



重質油焚ボイラ用内部混合型多孔二流体アトマイザの開発 (第1報 アトマイザ内部流動と微粒化特性)

Development of Internal Mixing Multi Exit Port Twin Fluid Atomizer for Heavy Oil Fired Boilers (1st Report Internal Flow Analysis and Spray Characteristics)

橋口 和明*,
(Kazuaki HASHIGUCHI)
三菱重工業(株)
(MHI, Ltd.)

山根 史也,
(Fumiya YAMANE)
三菱重工業(株)
(MHI, Ltd.)

藤井 宏
(Hiroshi FUJII)
三菱日立パワーシステムズ(株)
(MHPS, Ltd.)

佐藤 一教,
(Kazunori SATOU)
三菱日立パワーシステムズ(株)
(MHPS, Ltd.)

西田 恵哉
(Keiya NISHIDA)
広島大学
(Univ. of Hiroshima)

In advanced low-grade heavy-oil fired boilers, there has been a great demand for enhanced atomization to improve combustion efficiency and reduce the cost of environmental equipment. The high performance internal mixing atomizers with multi exit ports were developed to meet these demands. This paper describes the effects of liquid and atomizing media behaviors in the primary mixing zones of the internal mixing atomizers on the spray characteristics. Two types of actual sized atomizers were investigated. One is the type in which the liquid is fed straightly along the atomizer centerline and atomizing media from the surroundings intersects with the liquid (LSF). The other is the LCF type in which liquid is supplied from surroundings investigated. In the LCF atomizer, the liquid crossly mixes with atomizing media injected along the atomizer centerline. First, the numerical study using the computational fluid dynamics software was conducted to investigate the two phase flow behaviors in the internal mixing chamber and the exit port. Next, the differences in the spray characteristics were experimentally investigated between the LSF and the LCF atomizers. The uniformly spread and thin liquid film is produced at the inlet of the exit port of the LCF atomizer and results in improvements of atomization. On the other hand, the LSF atomizer shows poorer atomization due to deflected and thicker liquid film in the exit port.

Keywords: Twin-Fluid Atomization, Internal Mixing Atomizer, Atomization Mechanism, Spray Characteristics, Heavy Oil Fired Boiler

1. はじめに

昨今の世界的な石油市場において、C 重油需要は低落傾向にあり、いきおい軽質化が一段と進行している。この中で、SDA (Solvent De-Asphalting) 設備が各製油所へ普及しつつあるが、副生残渣油 (SDA ピッチ) の有効利用が課題となっている⁽¹⁾。SDA ピッチはボイラの燃料として期待されるが、残留炭素分が多く、既設のボイラプラントでは、ばい塵対策のため集塵設備の強化など大掛かりな環境対策が強いられる。

噴霧中の粗い液滴の存在が、ばい塵濃度上昇に強くかかわる。したがって、このばい塵は、液滴の微細化により格段に低減させることができる。高粘度燃料油の微粒化には、古くから二流体アトマイザが広く使用され、中でもいわゆる中間混合型といわれる Y ジェットアトマイザがボイラでは主流であった^{(2),(3)}。中間混合型を改良し、液体を気体で取り囲むようにした ϕ ジェットアトマイザの報告例もある⁽⁴⁾。これに対し、内部混合型といわれる二流体アトマイザがあり、CWM (Coal Water Mixture) 等の難微粒化流体に適用されている^{(5),(6)}。この内部混合型アトマイザは、気液の衝突部 (一次混合部)、内部混合室内の二相流動、噴出孔内の挙動等が複雑に絡みあっていて、それらの現象は十分に理解されていないというのが実状である^{(6),(7)}。

このような背景から、著者らは内部混合型アトマイザにおける微粒化促進のため、様々な角度から広く検討を行った。

本研究の目的は、数値解析と実験とを併用組み合わせながら、内部混合型多孔アトマイザの混合室内及び噴出孔の二相流動の役割を明らかにし、微粒化特性への影響を把握することにある。著者らは、まず実用上の展開も考慮した基本型となる内部混合型多孔アトマイザを、気液衝突部 (一次混合部) を変えて 2 通りのモデルとして設計・試作した^{(8),(9)}。このモデルアトマイザに対し、内部混合室及び噴出孔の二相流動を数値解析し、現象を把握するとともに微粒化特性に及ぼす影響を考察した。さらに、実験により微粒化特性を測定し、内部混合型アトマイザにおける微粒化改善の方向性を確認した。

本稿は、新型内部混合式アトマイザの開発から大型燃焼試験炉における実証に至る一連の成果の初報であり、今後順次まとめて報告する予定である。

2. 内部混合型多孔二流体アトマイザについて

2.1 微粒化メカニズムと設計上の着眼点

既往の研究、佐藤ら^{(5),(6)}、金ら⁽⁷⁾及び前報^{(10),(11)}から、内部混合型アトマイザの内部流動現象は図 1 のようであると推察される。具体的には、前報^{(10),(11)}では、単一孔の亚克力製可視化アトマイザの内部流動を観察し、液体質量に対する気体質量の比が増大すると、流動様式がスラグ流から環状噴霧流へと変化する

原稿受付：2017年9月11日

* 責任著者：正会員、三菱重工業株式会社 総合研究所
(〒676-8686 高砂市荒井町新浜 2 丁目 1 番 1 号)
E-mail:kazuaki_hashiguchi@mhi.co.jp

