噴霧燃焼炉内の流れ場とガス成分のフラックス測定*

池田 裕二^{*1}, 河原 伸幸^{*2}, 中島 健^{*3}Flux Measurements of O₂, CO₂ and NO in Oil Furnace

Yuji IKEDA, Nobuyuki KAWAHARA and Tsuyoshi NAKAJIMA

The flow velocity measurements and flux measurements of gas species of O₂, CO₂ and NO in an oil furnace were carried out. The velocity profiles in combustion and noncombustion were measured by the developed LDV, and the results show that the reversing flow regions for both cases were located at the same place and their volumes were almost equal. The comparisons of measured concentration and flux obtained using velocity and temperature were performed in spray combustion. The results show that there is little difference in the flame region but a large discrepancy outside of the flame region. The generated gas species in the flame and its convection outside of the flame were discretized, and the application of flux in spray combustion research was found to be very useful and effective.

Key Words: Spray Combustion, LDV Measurement, Gas Concentration, Flux Measurement, Oil Furnace

1. はじめに

液体燃料の燃焼手段として多く用いられている噴霧燃焼方式^{(1)~(3)}を工業的に応用し、大気汚染物質の低減を図る研究が近年、多く行われている。しかし、噴霧燃焼自体の現象解明も現在進行中であり、工業的に十分に応用するにはさらなる研究開発が必要である。噴霧燃焼を小形のボイラに用いる際にも、NO_x規制⁽⁴⁾(<80 ppm: O₂=4%換算)が適用されるようになってきた。用いるバーナーとしては、循環流を伴うガンタイプ方式とスワラ方式とがあり、燃焼負荷によって使用されている。いずれにしても、燃焼用空気流と燃焼噴霧の飛行により複雑な乱流場が形成されている。燃料噴霧の分裂、衝突、合体、蒸発、そして、乱流場を貫通する燃料液滴による非等方性効果などにより、計測自体が困難な状況下にある。温度計測時に熱電対⁽⁵⁾を用いる場合、火炎からのふく射や液滴の付着、時定数の問題等があり、ガスサンプル⁽⁶⁾⁽⁷⁾では等速吸引と反応

凍結等の問題がある。流れ場に LDV⁽⁸⁾⁽⁹⁾を応用する際には、火炎面で屈折によるビームのシスアライメント^{(11),(12)}、気相の流速と液滴の流速の区別不可能ということになる。そこで、本報ではこの温度、濃度、速度の情報をフラックスという値を用いて表し、おのおのの測定値とフラックス値との差異を利用して現象解明を行う。特に火炎内で生成、消費されるガス成分と火炎外で滞留する流れ中のガス成分との比較を行う。対象としている炉は実機(〜0.2 MW)のガンタイプバーナを用いた小形ボイラ用のものであり、バーナ近傍の循環流を伴う流れ場と炉全体の流れ場を測定対象とした。

2. 実験装置および計測装置

2・1 燃焼炉 本研究で用いた試験炉は0.2 MW級の小形ボイラ用のものであり、形状は内径430 mm、長さ1440 mmであり、七つのブロックからなっている(図1)。円管二重管方式を用いており、内壁の温度変化と各ブロックでの熱流速の計測を可能としてある。また、燃焼用空気量、燃焼圧、燃料流量、燃料の温度コントロールが可能であり、バーナ形状の変化にも対応可能な構造となっている。流速測定時には、試作したLDVの焦点距離と計測点の関係より、観測窓の

* 平成5年11月22日 第31回燃焼シンポジウム講演会にて講演、原稿受付 平成6年3月7日。

^{*1} 正員、神戸大学機器分析センター (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)。

^{*2} 准員、神戸大学大学院。

^{*3} 正員、神戸大学工学部。

大きさ($\phi 150\text{ mm} \times t15\text{ mm}$)を決め、曇り防止用に二重とした。使用した光学ガラスはBK-7(ARコート付き)と石英(ARコートなし)である。

