みかけの”放射率」を指すこととする。

ところで、一般に輝炎の(単色)放射率は、以下の式で表される⁸⁾。

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

式(1)は、Lambert-Beerの法則により与えられる放射率と吸収係数の関係式($\varepsilon_{\lambda} = 1 - \exp(-\alpha_{\lambda} L_e)$; α_{λ} , L_e はそれぞれ単色吸収係数、光学厚さ)において、 $\alpha_{\lambda} = Ak\lambda^{-\alpha}$ (A , k はそれぞれ煤の体積分率、定数)と表記できると仮定し、 $C = \exp(-AkL_e)$ と置けば導ける。係数 C と指数 α は燃料や燃焼の状態によって決まる定数であり、 $C=0$ (すなわち A , L_e が十分大きい)ならば黒体、 $\alpha=0$ (すなわち波長依存性がない)ならば灰色体となる。関数の形から推測されるように、指数 α の変化が単色放射率 $\varepsilon_{LM,\lambda}$ に与える影響は、係数 C のそれに比べて格段に大きい。そのため単色放射率は、近似的に指数 α のみの関数と考えて差し支えないと推測される。

Yagi & Iino⁹⁾は、赤外域の波長においてMie散乱理論に基づき予測される α の値を1としている。しかし、散乱断面積は球と鎖状では著しく異なる上、煤はどれも一様の特性を仮定している(異なるのは数のみ)。これは実際に観察される煤画像(例えば1)からも容認できない。Siddall & McGrathは α の値を様々な燃料を対象に調べた¹⁰⁾。その結果、燃料さえ決まれば α は一義的に決まり、炭素数の大きな燃料ほど0に近い(=灰色帯近似が適用できる)ことを示した。しかし、この実験では、既燃ガス中から採取した煤に透過法(赤外波長)を適用しており、サンプルにはどこで生成した煤であるかという位置情報が含まれていない。また、前述の直接法の際に述べた通り、採取された煤が燃焼場中と同じ状態であるのかどうか保証することは困難である。一方、Vincitore & Senkan¹¹⁾やHwang & Chung¹²⁾らは、対向流拡散火炎中の煤を直接レーザ(散乱法や透過法)によって計測し、燃料側ノズルからの距離によって煤の体積分率が変化することを示した。つまりみかけの放射率とは単に燃料のみで定まるものではなく、燃焼条件を反映して位置(空間)の関数となることを示唆する。このことは、ろうそくの炎の色温度が灰色体近似でうまく表せないのは、様々な煤が混在しているためとしたSenftleben & Benedict¹³⁾の予測を支持するものである。また、煤のサイズ分布などの特性が燃料のみならず様々な燃焼条件により異なるため、計測対象によって煤放射スペクトルに一定の理解が得られないという報告¹⁴⁾にも合致する。

1.3 本研究の目的と期待できる効果

上記の通り、輝炎からの放射には、場の温度だけでなく局所の煤特性量の情報を含む。「みかけの(単色)放射率」という概念を用いれば、それは局所温度と独立に、煤状態量のみの関数として与えられる。それをある近似(=モデル)関数(例えば式(1))で与えるとき、モデルパラメータ(ここでは指数 α)は、局所の煤状態量が強く関連することが予想される。そこで本報では、火炎面垂直方向における輝炎からの「みかけの放射率分布」を分光法により求め、放射率のモデル関数パラメータである指数 α が局所煤特性とどのような関係に

あるのか調べることを狙いとする。火炎面垂直方向の分布を得るため、本実験ではプロパン-空気対向流拡散火炎を用い、様々な可視域波長で得られる α の一次元分布について検討する。 α に対する燃料種および燃焼条件の影響については第2報に譲ることとし、ここではまず一般的な輝炎を対象とした分光計測により、局所の煤状態量を記述できるかどうかの可能性を探ることを目指す。レーザー計測や赤外域の分光に比べて可視域の分光は極めて安価であるため、本研究で得られる知見は、煤状態をモニタリングする装置への応用も期待できる。