ることを明らかにし、それらは Baker ら⁽¹²⁾の流動様式図と概ね一致する傾向を得た。さらに、佐藤ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾、玉木ら⁽¹⁴⁾は、多孔の内部混合二流体アトマイザでも単一孔と同様に混合室内壁における液膜の形成を明らかにしている。また、金ら⁽⁷⁾は、本研究と類似サイズの混合室を有するアクリル製アトマイザを用い、供給孔と噴出孔が偏芯していても噴孔部で環状噴霧流が形成されることを明らかにしている。したがって、本研究で対象とする内部混合型多孔二流体アトマイザも同様に液膜の生成を想定した。すなわち、液体は気液衝突部（一次混合部）で気体と衝突し、気体とのせん断により液塊状となって浮遊しながら軸方向へ移動し、正面の内壁に衝突して押し広げられ噴出孔へ流入する。一部の液塊は主流の周囲を循環し、周囲壁に衝突して液膜化するものもあれば、噴出孔に直接流入するものもある。いわゆる、噴出孔の外周側に環状の液膜流がある環状噴霧流が形成されると考えている。噴出孔出口の圧力が大気圧であるのに対し噴出孔入口の圧力は 10 気圧程度と高いため、噴出孔では二相流のチョーク流れが形成される。したがって噴出孔では、孔壁に添う比較的流速の液膜が、断熱膨張によって音速となる気体とのせん断によって微粒化するため、液膜を薄くするのが噴霧を良好にするポイントと見なせる。また、高粘性油ではリガメントが長く伸びて分裂するが、液膜を薄くする事が肝要な点は変わらない。

アトマイザ設計においては、バーナの燃焼方式に応じて燃料液滴群を任意の位置に分散させて良好に燃焼させる事が重要である。それらは噴出孔の配置（孔角度および噴出方向）で決定づけられるため、噴出孔を任意の位置に変更しても噴霧特性に影響を及ぼさないロバストな内部流動特性が要求される。

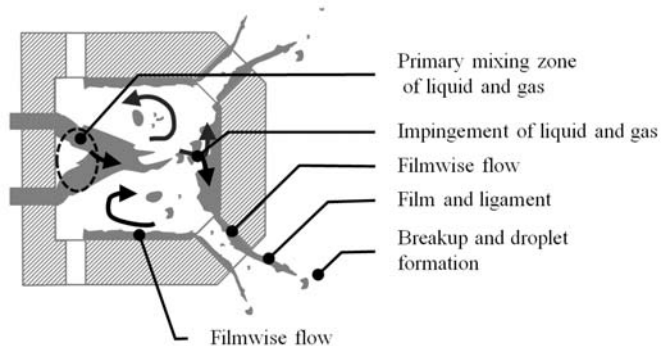
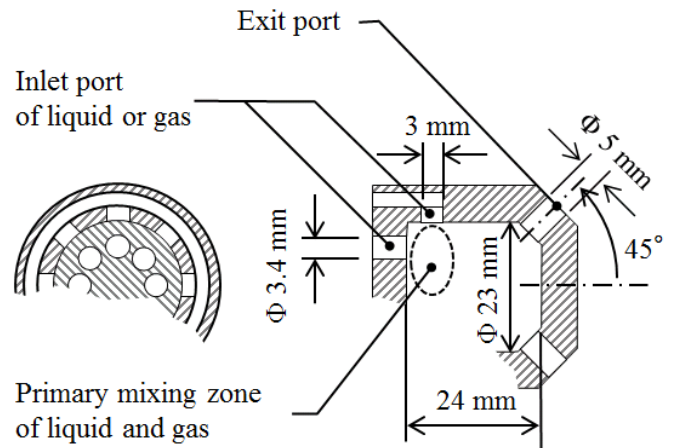


Fig. 1 Illustration of liquid flow behavior in internal mixing chamber

2.2 内部混合型多孔二流体アトマイザの試作

前節の考察に基づきアトマイザを試作した。概略構造を図 2 に示す。中央に単一の液体流入孔を設けた構造が先行研究で多く提示されているが^{(4),(5),(7),(10),(11),(13)}、本報では図中の(a)に示すように液体の流入孔と気体の流入孔が対になるように同心円状に等間隔に 8 方向に配置した。混合室入口（一次混合部）で液体に気体を直角に衝突させて混合室内に分散させることで液体の分散性を高めた構造としている。これらの気液の衝突のさせ方が微粒化特性に及ぼす影響を調べるため、各々の流入部分を交換できる構造とした。図中の(b)は、液体の流入孔を下流直進方向に向け、一方外周側に設けた気体の流入孔を気流が中心方向に噴出するように配置しており、内液外気式の一般的な構造である。この方式を、ここでは液ストレートフロー方式 (LSF) と呼ぶ。図中の(c)は、液体と気体の各々の流入孔を入れ替えた

配置としている。すなわち液体を外周側から中央側へ集めるように噴射し、そこへ中心側から気体を衝突させるものであって、液クロスフロー方式 (LCF) と呼ぶことにする。各部の寸法は、燃焼させる場合の燃料と空気の混合に配慮して噴出孔数と広がり角度を決定した。気体と液体の流入孔や噴出孔の面積は、圧力損失の実績値に基づいている。具体的には、アトマイザ軸方向の流入孔が約 $\phi 3.4$ mm の円筒形状であり、アトマイザ周囲から軸中心に向かって供給される流路が約 3×3 mm の矩形形状であり、断面積が同一になるようにした。噴出孔は混合室の前方角部 8 ヶ所に周方向に噴出角 45 度で配置し、孔径は約 $\phi 5$ mm とした。



