2色法を用いた拡散火炎内部での煤特性量分布の検討^{*}

Study on Soot Distribution in Diffusion Flames by Two-Color Method

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^{\$\$} Yuji NAKAMURA, Hiroshi YAMASHITA, Misao IWATA, Yuichi KAMATA, Kenji YANO, Kazuhisa HASHIMOTO, and Miyuki HASHIMOTO

Abstract

New measurement strategy of soot formed in diffusion flames by using two-color method is proposed. Methane-air counterflow diffusion flames in sooty condition are concerned as test field. One-dimensional soot distribution (side view: perpendicular to the counterflow direction) is analyzed via two-color thermography camera developed by Noritake Company Co Ltd.; SPRITE STH-3000. With selected two colors' thermal emission intensities from the luminous soot zone, two quantities are extracted such as 1) one-dimensional temperature distribution and 2) one-dimensional emissivity distribution. Since the emissivity is strongly correlated with local soot characteristics (size, surface area etc.), local soot state could be understood with this approach. For the comparison purpose, power spectrum of the luminous zone is also measured by spectrometer. Although spatial resolution may not be sufficient to capture a few millimeter flame structure, experimental results based on SPRITE for temperature distribution give reasonably good qualitative agreement with numerical simulated data. In order to make quantitative discussion on temperature measurement, empirical power law dependency of emission intensity on wavelength for soot cloud is introduced and appropriate model constant (value of the power) for methane-air soot flames is proposed. Estimated one-dimensional distribution of emissivity of soot is found to be good correlation with that of the soot number density rather than the soot volume fraction. Potential of new soot measurement strategy is addressed.

1. はじめに

燃焼排出物である PM (Particulate Matter: 煤) は大気汚染物質の一つとして知られており, 固定発生源(製鉄所など)および移動発生源(自動車など)など,人間の生産・消費活動に附 随して生じるものである.大気汚染は様々な2次的な波及効果となって我々の生活・生命を脅 かす.例えば,地球温暖化,都市温暖化,酸性雨といった地球環境破壊をもたらすのみならず, 近年では PM2.5 (2.5 µ m 以下の煤粒子の総称)が重大な肺疾患および癌の原因になることも指 摘されている[例えば 1,2].従って,煤の排出抑制・制御は人類の生活にとって急務の課題と言 える.

* 平成15年6月13日 東海流体熱工学研究会 第39期特別講演会にて講演 原稿受付 平成15年12月18日
** 正会員 名古屋大学理工科学総合研究センター,〒464-8603 名古屋市千種区不老町, Tel.052-789-4471
*** 正会員 名古屋大学大学院工学研究科, 〒464-8603 名古屋市千種区不老町, Tel.052-789-4470
* 特別会員 株式会社ノリタケカンパニーリミテド,〒451-8501 名古屋市西区則武町 3-1-36, Tel 052-561-9892
** 非会員 株式会社ノリタケカンパニーリミテド,〒451-8501 名古屋市西区則武町 3-1-36, Tel 052-561-9892 排出抑制あるいは制御を正しく行うためには,まずは煤の排出状況を素早くかつ正しく検出 できる装置が必要である.しかしながら,このような要求を満たす安価な計測機器は,著者が 知る限りにおいては存在しない.そこで我々は2色法の原理を用いて燃焼場あるいは反応性高 温場から発生する煤の特性量を計測するという新たな「廉価版」煤計測手法を提案したい.本 稿では,我々が提案する2色法を用いた煤計測の原理および測定される煤特性量に対する考察 を行うことで,この新計測法の有用性・計測技術としての可能性について述べる.

本計測手法の確立は,以下の理由により工学的および学術的に有益な知見を与えると期待される.

本研究成果の工学上の価値

例えば固定発生源に代表される工場などの現場では、煤の排出抑制のため燃焼状態を常時モ ニタリングする必要がある.このとき、目視で輝炎が観察されればそこに煤が存在することは 判断できるが、どの程度の煤が排出されているのか判断できない.輝炎の強度は、場の温度、 煤粒子の数、煤の総面積、表面性質などに影響を受けるため、目視による明るさの判断だけで そこに多量の煤が存在しているとは限らない.しかも現場の要請によれば、一度にモニタリン グできる領域は大きい程よく、しかも時事刻々変化する輝炎の状態を自動的に時系列でモニタ リングできることが好ましい.もちろんモニタリングに要するコストは低い程よい.すなわち、

「廉価で」「広範囲を対象に」「時間変化」が観測できる煤計測装置が求められている.これまでの煤観測手法と言えば、散乱法、LIIといったレーザを用いた光学計測法が主流である[3,4].しかしこれらは、「高価で」「測定空間が制限」されているため、前述の要求を満たさない.本研究で提案する煤計測手法は、上記の3大要求を全て網羅できる可能性を秘めている.この点において本研究の工業上価値が認められると考える.