2・2 ガンタイプバーナ 使用したガンタイプバーナは実機に用いられているものであり(0.1 MW)、図2に示す圧力噴霧方式である。燃料(A重油)は温度を一定にした後0.7 MPaにポンプ加圧され、ノズル(ダンフォス製H形)で60°の噴霧角でホロコーン状に噴霧される。バーナに取付けられたバッフルプレートにより循環流を形成し、保炎を行っている。また、このバッフルプレートには、スリットが設けられており、火炎の付着を防いでいる。図3に火炎の直接写真を示す。写真よりこの火炎は大きく分けて三つの部分からなっていることがわかる。バッフルプレート後流の循環流で保炎している部分、その後流の透明部での燃料蒸発部、そして輝炎を伴う主燃焼部である。このバッフルプレート後流における噴霧と循環流の流れの構造

は前報⁽¹⁰⁾で報告したように30 μm 以下の燃料液滴が循環流に巻き込まれ、50 μm 以上の燃料液滴が循環流を貫通していることがわかっている。

2・3 LDV 本研究用に光ファイバLDV(FLDV)を試作した(図4)。LDVを噴霧燃焼火炎へ適用する際の技術的課題とその対策は、(1)2本のビームが火炎面を通過する際に屈折率の変化により交わりなくなり、データレートおよびヴァリデーションが低下する。対策の一例として、ビーム交点からの散乱光

図1 試験炉の概略図

図2 バーナ概略図

図3 火炎の直接写真

図4 光ファイバLDVプローブ

強度を上げ、2本のビームが交わった際のデータレートとヴァリデーションを向上させる。また、屈折率の関係で交点が動いたため、前方散乱方式より後方散乱方式が望まれる。(2)燃焼用空気に散乱粒子を添加し、空気の流速を計測する際、粒子濃度が濃すぎると追従性の問題や、燃料との合体が生じる。さらに、粒子が燃えるため、耐熱に優れたものを選択しなくてはならない。通常の TiO_2 , SiO_2 , ZnO_2 は、微小粒子が合体した形となっているため、火炎中での温度の上昇により、各々の小粒子に離れてしまう。これがフリンジ間隔に比べ小さすぎるため、バースト信号は出るがドップラー信号が小さくなりビジビリティが低下する⁽¹³⁾。(3)火炎からのふく射や背景光はノイズとなる。そこで空間フィルタを用いて形成された測定体積よりも小さな体積を見ることにより空間分解能の向上とノイズカットを行う。ダイクロイックミラー(誘電体多層膜)と偏光板を併用するとさらによい。ノイズはホワイトもしくはピンクノイズが多いため、信号処理の際に留意しFFTなら二つのピーク比を高く選定し、自己相関ならポイント数とデータレートが高くなるデータをスクリーニングする。

従来、実炉内のLDV計測を行う際⁽⁸⁾⁽⁹⁾には2本のビームの交差する確率低下のため、測定体積を大きくする方法が用いられてきた。しかし、この方法では大きな速度こう配のある流れ場を平均化してしまうことになる。そこで本研究で製作したFLDVは、測定体積をできるだけ小さくし($69\mu\text{m} \times 1.03\text{mm}$)、散乱光強度の向上と、フリンジ間隔と使用する散乱粒子径とのマッチングを図った⁽¹⁴⁾。この方法では火炎面での屈折等により、2本のビームの交差する確率は低下するが、交差した際のデータの信頼性とデータレートの向上、そして高空間分解能を得ることができる⁽¹⁵⁾。表1にLDVの測定体積の使用を示す。測定体積の径と長さを小さくすることにより、散乱光強度を向上させることができる。さらに散乱光の受光立体角を広げることによりSNRの向上が図れる。この二つのパラメータをSNRパラメータ⁽¹⁴⁾で整理した。通常よく用いられるLDVのそれらと比べると、約5倍以上のSNRの向