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。基本的にはSeshadriらが使用した燃焼器¹⁵⁾と同様であり、上下に対称な二つの軸対称ノズルから構成される。上部ノズルはジュラルミン製の整流部と真鍮製のノズル出口部、下部ノズルは真鍮製の整流部およびノズル出口部からなる。燃焼器上部ノズルより酸化剤(酸素および窒素の混合気)を、下部ノズルより燃料(プロパン(C_3H_8)および窒素の混合気)を供給する。各混合気は整流部内部のビーズを通過して大規模な乱れが取り除かれ、均一な流れとなってノズル出口部へ導入される。続いてノズル出口部の先端に固定された焼結金属円板(SMC製、材質ブロンズ、直径60mm、内径56mm、厚さ5mm、公称濾過精度 $20\mu m$)を通過し、半径方向に一樣な速度分布となって大気中に放出される。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。火炎を周辺雰囲気に含まれる外乱から保護するため、上下ノズル共に出口部の外周(面積 $38.9cm^2$)から周囲流(Curtain Flow)として窒素を流す。また、火炎からの放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

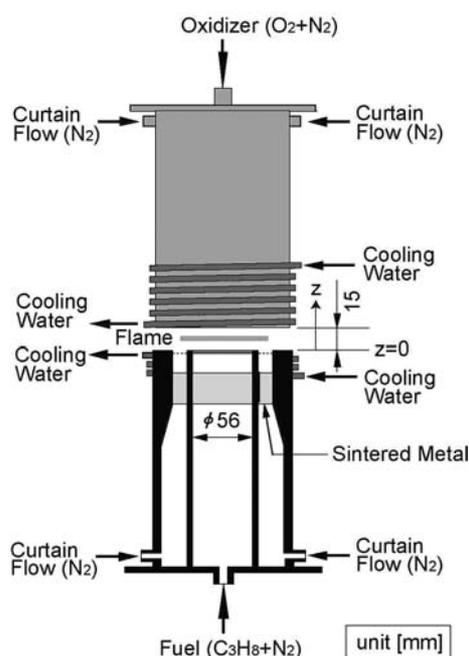


Fig. 1 Schematics illustration of counterflow burner

装置を設ける。ノズル間距離は、火炎の安定性およびノズル出口部の温度上昇を考慮して15mmとした。ノズル中心軸を z 軸とし、燃料噴出口を原点として酸化剤出口に向かって正の方向をとる。また、燃料流および酸化剤流ともに室温で5.5cm/sとする。実際は火炎からの放射熱によりノズル出口付近での温度は上昇するため(ただし温度上昇はせいぜい $100^{\circ}C$ 程度)、噴射速度は5.5cm/sよりも大きい。燃料流中のプロパン濃度および酸化剤流中の酸素濃度は、モル分率でそれぞれ $X_{C_3H_8}=0.55$ および $X_{O_2}=0.20$ とする。

2.2 温度測定

温度測定にはPt/Pt-13%Rh熱電対(ニラコ製、素線径0.1mm、接合部径約0.35mm)を用いた。素線の接合には都市ガスと酸素の予混合火炎を用いた。白金には触媒作用があるため、白金を用いた熱電対を裸線のままで用いると、素線の表面で化学反応が促進され、測定される温度が実際よりも高くなる可能性がある¹⁶⁾。そこで、都市ガス火炎中にヘキサメチルジシロキサン($[(CH_3)_2Si]_2O$)を注入し、その燃焼ガスによって熱電対の表面に二酸化ケイ素(SiO_2)の被覆を施した¹⁷⁾。また、素線の劣化を防ぐため保護管(セラミックス製、外径1mm、内径0.4mm)を用いた。測定は、熱電対の接合部をノズル中心軸上に0.5mm間隔ずつ移動させて行う。位置合わせにはカセットメータ(最小目盛0.1mm)を用いた。素線上の熱伝導を最小限に抑えるため、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。温度測定を行う際、熱電対の表面に煤が堆積すると煤からの放射による熱損失が増加し、測定される温度が実際よりも低下する。そこで、一点の測定後直ちに熱電対を不輝炎に移動させ、堆積した煤を除去する操作を加えた¹⁸⁾。また、熱電対の振動や、熱膨張による接合部の降下を防ぐため、熱電対に適当な張力を加えながら測定を行った。熱電対の冷接点は氷浴で $0^{\circ}C$ に保った。二つの冷接点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¹⁹⁾によって温度に換算した。接合部からの放射熱損失による温度低下分を補償するため、Kaskanの補正法²⁰⁾に基づいて温度補正を行った。このとき、熱電対の接合部形状は球近似を採用し、 $Nu=2$ として与える²¹⁾。補正では無限遠($300K$)への熱放射を仮定し、ここでは熱電対測定点と煤塊との間の熱放射交換などによる影響は含めていない。この意味で、補正量は実際よりも多く見積もられる(=計測温度値が低くなる)可能性があるが、煤塊の情報がないためここではその効果は無視する。