<u>本研究成果の学術上の価値</u>

煤の生成過程は燃焼学においてはまだ未知の領域であり、極めて複雑であることが良く知ら れてはいるもののその詳細は未だ十分に理解されていない.例えば、煤粒子はベンゼンなどの PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons:多環芳香族炭化水素)が熱分解および重合などを経て 多環化された最終段階で生成することは知られているが、主な生成経路が特定されていない [5-6].また、煤は多数の一次粒子(直径約数十 nm[7])の集合体であることは報告されている が、その形状がどのような過程に左右されているのか、その成長にはどのような化学種が寄与 しているのかなどは不明である[6].本研究は、これらの煤の生成・消滅に関する素過程を、煤 の粒子群からの熱放射を解析することで理解しようとするものである.本測定手法は、煤塊か らの熱放射を検出対象とするため、観測放射データには煤塊の形状、数密度などの情報を全て 含んでいる.放射線のうち適切な2色を選択することでこれらの情報を分離することが(原理 的には)可能である.この点において本研究の学術的な価値が認められる.

2. 実験装置と実験手法

2.1 燃焼器と平面拡散火炎

Fig.1 に本研究で観測対象とした対向流拡 散火炎燃焼器の概略図を示す.燃焼器は上下 一対の軸対称円筒ノズルにより構成されてお り、下部および上部ノズルから燃料および酸 化剤を対向して噴射し,その衝突面(よどみ 面)近傍に円盤状の拡散火炎がほぼ定常的に 形成される.各ノズル内部はメッシュにより 整流され、ノズル出口に取り付けられた焼結 金属により一様流となって大気に放出される. 火炎に対する外部擾乱を防ぐために、燃料お よび酸化剤流の外部には窒素流を設けている. ノズル壁面には水冷ジャケットが取り付けら れており、火炎からの伝熱に伴う燃料および 酸化剤の予熱を阻止している.

Fig.2 は本燃焼器によるメタン- 空気対向 流拡散火炎の直接写真である. 撮像方向はバ ーナ軸に対して垂直方向とし,薄い火炎帯の 断面を観察対象とする.この対向流火炎では, 物理量の分布は軸方向に対して垂直な面内で は一様であり,軸方向にのみ変化する[8-10].



Fig.1 Counterflow burner



Fig.2 Direct photo image of test flame

Fig.2 からわかるように,設定した条件下では火炎からは煤が発生し,輝炎となる.また輝炎部はよどみ点よりも下(=燃料側)に形成され,その上(=酸化剤側)には青炎が形成されることがわかる.

2.2 計測システム

本研究では2種類の計測システムを用いて実験を行った.それぞれの実験内容は以下に示す 通りである.

- 実験1: 分光器による輝炎部からの放射スペクトルの測定
- 実験2: 2色法を用いた計測システム[11-13]による輝炎部の測定

実験1は、輝炎部からの平均放射スペクトルを調べることにより、輝炎部の平均温度を見積 もるために行った検証実験である.実験には分光器システム(Ocean Optics 製 USB2000)を 用い、高温標準黒体炉(チノー製 IR-R8)と併用して温度-スペクトル分布の関係を得た.対 象輝炎部付近に受光部を固定してスペクトル計測を行った.

