

論文

内部混合型二流体噴霧器から発生する乱流と噴霧構造の関係*¹

佐賀井 武*² 趙 黛青*³

Relation of Turbulence and Spray Structure Issued from Internal Mixing Twin-Fluid Atomizer of Orifice-Type

Takeshi SAKAI and Daiqing ZHAO

The structure of spray from TFA-IM-O were investigated by means of PDPA and the results were compared with the turbulent characteristics of air within spray and air jets. The spray were bell typed and consisted with finer droplets at the central region and coarse particles at the outer layer as shroud. Between two regions there were medium size region. Along the central axis the mean diameters were decreased rapidly from near the nozzle port to the distance 20D, though the disintegration of liquid seemed to be continuing until more than 80D. The disintegration mechanism at the central and neighboring region were considered by the Reynold's shearing force which caused from turbulence, and for the outer shroud region the viscosity shearing force may play as the driving force which caused by relative velocity of air and jets.

Keywords : Atomizer, Turbulence, Spray, Disintegration Mechanism, Reynold's stress, Reynold's shear

1. 緒言

二流体噴霧器は外部混合型と内部混合型の二種類に大別され、いずれも産業から家庭にいたる広い分野で古くから利用され、研究されてきた。外部混合型に較べて内部混合型については、その設計や操作基準はもとより、微粒化機構などの基礎的知識がいまだに不十分である。

本研究では内部混合型二流体噴霧器の噴霧構造をレーザー粒子分析計P D P Aを用いて実験的に検討した結果と、円管ノズルおよび内部混合型二流体ノズルとから噴出した空気みの噴流と、気液二相噴霧流の

乱流特性とをレーザー速度計L D Vをもちいて比較検討することによって、本噴霧器からの噴霧の構造と微粒化機構をあきらかにすることを目的とする。Fig.1 に両ノズルを示した。

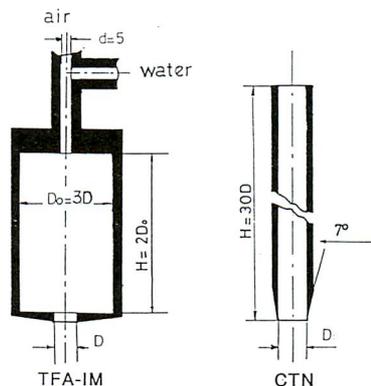


Fig. 1 Structure of TFA-IM-O nozzle and circular tube nozzle used in experiments

* 1 平成4年10月21日 原稿受付
 * 2 群馬大学名誉教授
 〒329-41 栃木県足利市小俣3979-5
 T E L 0284-62-1131

* 3 南京化工学院

2. 既往の研究

外部混合型二流体噴霧器 External Mixing Twin Fluid Atomizer (以下, TFA-EM と略称) に関しては棚沢らの一連の詳細な研究があり, その後も多くの研究が発表されている。

これに対して, 内部混合型二流体噴霧器 Internal Mixing Twin Fluid Atomizer, (以下, TFA-IM と略称) が注目され始めたのは比較的近年である。すなわち, 第2次大戦後, 重質重油がもちいられ始め, その噴霧燃焼器として注目された。TFA-IM はEM型に比較して, より広いノズル孔をもちながら微細な噴霧がえられることや噴射媒体である気体の圧力が比較的低压かつ少量で良く, 空気でも水蒸気でも稼働できるなどの特長をもつために, 広く実用されてきた。近年では石炭-水スラリー燃料 CWS や汚泥などの噴霧器として注目されている。

TFA-IM はオリフィス型(TFA-IM-O と略称) と Y ジェット型(TFA-IM-Y と略称) の二種に細別されるが, Eisenklam¹⁾ は各種噴霧器の紹介のなかでこれらノズルについて論じている。英国国立ガスタービン庁はバンカー重油の燃焼器として Y ジェット型二流体噴霧器を採用し, 一連の NGTE ノズルの開発をおこない, これらの噴霧器は現在も稼働している²⁾。

Wigg³⁾ は Y ジェットを含む内, 外部混合二流体噴霧器の実験をおこない, 二流体の質量流量比による平均粒径の推算式を提案した。しかし, Y ジェットノズルの内部における流動と微粒化機構との関係を始めて