2.3 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。輝炎からの放射スペクトルは分光器(Ocean Optics社製、USB2000、分解能0.35nm)によって計測する。本研究における測定波長域は $0.6 \sim 1.0\mu m$ の範囲である。分光器先端には集光レンズを取り付けてある。ただし、集光レンズはカタログ値で1度以下の広がりを持つため、その手前にスリット(幅0.3mm)を配置し、空間分解能の向上を図った。分光器ユニットは火炎

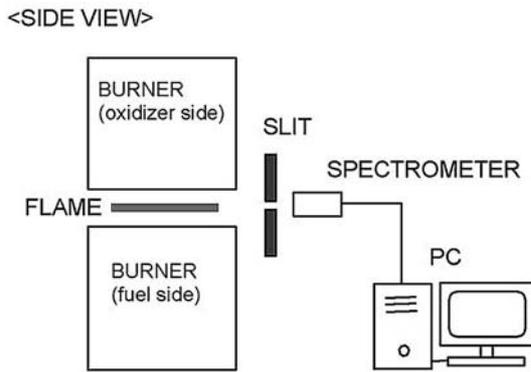


Fig. 2 Schematics of experimental apparatus

(端) から 10.0cm の位置に固定して計測を行った。実計測領域は火炎前面において高さ 2.05mm 以下 x 幅 7.10mm 以下となり、局所位置における分光計測で得られる値は、その位置周辺の平均値である。

データ解析のため、あらかじめ各温度における高温標準黒体炉 (チノー製, IR-R8) を同分光器で測定して得られた黒体の放射能スペクトルを採取しておく。計測された放射スペクトル分布は、その局所における温度 (熱電対で計測したもの) における黒体放射スペクトルと比較することで式 (1) の指数 α を決める。この際、前述の通り係数 C は固定する。なお、 α の値は輝炎が存在する軸方向位置 $z = 7.0 \sim 10.0$ mm の範囲を解析対象とした。計測時間は 10 秒以下とし、 $z = 7.0 \sim 10.0$ mm の範囲では S/N が 5 以上となることを確認している。その範囲外では背景光の影響が無視できなくなるため、今回の解析対象範囲とはしない。

3. 実験結果

3.1 火炎写真

Fig. 3 に本研究で用いた対向流拡散火炎の直接写真を示す。輝炎の存在領域は、約 $z = 6.7$ mm \sim 10.0mm であり、青炎の位置は $z = 11.8$ mm 近傍である。よどみ点は約 $z = 8.4$ mm (バーナ中央点よりも酸化剤側) の位置にあり、輝炎はよどみ点を中心にして上下にほぼ同じ幅だけ広がることを確認できる。火炎の端は若干上方にそりあがるものの、それ以外の位置では火炎はほぼ平面となる。この火炎は理論的に横方向へは一樣な分布になることが知られているため、この火炎を真横から分光器で眺める際、奥行方向には「全く同じ状態を持つ煤塊」しか存在せず、位置により変化する局所の煤特性値 (光学厚さ、波長依存性など) を得ることが可能である。火炎端

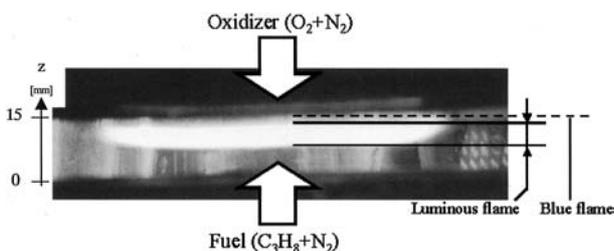


Fig. 3 Direct photograph of propane-air counterflow diffusion flame

部のそりあがり部分の分だけ光学厚さがずれるが、そりあがり部は全体の一割に満たないため、その影響は無視できるととする。

3.2 温度分布および単色放射能分布 ($0.8 \mu\text{m}$)

Fig. 4 に火炎面に垂直方向における温度分布および単色放射能強度分布 ($0.8 \mu\text{m}$) を示す。図中にカセットメータを用いて目視で確認できる輝炎の位置と青炎の位置を書き加えてある。図より、温度分布は酸化剤側にあたる青炎の位置付近でピークを取り、燃料側での温度上昇は緩やかで、酸化剤側での温度低下は急であることがわかる。燃料側での温度分布は、位置とはほぼ比例関係にあり、直線的な温度分布となる。輝炎の存在領域における温度は約 900K \sim 1600K となり、メタン火炎よりも低温領域で輝炎を確認することができる²²⁾。煤は、対流で流されると同時に、サーモフレシス効果による温度勾配に応じたドリフト速度を受ける。そのため、煤の分布は流れ場だけでなく温度場にも依存する。