実験2で用いた計測システムを Fig.3 に示す.2色計測システムには SPRITE 熱画像解析シス

テム (ノリタケカンパニーリミテド製 STH-3000)を用いた.もともとこの計測 システムは、測定対象物からの熱放射を 利用して、その場の「時間変動」のある 「高温度測定」を狙ったものであるが、

既存の計測システムでは珍しく,最終的 な温度データだけでなく温度を計算する 元となる2色の強度値データも取り出す ことができる.これを利用することによ り,温度以外の各諸量を検討可能である ため,様々なデータを様々な角度から検



Fig.3 Measurement system (SPRITE)

討する研究用途に向いている.本計測システムは2波長光学系を用いたカメラと画像演算ソフトの2点から構成されている.測定対象である円盤状の平面火炎を真横(=対向バーナの軸方向に垂直な向き)にカメラを配置し,軸方向の一次元輝炎分布を計測する.2色法の原理の詳細は後述するが,本計測システムを用いることにより,輝炎部の温度および煤の情報を同時に取り出すことが可能である.なお,温度分布の検証のため,燃焼場の温度計測でよく用いられる熱電対による温度分布との比較も行った.

2.3 計測対象火炎の条件

本研究で用いた参照火炎の条件は以下の通りである.燃料には天然ガスの主成分であるメタ ンを用い,燃料流および酸化剤流ともに窒素で希釈した.希釈率は,体積比率で燃料流では燃 料:窒素=0.75:0.25に,酸化剤流では酸素:窒素=0.2:0.8である.なお,各混合気は常温と する.これらの組成比により形成される拡散火炎の最大温度(理論値)は2100K程度になる(断 熱火炎温度の計算による).上下ノズルから対向して噴出される速度はそれぞれ 7.5cm/s(常温 常圧)とした.

2 色法で用いた 2 種類の波長には可視域(近赤外)の 750nm および 800nm である.この選 択理由は次節の測定原理で述べる.

3. 2色法と煤測定原理(温度と煤の同時測定)

3.1 2色法による温度測定の原理

本節では2色法を用いた温度計測および煤特性量の計測の原理について述べる.まずは一般的な2色法による温度測定の原理について述べる.

ある放射体からの単色放射能を $E(\lambda, T)$ とすると(これは波長と温度の関数である),放射率 $\epsilon(\lambda, T)$ と黒体単色放射能 $E_b(\lambda, T)$ を用いて一般的に次のように表記することができる[14].

このとき、煤からの放射率、場の温度は未知数であり、既知量として与えることができない. 今、選択された2つの波長(λ_1 , λ_2)における単色放射能をそれぞれ(E_1 , E_2)とすると、 それぞれ以下のように表記される.

ここで、 $E_b(\lambda_i, T)$ とは、波長 λ_i における黒体単色放射能を指し、いわゆるプランクの法則[14] により与えられる.このとき、2つの波長(λ_1 , λ_2)の選択はユーザに託されているので、極 めて近い波長で2色を選んだとすると(すなわち $\lambda_1 - \lambda_2$)、その2色における単色放射率 ($a[=\epsilon(\lambda_1, T)], \epsilon_2[=\epsilon(\lambda_2, T)]$)もほぼ等しいと考えることができる(すなわち $a - \epsilon_2$).この 仮定は、放射物が灰色体(ϵ -const.)の場合は完全に正しいが、そうでない場合でも「選択し た2色での放射率が極端に異なる場合を除いて」近似的に成立する.このとき、該当する2色 での単色放射能の比を取れば、

$$\frac{\underline{E}_1}{\underline{E}_2} = \frac{\underline{\varepsilon(\lambda_1, T)}}{\underline{\underline{\varepsilon(\lambda_2, T)}}} \cdot \frac{\underline{E}_b(\lambda_1, T)}{\underline{E}_b(\lambda_2, T)} \sim \frac{\underline{E}_b(\lambda_1, T)}{\underline{E}_b(\lambda_2, T)} = f(T) \qquad \dots \dots \dots (4)$$

という関係を得る. このとき, 左辺はある 未知の温度場からの2色の単色放射能の比 を表し,計測値に相当する. 一方,右辺は 選択した2色の黒体単色放射能の比であり, 温度のみの関数となる. よって,測定量は その場の温度に対応した量となることがわ かる. この概念を応用して,まず2色の単 色放射能を黒体炉により検定し,その関係 を $E_1/E_2 - T$ 平面上にプロットしておけば



Fig.4 Proof curve of E1/E2 vs.Temperature

(=検定曲線),測定値から温度を計算することができる.

Fig.4 に本計測システムにおける検定曲線を示す. 横軸は2色の単色放射能比, 縦軸は検定された温度を示す. 図からわかるように, 興味ある燃焼温度範囲(1200K〜2200K)では検定曲線は単調関数(しかもほぼ線形)であり, 単色放射能比と温度は1対1の関係にあることがわかる.

