

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760165

研究課題名(和文)単分散噴霧火炎構造の重ね合わせによる噴霧燃焼解析手法の開発

研究課題名(英文)Development of analysis procedure for spray flame using the superposition of the flame structure appeared in spray flame formed by mono-dispersed spray

研究代表者

林 潤 (Hayashi, Jun)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：70550151

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、平均粒径および粒径分布の幅が噴霧火炎構造に与える影響の解明および様々な噴霧特性を持つ噴霧火炎に対して適用可能な解析手法を開発することを目的とした。実験では、粒径分布が制御された噴霧を層流対向流場に供給することで形成された噴霧火炎に対するレーザー誘起赤熱法計測を行った。その結果、同一平均粒径を持つ場合には、粒径分布の幅が広い条件においてすす一次粒子の生成領域が減少することが明らかとなった。また、単分散噴霧火炎構造の重ね合せによる多分散噴霧火炎構造の評価を行った結果、噴霧火炎特有の群火炎構造が表現できる可能性は示唆されたものの、小粒径の燃料液滴による燃焼を過剰に見積もる傾向が示された。

研究成果の概要(英文)：The experimental study for spray flame formed in counterflow field was conducted to clarify the effect of droplet size distribution on spray flame structure. The modified vibratory orifice atomizer was adopted to control the Sauter mean diameter and droplet size distribution without changing fuel flow rate and airflow rate. The soot formation area becomes small in the poly-dispersed spray. The reason of this trend stems from the population of diffusion-like flame structure in the spray flame. In addition, to propose an analysis procedure for describing the spray flame structure using superposition of the flame structure appeared in mono-dispersed fuel spray, a dimensional direct numerical simulation was conducted. Results show that it can show the structure of group combustion in spray flame. However, this procedure tends to overestimate the combustion characteristics comes from spray with small droplet size spray.

研究分野：燃焼工学

キーワード：噴霧燃焼 粒度分布 すす生成 平均粒径

1. 研究開始当初の背景

現状のエネルギー供給の約40%は、液体燃料の燃焼に依存しており、エネルギー変換効率の高い液体燃料を用いる燃焼器の設計・製作が求められている。

一方で環境負荷に関する規制の施行時期は目前まで迫っており、環境規制を満足しつつエネルギー変換効率の高い燃焼器の開発が求められている。液体燃料を用いる燃焼器の場合は、液体燃料を霧状にして燃焼させる「噴霧燃焼」が代表的な手法である。噴霧燃焼は、供給する燃料流量が一定の条件であっても、微粒化状態によって決定される噴霧特性が火炎構造や燃焼生成物の排出特性大きく影響を与える。

実用燃焼器では、燃料噴霧中の油滴の存在割合(粒度分布)が噴射弁によって異なるため、エネルギー変換効率の高い燃焼器を開発するためには、噴霧火炎構造の正確な予測が必要となる。しかしながら、噴霧特性に依存する火炎構造の変化が解明されていないために、実用燃焼器の開発には現在でも経験的な手法が用いられており、噴霧特性が異なる条件における火炎構造の解明と燃焼状態を予測可能な解法が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、異なる粒度分布を持つ燃料噴霧が、火炎構造及び粒径による火炎構造の変化に与える影響を明らかにすることで、燃料噴霧に対しても適用可能な解析を行うことを目的とした。

特に、燃料流量および空気流量から独立して噴霧特性を制御することが可能な、改良型振動オリフィス式噴射弁を用いて、同一平均粒径を持つ単分散噴霧および多分散噴霧、多峰性噴霧による噴霧火炎を形成し、噴霧火炎構造に与える粒径分布の影響を明らかにすること、および単分散噴霧火炎構造の重ね合わせによって多分散噴霧を表現する解析手法の開発を目標とした。

3. 研究の方法

異なる噴霧特性を持つ噴霧火炎構造の解明には、“異なる噴霧特性を持つ燃料噴霧の作成”と“噴霧火炎構造の詳細観察”を行う必要がある。“異なる噴霧特性を持つ燃料噴霧の作成”には、改良型振動オリフィス式噴射弁を用いた。なお、噴霧特性の計測には、位相ドップラー粒子計測装置(Phase Doppler Anemometry; PDA)を用いる。

“噴霧火炎構造の詳細観察”には、実験場として、よどみ面付近に単一の噴霧火炎を定在化させることが可能な対向流バーナを用いる。また、レーザーを用いた非接触計測であるレーザー誘起赤熱法(Laser Induced Incandescence; LII)を適用して、噴霧火炎中におけるすす一次粒子の体積分率を計測する。