計測波長 $0.8 \mu\text{m}$ における輝炎からの単色放射能強度分布 (縦軸は対数表示) は、2 色放射温度解析装置 (SPRITE STH-3000, (株)ノリタケカンパニーリミテド製) を用いて取得した。Fig. 4 によれば、放射強度の分布形状は、温度分布と同様に座標方向に対して非対称である (燃料側において緩やかで酸化剤側において鋭い)。また、放射強度のピークは $z = 9.6$ mm 付近に位置し、温度ピーク位置とは明らかに異なる。この傾向は燃料および観察波長に依存したものではない²³⁾。放射強度 (放射能) は、ステファンの法則によれば温度の 4 乗に比例する。このことから、比例乗数である放射率が位置に依らず一定であるとは考えにくい。煤状態の関数であろう放射率は、温度と逆相関の関係にあることが推測される。

放射能強度分布のピーク位置において、温度分布は若干歪

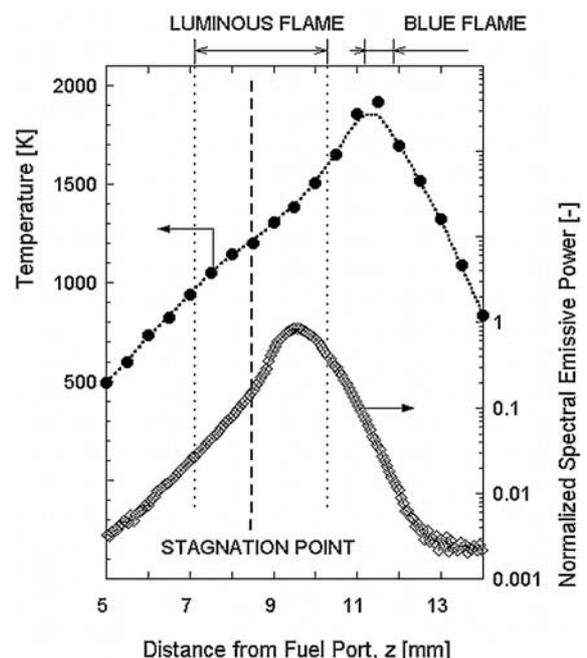


Fig. 4 1-D temperature profile

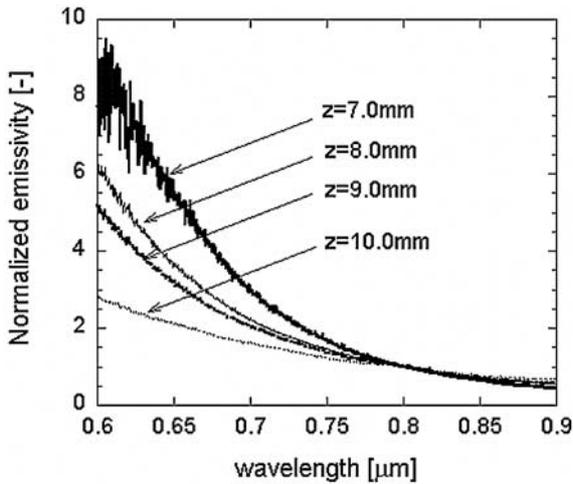


Fig. 5 Profiles of normalized spectral emissivity

み、局所的に低温部が生じる。これは、煤からの放射伝熱による熱損失による影響である。ただし、温度歪みを受ける範囲は放射能強度ピーク付近のみの狭い範囲に限られる。このことは、煤からの輻射熱損失分はピーク部以外では熱バランスにあまり影響しないことを示唆する。