上が図られている。このSNRパラメータが高いとデータの信頼性、空間分解能は高いが、測定体積を通して散乱粒子の数が低下するため、一概にSNRパラメータの値のみだけでデータレートおよびデータの信頼性を議論できない。しかし本報では、MSF⁽¹⁶⁾を用いるため、SNRパラメータの向上がSNRの向上となり得た。光源としてはアルゴンレーザを用い、交点での2本のビームパワー合計は約500MWであった。後方散乱方式であるにもかかわらずどの測定点においても約5kHz以上のデータレートを得ることができた。信号処理にはBSA(DANTEC社)、散乱粒子にはMSF(リキッドガス製: $2.7\mu\text{m}$)を用いた。

また、燃焼用空気の流速なのか、燃料液滴の液滴速度なのかを区別できないという問題が生じる。この対策としては、燃焼場のPDA計測が考えられる。しかし、測定時の問題、対策、補正が関係してくるため非常に複雑な問題である。この件については次報で報告する。

2.4 温度、ガス濃度の計測 燃焼ガス温度測定には、R熱電対(白金-白金ロジウム13%)を用いた。素線径は $\phi 0.5\text{mm}$ 、精度はJIS 0.25級、熱接点は露出形である。触媒効果を防ぐためにコーティング(酸化ベリリウム、塩化イットリウム)を施してある。ただし、ふく射、熱伝導、油滴の付着による熱損失の補正は行っていない。

試料ガスの採取には、水冷式サンプリングプローブを用い、燃焼ガス組成のうち、 O_2 (磁気式: 島津製作所製)、 CO_2 (非分散赤外線吸収式: 島津製作所製)およびNO(常圧式化学発光法: 島津製作所製)の分析を行った。サンプリングプローブは、局所ガス濃度計測を目的としているため、外形 $\phi 10.0\text{mm}$ でステンレス製水冷二重管構造であり、先端はテーパ形状となっている。燃焼ガスは、内径 $\phi 1.6\text{mm}$ の先端口より吸引され、冷却により化学反応は凍結される。その後、フィルタを通過し、吸引速度を任意に設定できるように、サンプリングボックスに一度ためられ、各ガス分析器に送られる。等速吸引を目指し、吸引速度の影響を検討した。

2.5 実験条件 実験条件は、燃料流量 $9.45 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{h}$ (発熱量: 0.1MW)、空気過剰率1.2とした。この実験条件における炉出口でのガス成分濃度は、 O_2 : $4.7\text{vol}\%$ 、 CO_2 : $10.8\text{vol}\%$ 、NO: 58.4ppm ($\text{O}_2=0\%$ 換算)、CO: 0ppm である。これより、NO排出指数を算出すると、 2.97g/kg Fuel となる。

表1 光ファイバLDVプローブの測定体積

	Kobe Univ.	TSI	DANTEC	KANOMAX
Focal length (mm)	500	500	400	800
Probe diameter (mm)	110	83	60	60
Spot diameter (μm)	69.9	160	119	179
Spot length (mm)	1.08	3.28	2.51	5.67
Fringe spacing (μm)	3.86	5.15	5.42	7.72
Fringe number	18	31	22	22
SNR parameter ($\times 10^{-4}$)	3.07	0.63	0.68	0.13

図5 バーナ近傍の流速, rms 分布

3. 実験結果および考察

3.1 バーナ近傍の流れ場 バーナ近傍においては三次元の流速測定を行った。 $x/D=0.02$ (バーナより9 mm) の測定断面における流速分布, rms 分布を図5に示す。図2のバーナ構造図からもわかるように, 保炎用のパッフルプレートが取り付けられており, 図5中に黒の横棒で示されている。パッフルプレート内側より, 燃焼用空気と 60° に噴霧された燃料液滴が混合しながら飛んでくる。この 60° の角度で燃料の達する位置を破線で表してある。軸方向速度に着目すると, 燃料が飛行する地点で最大速度を迎え, パッフルプレートの中央やや外側で負の速度となり, 循環流を形成していることがわかる。また, $r/R=0.2$ 近傍でパッフルプレートとバーナスロートの間より流れ出た燃焼用空気とパッフルプレート間の負の流れにより, 外側の循環流を形成している。半径方向速度では, この内側の循環流内で大きな速度を示しているが, 外側の循環流ではほとんど流れがない。パッフルプレートに設けられたスリットにより, わずかに旋回方向流速が生じている。これも外側の循環流の位置とほぼ同じ位置にある。rms の分布からわかることは, 燃料液滴の飛行と循環流とが干渉する領域で大きな乱れが生成されていることである。