(a) Overview of internal mixing atomizer

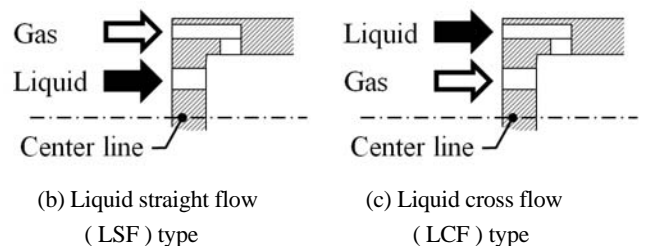


Fig. 2 Schematics of internal mixing atomizer

3. アトマイザ内部流動

3.1 数値解析方法

解析には汎用の流体解析コード (ANSYS 社 FLUENT) を用い、界面捕捉手法の一つである VOF 法 (Volume of Fluid Method) を採用して、液体と気体との相互作用を解析した。VOF 法は各計算格子の液相の体積分率 f を定義し、密度や粘性係数等の物性を混合比率で平均化する。支配方程式を以下に示す。なお、乱流モデルは SST $k-\omega$ を用いた。

$$\rho = \rho_l f + \rho_g (1 - f) \quad (1)$$

$$\mu = \mu_l f + \mu_g (1 - f) \quad (2)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \cdot \nabla f = \frac{S_f}{\rho} \quad (3)$$

ここで、 ρ : 密度 [kg/m³], ρ_l : 液体密度 [kg/m³], ρ_g : 気体密度 [kg/m³], f : 液相体積率 [-], μ : 粘性係数 [Pa·s], μ_l : 液体粘性係数 [Pa·s], μ_g : 気体粘性係数 [Pa·s], u : 速度 [m/s], S_f : 生成項.

図3に解析モデルを示す. 三次元の1/8カットモデルを用いカット面を周期境界とした. 液体の流入孔, 気体の流入孔および噴出孔を各々1孔ずつ直線上に配置し, 入口の境界条件は, 液体の質量流量を0.083 kg/sに, 気体の質量流量を0.010 kg/sに設定し, 出口の境界条件は噴出孔から十分に離れた位置を大気圧に設定した. 混合室内のメッシュサイズは0.2 mmに設定し, 噴出孔近傍のみ0.1 mmに設定した. 解析はレイノルズ平均モデルを用い, 時間ステップを1マイクロ秒に設定して非定常で計算した. 気体と液体を供給してから約5ミリ秒後に内部混合室内の液保有量が飽和し, その後, 約20ミリ秒まで継続計算した. 計算格子内の気液界面は, 形状再構成法を用いて線形で補間すると共に, レベルセット法を併用した. 壁面の接触角は30度に設定し, 濡れ性を考慮した. これらの表面張力や界面張力は, Brackbill⁽¹⁵⁾らの連続体表面力の考えを用いており, 運動量方程式に外力として追加される. また, 界面張力は壁近傍の界面の曲率から求めた. なお, 解析は1マイクロ秒ごとに段階的に計算し, 動的な現象を準静的なものとして取り扱った.

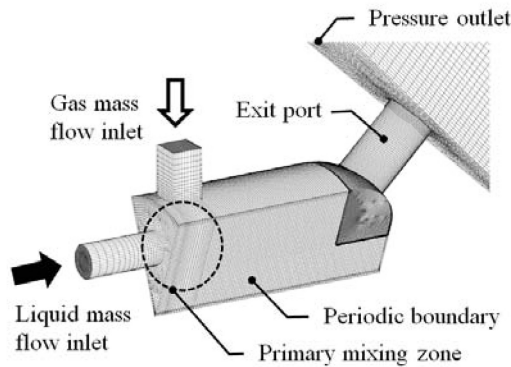


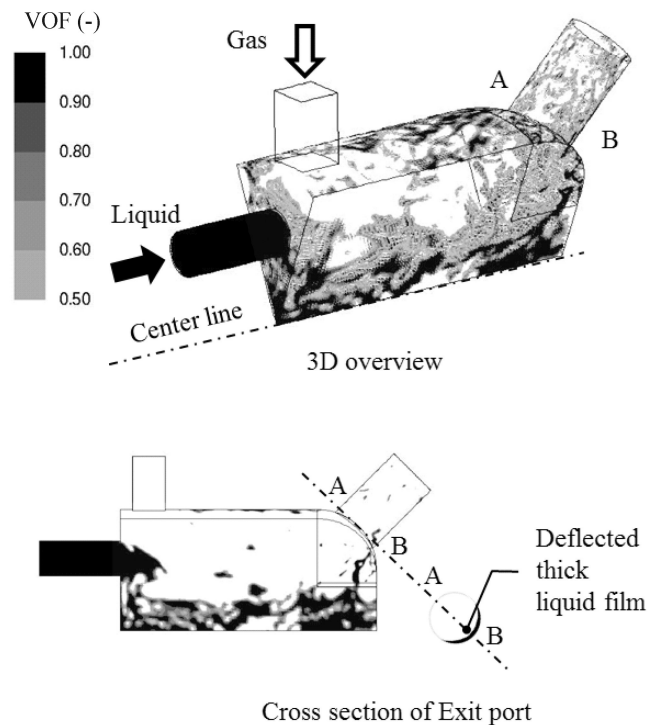
Fig. 3 Simulation domain and boundary conditions of the internal mixing chamber