3.3 火炎厚さ方向における局所の放射率スペクトル分布

Fig. 5に、火炎厚さ方向の各位置における波長0.6~0.9 μmの範囲での放射率スペクトル分布を示す。縦軸に相当する放射率は各位置の温度における黒体放射スペクトルを用いて算出した。なお、一つの図にまとめて表示するためにそれぞれの0.8 μmにおける値で除している（そのため $\lambda < 0.8 \mu\text{m}$ の領域では1より大きくなる）。得られる曲線が水平に近いほど（放射率の波長依存性がなく）灰色体に近づくことを意味しており、逆に水平線から大きく違うほど放射率の波長依存性が大きく、灰色体近似からずれることを意味する。図によれば、各位置（ $z = 7.0\text{mm} \sim 10.0\text{mm}$ ）での放射率の波長依存性は異なり、波長依存性は低い位置ほど大きくなっている。また、最も波長依存性が小さい $z = 10.0\text{mm}$ においても、今回の観察波長範囲では2倍以上の変化をもたらす、灰色体近似（ $\alpha \sim 0$ ）は適さないことがわかる。図には載せていないが、この傾向は炭素数の少ないメタン火炎でも同様である。

このように、一般的な炭化水素系のガス燃料で形成される輝炎において灰色体近似を用いることは不適切であり、しかもその波長依存性は火炎面垂直方向で異なる。よって、その依存性は「火炎面断面方向に分布を持つある状態量の関数」として与えられると推測される。

4. 結果の検討

4.1 指数 α と係数Cとの関係

式(1)のモデル関数においてフィッティングにより求められる指数 α と係数Cの組み合わせは無数にあるため、まずそれらの関係について調べる。Fig. 6に、異なる位置における波長0.6~1.0 μmの範囲で関数フィッティングにより求めた指数 α と係数Cの関係を示す。フィッティングの結果、各位置に

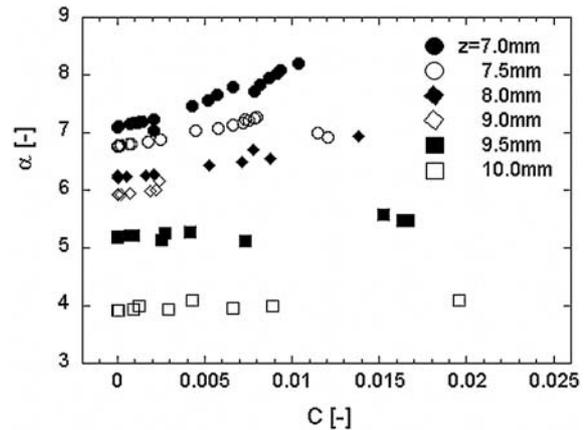


Fig. 6 Possible α -C combinations in various locations

おいてCは様々な値を取り得るが、 α はほぼ一定の値に定まる。このことは、Cの変化に対して放射率特性はあまり変化しない一方で、 α の変化に対して放射率特性は大きく変化することを示している。従って、式(1)の関数形からも予測された通り、放射率特性の変化は、 α の変化を知ることでほぼ特定される。

ところで α の値は、位置が低いほど大きく、位置が高くなるほど小さくなるのがわかる。これはFig. 5において、燃料噴出口に近いほど波長依存性が大きく、そこから離れるほど波長依存性が小さくなることと対応している。

4.2 指数 α の火炎面垂直方向分布

Fig. 7に波長0.6~1.0 μmの範囲で関数フィッティングにより求めた指数 α の火炎面方向分布を示す。図より、燃料噴出口から離れる程 α の値は減少することがわかる。低い位置では、位置の変化に対して α の値が急激に変化するが、 $z = 8.0\text{mm}$ 以上になると若干それが緩やかになることが特徴的である。

Fig. 8には関数フィッティングの波長範囲を狭くした場合（0.6~0.7 μm, 0.7~0.8 μm, 0.8~0.9 μm, 0.9~1.0 μm）で得られる α の火炎面方向分布を示す。図で明らかなように、選

