一様流中に直角に噴出した噴流の拡散* (第3報, 噴流に与えた旋回強度の影響)

吉廻 秀久^{*1}, 吉田 邦勝^{*1}, 秋山 厳^{*1}

Diffusion of a Jet Injected Perpendicularly into Uniform Cross Flow (3rd Report, Influence of Swirl Intensity on Diffusion of a Jet)

Hidehisa YOSHIZAKO, Kunikatsu YOSHIDA and Iwao AKIYAMA

Velocity vectors and concentration profiles of a swirling jet have been measured by flow visualization and its image processing. At visualization a water flow model is used and a single jet is injected to simulate diffusion of a burner or an airport jet in large utility boiler furnaces. The conclusions show that (1) because of a increase of swirl intensity, a jet spreads widely near the throat and decreases its penetration depth into uniform flow, and that (2) the uniform flow is accelerated where the direction of the uniform flow velocity vector coincides with the direction of the swirling jet rotating velocity component.

Key Words: Diffusion, Swirling Jet, Flow Visualization, Image Processing, Concentration Profile, Velocity Vectors

1. 結 言

対向および前面燃焼方式の事業用ボイラ火炉では混合促進のために、バーナとかエアポートからの噴流に旋回を与えるのが普通である。しかし、炉内における噴流の挙動は複雑で未知な部分が多い。

そこで、著者らは炉内における噴流の挙動を明らかにするために、一様流中に単一旋回噴流を噴出する模擬実験を行った。前報⁽¹⁾⁽²⁾ではトレーサ粒子を用いた可視化法に画像処理を加え、速度ベクトルと濃度分布の両方を算出する方法について報告したが、今回はこの方法を用いて、一様流中に噴出した旋回噴流の速度ベクトルと濃度分布を計測したので報告する。

記 号

Sw : 旋回噴流のスワール数
 X : スロート面からの距離 m
 Y : 噴流噴出軸からの幅方向への距離 m
 H : 噴流噴出軸からの高さ方向への距離 m
 D : スロート径 m

V : 高さ方向の速度成分 m/s

V_0 : 一様流の上昇速度 m/s

2. 実 験 方 法

2・1 可視化方法 実験装置は図1の系統図に示したように水流可視化部と画像処理部とからなっている。水流装置は循環式で、バッファタンク内の水はポンプによって整流器および旋回器に送られ、テスト部で混合した後、再びバッファタンクに戻る。旋回噴流にはポリスチレン粒子(平均粒径: 1.0 mm, 色: 白色, 平均比重: 1.03)を混入した。ポリスチレン粒子はテスト部の後流側に設けたフィルタで回収した。

テスト部は噴流の側面または正面からスリット光を照射し、撮影コマ数が30コマ/sのビデオカメラでそれぞれ照射面に直角な方向から撮影した。スリット光は幅が500 mmで、厚さは10 mm(側面撮影時)、および20 mm(正面撮影時)である。

座標は噴出軸方向を X 、高さ方向を H 、幅方向を Y とした。

2・2 旋回発生方法 整流器から出た一様流は断面が400 mm×400 mmで高さが1200 mmの角ダクト内を流速50 mm/sで上向きに流れる。旋回噴流は一様流に直交して平均噴出速度200 mm/sで噴出する。

* 原稿受付 平成2年4月19日。

^{*1} 正員、パプコック日立(株)呉研究所 (〒737 呉市宝町3-36)。

旋回発生器は図2に示したように、一般のバーナと同じ構造の旋回発生器を用いた。旋回強度の指示には次式で定義したスワール数を用いた。

$$S_w = \frac{\text{旋回羽根出口の回転モーメント}}{\text{オリフィス半径} \times \text{オリフィス断面の軸方向運動量}} \dots\dots\dots (1)$$

S_w は旋回羽根が法線となす角度 θ によって調整し、0, 0.34, 0.76, 1.54 の4種類で実験を行った。

3. 解析方法

3.1 速度ベクトル 画像処理では粒子の移動距離から速度ベクトルを算出する方法と、粒子の空間密度から噴流の濃度を算出する方法との二つを併用した。これらの詳細な処理内容は前報⁽¹⁾⁽²⁾で報告しているので割愛する。

速度ベクトルの算出ではビデオテープレコーダに記録した20s分の画像の中から、連続した2こまの画像を等間隔に50組抽出した。そして、おのおのの組において粒子の移動距離から時々刻々の速度ベクトルを求め、最後にこれらを平均して時間平均値を求めた。

3.2 濃度分布 濃度分布算出では180s分の画像から等間隔に100こま取り込み、各画像に対して粒子像だけを1としそれ以外を零とする二値化処理を行い、128階調の画像メモリ上に積算した。そして、この画像を積算値が最も大きくなる噴流噴出部の値で割って無次元化し、5段階の濃度分布として表示した。

4. 実験結果

4.1 $S_w=0$ の場合 噴流に旋回を全く与えない場合の結果を図3に示す。上段が速度ベクトルで下段が濃度分布である。いずれも図3(a)は噴流中心($Y/D=0$)の側面図、図3(b), (c)は $X/D=1$ および X/D