3.2 液体の分布

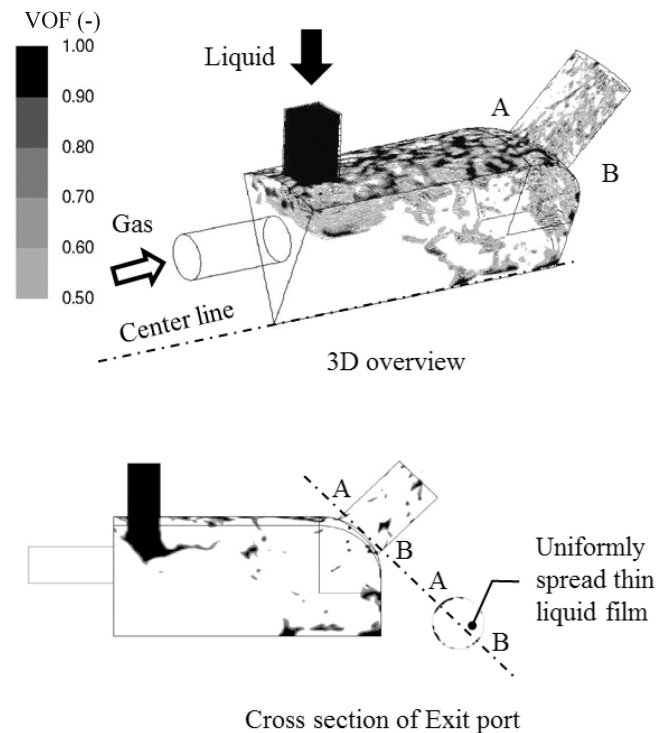
アトマイザ内部の液体 (VOF 率 0.5 以上) の三次元分布及び流入孔と噴出孔の中心を結ぶ断面を図4に示す. 液体を中心軸方向に供給する LSF では, 一次混合部で液体が気体との衝突によって押し広げられて, 液柱状から扁平状となり, その周囲から液塊状に分裂する. 液塊は, アトマイザ中心軸側に集合しながら前進し, 内部混合室の壁に正面衝突して押し広げられ壁に沿って噴出孔へ流入する. 噴出孔の流入断面の気液界面は絶えず変動しており, それらを3ミリ秒平均処理したものを示しているが, 中心軸側に厚い液膜が形成されている. このような厚い液膜は噴出孔から噴出し分裂する際に粗い液滴となりがちである.

一方で, 液体を外周側から流入させる LCF では, 一次混合部における気液の衝突により液塊となる点は LSF と共通しているものの, 内部混合室中央部の液溜りが少なく, 噴出孔の流入断面は均一な薄い液膜が形成されている. 全体的な液の割合は LCF の方が少なくみえるのは, 内部混合室内の VOF 率が LSF では 0.18, LCF では 0.13 と少ないためである. 流入させる液体

と気体の VOF 率が 0.09 であるので, その増加分は内部混合室内の液体の滞留を表し, LCF の方が低く液膜が薄くなりやすい. 以上の結果から, LCF の方が微細な噴霧生成に有利であるとの予測ができる.



(a) Liquid surface in mixing chamber for liquid straight flow (LSF)



(b) Liquid surface in mixing chamber for liquid cross flow (LCF)

Fig. 4 Volume fraction in the mixing chamber

3.3 噴出孔での気液質量流量

噴出孔入口面での液体及び気体の質量流量の時間的変動の結果を図5に示す。液体と気体の供給を開始してから概ね5ミリ秒後に混合室内の液体滞留量が一定となった時点と定常到達とみなし、それ以降の変化を示しているが、定常到達後も液量は変動している事がわかる。一方で気体の流量変動は小さい。液量が増えることは、気液流量比も変動する事を意味する。すなわち二流体アトマイザにおいては、周期的に気液比が上昇・下降しており、気液比下降時には瞬時に微粒化が悪化する現象が生じる可能性も、この結果は示唆しているといえる。LSFとLCFを比較すると、LCFの方が周期がやや穏やかでありパターンに持続性がみられる。一方でLSFは急激な液量変動が周期的にあり、その瞬間は気液比が低下し微粒化が悪化すると考えられる。

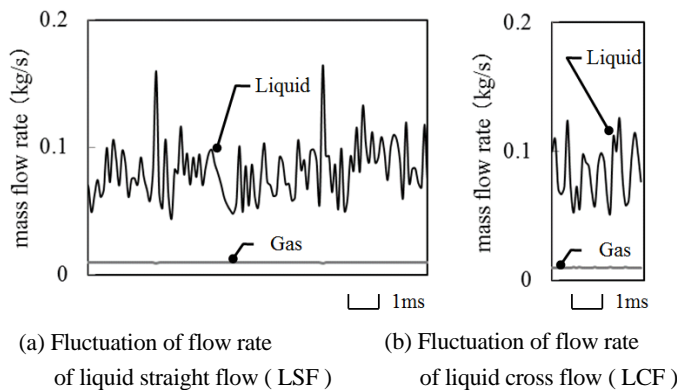


Fig. 5 Fluctuation of mass flow rate

4. 微粒化特性

4.1 実験装置および方法

図6に噴霧実験装置の概要を示す。液体には常温の水道水を、微粒化用気体には空気をを用いた。水はスクリーンプンプでタンクから圧送し、マスフローメーターで流量が0.67 kg/sとなるように制御弁で調整した。実機規模の大流量となるため水を使用しているが、重質油のような高粘性流体でも水と同様のザウタ平均粒径の変化を示すことを前報⁽¹¹⁾で確認しており、微粒化特性の噴射パラメータによる変化傾向は水と油で一致すると考えられる。空気はコンプレッサーで圧縮し、ドライヤーで除湿した後蓄圧して、液体の質量流量に対し気体の質量流量を0.08 kg/s、気液流量比0.12となるように制御弁で調整した。横置き風洞内で安定した噴霧を形成した後に、フラッシュランプ（発光時間数 μ s）で照明した噴霧の散光画像撮影を行った。また、風洞外から位相ドップラー液滴計測装置（Artium社製PDI-200MD）を用いて、液滴径および液滴速度を測定した。

図7に噴霧計測位置を示す。タンジェンシャルボイラ⁽¹⁾における着火位置がアトマイザの下流およそ500 mmであることから、アトマイザ下流500 mmにおいて、半径方向に5 mmピッチで測定した。位相ドップラー液滴計測装置は、ビームエキスパンダーによるビーム径の拡大、ビーム間距離の拡大および焦点距離の拡大を施した特殊仕様とすることで測定領域の長さを1.2 mmに拡大し、最大液滴径約 ϕ 1 mmの粗粒を測定可能とした。測定領域の拡大によって、計測レンジが10-1500 μ mと一