本計測法の優位な点は、上記の仮定(2色を近いものを選択一放射率が等しい)を導入する ことにより、「放射率が未知でも」測定場の温度を求めることができる点にある.本研究ではこ の原理を煤群に適用し、煤群からの明るさ、すなわち輝炎部からの単色放射能によって燃焼場 (煤存在領域に限定)における局所温度の測定を試みる.

3.2 煤特性量の測定の原理

2色法の特色は、2つの条件(選択した波長)を課すため2つの情報を得られる点にある. そのうちの一つが上記で示した局所温度であり、もう一つはこれまで未知量としてきた局所で の(単色)放射率である(温度が求められれば式(2)または(3)よりその温度における単色放射率 が逆算できる)[12].

我々が2色法により煤測定を試みたのは、この煤群からの放射率とその場に存在する煤とは 強い相関関係があるものと考えたことによる.良く知られているように、煤とは直径数十 nm の球形の一次粒子が凝集して枝状となり、空間に浮遊している.もちろん個々の煤塊(〜数百 nm)は本計測装置の解像度よりも圧倒的に小さい.つまり、上記の操作によって得られる煤の 放射率とは、煤粒子表面の特性というよりも、まばらに浮遊している煤群からの「みかけの放 射率」に相当すると考えるべきである.よって、この放射率は、例えば煤の詰まり具合、煤塊 の大きさなどの煤特性量を代表するものと予想される.本研究を通じて、得られる「みかけの 放射率」が実際の煤諸量のうち何に相当するのか(例えば、煤塊の数密度、代表粒子径、体積 分率など)について検討を行う.

4. 実験結果

まず本研究で用いる2色法計測システムにより,燃焼場の温度の測定が可能であるかどうか 検証する.前述の測定原理で示した通り,温度測定を正しく行うことは直ちに煤分布を正しく 計測することにつながるため,この検証実験は極めて重要である. 本節では,

- 実験(1) 熱電対と2色法による温度分布の比較
- 実験(2) 分光器による火炎の平均色温度と平均温度測定
- 実験(3) 2色法による輝炎部の温度分布と2色輝度分布の測定

を実施した結果を示し、2色法による燃焼場の温度測定がどの程度可能なのかを模索する.それと同時に単色輝度分布も示し、これを基にして次節で煤分布の検討を行うためのデータを提示する.

実験(1) 熱電対と2色法による温度分布の比較(2色法の計測値の妥当性)

ここでは Pt-PtRh 熱電対を用いて, 熱電対と2 色法による同時温度計測を行った結果を示す. 本実験では, 測定対象である平面対向流拡散火炎に対して平行となるように熱電対を挿入し, 検出部である熱電対接合部(外径約 0.2mm で二酸化硅素の被膜処理付.以下単に「接合部」と 表記)を中心軸上で上下させることにより, 接合部における局所温度(熱電対温度)を得る.

それと同時に,2色計測システム により熱電対接合部の単色放射率 に基づく局所温度(2色法による 温度)も得る.この2つの操作に よって,異なる2つの測定法を用 いて局所燃焼場の同時刻の温度を 得ることが可能となる.繰り返し になるが,この計測においては2 色法の測定対象は輝炎部そのもの ではなく燃焼場に挿入した熱電対 の接合部であることに留意された い(輝炎部からの2色信号により 輝炎部での温度分布を計測につい ては後述).



Fig.5 Temperature distributions measured by thermo-couple (TC) and two-color method (SPRITE)

Fig.5 に、本測定法により得られ た燃焼場における軸方向温度分布を示す.図の横軸はバーナ下部からの距離を表す.図には2 つの熱電対温度が表示されているが、●は出力電圧信号から換算される生データ、○は熱電対 の接合部での放射熱損失を考慮した補正温度である.なお、熱放射補正には次式で表される Kaskanの補正式[15]を用いた.

ここで λ は熱電対接合部の温度 T_w での気体の熱伝導率,Dは熱電対の熱電対接合部の外径, η は熱電対接合部の温度での気体の粘性係数, ρu_w は熱電対接合部周りの質量流束, σ はステフ

ァンボルツマン定数, ϵ は熱電対接合部の放射率(本研究では $\epsilon \sim 0.22$ とした).なお,各物性値は窒素のものを用いた.