検討し, 最適設計と操作条件との基準を提案したのは Mullinger と Chigier⁵⁾ である。

第一回液体微粒化国際会議 (The 1st International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLAS '78) が東京で開催されて以来, 同国際会議において毎回内部混合型二流体噴霧器 TFA-IM に関する研究が発表されてきた。すなわち, Y ジェット型に関しては NGTE ノズルで空気と水蒸気をもちいて重油を微粒化した Bryce et al⁹⁾ の研究, 及び Sargeant¹²⁾ の研究があり, Prasad¹¹⁾ は寸法最適値や平均粒径の推算式を提案した。また De Michele^ら²³⁾ も粒径と流量の実験式を提出した。

他方, オリフィスをもつ TFA-IM-O については, より多くの論文が提出されている。すなわち, まず平均粒径の推算式がノズル口径や気液流量比をもちいて提出された。佐賀井^ら⁷⁾ は平均粒径および混合室内部圧力の実験式を提案した。Deyson-Karian^{8,10)} は内, 外部混合ノズルの実験をおこない両者を一つの実験式で表せるとした。Biswas¹³⁾ は平均径の実験式とノズル設計のガイドラインを提案した。Hurley-Doyle¹⁵⁾ は 8 種の Y ジェットノズルと 12 種のオリフィス型ノズルの実験をおこない SMD の実験式を提出した。Tate¹⁶⁾ も新しい光学系を採用して TFA-IM-O の平均径の実験式を提出した。Inamura-Nagai¹⁷⁾ は外部混合と内部混合ノズルの平均粒径の実験式を提出した。

これらの多数の実験的研究は主として粒度分布や平均粒径に着目していたが, 微粒化の機構に対する考察が次第に提出される

ようになった。すなわち, Andreussi et al.²⁰⁾はTFA-IM-Oの微粒化実験をおこない平均粒径の実験式を提出するとともにノズル内部での気液の混合とノズル孔端における粗大粒子の生成とを分けて指摘し, ノズル口径が最も重要因子であると主張した。Sato et al.¹⁹⁾はTFA-IM-Oの微粒化実験をおこない, 微粒化の機構はノズル孔内における気液二相の界面に発生する擾乱によるものと, ノズル孔における二相の混合以前(混合室内)の攪乱によるとして初めて混合室の役割を指摘した。

Yジェットノズル内での微粒化機構の基礎研究として重要と思われる壁面上における液面波とその分裂についてNagai et al.¹⁴⁾が報告した。また, オリフィス型ノズルの内部攪乱発生機構の基礎的研究としては, Sadakata-Kunii⁴⁾の囲まれた容器内で噴流によって発生する循環流と乱流の研究がある。

TFAからの微粒化において, 大粒子の発生の原因と指摘されるノズル孔縁辺に生成する付着膜からの粗大粒子を再分裂させる目的で振動子を設置するアイデアをNagai et al.⁶⁾およびRamesh-Natarajan²¹⁾がそれぞれ提案した。また, Inamura-Nagai¹⁸⁾はCWSの微粒化にTFA-IM-Oの作動気体としてスーパーヒートした水蒸気をもちいることを提案した。

このように, 多くの研究者によりTFA-IMによる液体の微粒化については次第に多量の知識が蓄えられてきたが, その微粒化機構に関しては未だに解明は不十分である。

3. オリフィス型内部混合二流体ノズル噴流内の空気の乱流特性

筆者らはTFA-IM-Oノズルによる液体微粒化の研究を1st ICLAS⁷⁾以来発表してきたが, 比較的小容量のノズルについてであった。そこで, Fig.2に示したように

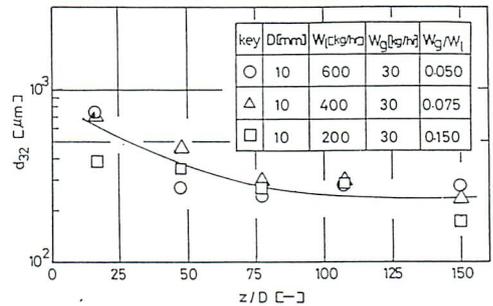


Fig. 2 Change of Sauter mean diameter along center axis of TFA-IM-O spray

ノズル口径D = 5~15mm, 液流量Q₀ = 200~1200kg/hの産業規模のノズルをもちいて微粒化実験をおこなった結果, 噴霧中心軸上のザウテル平均径がノズル出口から噴霧流の下流に向かって約75~85D(ノズル径D = 10mmでは75~85cm)まで引き続き徐々に減少し, やがて一定になることを受け止め法によって測定し報告した^{24,25)}。

圧力噴射, 渦巻噴射, 外部混合二流体ノズルなどからの微粒化においては, 液体の分裂微粒化現象はノズル噴出直後からノズルの近傍で完了し, その後は周囲空気を巻き込む乱流拡散により液滴が移動するのみであると理解されている。すなわち, 液分裂はノズル近傍場における気液の相対速度差による粘性剪断および液体の複雑な波動