般的な仕様よりも約10倍高くなり、本研究で対象とする20-350 μ mの液滴計測に適していると考えられる。なお、岡本ら⁽¹⁶⁾は液滴径がビーム径の半分以上となる場合の誤認を指摘しているが、この観点からも本研究の設定ではビーム径の半分よりも十分に小さく、設定は適切とみなせる。

トランスミッターとレシーバとを3次元トラバーサに設置して移動させた。計測はサンプリング液滴数を10000個とし、4回繰り返して平均値で評価した。それらのザウタ平均粒径(SMD)のばらつきは、概ね \pm 4%未満である。また、高液滴密度ではレーザーが透過しづらいため、8つの噴出孔のうち計測対象以外の7つの噴出孔から出る噴霧流を、ノズル下流200 mm位置に設置したスポンジ状のスリットにより回収した。スリット幅は、スリットに噴霧が衝突する影響を極力小さくするように何ケースかの予備試験を行い、最終的に15 mmに決定した。結果として、バリデーション率は約80%であった。

圧力や気液比などの基本的運転条件が噴霧に及ぼす影響は前報⁽¹⁰⁾で報告しており、本報では液流への気流の衝突が内部流動に及ぼす影響を調べるため、数値解析と同様に各々の流入部分を入れ替えて実験を行った。

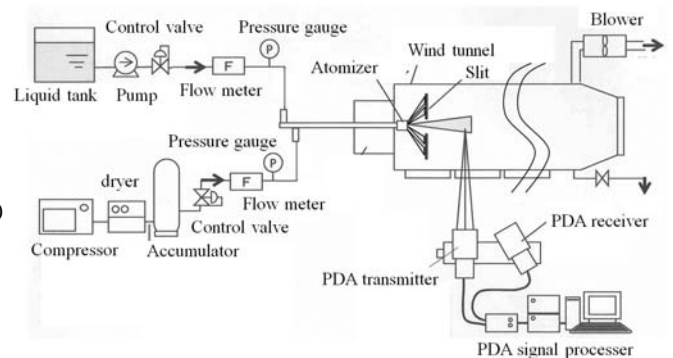


Fig. 6 Schematics of spray test rig

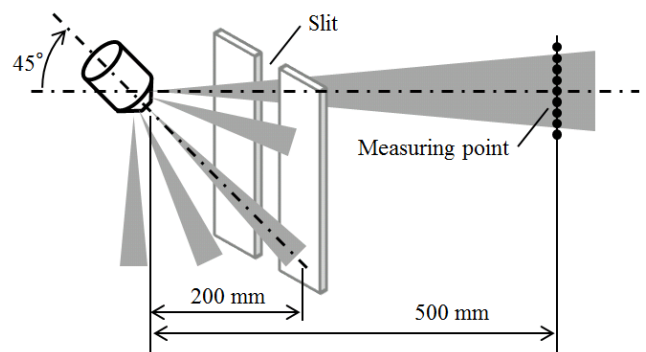


Fig. 7 Measurement location of PDA

4.2 噴霧画像

図8に8つの噴出孔からの噴霧の撮影結果を示す。噴霧流は約1 mと広範囲に広がるが、図はノズル近傍を拡大して示している。個々の噴霧流は、噴出孔出口部で微粒化用気体の膨張によりふくらみ、その後噴出孔軸方向に直進している。隣り合う噴霧流同士が、衝突せずに独立しているため、単一噴霧流を計測で比較すればアトマイザ全体を評価できると考えられる。また、各噴出孔からの噴霧流の周期的挙動はLSFとLCFで概ね一致しているようである。

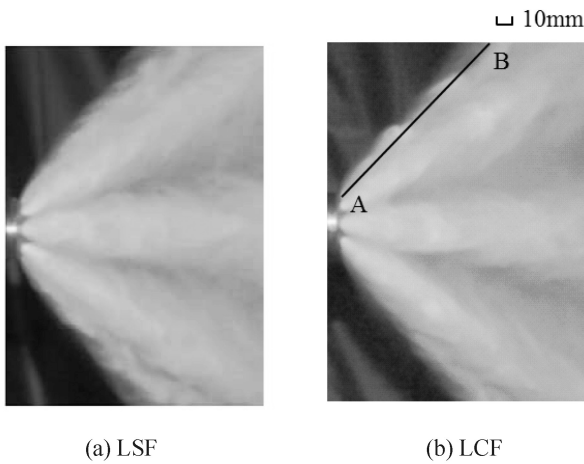


Fig. 8 Comparison of the spray images between LSF and LCF

噴霧流の画像には周期性がみられる。8つの噴流のうち図8のAB線に示す噴霧流の輝度分布を図9に示す。噴出口軸上の輝度は、周期的に高い部分があり、それらは噴霧流の濃い部分を表している。噴霧流の軸方向に3つの山が確認され、噴霧流の拡散に伴って輝度が減衰している。撮影画像の輝度（ミー散乱）は液滴径の二乗に比例する特性があるため、輝度の変動は液滴径の変動もしくは液体量の変動を表していると考えている。これらの周期的な濃淡は3章で述べた噴出口での液流量の変動が一つの要因と考えられるが、詳しくは次報で論じる予定である。