図より、2色法により計測された接合部の局所温度分布は、熱電対温度とよい対応をしてい ることがわかる.また、その温度は熱電対の補正前の温度よりも高く、補正後の温度よりも低 い.補正前の熱電対温度は輻射による熱損失の影響を無視しているため、真の温度よりも低い のは自明である.また、前述のKaskanの補正では接合部を「円柱」と仮定するため、実際の接 合部の形(円柱というよりもむしろ球)に依存した補正が正しく行えず、特に低流速状態にお いては補正量を過剰に見積もりがちになる.以上を考慮すると、真の温度とは熱電対の補正前 の温度と補正後の温度の間に存在すると考えられる.2色法により計測された温度分布はまさ にその領域に存在しており、真の燃焼場の温度を検出していると考えることができる.

なお、この2色温度によれば、参照火炎の輝炎部の平均温度は約1700K程度であることがわかる.以後、この値を輝炎部の真の平均温度として議論をすすめる.

実験(2) 分光器による火炎の平均色温度と平均温度測定

Fig.6 に、分光器によって得られたメタン- 空気平面対向流拡散火炎における輝炎部(=煤に よる放射領域)周辺からの平均放射能のスペクトル分布を示す.この実験は、外部からの入射 光(太陽、蛍光灯およびそれらの反射光など)を遮蔽した状態で行われた.ここで留意すべき は、分光器で検出される放射データは、ある特定の位置(例えば輝炎部の内部の1点)からの ものではなく、比較的大きな有限の空間体積(数〜数+mm³)からのもの、ということである. その空間内部にて温度が一定であれば問題ないが、輝炎部およびその周辺では温度変化は著し

く大きい.従って,分光器で得 られる放射スペクトルは,あく までも有限の検査体積内部の平 均温度によるものと考えるべき である.また,図中には標準黒 体炉を用いて得られる各温度の 放射スペクトルも併せて表示し た.全てのスペクトル分布はそ れぞれ 800nm での値で正規化し てある.

この図から明らかなように, 輝炎部の平均色温度は約 2300K 程度であることがわかる. 今,



Fig.6 Power spectrum of luminous flame

煤群が「灰色体」の特性を有すると考えると、輝炎部の真の平均温度はまさに 2300K となる. 平均温度が 2300K 程度とすれば、煤領域内部の最高温度はそれ以上となる.本実験条件のよう な比較的遅い対向流内部で形成されるメタン-空気拡散火炎では、一般に燃料側の温度勾配は 数百 K/mm 程度であることを考慮すれば、輝炎部の最高温度は 2500K~2700K 程度になると推 察される.この火炎温度は推定される理論値(本実験条件における断熱火炎温度〜2100K)に 比べて明らかに高い.従って、煤群に「灰色体」の仮定を課すこと自体が不適切であることが 示唆される.

実験(3) 2色法による輝炎部の温度分布と2色輝度分布の測定

続いて、輝炎部である煤からの単色放射能を用いて、2色法による輝炎部の温度分布および 単色輝度分布の測定を行った.Fig.7にその結果を示す.輝度分布は滑らかであるにも関わらず、 温度分布にはばらつきが目立つ.これは2色の放射能比を用いて温度へと換算する際に生じる ものと考えられる.その一方、温度分布における「燃料側(図の横軸左側)から酸化剤側(横 軸右側)に向かって温度が増加する傾向」を明らかに捕らえていることは留意に値する.

本実験結果によれば,輝 炎部の温度範囲は 2200K〜 2700K 程度を示し(平均温 度は 2500K 前後),上記「実 験(1)」で得られた燃焼場 内部の真の温度(1700K)を 随分上回る.むしろこの温 度は分光器によって得られ た色温度(2300K)に近い. 以上より,測定手法(分光 器,2色法)に関わらず, 煤からの放射能を用いて温 度を算出する場合,真の温 度よりも高めに見積もるこ とがわかる.



Fig.7 Distributions of temperature and spectral intensities (\bigcirc : 750nm, \bullet : 800nm)

煤からの単色輝度分布に

よれば、1)燃料側に輝度のピークを持つこと、2)ピークを介して非対称分布となることが わかる.この輝度分布を元にして、次節では煤群の(みかけの)放射率に対する一次元空間分 布について考察する.