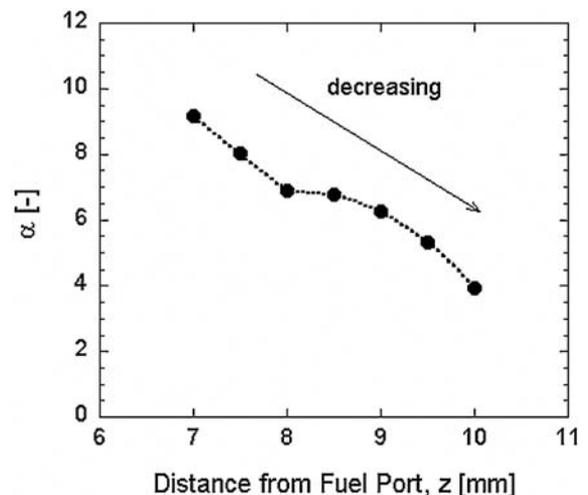


Fig. 7 Profiles of α defined in the range from 0.6 μm to 1.0 μm

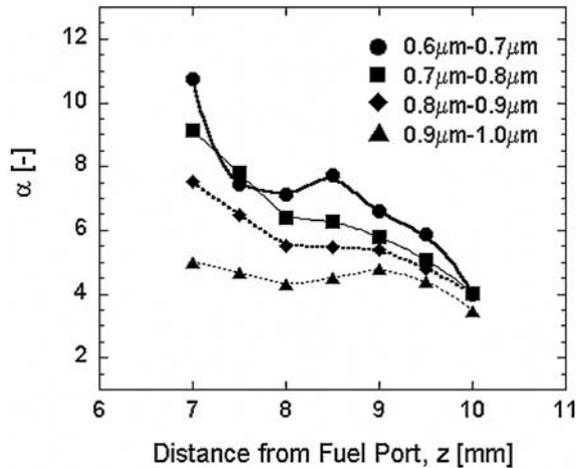


Fig. 8 Profiles of α defined in various spectral ranges

波長範囲によって α の値は異なる(この理由は後述)。計測波長が長くなるにつれて α の値が小さくなり、位置に対する α の変化も小さくなる。このような計測波長に依存した α の傾向は、Siddall & McGrath¹⁰⁾によるプロパンの傾向と同じである。つまり、計測波長を長くすれば、位置によらず灰色体近似を適用できる可能性を示唆している。一方で、短波長を含む関数フィッティングで得られる α は、位置に対する変化が顕著に現れ、その傾向は温度分布とほぼ逆相関を示す。

ところで、Fig. 7と8の結果には、燃焼生成物などによる放射成分の吸収が懸念される。今回の観察波長域において、 H_2O 、 O_2 、 O_3 、 CO_2 、 OH などによる顕著な吸収波長領域を、汎用ソフトHITRAN²⁴⁾を用いて調べた(Fig. 9)。燃焼面付近ではこれら以外の成分も存在するが、その生成量は上記に比べて桁違いに小さいため、ここでは無視する。図によれば、代表的な成分による吸収帯域は、 H_2O では $0.7\sim 0.75$ 、 $0.8\sim 0.85$ 、 $0.9\sim 1.0\mu\text{m}$ の範囲、 O_2 および O_3 では $0.75\mu\text{m}$ 付近、 OH では $0.75\sim 0.8$ 、 $0.95\sim 1.1\mu\text{m}$ の範囲である。なお、 CO_2 によるエネルギー吸収領域は $14\mu\text{m}$ 以上の赤外領域であり、可視域には存在しない。以上から、 H_2O や酸化剤(O_2 、 O_3)などが多量に存在する位置(温度分布のピーク付近)の α には分子吸収の影響を含み、純粋な煤から発せられる放射特性とは異なる可能性がある。その一方で、酸化剤の影響を受けない温度ピークよりも燃料側の α にはそれらの影響は含まれず、純粋な放射特性を示すものと考えられる。いずれにせよ、 α が位置の増加に伴って減少する傾向はあるものの、 $z > 8.0\text{mm}$ の領域での変化の詳細な解釈には注意すべきである。煤からの放射特性のみを抽出するには、分子吸収の影響の少ない波長域(例えば $0.65\mu\text{m}$ 、 $0.85\mu\text{m}$ 付近)のみを観測して α を求めることが望ましい。

4.3 指数 α の意味づけ

我々の目的は、輝炎からの放射率(先に述べたように「みかけの放射率」のことであり)に含まれるパラメータ α を算出することによって、局所における煤の状態を推測することにある。そのためには、この α の変化が実際の煤状態にお