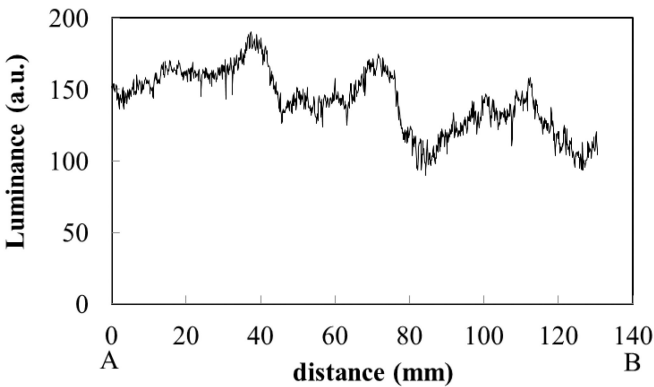


Fig. 9 Luminance fluctuation occurred on spray

4.3 液滴速度とザウタ平均粒径

図8の噴霧流の画像を見る限り、LSFとLCFの噴霧流の外観は同様であるが、微粒化特性には差異が現れる。図10(a)に半径方向距離と液滴速度の関係を、(b)に半径方向距離とザウタ平均粒径(SMD)の関係を、(c)に液滴速度とザウタ平均粒径(SMD)の関係を示す。

図10(a)の液滴速度は半径方向位置のマイナス側(アトマイザ中央側)に極大点がシフトしており、これは隣接する噴霧間のコアンダ効果により噴霧同士が引き付けあうためと考えられる。液滴速度の最大値はLSFの方がLCFより大きい。

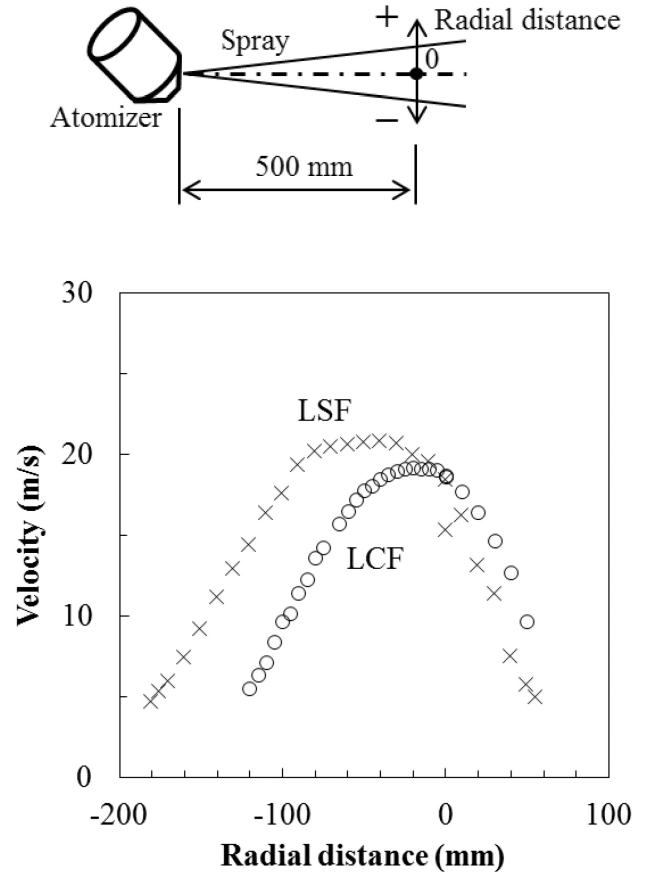
図10(b)のSMDは、半径方向位置±60mmの範囲では大きな差はないが、半径方向位置-60mmからマイナス側(アトマイザ中央側)ではLSFのSMDが大きくなる。これは、第3章で述

べた噴出口内の液膜が厚い位置がアトマイザ中央側にあるのと同一であり、液流の偏流の影響と考えられる。LSFは、液滴速度が高くザウタ平均粒径が大きい、LCFでは、このような傾向が弱く、微粒化が促進されている。実際の大型ボイラの燃焼場においては、粗大液滴は、ばい塵濃度に強く関わるので、SMDを小さくできた効果は大きいと期待できる。

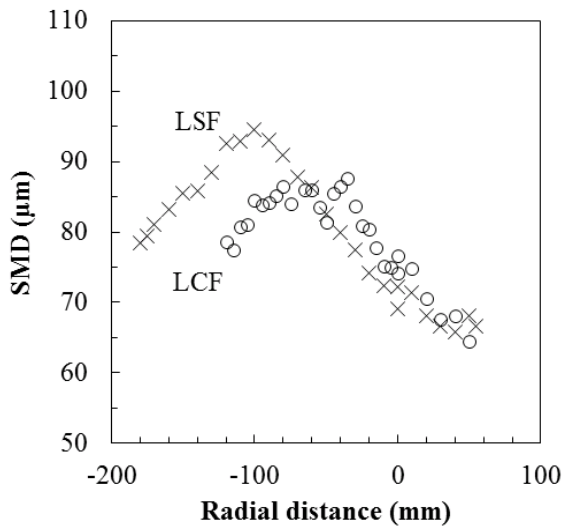
図10(c)は、上記の液滴速度と液滴径との関係をマップ化している。このようにSMDの大きいアトマイザ中央側とSMDの小さい外周側でコの字型に分かれる傾向は、多孔噴霧流によるコアンダ効果と考えられる。また、低流速の領域では両者に差は無いが、高流速部ではLSFのSMDが大きくなる。これは、LSFの粗い液滴がLCFに比べて貫通力が高く、液滴速度が減衰しにくくなるため、LSFはLCFよりも高い速度を維持する。

