旋回流燃焼器近傍の非燃焼流れの可視化*

萩 原 明 房^{*1}

Isothermal Flow Visualization for Flows near Swirl Burners

Akifusa HAGIWARA

Isothermal annular swirling flows with a central jet stream were investigated using a flow visualization technique in order to clarify flow structures near pulverized coal-fired swirl burners. The experiments revealed that the behavior of the central nonswirling jet is significantly affected by the downstream flow system geometry. For flows with a divergent burner tile, observed flow patterns were classified into four categories: type A to D in order of the swirl strength. Type A is a simple jet flow. Type B flows can be seen for the swirl numbers less than 1.2-1.3, and are characterized by the way that the primary jet stream rotates around the central recirculation zone. For higher swirl numbers, types C and D, which are steady and axisymmetrical unlike type B, can be seen. The observation revealed that for a certain range of swirl number the flow becomes unsteady and three dimensional, suggesting that time mean figures in terms of transport phenomena should be carefully treated for such flows.

Key Words: Swirl Burner, Flow Visualization, Isothermal Swirling Flow, Pulverized Coal Combustor

1. 結 言

微粉炭だき旋回流燃焼器では、中央に設けられた燃料噴射管周囲の環状通路から供給される燃焼空気に旋回を付与している。この環状旋回流と非旋回の一次噴流との混合は火炎特性を支配する重要な過程であり、従来から研究が行われてきている⁽¹⁾。しかし、実機燃焼装置設計の精度を高めるのに必要な、旋回流における非定常かつ三次元的な流れの構造の把握は、依然として十分であるとはいえない。特に、平均流特性を正しく評価するうえで、流れの瞬間的な様相を正確に記述しておくことは不可欠である。

本研究は、微粉炭燃焼装置を念頭においた等温流モデルにおいて、一次噴流と環状旋回流とが作りだす流れをスモークワイヤ法による可視化技術を利用して観察したものである。ただし、ここでは微粉炭粒子の影響は考慮せず、流体間の相互干渉についてのみ着目した。また、渦形式の違いによる混乱を避けるために、一様剛体旋回流を取扱っている。実験では管路形状(直円管、拡大管)、一次噴流速度、スワール数などのパラメ

ータが流れ模様に与える影響を調査し、また観察された多様な流れ模様の発生条件を整理し、旋回流モデル化の際の指針となるようなデータを提供しようと試みている。

記 号

D_o : 旋回流発生器出口直径

D_b : 一次噴射管外径

D_e : 拡大管出口直径

D_f : 炉直径

M_o : 全質量流量

r : 半径

Sa : 環状流のスワール数

$$= \frac{\int_{D_b/2}^{D_o/2} \rho \pi W U r^2 dr}{\left(\int_{D_b/2}^{D_o/2} \rho \pi U^2 r dr \right) \left(\frac{D_o}{2} \right)}$$

U : 軸流速度

U_a : 環状旋回流噴出軸流速

U_p : 一次噴流軸速度

W : 旋回速度

x : 軸方向距離

α : 拡大管の広がり半角

ϕ : 流れ関数

* 原稿受付 平成6年7月15日。

*1 正員、東京電力(株)エネルギー・環境研究所 (〒230 横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)。

2. 実験装置と測定法

2.1 旋回流発生装置 本試験では、管断面にわたって一様な軸流速分布をもつ剛体旋回流を作り出すために設計された回転円筒式の発生器を使用した(図1)。この発生器は内部にハニカム格子を固定した円筒(内直径 $D_o=190$ mm)と、その両端を支持するボールベアリングから構成されている。この円筒全体を可変速度モータで回転させることにより、整流装置からの一様流に対して剛体旋回を付与することができる。ここでは、管軸中央部に示したように、燃料噴射管を模擬した非旋回一次噴流の噴出管を設置している(ただし、噴射管は回転しない)。この噴射管の下流端は、旋回流発生器出口と一致させている。

環状旋回流の初期流速分布は、噴射管先端より 30 mm 上流側の断面において、一様流の流速を $U_o=5$ m/s($Re=45\,000$)とした条件で測定した。流速分布は高スワール数(例えば $Sa=1.6$)の場合に噴射管壁面近くで若干軸流速が低下する傾向にあることを除い

図1 一様剛体旋回流発生器の構造

図2 試験流路形状 ($D_o=190$ mm, $D_b=80$ mm)