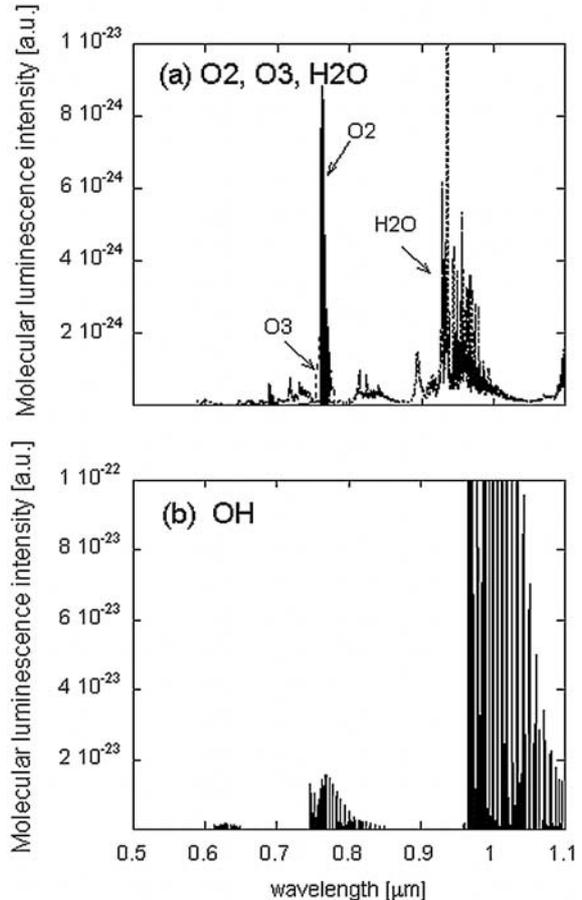


Fig. 9 Spectral absorption structure by major combustion products: (a) O_2 , O_3 , H_2O , (b) OH

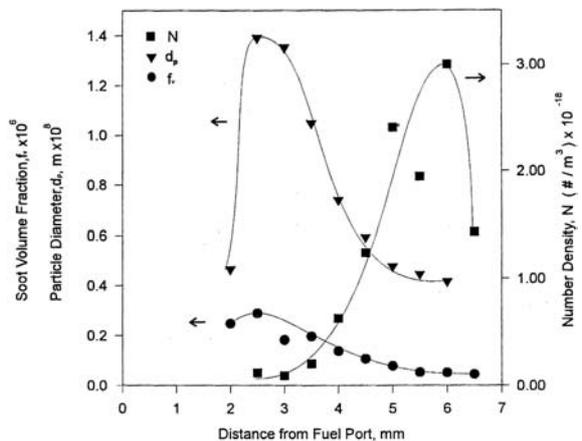


Fig. 10 1-D measured soot properties [11]: N = number density, d_p = averaged diameter, f_v = volume fraction

いて何の変化に相当するのかを把握しておく必要がある。

本研究で得られた結果によれば、 α は定性的に温度と逆相関をもち、高温になるにつれて小さくなる。Fig. 10に、Vincitore & Senkanによるメタン-空気拡散火炎の局所煤状態量(数密度、代表粒子径、体積分率)の火炎面方向分布を示す¹¹⁾。この結果と α の傾向とを比較すると、粒子径あるいは体積分率は燃料噴出口から離れるほど減少しており、 α の変化と定性的に等しい。つまり、 α の減少は平均粒子径の減少や体積分

率の減少と対応している。一方で、その傾向は数密度と逆相関にあることがわかる。従って、 α の値が他の場所よりも小さい $z = 10.0\text{mm}$ 付近では、「平均粒子径が小さく」「体積分率も低い」ため「一つ一つが小さな煤粒子が空間にまばらに存在する」ことになる。ただし、前述の通り数密度は大きくなるため、放射に寄与する空間にさらされる表面積は増加する。ある空間に電磁波を発する粒子が多量に存在すれば、電磁波の散乱が促進されて波長依存性が弱まる可能性が高くなる²⁵⁾。本分光実験の結果と併せれば、この状態が「灰色体に近づく」ことに等しい。一方、 α が大きい位置($z \sim 6.0\text{mm}$)では粒子径は大きくなるが、数密度は小さいため、まばらさが顕著に現れる。この場合、散乱度合は少ないのが強調されて、波長依存性が強く現れたものと推測できる。このように、測定より得られる α の値と局所の煤の平均直径、体積分率や数密度と対応づけを行うことにより、このような煤の状態を煤からの放射の分光計測により推定することが可能になると考えられる。定量的な評価に使うためには、分子吸収の影響を除外するなどのシステムに関する改良が必要であるが、手軽な煤状態モニタリング手法として有効である可能性を示すことができた。ただし、この手法が単に今回用いた燃料や燃焼条件のみで成立するものなのかには慎重な議論が必要である。次報(第2報)ではその点について詳細に検討し、本手法の適用範囲について調べたい。

5. まとめ

プロパンを燃料とした対向流拡散火炎から発せられる放射強度を分光分析し、放射特性パラメータを介して局所の煤状態の診断を試みた。煤の“みかけの”放射率に対する波長依存性を検討した結果、以下の結論を得た。