4.4 粒度分布

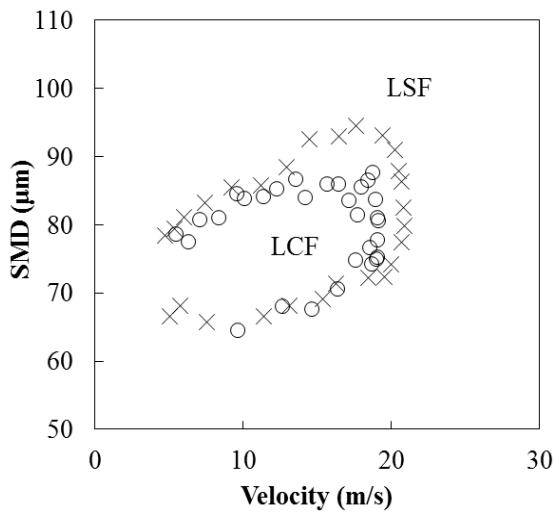
噴流軸上となる半径方向0mm位置および半径方向-100mm位置でのLSFとLCFの粒度分布を図11に示す。液滴速度やSMDに差が無い噴流軸上の(a)LSFと(b)LCFを比較すると、全体的に大きな差は見られないものの、300μm以上の粗粒はLSFだけに確認される。一方、半径方向-100mm位置での(a)LSFと(b)LCFを比較すると、体積分布が最大値となる液滴径は、LSFの70μmに対しLCFは60μmと小さくSMDもLCFが小さい。このように噴流軸上で粗粒がなくなり、噴流軸からそれた部分で微粒側が増えていることは、LCFの噴出口において液膜が薄く一様に広がった影響と考えられる。



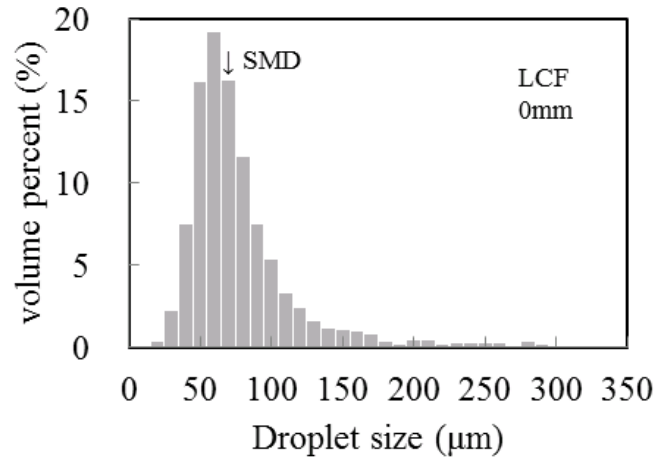
(a) Droplet velocity



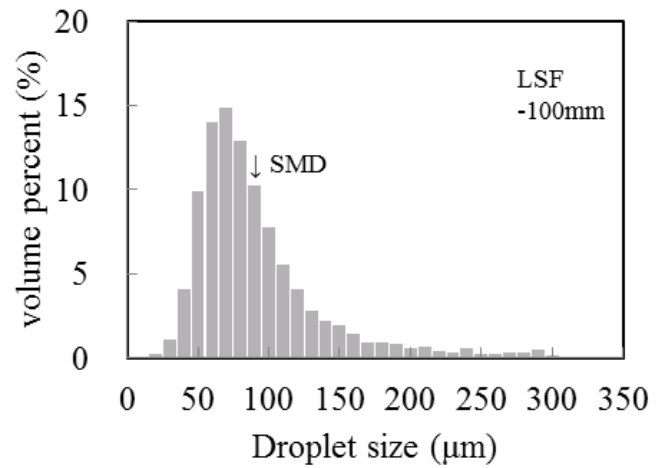
(b) SMD



(c) Mapping of velocities and SMDs for LSF and LCF

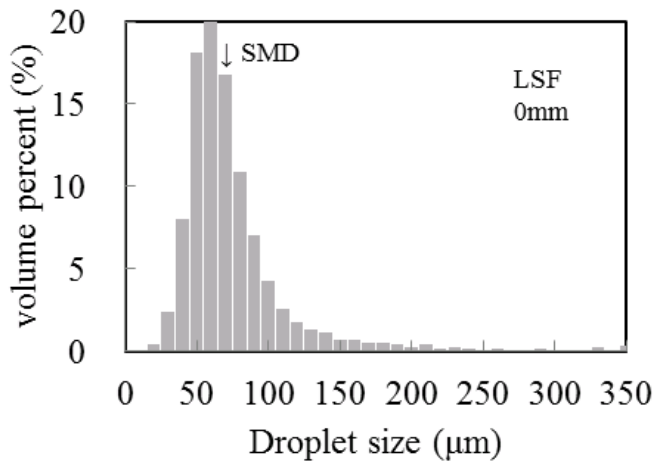


(b) LCF with radial distance 0mm

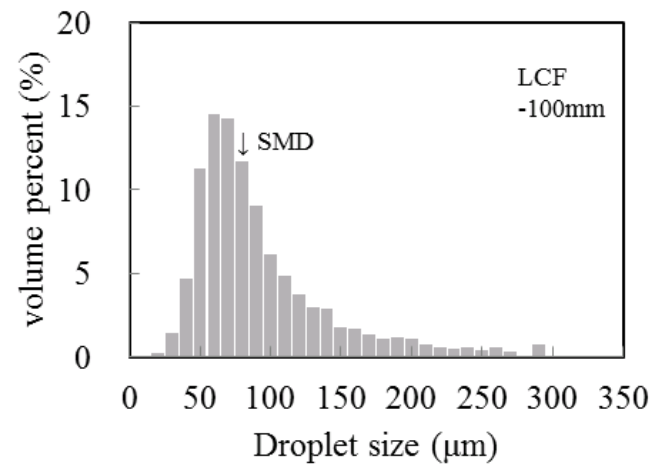


(c) LSF with radial distance -100mm

Fig. 10 Comparison of droplet velocity and Sauter mean diameter between LSF and LCF