運動によると考えられている。

しかしながら、このような解析のみではザウテル平均粒径が下流に向かって減少してゆく現象の説明には不十分であると考えられる。筆者らはオリフィス型TFA-IM-Oによる液体微粒化に際して液体に対して働く剪断力としては、気液の相対速度差による粘性剪断とともに、噴霧流内の空気乱流のレイノルズ応力による剪断力により気体が液体を分裂し続けるという微粒化機構を提案した²⁸⁾。

すなわち、オリフィス型TFA-IM-Oノズルと圧力噴射やTFA-EMノズルから噴出する噴流の乱流特性が異なるために、このような微粒化機構の相違が起こる可能性があるとの予測のもとに、まずTFA-IM-Oノズル、およびその他のノズル噴流の特徴に良く似た円管ノズルからの空気噴流の乱流特性をレーザー速度計LDVをもちいて測定し、相互に比較検討した^{26,27)}。その結果、

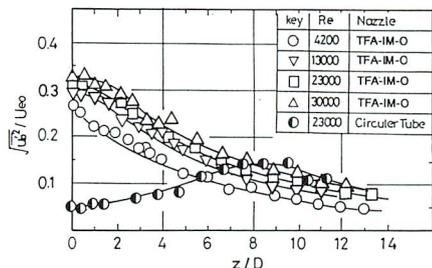


Fig. 3 Turbulent characteristics of air jets from TFA-IM-O and circular tube along the axis

Fig.3に示したように、内部混合ノズルからの空気噴流は円管ノズルからのそれとは異なり、噴孔直後に0.3以上の最大の乱れの強さを持ち、乱れの強さは下流軸方向にむかっ

て単調に減衰してゆく。それに対し、円管ノズルからの空気噴流は噴孔直後では0.05以下の乱れの強さで噴出し、下流約7~10D付近で乱れの強さが最大値に達して、TFA-IM-O噴流とほぼ等しい乱れの強さとなり、TFA-IM-O噴流と同じように減少してゆくことが判った。

ここで、 u' はその位置における平均速度と測定瞬間の速度との差、すなわち変動速度で正負に変化する。その自乗の平方根を噴流中心軸上平均速度 U_0 で割ったものが「乱流強度」である。 $u_0'^2/U_{e0}$ はノズル出口中心軸上の平均速度で無次元化したある軸上位置での「乱れの強さ」である。

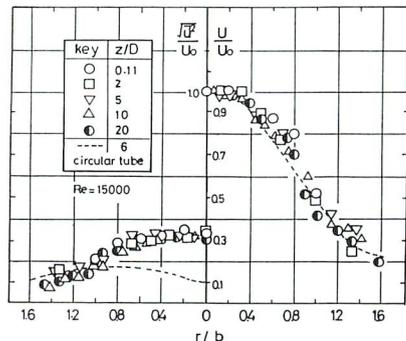


Fig. 4(a) Radial distribution of turbulent intensity and velocity of air jets at every axial distances from TFA-IM-O and circular tube nozzles

また、半径方向の乱流強度分布についてもFig.4(a)に示すようにTFA-IM-Oではノズル噴出直後から直ちに中心軸上が最大で $z/D=0.1$ で既に自己保存域にはいり、下流に向かって相似性が成立しているのに対し、Fig.4(b)のように円管ノズル空気噴流

では噴出直後は中心軸上は噴流外側と同様に乱流強度が低く、 $z/D \approx 10$ 以降の下流になってから相似性が成立することが判った。

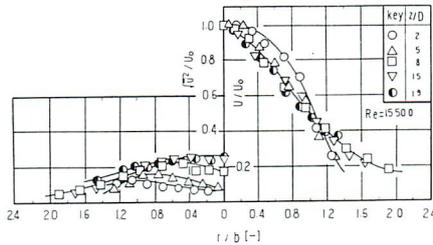


Fig. 4(b) Radial distribution of turbulent intensity and velocity of air jets at every distances from circular tube nozzles

つぎに、以上の乱流特性の相違と特徴とが噴霧流中の空気流についても成立しているかどうかについて、空気噴流と同様にLDVを用いて噴霧流についても乱流の計測をおこない空気噴流との比較検討をおこなった²⁸⁾。