LDV で流速を計測しているので, 燃焼用空気の流速なのか, 燃料液滴の液滴速度なのか区別は不可能である。非燃焼時の PDA 計測結果⁽¹⁰⁾ と比較すると, スロートとプレート間より流れ出る燃焼用空気の流速値は $10 \sim 12$ m/s とほぼ一致しているが, 内側の流速は LDV 計測のほうが PDA 結果⁽¹⁰⁾ より少し高めに出ている。しかし, これは燃焼による体積膨張による効果も含まれるので一概には評価できない。燃焼場の PDA 計測は, 測定時の問題点, 対策, 補正等があるため, 次報で報告する。

図6 炉内の流速, rms 分布

3.2 炉内の流れ場 燃焼により炉内の流れ場がどのように変化するかを調べるため, 非燃焼時(噴霧なし)と燃焼時の軸方向流速分布と rms 分布を比較して図6に示す。右図中のハッチング部は逆流領域($u < 0$)である。図6中の縦軸, 横軸は, 火炉内径 D と半径 R で無次元化された値で示している。

燃焼, 非燃焼で大きく異なるのは, バーナ近傍の流速値である。等高線の形状は両者よく似ているが, その値は, 燃焼時のほうが非燃焼時に比べて, 約2倍の値となっている。このように大きな値をとるのは, 燃焼による空気の体積膨張のためであると考えられる。

炉内での逆流は自己再循環として働き, NO_x の生成量に大きな影響を与えるため, この逆流量とその形態を把握することは, NO_x の生成量を評価するうえで非常に重要である。計測結果よりこの逆流領域は, 燃焼, 非燃焼とも約 $x/D=2.0$ まで伸びており, 燃焼時には周囲に押された形状となっている。炉内体積に占めること逆流領域の体積としては, 燃焼時で約31%, 非燃焼時で約34%であり, ほとんど差異がないことがわかる。また, その逆流の最大流速を比較してみると, 非燃焼時の 0.7 m/s に対し, 燃焼時は 1 m/s であり, 燃焼時のほうがわずかに大きい程度である。

図7 温度、ガス濃度、流速、乱れの半径方向分布

3.3 炉内の温度、ガス濃度分布 温度、各種ガス濃度と流れ場の個々の関係を見るために、図7に温度、各種ガス濃度、流速、乱れの半径方向分布を示す。図7中において、点線はこの断面における噴霧の到達位置(噴霧角 60°)を示している。図7中 $x/D=0.174$ 断面は、パッフルプレートより74.8 mm下流の地点で循環流の後端付近である。この断面においては、保炎部の特徴を見ることができる。 $x/D=0.593$ は図3における火炎の輝炎部で、温度が最大値となる断面である。 $x/D=2.302$ は炉尻近傍断面である。まず、 $x/D=0.174$ 断面に着目する。中心軸では温度はわずかに周囲より低くなっており、 O_2 濃度も高く、 CO_2 濃度も低い。これは噴霧のコーンが存在することにより、一次空気および周囲空気が中心軸付近まで流入できず、燃料と空気の混合が不十分になるためと考えられる。

中心軸より21.5 mm外側の $r/R=0.1$ 近傍において、 O_2 濃度が中心軸より低下し、 CO_2 濃度が増加している。この位置でのNO濃度は上昇し、最大値となる。この $r/R=0.1$ では、火炎温度が最大値となっており、酸化反応が盛んに進行しているためと考えられる。しかし、流速分布、rms分布には顕著な変化は見られない。