また、本研究では任意の噴霧特性を持つ燃

料噴霧が形成する噴霧火炎構造の正確な予測を行うことが出来る解析手法の確立が目標となる。本研究では、Watanabeらが行った直接数値解析^(1, 2)を用いた。本手法では、気相をEular的に、分散相である液滴をLagrange的に取り扱うEular-Lagrange手法を基本としており、気相と液相の物理量の授受にPSI-Cellモデルを用いている。さらに、輻射に対してはDiscrete Ordinateモデルを用いた。本手法を用いて、実験と同様に、異なる粒度分布を持つ燃料噴霧によって形成される噴霧火炎構造の解析を行い、結果に対して検討を加える。特に、実験的な手法では計測が困難な、燃焼反応率の空間勾配や局所的な混合状態に依存する火炎構造の変化に対して考察を行う。

4. 研究結果

図1に噴射弁断面図と噴射弁によって生成される液滴列の直接写真を示す。図1より、印加する周波数の違いにより分裂状態が異なることが分かる。本噴射弁に供給する空気は、液滴を分散させるためだけに留めて、燃焼場には別流路を用いて噴霧燃焼用の空気を供給した。このことにより、空気流量条件および燃料流量条件から独立して噴霧粒径および粒径分布の幅を操作することに成功した。

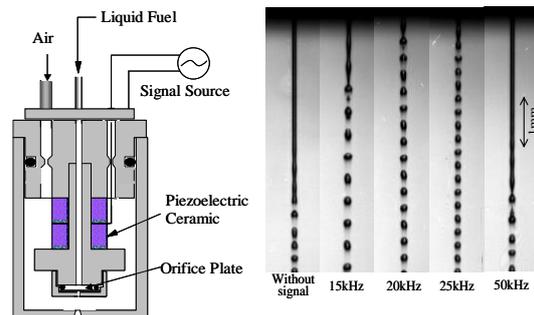


Fig. 1 A schematic illustration of the frequency-tunable vibratory orifice atomizer and the typical liquid jet behavior from the atomizer in the case without dispersion air

図2に実験および解析の対象となる対向流場の概念図を示す。また図3には、改良振動オリフィス式噴射弁を用いて形成された、異なる平均粒径および異なる粒径分布を持つ燃料噴霧が形成するすす生成領域の傾向を示している。すす生成領域は、高い時間分解能を持つ二次元LIIにより求めた。本手法では、高速ゲート付きイメージインテンシファイアおよび高速度CMOSカメラとレーザーの同期を行った。図3中、黒塗りのプロットは単分散噴霧、白抜きのプロットは多分散噴霧の結果を示している。

図3から分かるように、平均粒径の増加に伴いすす一次粒子の生成量が増加する傾向がある。これは、単分散噴霧で形成した噴霧火炎による結果と多分散噴霧で形成した噴

霧火炎による結果で相違ない。しかしながら、同一の平均粒径を持つ場合、単分散噴霧と比較して粒径分布の幅が広い多分散噴霧においてすす一次粒子の生成領域が狭いことが明らかとなった。これは、平均粒径が同一かつ粒径分布の幅が広い条件では、最頻出粒径が低下することに起因しており、微小粒径を持つ燃料液滴数が増加することにより、噴霧火炎中において予混合火炎構造を持つ領域の割合が増加するためである。

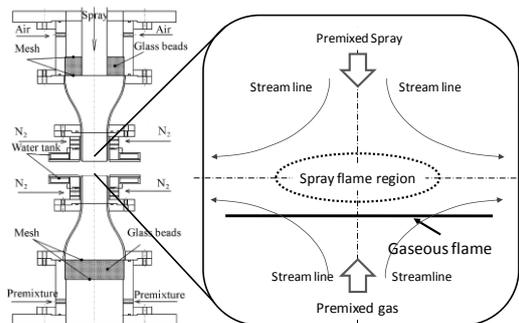


Fig. 2 Schematic illustration of counterflow burner A schematic illustration of the counterflow burner and the configuration of spray flame region

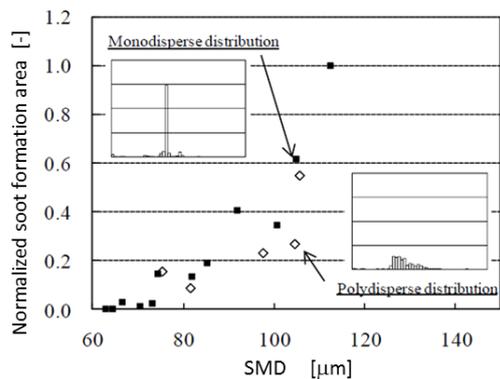


Fig. 3 The variation of soot formation area as a function of SMD in the cases of (a) QM-DSD fuel spray and (b) P-DSD fuel spray