(a) LSF with radial distance 0mm



(d) LCF with radial distance -100mm

Fig. 11 Comparison of volume-based droplet size distribution between LSF and LCF

5. おわりに

内部混合型多孔二流体アトマイザにおいて、混合室内の気液衝突部の方式が異なる2ケースに対し数値解析を行い、内部混合室内及び噴出孔における気液二相流動を比較した。さらに実際の噴霧特性を測定し噴出孔における気液二相流動との関係について検討した。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 液体を混合室中心軸に沿って供給し、混合室周囲から微粒化用気体を衝突させる液ストレートフロー方式 (LSF) は、噴出孔入口において偏った厚い液膜が存在する。
- (2) 液体を混合室の外周側から中心軸側へ集めるように送り、微粒化用気体を混合室中心軸に沿って供給する液クロスフロー方式 (LCF) では、噴出孔入口で一様に薄く広がる液膜が生じる。
- (3) LSF と LCF の両方とも、噴霧間の相互作用により噴出孔よりアトマイザ中心側に噴霧液滴の最大速度とザウタ平均粒径の最大値が現れる。
- (4) LCF の方が、アトマイザ中心側のザウタ平均粒径が小さく液滴速度も小さい。以上から、噴出孔入口の液膜に偏りが少なく、噴出孔において液膜が一様に薄い方が微粒化促進に有利といえる。
- (5) 噴出孔入口において液体流量は大きく変動する。気体流量の変動は小さい。

最後に、本研究における数値解析と実験の関連について一言振り返りたい。数値解析によって、気体と液体の衝突方式の違いが内部混合室内の流動形態に及ぼす影響を明らかにした。さらに、それらの流動形態は噴出孔にまで関与し、噴出孔内における液流の偏りが微粒化特性に強くかかわるという見通しを得た。これは透明なアトマイザモデルで観察してもなかなかわからない知見であった。具体的には、数値解析で LSF と LCF を比較した結果 LCF の方が微粒化にすぐれるであろうとの予測結果を得たので、それを噴霧計測によって幾分間接的ではあるが実証することができた。一連の研究における数値解析と実験の併用は流量変動の解明においても継続しており、この結果は次報において述べる予定である。

文 献

- (1) 田中铁也, 高橋英二, 藤井宏, 國領繁光, 小出敬雄: SDA ピッチ (石油残渣物) 焚きボイラの計画と運転実績, 三菱重工技報, Vol48 No.3(2011), 34-40.
- (2) Zhou, Y., Zhang, M., Yu, J., Zhu, X., Peng, J.: Experimental investigation and model improvement on the atomization performance of single-hole Y-jet nozzle with high liquid flow rate, Powder Technology, 199-3(2010), 248-55.
- (3) 佐藤一教, 沖浦邦夫, 正路一紀, 秋山巖, 船崎富士夫: 二流体アトマイザの最適微粒化条件に関する一考察, 日本機械学会論文集, 54-506(1983), 2935-2940.
- (4) Park, H., Ku, K., Lee, C., Hong, J.: An experimental study on the atomization characteristics of the twin-fluid atomizer for the heavy fuel oil boiler, The 16th Conference of ILASS-ASIA, 22(2013), 9-12.

- (5) 佐藤一教, 沖浦邦夫, 馬場彰, 正路一紀, 秋山巖: 高粘度石炭・水スラリの微粒化特性に関する研究 第2報微粒化機構, 日本機械学会論文集, 86-1152A(1987), 2995-3002.
- (6) 佐藤一教, 沖浦邦夫, 正路一紀, 高橋芳孝: 内部混合式アトマイザにおける CWM の微粒化特性, 燃料協会誌, 70(1991), 1067-1074.
- (7) 金相進, 西田恵哉, 廣安博之, 近藤真也: 内部混合型二流体噴射弁による液体の微粒化特性 II 混合室出口噴口の影響, 日本エネルギー学会誌, 76-4(1996), 305-312.
- (8) 橋口和明, 岡元章泰, 濱屋秀行: バーナチップ及び燃焼バーナ並びにボイラ, (2016), 特許第 5972847 号.
- (9) 橋口和明, 岡元章泰, 濱屋秀行: バーナチップ及び燃焼バーナ並びにボイラ, (2017), 特許第 6100154 号.
- (10) Li, Z., Wu, Y., Cai, C., Zhang, H., Gong, Y., Takeno, K., Hashiguchi, K., Lu, J.: Mixing and atomization characteristics in an internal-mixing twin-fluid atomizer, Fuel, 97(2012), 306-314.
- (11) Li, Z., Wu, Y., Yang, H., Cai, C., Zhang, H., Hashiguchi, K., Takeno, K., Lu, J.: Effect of liquid viscosity on atomization in an internal-mixing twin-fluid atomizer, Fuel, 103(2013), 486-494.
- (12) Baker, O., : Design of pipelines for simultaneous flow of oil and gas, Oil & Gas J., Vol. 53(1954), 185-190.
- (13) 大島逸平, 川端諒太, 西山真悟, 宋明良, 松浦一哲: 気液物性値とノズル形状が並行気流による平面液膜流れの微粒化過程に及ぼす影響, 日本液体微粒化学会, 第25回微粒化シンポジウム講演論文集, (2016), 14-17.
- (14) 玉木伸茂, 清水正則, 廣安博之: 内部混合形二流体噴射弁による高粘度液体噴流の微粒化, 日本機械学会論文集, 71-712(2005), 3017-3024.
- (15) Brackbill, J. U., Kothe, D. B., Zemach, C.: A continuum method for modeling surface tension, J. Comput. phys., 100(1992), 335-354.
- (16) 岡本達幸, 高城敏美: ガウシアンビームを用いる位相ドップラー法における粒径誤認に関する検討, 日本機械学会論文集, 59-558(1993), 639-644.