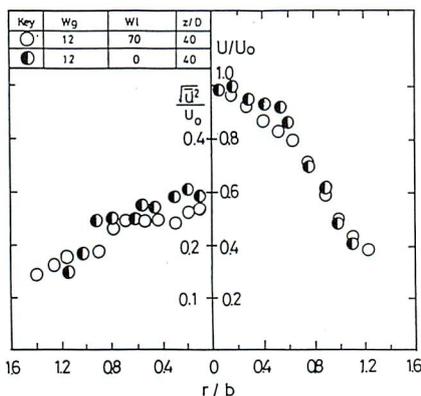


Fig. 5 Comparison of radial distribution of turbulent intensity and velocity within spray and air jets at $z = 40D$

その結果、噴霧流についてはノズル直後での測定は困難であるが、約 $20D$ よりも下流では空気噴流と噴霧流とは、空気流量が同一の場合、噴流内における半径方向位置における空気流の無次元平均速度および乱流強度のいずれもほぼ一致し、噴霧流についても空気噴流と同様に、噴流の相似性が成立していることが確認された。Fig.5は空気噴流と噴霧流中の半径方向位置における空気の軸方向速度および乱流強度分布の一例である。

このようにして、TFA-IM-O ノズルと円管ノズル空気噴流の乱流特性の相違点が噴霧流についても同様に成立することが確かめられた。

4. オリフィス型内部混合二流体ノズルからの噴霧構造

以上のように、TFA-IM-O からの噴霧の生成過程において、液体の分裂にたいして乱流が大きく寄与するであろうと考えられるが、Fig.2に示したザウテル平均粒径は受け止め液浸法により中心軸上で測定されたものであり、噴霧の全体や局所の構造はどのようなものであるか、またその構造は前述の推論と矛盾しないかについて検討する必要がある。

そこで、TFA-IM-O から噴出した噴霧の構造をPDPA 粒子分析計を用いて検討した。測定に使用したPDPA (Phase Doppler Particle Analyser) はAerometrics 社製PDPA100A である。実験に使用したノズルの口径は5mmで混合室(内径15mm,長さ30mm)の中心に開口している。

4. 1 液滴の半径方向流量分布

噴霧コーンの軸に垂直な各断面を単位時間を通して液滴の流量が一定であるかどうかは、液滴の分裂や合体が進行している過程で蒸発による減少が無視できること、すなわち液相について物質収支が成立しているかどうかを示す。

Fig.6は液流量 $Q_l = 1.62 \text{ l/min}$, 空気流量 $Q_a = 80 \text{ l/min}$ の噴霧の、噴霧軸上の各距離 z における無次元半径方向位置 r/z における液滴流量フラックス $[\text{cm}^3/\text{cm}^2 \text{ s}]$ を片対数グラフに描いたものである。ただし、全測定値をプロットし、その傾きは保ったまま断面を通過する流量に合致するように切辺の補正をおこなった。

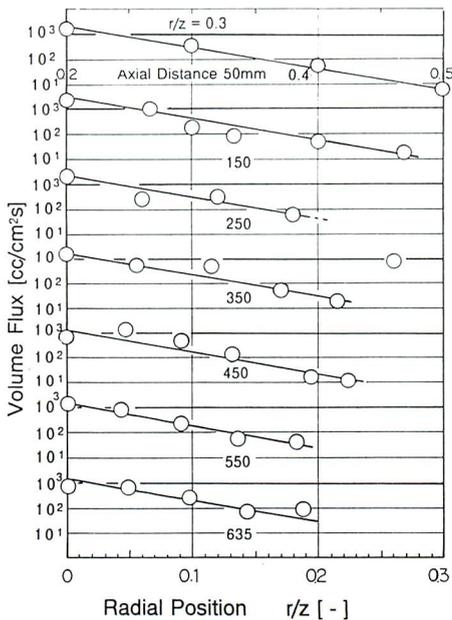


Fig. 6 Radial distributions of flow volume fluxes at every section of TFA-IM-O spray

図から判るように、それぞれの軸距離の

半径方向位置における流量フラックス分布は、いずれもほぼ直線的に中心から半径方向に向かって減少していき、 $z = 150\text{mm}$ 以上の下流では流量フラックスはほぼ同一直線で表され次式で近似される。

$$F_v = 3259 \exp(-26.08 r/z) \quad [\text{cc}/\text{cm}^2 \text{ s}] \quad (1)$$

無次元半径 r/z をもちいた無次元噴霧断面面積 S を規格化するためには

$$S = \pi (r_{\text{max}}/z)^2 = 1$$

であるから、噴霧コーン断面の外縁半径は $(r_{\text{max}}/z) = 0.5642$ である。しかし、実質的には断面を通過する液流量 $Q_l [\text{cc}/\text{s}]$ は

$$Q_l = \int_0^{r_{\text{max}}/z} 2\pi (r/z) F_v d(r/z) \\ = 20477 \int_0^{r_{\text{max}}/z} (r/z) \exp\{-26.08 (r/z)\} d(r/z) \quad (2)$$