実験結果から、粒度分布の幅に起因する噴霧火炎構造の相違が、すす生成特性に影響を与えることが示唆された。しかしながら、実験では二次元平面で計測されたすす一次粒子の平均値でのみすす生成特性を評価している。三次元空間において形成される火炎構造と比較するために、三次元直接数値計算を行った。図4には、実験で得られた直接写真と計算で得られた当量比1の等値面の図を示す。図4より、本研究で用いた三次元計算によって噴霧火炎構造の相違が表現できることが示された。また、噴霧火炎中に形成される拡散的な火炎構造を持つ領域で表現できることが示された。

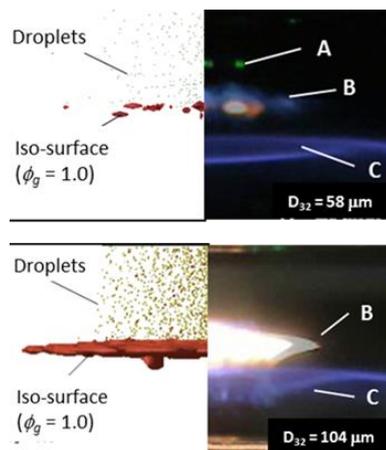


Fig. 4 The instantaneous predicted two-dimensional distribution of iso-surface of $\phi_g = 1.0$ and direct photograph with different SMD and same fuel flow rate (A: scattering light from droplets, B: spray flame, C: gaseous flame ($\phi_g = 0.6$))

図5, 図6に実験と同一条件における温度, 燃料濃度, 酸素濃度およびFlame Indexの中心軸上分布を示す。Flame Indexは、格子点の酸素濃度の空間勾配と燃料濃度の空間勾配の積であり、正值の場合は予混合火炎構造, 負値の場合は拡散火炎構造を表現することができる⁽³⁾。

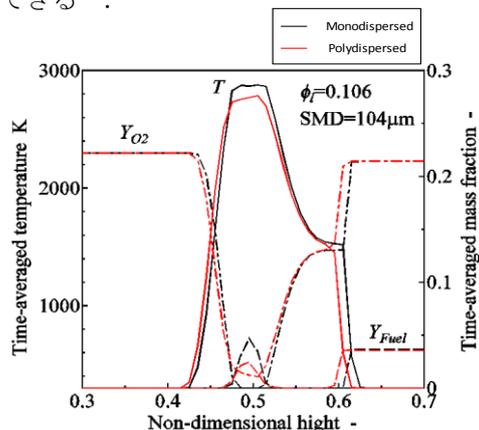


Fig. 5 The predicted vertical distributions of time-averaged gaseous temperature and volume fraction of oxygen and fuel

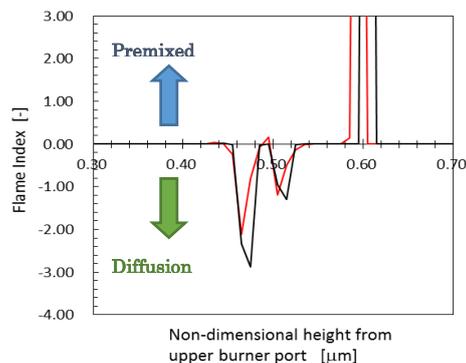


Fig. 6 The predicted vertical distributions of flame index (F.I.)

図6に示した通り、平均粒径が同一の条件でも、最大温度、燃料濃度の軸方向分布が異なることが分かる。また、FIで評価を行った場合、多分散噴霧の条件では、火炎が軸方向に分布する領域が拡大して予混合火炎の領域と拡散火炎領域が同時に存在することが明らかになった。

ここまでの結果から、対向流場に形成される噴霧火炎構造を中心軸上の温度分布およびFlame Indexで表現できることが示された。二次元の直接数値解析コードを用いて、分散の異なる噴霧を比較することで単分散噴霧の重ね合わせによる解析手法の開発の可能性を検討した。

計算の条件として、平均粒径が等しい二峰性噴霧、多峰性噴霧（四峰性）、多分散噴霧とした。図7に各粒径分布における中心軸上の温度分布を示す。図7より、ザウタ平均粒径が同じ場合には、中心軸上の温度分布は大きく変化しないものの、噴霧を構成する粒径を限定することで、対向流場の上流における温度上昇、すなわち小粒径の燃料液滴の燃焼に起因する温度分布の影響が大きく現れることが示された。