$r/R=0.25$ においては、 $r/R=0.1$ とは逆に O_2 濃度が上昇し、 CO_2 濃度が低下する。これは温度分布がいったん低下する部分と一致しており、火炎面近傍であることがわかる。この O_2 濃度が高く、高速流の領域は燃焼用の一次空気の流れによるものと考えられる。一

次空気の流れの内側では混合が進み燃焼反応が進んでいるが、この領域では噴霧の蒸発と、一次空気との混合の不十分さにより O_2 過濃状態になり、それにより火炎が軸方向に引き伸ばされている。 $r/R>0.5$ においては、 CO_2 濃度がかなり高い値を示しているが、これは再循環流内の排ガスによるものであるが、濃度の評価については、単なる体積分率のみでは評価が困難である。図7中の平均流速値は -0.5 m/s程度しかないため、生成量もしくはフラックスとして評価することが望ましい。

$x/D=0.593$ 断面において着目すべき点は、流速値はほとんど零にもかかわらず、 CO_2 濃度が $r/R>0.4$ で高くなっていることである。濃度のみ高い値を示すのは、 CO_2 の生成なのか滞留なのか区別できない。同様のことはNO濃度においてもいえる。火炎内で生成されるNOの濃度とほぼ同じオーダの濃度が再循環流内に存在している。したがって、フラックス値として評価することが望ましいことがわかる。

3.4 ガス成分のフラックス測定 従来、流速、温度、ガス濃度を別々に計測結果を議論してきたが、おのおのに含まれる誤差もあり、それらの関連性を説明するのは定量的には困難であった。そこで、一つのパラメータで評価することが望ましい。例えばNOの濃度が高い値を示すからといって本当にNOが大量に存在するのかは一概にいうことはできない。また、バーナ近傍などで濃度は低いが高速度で流れていると、生成されるNOが多いことを意味することになる。そこで、ガスの生成と滞留するガス量を考えるうえで、速度と温度そしてガス濃度を考慮した一つのパラメータとしてフラックス($kg/m^2/s$)の適用を試みる。フラックスを用いると、ある方向に単位時間単位断面積を通過したガスの質量を把握することができ、流れを考慮したガスの生成、消費を検討することが可能となる。図8に3断面の各ガス成分(O_2 , CO_2 , NO)の測定された濃度と軸方向のフラックス値および軸方向速度のフローパターン、等温度線図をあわせて示す。本報でいうフラックスは軸方向の対流フラックスである。ここでフラックスを計算する際には計測された温度を用いて密度補正を行った。用いた速度値は10 mm間隔の計測グリッドにおける軸方向速度である。そのため、負の速度が存在する所はフラックス値を負の値で示した。

まず、 $x/D=0.174$ 断面に着目する。中心軸より $r/R=0.4$ までの領域では O_2 , CO_2 , NOの濃度の変化とフラックスの変化は同様の傾向を示しているが、 $r/R>0.4$ では濃度とフラックス値には大きな違いが生じて

図 8 炉内のフラックス分布

いる。O₂においては $r/R > 0.4$ で濃度が約 5% となっており、これは $r/R = 0.1$ の燃焼反応の盛んな領域の濃度と一致する。しかし、フラックスで見ると $1 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ 以下の値となり、ほとんど零の値となっている。同様に CO₂ においても、 $r/R > 0.4$ で最大濃度値が 8% のものが、 $r/R > 0.4$ では 10% を超す濃度となっている。フラックス値で見ると $r/R > 0.4$ では O₂ 同様ほぼ $1 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ 程度であり、自己再循環流内のゆっくりとした流れによるものであることがわかる。NO に関しても $r/R > 0.4$ では、CO₂ と同様な傾向でフラックス値と濃度値に大きな差異が生じていることがわかる。これらのことより、火炎内部では従来の速度、温度、ガス濃度の個別の計測でも、現象の特徴を把握できるが、火炎外部(滞留部)においては、フラックス値が有用な表現方法であることがわかる。