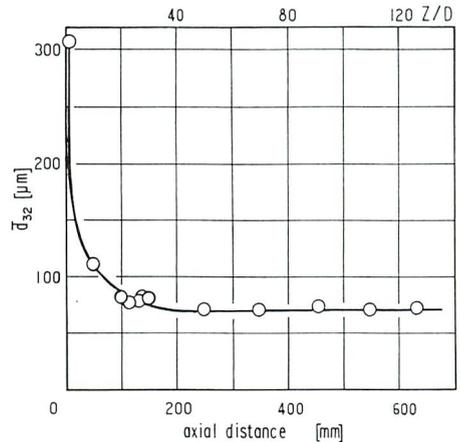


Fig.7 Change of Sauter mean diameters along axis of TFA-IM-O of 5mm port, measured by means of PDPA

において、 $r_{\text{max}}/z = 0.3$ と置くと液流量の計算値 $Q_l \approx 30 \text{ cc/s}$ となる。見掛け上の噴

流外縁 (Fig.5 参照) の無次元半径約0.3をもちいて差し支えない。

以上により, PDPA による流量フラックスの情報によれば, 液滴の蒸発はほぼ無視できると考えられる。

4. 2 噴霧中心軸上のザウテル平均径

つぎに, Fig.2 に示したように噴霧中心軸上のザウテル平均径が下流にいたるまで減少し続ける現象はPDPA による測定でも認められるかどうかを検討した。Fig.7 はノズル径 5 mm, $Q_e = 30 \text{cc/s}$, $Q_a = 1333 \text{cc/s}$ の条件で水を微粒化した場合の噴霧軸上ザウテル平均径の変化を示す。

Fig.2 の場合とは異なりノズル径は 5 mm と小規模であるがノズル孔直後 (9 mm) では約 $300 \mu\text{m}$ のザウテル平均径が約 30D の下流まで急速に減少し, その後はほぼ一定になることが示されている。20D 前後の折れ曲がり部分については詳細に再確認検討した。

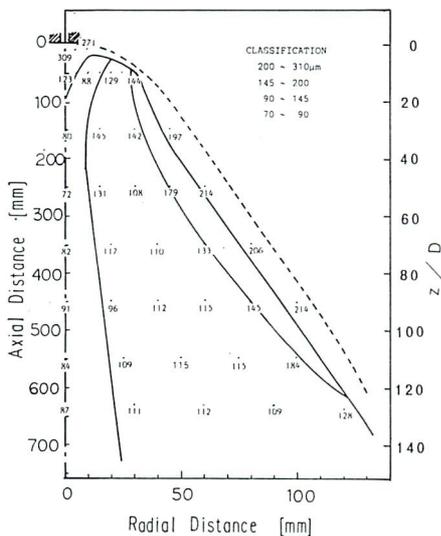


Fig. 8 Schematic structure of TFA-IM-O spray

以上により, TFA-IM-O 噴霧を液浸法によって測定し認められた, 平均径が下流に向かって減少し続け, やがて一定になる現象がPDPA によっても確認された。

4. 3 平均径分布から見た噴霧の構造

噴霧の中心軸上における平均径の変化のみでは噴霧の構造は明確ではない。そこで, ノズル孔から噴霧下流各断面における半径方向各位置におけるザウテル平均径を測定し, それぞれの粒径を図中に記入し, 粒径の粗さに応じて分級し領域に分けたのがFig.8 である。

図から判るようにTFA-IM-O の噴霧は, 通常のノズルからの噴流がノズルの内部のある仮想原点から発した放射円錐状であるのと異なり, その噴霧流の外縁は二相流中の気体の膨張によりノズル噴出直後に半径方向へ拡張し, 釣鐘型を示す。

また, 平均粒径の分布を観察すると噴霧中心軸上ではノズル孔噴出直後から約30D までに急速に減少し, 以後の下流ではほぼ一定の平均径を示すことが見られる。また, 中心部の細粒子部分はラバール管に似た形状で, 約30D~40D で狭いのど部となり, 以後の下流では徐々に拡大してゆく。