$=3$ における正面図である。図3(a)の側面図から噴流は対向壁($X/D=7$)に衝突しているのが認められるが、噴流の上流側($X/D<5$)への影響はないことを予備実験で確認したので、正面からの解析は $X/D=1$ と $X/D=3$ で行った。図3(c)では速度ベクトルも濃度分布もほぼ左右対称になっており、また、噴流の上方に後流渦ができています。これらは、いずれも一般事実と一致しているので、本実験は妥当であると判断した。なお、図3(b)の速度ベクトルが左右対称でないのは、図2の旋回器では一般の噴流に比べて整流区間が短いので速度変動が大きく、50回の平均では十分に速度変動が取り除けなかったからである。

4.2 $S_w=0.34$ の場合 図4に $S_w=0.34$ の結果を示す。図4(a)と図3(a)を比較すると、一様流中への到達距離が減少しているのがわかる。これは噴流に旋回を与えることによって周囲の一様流との相対速度が大きくなり、乱流混合が促進されるためと考えられる。また、 $X/D=1$ の正面図で濃度分布が旋回方向(時計回り)に傾いているのが認められる。これは図3(c)の速度ベクトルにおいて、一様流の方向と旋回成分の方向が順方向になる噴流の左側(以後左側と称す)では逆方向となる右側(以後右側と称す)より速度ベクトルの絶対値が大きくなっていることから、右側ではせん断力が働き乱流混合が促進され、逆に左側では抑制されるためと考えられる。

4.3 $S_w=0.76$ の場合 図5に $S_w=0.76$ の結果を示す。図4と比較すると、図5(a)の側面図において到達距離が減少しているのに対し、図5(b), (c)の正面図では噴流の直径が増加していることから、旋回力の増加に伴い噴流と一様流との乱流混合がさらに促進されているのがわかる。

次に、図5(a)の速度ベクトルにおいて噴流の噴出部近傍($X/D=1$)に逆流が認められる。一般に、旋回噴流では $S_w>0.6$ になると噴出部後方に逆流域が形成されるので、この場合も旋回による逆流域と考えられ

図1 実験装置

図2 旋回発生器

図3 速度ベクトルと濃度分布 ($Sw=0$) 図4 速度ベクトルと濃度分布 ($Sw=0.34$)

図 5 速度ベクトルと濃度分布 ($Sw=0.76$)

図 6 速度ベクトルと濃度分布 ($Sw=1.54$)

図7 旋回噴流近傍の流れ観察(正面図)

る。

また、図5(b)の速度ベクトルにおいて噴流の上方($H/D=3$ 付近)で速度ベクトルが左向きになっている領域がある。これは噴流の旋回方向から考えると一見矛盾しているように思われる。しかし、図7の流れの観察結果に示すように、噴流の右側上方には旋回方向とは反対方向の渦が形成され、この渦によって噴流の右側の一様流が左側へ輸送されているのが確認されたので、旋回流と一様流のせん断領域に形成される二次流れであることがわかった。ただ、この現象は図5(c)では見られないが、これは噴流が大きく曲がってしまったところであり、計測断面が噴流と直角になっていないためと考えられる。

4・4 $Sw=1.54$ の場合 図6に $Sw=1.54$ の結果を示す。ほとんど $Sw=0.76$ の場合と変わらないが、側面図において噴出部後流の逆流域が明りようになり、旋回力の増加によって逆流も強くなったのがわかる。

4・5 噴出部における旋回噴流の構造 旋回噴流の内部構造を知るために、各条件における速度ベクトルの比較を行った。図8は a の $H/D=0$ の位置における、高さ方向の速度成分 V/V_0 の分布を比較したものである。いずれの場合にも噴流の中心部では速度分布は直線的に変化し、その幅はほぼ1でスロート径に等しい。したがって、本旋回発生器によって生じる旋回噴流は中心部がスロート径に等しい強制渦で、その外側が自由渦で構成されるランキン渦に近いものであることがわかった。ただ、図8からは旋回強度が増加しても強制渦の大きさと強度に変化は認められないが、この外側の自由渦の強度は旋回強度に応じて強くなっていると想像される。

4・6 噴流下流部の速度分布 二段燃焼を行っている旋回バーナ噴流に、エアポートからの空気を迅速に混合させるためには噴流下流部の速度分布が必要である。そこで、特に重要な火炉中央部に相当する X/D

図8 噴出部の速度分布($X/D=1$, $H/D=0$) 図9 下流部の速度分布($X/D=3$, $H/D=0$)

$=3$ の断面における速度分布を比較した。図9は(c)の $H/D=3$ の位置における高さ方向の速度成分を比較したものである。これより、 $Sw=0$ のときには $Y/D=0$ の位置を中心としたMの形をした速度分布となっているが、旋回強度が増すにつれて左側の速度が大きくなり、反対に右側では小さくなっているのがわかる。したがって、旋回噴流の下流では噴流の旋回強度が増すにつれて左側の流量は増加し、反対に右側の流量は減少する。

5. 結 言

本実験により次の結果を得た。

(1) 一様流の方向と旋回噴流の旋回成分の方向が同じになる側では旋回強度が増すにつれて流量が増加するが、反対側では減少する。

(2) $X/D=1$ の断面において旋回噴流の上方には
旋回方向と逆向きの二次流れが生じる。

文 献

(1) 吉廻・ほか2名, 機論, 54-502, B(1963), 1356-1359.

(2) 吉廻・ほか2名, 機論, 54-592, B(1963), 1360-1363.

(3) Abramovich, G. N., *The Theory of Turbulent Jets*, (1963), 671, M. I. T. Press.

(4) Patrick, M. A., *Trans. Inst. Chem. Eng.*, (1967), 45, 16-31.