5. 結果の検討

5.1 温度分布および平均温度の検証(文献データとの比較)

ここではFig.7で得られた2色法による煤領域での温度分布の妥当性について検討する.Fig.8

は数値計算によって得られた 対向流拡散火炎の温度分布で あるが[16],このデータを参照 データとして本実験結果の検 証を行う.Fig.8の温度分布に 加えた太線部に相当するとこ ろが煤領域である.図より, この領域内部での温度分布は 燃料側で低く,酸化剤側に向 かって増加する.この定性的 な傾向はFig.7(2色法による 温度分布)でも再現されてい る.よって,本計測システム では正しい温度分布の傾向を 捕らえていると考えてよい.

ただし,数値計算による平 均温度は,分光器および2色 法で計測される温度(2300K)



Fig.8 Corresponding temperature, velocity, soot volume fraction distributions via numerical simulation with detailed chemistry model[16]. *Note that horizontal axis shows the "distance from

OXIDIZER nozzle" (Left/Right side: oxidizer/fuel side: opposite to the present experiment).

よりも明らかに低い.前述した通り,平衡計算により本実験条件での断熱火炎温度を算出する と,約 2100K 程度となる.よって,分光器による輝炎部の平均色温度および2色法により計測 された輝炎部の平均温度は理論上実現できない温度を示していることになる.逆に言えば,現 在の2色法の計測システムでは輝炎部を元にした燃焼場の温度を得ることはできず,何らかの 補正・改善が必要であることを示唆している.

5.2 煤群からの放射強度における波長依存性

ここでは何故煤群からの放射能を用いて算出される温度(分光器による平均色温度,2色法 による輝炎部の平均温度)が高くなり得るのか,またそれをどのように補正したらよいのか検 討する.

ここまでに得られた重要な実験事実は、2色法により同じ燃焼場を計測したにも関わらず、 測定対象を煤群,熱電対接合部とした場合に温度が異なることである.また,煤群のみかけの 放射率は未知であるが,熱電対接合 部表面の放射率は750nmと800nmで はほぼ同じ(一灰色体の仮定が適用 可能)と考えられる.このことから, 幾ら近い2色を選択したとはいえ, 計測原理の大前提である「選択した 近い2色での放射率が等しい」とい う仮定が煤群には不適切であったと 考えることができる.すなわち,本 2色法温度測定システムを用いて煤 群の温度を正確に測定するためには, 放射率に対する波長依存性を考慮す る必要があると考えられる.



Fig.9 Corrected power spectrum of luminous flame

Koike らによれば, 塵塊の放射率は

5.3 煤群のみかけの放射率(bulk emissivity)と対応する煤特性量

Fig.10 に実験(3)で得られた単色輝度分布(ここでは 800nm を選択)を白点で示す.前述 の通り,この強度には「場の温度」および「煤群のみかけの放射率」という2つのパラメータ が関係する.仮に測定場が等温とすると,放射率分布はそのまま輝度分布に一致する.しかし, 実際には Fig.7 で示されたように煤領域では燃料側で温度は低く,酸化剤側に向かって単調増 加するという温度分布が存在する.そこで,この温度分布による影響を差し引き,本実験条件 における煤群のみかけの放射率分布を得ることを試みると(高(低)温場であれば放射率を高 め(低め)に見積もるため),みかけの放射率分布は Fig.10 内の実線のようになる.なお,図 中の矢印は温度分布を考慮した際の補正方向を示す.この操作から,煤群のみかけの放射率分 布は酸化剤側で急激に,燃料側でなだらかに減少する分布形状となることがわかる.

最後に、この分布がこれまでに報告されている煤諸量の何に相当するのか検討する. Fig.11 に Vincitore らが測定したメタン-空気対向流拡散火炎による煤塊の数密度分布,体積分率,平 均粒径の一次元分布を示す[18]. これらの分布と Fig.10 の太線分布との比較により、本実験を



Fig.10 Estimated emissivity distribution

Fig.11 Distributions of soot parameters [18]

通じて得られる煤群のみかけの放射率分布は「煤塊の数密度分布」に相当することがわかる. すなわち,2色法の特色を生かし,煤が大きく凝集した形態ではなく小さな塊として存在する 部分を知ることができる.以上のように,2色法計測システムを用いて煤群の放射率,すなわ ち煤塊の数密度を得られる可能性があることがわかった.