一方, 釣鐘状の噴霧流外縁部では粗大粒子のshroud が約100D の下流に至るまで存在し, 噴霧の外周を包んでいることが見られる。粗粒子のshroud と微細粒子の芯部との中間領域はshroud に続いて僅かに粒径が小さいが粗い粒子の領域があり, さらに内側に広い範囲で中間粒子領域が存在することが判った。

4. 4 液滴粒子数の変化から見た分裂過程

噴霧軸に垂直な各円断面における全粒子

数を、PDPA による各半径位置における測定値粒子密度 (個数/cc) から計算し、軸距離にたいしてプロットしたのがFig.9である。

図に見るように粒子数は軸距離100~200mm (20~40D) の区間では1桁以上急激に増加し、200mmを超えると増加の傾向は徐々に低くなるが、630mmの下流にいたるまで依然として粒子数が増加し、滴分裂が進行しつつあることを示している。

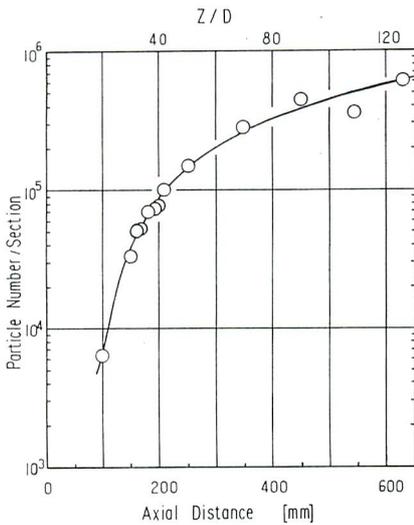


Fig. 9 Change of particle number from near nozzle to down stream

ノズル孔直後から100mmまでの測定値は不安定なため省いたが、噴出時には空気を含んだ液体の塊 (連続相が水である気液二相流) であることを考えると、この区間 (0~100mm) では、次の (100~200mm) 区間よりも更に急激な個数の増加が起きているであろうと推測される。

5. 噴霧の分裂生成過程の考察

TFA-IM-Oによる定常噴霧の中心軸上

におけるザウテル平均粒径の変化、各断面の各半径方向位置における液滴流量フラックス、および平均粒径、各断面上に或る時刻に存在する粒子数の変化等についての知見がえられた。これらの測定結果を総合して考察をおこなう。

5. 1 主流の分裂

Fig.7の軸距離50mmより上流の平均粒径の急激な減少、およびFig.8のノズル孔直後のラバール管類似部分の入口部分の形状を観察すると、通常の噴霧器では外周部から分裂が進行するのと異なり二相噴流の中心部から分裂していることが判る。混合室内での気液混合が良好である場合は、気液二相噴流のノズル孔出口における空気と液体とはほぼ等しい速度で噴出していると見られる。(混合が不完全あるいは間欠噴射の場合には液はノズル外縁から膜状分裂し、空気は中央を吹抜けるため気液に相対速度が発生する。)したがって、良好な混合状態で噴

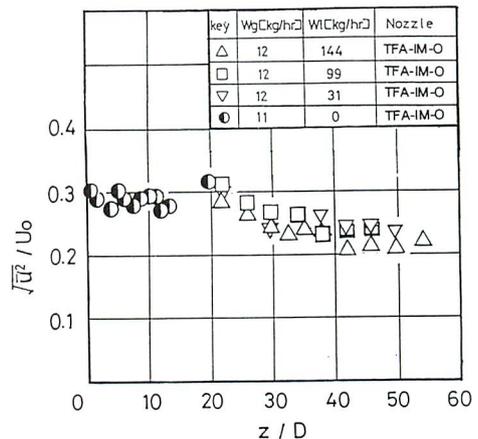


Fig. 10 Turbulent intensity along axis of spray and air jets from TFA-IM-O

出される気液二相噴流の中心部分では通常の液体分裂の原因である気液相対速度差による粘性剪断が起こることは考え難い。

他方, Fig.3,4,5 に示されたように, ノズル孔噴出直後におけるTFA-IM-Oからの二相噴流は, その噴流中心軸上に最大の乱れの強さをもっている。乱れの強さ u' , v' , w' , の自乗あるいは相互の積が乱流レイノルズ応力 $\rho u'v'$ 等になるので, その結果として, レイノルズ剪断力が強く作用し, 粘性剪断力が殆ど作用しないと見られる噴流の中心部において二相噴流中の気体が液体を分裂させるものと考えられる。

このレイノルズ剪断力による液体の分裂はFig.10を見るとかなりの下流に至るまで継続される理由が理解される。

Fig.10 は本噴霧器から噴出した噴霧および空気噴流の軸に沿った乱流強度の変化を測定したものである。液流量が異なっても空気流量が一定ならばほぼ同一の乱流強度が示され, $z/D=60$ に至っても噴霧流の乱流強度は0.2程度の強さを維持している。