1. 炎の放射は灰色体として扱うことができず、その放射率には波長依存性がある。
2. みかけの放射率は、火炎面垂直方向に変化し、温度とは逆相関を持つ。
3. 放射率の波長依存性を示す指数 α の値と、局所の煤の代表粒子径および体積分率には正の相関関係が見られる。
4. 青炎近傍のガス温度が高く煤の代表粒子径および体積分率が小さい状態、すなわち小さな煤がまばらに存在する状態では、放射率の波長依存性を示す指数 α の値が小さく、灰色体の状態に近づく。

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。また、名古屋大学大学院工学研究科 山下博史教授には実験遂行に関して多大な協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

文献: References

- 1) Kooylu, U. O., Faeth G. M., Farias, T. L., Carvalho, M. G., *Combust. Flame*, **100**, 621 (1995)
- 2) Ishiguro, T., Takatori, Y., Akihama, K., *Combust. Flame*, **108**, 231 (1997)
- 3) VanderWal, R. L., *Appl. Opt.*, **35**(33), 6548 (1996)
- 4) Shaddix, C. R., Smith, K. C., *Combust. Flame*, **107**, 438 (1996)
- 5) VanderWal, R. L., Ticich, T. M., Stephens, A., B., *Combust. Flame*, **116**, 291 (1999)
- 6) Crua, C., Kennaird, D., A., Heikal, M., R., *Combust. Flame*, **135**(4), 475 (2003)
- 7) 稲垣和久, 高須施開, 中北清己, 渡部哲, 自動車技術会論文集, **35**(1), 89 (2004): Inagaki, K., Takasu, S., Nakakita, K., Watanabe, S., *JSAE collected papers*, **35**(1), 89 (2004)
- 8) Siegel, R., Howell, J. R., *Thermal Radiation Heat Transfer*, 3rd ed, (Taylor&Francis), p. 652-679 (1992)
- 9) Yagi, S., Iino, H., *Proc. Combust. Inst.*, **8**, 288 (1960)
- 10) Siddall, R. G., McGrath, I. A., *Proc. Combust. Inst.*, **9**, 102 (1963)
- 11) Vincitore, A. M., Senkan, S. M., *Combust. Sci. Tech.*, **130**, 233 (1997)
- 12) Hwang, J. Y., Chung, S. H., *Combust. Flame*, **125**, 752 (2001)
- 13) Senftleben, H., Benedict, E., *Ann. Phys. Leipzig*, **69**, 297 (1919)
- 14) Gaydon, A. G., Wolfard, H. G., *Flames - Their structure, radiation and temperature-*, 3rd ed, (Chapman and Hall Ltd.), Chapt. IX (1970)
- 15) Seshadri, K., Puri, I., Peters, N., *Combust. Flame*, **61**, 237 (1985)
- 16) Fistrom, R. M., Westenberg, A. A., *Flame Structure*, (McGraw-Hill), p. 145 (1965)
- 17) 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)
- 18) Olten, N., Senkan, S., *Combust. Flame*, **118**, 500 (1999)
- 19) JIS C 1602-1981, 日本規格協会
- 20) Kaskan, W. E., *Proc. Combust. Inst.*, **6**, 134 (1957)
- 21) 相原利雄, 伝熱工学 (第7版), (裳華房), p. 97-129 (2000): Aihara, T., *Heat Transfer Engineering*, 7th ed., (Shokado), p. 97-129 (2000)
- 22) 長谷川義朗, 中村祐二, 山下博史, 機論(B編), **71**(705), 1475 (2005): Hasegawa, Y., Nakamura, Y., Yamashita, H., *Trans. JSME (Ser. B)*, **71**(705), p. 1475-1482 (2005)
- 23) 中村祐二, 山下博史, 岩田美佐男, 鎌田祐一, 矢野賢司, 橋本和久, 橋本みゆき, 流体熱工学研究, **38**(2), 19 (2003): Nakamura, Y., Yamashita, H., Iwata, M., Kamata, Y., Yano, K., Kashimoto, K., Hashimoto, M., *Trans. Tokai Inst. Fluid & Heat Eng.*, **38**(2), 19 (2003)
- 24) <http://cfa-www.harvard.edu/hitrans/>
- 25) Rybicki, G. B., Lightman, A. P., *Radiative Processes in Astrophysics* -1st ed., (John Wiley & Sons), (1979)