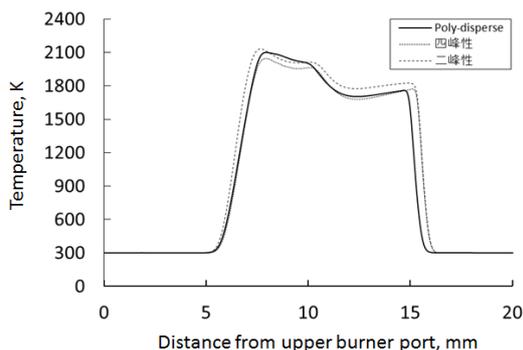


Fig. 7 The predicted vertical distributions of time-averaged gaseous temperature in poly-dispersed spray, bimodal spray and multimodal spray with same SMD of $104 \mu\text{m}$

次に、単分散噴霧の噴霧火炎の重ね合わせを用いた解析について、多峰性噴霧（四峰性）の火炎構造の表現を試みた。単分散噴霧の計算結果の重ね合わせでは、多峰性噴霧の粒径分布における各粒径の確率密度関数に応じて単分散噴霧の計算結果に対する重み付けを行う。確率密度関数には、数密度を基準として粒径分布を算出する条件と、総体積を基準として算出する条件を用いた。それぞれの条件において、算出された粒径分布に応じて、単分散噴霧による計算結果（温度分布やFlame Index）に重み付けすることで、四峰性噴霧の温度分布の表現を行った。

図8に中心軸上の温度分布およびFlame Indexの分布を示す。結果から、Flame Indexが負の値を示している領域が高温領域となっており、四峰性噴霧および単分散噴霧の重

ね合の双方において、噴霧火炎特有の群火炎構造が表現されていることがわかる。しかしながら、数密度基準、体積基準の双方において小粒径の温度分布を過剰に見積もる傾向が示された。

今後の展開として、本研究期間に噴霧計測手法として着手した、未燃燃料噴霧液滴、多環芳香族炭化水素、およびすすの二次元同時計測手法を用いて実験的に噴霧火炎中の蒸発からすす一次粒子生成への過渡的遷移を明らかにしていくほか、本研究期間で課題として顕在化した小粒径の噴霧火炎構造の寄与に対して、単分散の重ね合わせによる噴霧火炎構造解析の検討を進める必要がある。

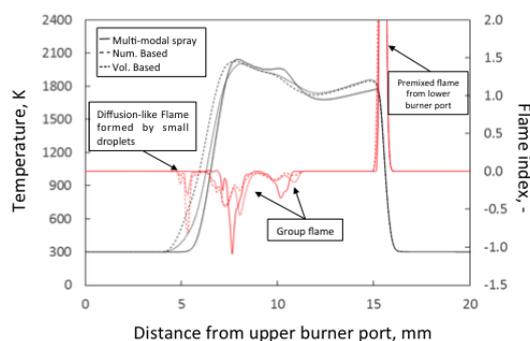


Fig. 8 The predicted vertical distributions of time-averaged gaseous temperature and flame index (FI) in multimodal spray and superposition of the results obtained from mono-dispersed spray (number based, volume based) with same SMD of $104 \mu\text{m}$

- (1) H. Watanabe, R. Kurose, S.-M. Hwang, F. Akamatsu, Combustion and Flame 148 (2007) 234-248.
- (2) H. Watanabe, R. Kurose, S. Komori, H. Pitsch, Combustion and Flame 152 (2008) 2-13.
- (3) H. Yamashita, M. Shimada and T. Takeno, Proceedings of the Combustion Institute, 26 (1996) 27-34.

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計1件)

Jun Hayashi, Junichi Fukui, and Fumiteru Akamatsu, Effects of Droplet Size Distribution of Fuel Spray on Soot Formation in Spray Flames Formed in a Laminar Counterflow, Proceeding of the Combustion Institute, 34-1(2013), 1561-1568.

〔学会発表〕(計1件)

山垣拓馬, **林 潤**, 中塚記章, 赤松史光, 噴霧火炎中のすす生成に及ぼす二酸化炭素雰囲気の影響, 第22回微粒化シンポジウム講演論文集, (2013. 12. 20), 399-405.

〔図書〕(計 件)
該当なし

〔産業財産権〕
該当なし

〔その他〕
該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 潤, 博士(工学)

大阪大学 大学院

工学研究科 機械工学専攻

燃焼工学研究室 講師

研究者番号:
70550151