6. まとめおよび今後の課題

本研究では、2色法計測システムを用いて燃焼場における輝炎部の温度および煤特性量の同 時計測法の可能性について検討した.その結果、

- 2) 煤群のみかけの放射率は、煤塊の数密度に相当する量であること

を示すことができた.また,正しい煤群の特性量を測定するためには,各燃焼条件における煤 群のみかけの放射率に対する波長依存性についてさらに検討する必要があることがわかった. 今後は,上記の対して詳細な検討を進め,2色法による煤計測手法の確立を目指したい.

謝辞

本研究の実施にあたり、当研究室の修士課程1年の高橋真一氏,修士課程2年の長谷川義朗 氏には多大な協力を頂きました.また本研究の立ち上げに際し,趙 黛青氏(現 中国科学院 教授)には有意義な助言を頂きました.ここに記して謝意を表します.

参考文献

[1] 山口勝三, 菊池 立, 斉藤紘一, 環境の科学 - 我らの地球, 未来の地球- (改訂版), 培

風館, 2002.

- [2] 畠山史郎, 酸性雨- 誰が森林を傷めているのか-, 日本評論社, 2003.
- [3] 大澤敏彦,小保方富夫,レーザ計測(第6版),裳華房,2002.
- [4] VanderWal, R. L., "Laser Induced Incadescence: detection issues", *Applied Optics* 35 (33) (1996), pp.6548-6559.
- [5] Richter, H., and Howard, J. B., "Formation of Polysyclic Aromatic Hydrocarbons and their Growth to Soot –a review of chemical reaction pathways-", *Prog. Energy Combust. Sci.* 26 (2000), pp.565-608.
- [6] Kennedy, I. M., "Models of Soot Formation and Oxidation", *Prog. Energy Combust. Sci.* 23 (1997), pp.95-132.
- [7] Ishiguro, T., Takatori, Y., and Akihama, K., "Microstructure of Diesel Soot Particles probed by Electron Microscopy: First Observation of Inner Core and Outer Shell", *Combust. Flame* 108, (1997), pp.231-234.
- [8] Tsuji H., and Yamaoka, I., "Structure Analysis of Counterflow Diffusion Flames in the Forward Stagnation Region of a Porous Cylinder", *Proc. Combust. Inst* 13 (1971), 723-731.
- [9] Takeno, T., "A Gasdynamic Analysis of a Counterflow Diffusion Flame", *Combust. Sci. Tech.* 5 (3) (1972), pp.99-106.
- [10] Tsuji H., "Counterflow Diffusion Flames", Prog. Energy Combust. Sci. 8 (1982), pp.93-119.
- [11] 村岡総一郎, 黒川一夫, "2次元2色放射温度計", 画像電子学会誌18 (1989), pp.371-378.
- [12] 宮内克之, "放射温度計(2) 温度と放射率を同時に計測できる新放射温度計 放射温度 計の使用事例-", オートメーション36(4)(1990), pp.75-80.
- [13] 臼井寛之, 三井健司, "2 色温度計測カメラシステム", 映像情報 33 (3) (2001), pp.76-79.
- [14] Siegel, R., and Howell, J. R., Thermal Radiation Heat Transfer, Taylor & Francis (1992).
- [15] Kaskan, W. E., "The Dependence of Flame Temperature on Mass Burning Velocity", Proc. Combust Inst. 6 (1957), pp.134-143.
- [16] Wang, H., Du, D. X., Sung, C. J., and Law, C. K., "Experiments and Numerical Simulation on Soot Formation in Opposed-Jet Ethylene Diffusion Flames", *Proc. Combust. Inst.* 26 (1996), pp.2359-2368.
- [17] Koike, C., and Shibai, H., "Mid- and Far Infrared Absorption Spectra of Fine Fused Quartz Grains", Mon. Not. R. Astron. Soc. 269 (1994), pp.1011-1018.
- [18] Vincitore, A. M., and Senkan, S. M., "Experimental Studies of the Micro-Structure of Opposed Flow Diffusion Flames: Methane", *Combust. Sci. Tech.* 130 (1997), pp.233-246.