て、ほぼ一様な剛体旋回流となっていることを確認した。図2には試験流路形状を示す。

2.2 可視化方法(スモークワイヤ法) スモークワイヤ法は流れに垂直にワイヤを張り、ワイヤに沿って一定の間隔で付着した油滴を電氣的に加熱して燃焼させ、スモークを発生させる手法である。それぞれの油滴が約 0.2~2 s、継続的に流跡線が発生させる。ただし、持続時間は流速とワイヤに通ずる電流によって変化する。流跡線の記録は暗室中でストロボ光により写真を撮る方法を用いた。

可視化装置は図3に示すように、ステンレス製支柱に固定された2本のワイヤ支持アームをもつワイヤ支持装置、油滴供給用ゴム圧入器、加熱電流用 AC-DC 変換器、加熱電流とストロボ光の同調制御システム、ストロボ、モータドライブ付きカメラから構成されている。ステンレスワイヤは線径 $\phi 0.13$ mm のもので、油はシリコン油を使用した。上部支持アームから供給される油滴は、重力により落下し、ワイヤ表面に油膜

図3 スモークワイヤ可視化装置構成

図4 可視化装置制御信号シーケンス

を形成し、これが表面張力により微小油滴の連なりを形成する。

図4には可視化装置の動作ロジックについて示している。制御装置のスイッチを投入すると直ちに信号Bが発生しワイアが加熱される。遅れ時間 τ_1 の後、信号Cがカメラに送られてシャッタが1/60 sだけ開孔する。シャッタ開孔中に信号Dによりストロボが発光する。撮影用フィルムは高速度用白黒ネガフィルムであるAgfapan Vario Xを使用した。

3. 直円管中の旋回流と一次噴流の混合

3.1 流跡線による流れの観察 旋回流発生器出口径に等しい内径をもつ直円管(長さ4 m)を取付けて、噴射管からの非旋回一次噴流と環状の旋回流の相互干渉によって作り出される流れ場を調べた。図5には一次噴流と環状旋回流の吹出し軸流速度比を $U_p/U_a=0.5$ に固定し、スワール数を増加させていった場合の可視化写真を示す。

$Sa=0.5$ の場合には、一次噴流は管軸中央にまっすぐな流跡線で、また環状の旋回流はスパイラル状の流跡線として観察される。 $Sa=0.9$ の場合にもほぼ同様な流れが観察されるが、一次噴流の直径が噴射管直後で絞られているのと、スパイラル状の流跡線の周期

が短くなっているなどの違いが観察される。

スワール数を $Sa=1.1$ まで増加させると、一次噴流の挙動に大きな変化が見られるようになる。写真に示されるように噴射管から噴出した一次噴流はまずその噴流直径が縮小し、流れが加速された直後、流跡線が急激に半径方向外側に曲がり噴流直径が噴射管と同程度の大きさまで広げられる。その直後流跡線は再び急激な変化を受け、流跡線は乱れることが観察される。ただし、この急激な変化が起こる軸方向位置は時間的に変動している。さらに、 $Sa=1.6$ では噴出した一次噴流は直後に乱れた状態になるのが特徴的である。

$U_p/U_a=1.0$ の場合には、低いスワール数において一次噴流が絞られることなく、噴射管径に対応したコア流れが見られる。高いスワール数では、一次噴流直径の時間変動が大きくなり、また $U_p/U_a=0.5$ で見られたような一次噴流の急激な変化も観察された。

3.2 一次噴流の平均流特性 図6には一次噴流境界線と旋回速度 $W=0$ となる位置(この線より中心軸よりの領域は非旋回の領域となる)を示す。境界線は、熱線流速計による流速測定により式(1)で定義される流れ関数を計算し、一次噴流と同等流量が含まれる管中央領域の境界位置を求めたものである。

図5 直円管中の一次噴流と環状旋回流($U_p/U_a=0.5$, ワイア位置 $x/D_o=0.16$)

$$\phi = \pi \rho \int_0^r U r dr / M_o \dots\dots\dots (1)$$

$U_p/U_a=0.5$ の場合、可視化観察で明らかになった一次噴流が絞られる様子がわかる。特に高いスワール

図6 直円管中にある一次噴流の挙動
(流管境界線と $W=0$ となる境界線)

数の流れでは、噴射管直後に急激に一次噴流が絞られ同時に一次噴流がすみやかに旋回速度をもつようになり、その後再び噴流直径が拡大する様子が示されている。下流側では境界位置は一定になるが、スワール数によってその位置は複雑に変化する。また、一次噴流全体が旋回速度をもつようになる位置は、スワール数が大きくなるに従って噴射管に近くなる傾向が見られる。

$U_p/U_a=1.0$ の場合には、一次噴流の境界はほぼ噴射管直径に相当する位置で一定となっており、平均流れの絞りは一次噴流流速が環状流流速よりも遅い場合にのみ見られるものであることがわかる。また、一次噴流全体が旋回運動する位置は $U_p/U_a=0.5$ の場合よりも下流側になる。