$x/D = 0.593$ (火炎の輝炎部) においても、火炎の内側では濃度とフラックスは同様の傾向が見られるが、 $r/R = 0.4$ より外側では濃度とフラックス表示では異なった現象を表している。 $r/R = 0.65$ で軸方向速度の向きが逆流する。ここでのフラックス値は軸方向速度が零になるため、零となるが、濃度表示ではほぼ均一な値を示している。個別のガスの成分濃度の計測で、現象を調べようとするのではなく、フラックス値を用いるほうが滞留部での特徴を十分に表現でき、循環する流れを考慮している点でより有用な情報となり得ることが図 8 よりわかる。

NO に関してみると、 $x/D = 0.174, 0.593$ の両断面と

も火炎外 ($r/R > 0.3$) においては、炉壁側ほど高い濃度を示している。これは、火炎内で生成されたものと自己再循環により循環して滞留しているものとが合ったためである。しかし、フラックス表示では循環する流れを考慮しているため、生成される値(火炎内)と滞留する値 ($r/R > 0.3$) を区別して考えることができる。

4. ま と め

噴霧燃焼炉内において FLDV をもちいて流速測定を行い、また温度、ガス濃度分布の計測をあわせて行ったことにより、以下の知見を得た。

(1) 炉内の中心軸付近の流速は、非燃焼時に比べ、燃焼時のほうが約 2 倍の値となるが、自己再循環流内の流速値はほぼ同じであることがわかった。

(2) 炉内の逆流領域の位置は燃焼、非燃焼ともに $x/D = 2.0$ 付近まで伸びており、その逆流領域の体積は燃焼時で約 31%、非燃焼時で約 34% と、大差ないことがわかった。

(3) パーナ近傍において、ガス流速、温度、濃度の個別データによる現象解明では火炎内部では現象の特徴を解明できるが、火炎外部の滞留部での現象の特徴は表現し切れていない。このような場所にフラックスを適用すると、火炎内で生成されるガス量と滞留するガス量を区別できることがわかった。

文 献

- (1) 水谷, 燃焼工学, (1977), 133, 森北出版.

- (2) William, F. A., *Combustion Theory*, 2nd ed., (1985), 446, The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.
 - (3) Chigier, N. A. and Dvorak, K., *Proc. 15th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, (1974), 573.
 - (4) 東京都業務用小型ボイラ等低 NO_x 燃焼機器認定要綱, (1989).
 - (5) 小沼, 大阪大学学位論文, (1976).
 - (6) Nakabe, K., ほか 3 名, *Combust. Flame*, **74**(1988), 39.
 - (7) 平井・ほか 4 名, *機論*, **51**-463, B(1985), 1977.
 - (8) Baker, R. J., ほか 2 名, *Proc. ASME-AIChE Heat Transf. Conf.*, Atlanta, 73-HT-34(1973).
 - (9) Ereaud, P. R. and Gover, M. P., *J. Inst. Energy*, **64** (1991), 135.
 - (10) 栗原・ほか 2 名, *機論*, **60**-570, B(1994).
 - (11) 橋本・ほか 3 名, *機論*, **49**-439, B(1983), 715.
 - (12) Hong, N. S., ほか 2 名, *Proc. R. Soc., London*, Ser. A, **353**(1977), 77.
 - (13) Ikeda, Y., ほか 4 名, *Proc. 6th Int. Symp. Appl. Laser Tech. Fluid Mech.*, S32-2-1(1992).
 - (14) Ikeda, Y., ほか 3 名, *Meas. Sci. Tech.*, **1**-3(1990), 260.
 - (15) 池田, 第 3 回デザイン・エンジニアリング・プラザ, テキスト, (1993), 11.
 - (16) Ikeda, Y., ほか 3 名, *Part. Part. Syst. Character.*, **11**(1994), 127.
-