このことは, Fig.9 において $z > 300\text{mm}$ の下流においても依然として粒数が増加し続け, 乱流レイノルズ剪断が作用し続けるとの見方を裏付ける。

5. 2 噴霧コーン外周部の分裂

Fig.8 を見ると, 噴霧コーン外周部に粗い粒子の層が認められる。この粗大粒子の発生についてはAndreussi et al.²⁰⁾らがノズル孔端における大粒子の発生を指摘しており, 彼らはノズル口径が設計に重要であると主張した。また, 筆者ら⁷⁾はザウテル平均粒径の実験式をノズル径および操作条件の関数として提案した。

このように, 本噴霧器の噴霧外周部における分裂過程はホロコーンノズルや渦巻き噴射弁からの噴霧の分裂過程と同様に, ノズル孔の開口縁辺から生成した液膜や液柱が周囲空気との相対速度による粘性剪断や液自身の振動による分裂により微粒化するものとみることが出来る。

5. 3 中間領域の噴霧の構造

Fig.8 における粒径約90~145 μm の広い中間領域はFig.5の左側の半径方向乱流強度分布の中間部分に相当し, 0.2程度の乱流強度をもっている。すなわち, 中心部と中間部とは激しい渦運動が起こっていて, レイノルズ剪断力によって中心部およびその周辺で分裂した微粒粒子が乱流拡散によって外周部へと渦運動とともに移動し, 外周部では気液間の相対速度による粘性剪断により生成した粗粒が再分裂し, 発生した細粒は中間領域をへて中心部の方向へ巻き込み空気と共に乱流相互拡散する。このようにして, 広い範囲にわたる中間領域が形成されるものと考えられる。

6. 結言

オリフィス型内部混合二流体噴霧器TFA-IM-Oからの噴霧内の平均粒径の分布, 粒数の変化をレーザー位相差粒子分析計PDPAをもちいて測定し, その噴霧の構造を調べた。その結果, 外部混合二流体噴霧器, 圧力噴射弁, 渦巻き噴射弁, ホローコーンノズルなどの噴霧器からの噴霧の構造と異なり, 噴霧の中心部に最も細かい粒子が存在し, 且つ中心部の流量が最大で, その平均粒径は軸方向下流にむかってノズル孔から約30D迄に急激に減少し, その後も減少し続

けることが確かめられた。このことは、噴霧の各断面に存在する粒子数の変化からも確かめられた。

このような噴霧構造が発生する原因である液体分裂がいかなる機構によるかを調べるために、レーザードップラー速度計 LDV によって本噴霧器から噴出する空気噴流および噴霧流内空気の乱流特性と、比較対照するために円管ノズルからの空気噴流の乱流特性とを調べた。

その結果、TFA-IM-O の噴霧流は空気噴流と同様に、噴流の自己保存性が成立しており、ノズル噴出直後に約0.3程度の乱流強度をもつ乱流特性があり、この強い乱流のレイノルズ剪断力が通常の微粒化で作用する粘性剪断力に替わって噴流中心部における液体分裂作用をおこなっているものと見られる。

また、釣鐘状の噴霧外周部には粗い粒子が多い領域が存在するが、これらの粒子はノズル開口縁辺に付着して生成された液膜や液柱が液体の波動分裂や周囲空気との相対速度による粘性剪断により分裂して発生したものと見られ、通常の液体微粒化の機構と同様の過程である。したがって、ノズル口径が外周部に発生する粗大粒子に関係するであろうことが推測されるが、どのような機構で影響するかは今後の検討が必要である。また、噴孔の位置についても本研究では混合室の中央のみであるが、その位置は混合室における気液混合の度合や、空気の開口部吹抜けなどと関連して液分裂に影響するであろうと思われる、検討が必要である。さらに、噴霧内各位置における滴径と気液相対速度の解析なども今後検討が必要であ

る。

レーザー位相差粒子分析計 PDPA を用いてオリフィス型内部混合二流体噴霧器からの噴霧の構造を解析した結果と、レーザー速度計 LDV による空気噴流および噴霧流内空気の乱流特性とを比較検討することにより、本噴霧器による液体微粒化の機構は噴霧中心部では乱流によるレイノルズ剪断が支配し、噴霧外周部では通常の液体微粒化を支配する気液相対速度による粘性剪断および波動分裂が主となると考えられる。

謝 辞

本研究は群馬大学工学部および同地域共同利用研究センターでおこなった研究費の一部は綜研化学(株)によることを記し、深甚なる謝意を表する。

引 用 文 献

- (1) Eisenklam, P.; J. Inst. Fuel, **34**, 130 (1951)
- (2) Clare, H. and Radcliffe, A.; J. Inst. Fuel, **27**, 510 (1954).
- (3) Wigg, L. D.; J. Inst. Fuel, **37**, 500 (1964)
- (4) Sadakata, M. and Kunii, D.; J. Chem. Engg. Japan, **5**, 355 (1972).
- (5) Mullinger, P. J. and Chigier, N. A., J. Inst. Fuel, **47**, 254 (1974)
- (6) Nagai, N. Kumazawa, T., Hayakawa, Y. and Okazaki, H.; ICLASS-'78, paper 9-1, p209 (1978), Tokyo.
- (7) Sakai, T., Kito, M., Saito, M. and Kanbe, T.; ICLASS-'78, paper 10-1, p235 (1978).

- (8) Deysson, J. Y. and Karian, J.; ICLASS-'78, paper 10-2, p243 (1978).
- (9) Bryce, W. B., Cox, N. W. and Joyce, W. I.; ICLASS-'78, paper 10-4, p259 (1978)
- (10) Deysson, J. Y. and Karian, J.; ICLASS-'82, paper 4-2, p112 (1982), Wisconsin.
- (11) Prasad, K. S. L.; ICLASS-'82, paper 4-3, p123 (1982).
- (12) Sargeant, M.; ICLASS-'82, paper 4-4, p131 (1982).
- (13) Biswas, M. N.; ICLASS-'82, paper 5-1, p145 (1982).
- (14) Nagai, N. and Inamura, T.; ICLASS-'82, paper 5-2, p153 (1982).
- (15) Herley, J. F. and Doyle, B. W.; ICLASS-'85, paper 1A/3 (1985), London.
- (16) Tate, R. W.; ICLASS-'85, paper 2C/2 (1985).
- (17) Inamura, T. and Nagai, N.; ICLASS-'85, paper 2C/2 (1985).
- (18) Inamura, T., Nagai, N., Matsunaga, Y., Watanabe, T. and Nawata, K.; ICLASS-'88, paper B1-2, p65 (1988) Sendai.
- (19) Sato, K., Okiura, K., Shoji, K., Akiyama, I. and Takahashi, Y.; ICLASS-'88, paper B1-3, p73 (1988).
- (20) Andreussi, P., Giacomelli, A. & Tognotti, L., De Michale, G., Graziadio, M. & Morelli, F.; ICLASS-'88, paper B5-3, p271 (1988).
- (21) Ramesh, N. R.. & Natarajan, R.; ICLASS-'91, paper 42, p407 (1991), Gaithersburg.
- (22) Ingebo, R. D.; ICLASS-'91, paper 54, p507 (1991).
- (23) De Michele, G., Graziadio, F., Morelli, F. & Novelli, F. G.; ICLASS-'91, paper 87, p779 (1991).
- (24) 佐賀井武, 定方正毅, 須田覚; 第13回液体微粒化講演会論文集, p85(1985) 東京.
- (25) 佐賀井武, 定方正毅, 須田覚; 第14回液体微粒化講演会論文集, p109 (1986) 東京.
- (26) 定方正毅, 山口晃, 佐賀井武, 趙黛青; 化学工学論文集, **16**, p354 (1990).
- (27) 趙黛青, 佐賀井武, 定方正毅, 佐藤正之; 化学工学論文集, **16**, p1173 (1990).
- (28) 趙黛青, 佐賀井武, 定方正毅, 須田覚, 佐藤正之; 日本エネルギー学会誌, **71**, p353 (1992).
- (29) Thning, M. W. and Newby, M. P.; Fourth symp. on combn., P789 (1953) Baltimore.
- (30) 浅見彰, 佐藤武雄, 佐賀井武, 佐藤正之; 第19回液体微粒化講演会論文集, P7 (1992) 東京.

記号

b	half velocity width of jet	[m]
D	diameter of nozzle	[m]
d_{32}	Sauter mean diameter	[μ m]
Fv	flux of volumetric flow rate	[cc/cm ² s]
r	radius or radial distance	[m]
U ₀	velocity on center axis	[m/ s]
U	velocity	[m/ s]
u'	velocity fluctuation	[m/ s]
W	mass flow rate	[g / s]
Z	distance for z direction	[m]
Subscript		
e	nozzle port	
g	gas	
l	liquid	
o	center axis	