4. 拡大管中で一次噴流をもつ環状旋回流

4.1 流れの可視化観察 図7には図2(2)のように旋回流発生器出口に拡大管($D_e/D_o=1.5$, $\alpha=20^\circ$)を取付け、その下流側に $D_f/D_o=1.53$ の円筒を接続した流路における流れを調べたもので、スモークワイヤは旋回器出口直後に設置している。この写真では、

$U_p/U_a = 0.5$

(a) $Sa=0.3$

(b) $Sa=0.8$

(c) $Sa=1.4$

$U_p/U_a = 1.0$

(d) $Sa=0.4$

(e) $Sa=0.9$

(f) $Sa=1.4$

図7 拡大管中にある一次噴流と環状旋回流(1)
($D_e/D_o=1.5$, $D_f/D_o=1.53$, wire pos. $x/D_o=0.16$)

図 8 拡大管中にある一次噴流と環状旋回流 (2)
 $(D_e/D_o=1.5, D_f/D_o=1.53, \text{ with a short straight pipe before divergence, } U_p/U_a=0.5 \text{ wire pos. } x/D_o=0.16)$

$U_p/U_a=0.5$ と 1.0 について示しているが、スワール数の増加に伴って下流側で形成される再循環領域に影響されて、一次噴流の挙動が大きく変化している。

例えば $U_p/U_a=1.0$ の場合に、 $Sa=0.4$ では一次噴流は管軸中央を通っているのに対して、 $Sa=0.9$ では一次噴流は非対称的に偏向していることがわかる。この一次噴流の偏向は非定常的な挙動で、偏向の方向は時間とともに変化する。 $Sa=1.4$ では再び定常な軸対称流れが観察されるようになるが、一次噴流は低スワール数のときに見られたような著しい貫通力はなく、早期に周囲の流れと混合していることが観察される。

一次噴流速度を $U_p/U_a=0.5$ とし、さらに図 2 (3) のように旋回流発生器と拡大管との間に $L=110 \text{ mm}$ の短管を取付けた場合に、この傾向はいつそう顕著となる (図 8)。 $Sa=0.9$ では一次噴流が短管部ですでに大きくその位置を管軸上からずれており、スパイラル状に変動していることがわかる。また、 $Sa=1.4$ の高スワール数の場合には、一次噴流は即座に下流側の再循環領域の影響を受けて押し戻されるようにして、周囲流へと混合してゆく過程が見られる。

4・2 流動形式の分類 スモークワイアの位置を逐次下流側に移動させながら、各位置での流動の様相を観察してゆくと全体の流動様式を推定することがで

図 9 流動様式の分類

きる (例えば、単純な再循環領域ではワイア中央部で逆流が発生し、上端および下端側では下流向きの流れが観察される)。図 9 にはこのようにして求めた流動形式を示しており、それぞれ形式 A~D と呼び、以下の特徴をもつ。

(1) 形式 A 噴流形-弱い旋回噴流

中央の非旋回一次噴流が次第に旋回していくようになり、全体としては弱い旋回噴流として振る舞う。管

表 1 スワール数による流動形式変化

Up/Ua	CONFINED FLOW		FREE JET	
	0.5	1.0	0.5	1.0
A	0~0.2 0~0.2	0~0.5 0~0.4	0~0.4 0~0.2	0~0.5 0~0.4
B	0.2~0.8 0.2~1.2	0.5~1.2 0.4~1.2	0.4~1.2 0.2~1.2	0.5~1.3 0.4~1.2
C	0.8~1.2 -	- -	1.2~ 1.2~	1.2~ 1.2~
D	1.2~ 1.2~	1.2~ 1.2~	- -	- -

* The lower columns for cases with a short straight pipe before divergence.

軸上の再循環領域は形成されず、外部再循環領域のみが形成される。

(2) 形式 B 非対称再循環領域をもつ流れ

流れは非定常的で再循環領域は瞬間的には著しい非対称性をもつと考えられる。一次噴流はこの再循環領域を貫通することなく、その噴流中心軸は大きく管軸から偏向し、再循環領域の周囲に沿って次第に旋回流側に混合してゆく。

(3) 形式 C 一次噴流貫通のない再循環領域

軸対称の再循環領域が管軸上に形成され、一次噴流は再循環領域を貫通することなく、その周囲を軸対称的に回って流れてゆく。

(4) 形式 D 一次噴流貫通のある再循環領域

軸対称の再循環領域が管軸上に形成されるが、一次噴流は押し戻されることなく再循環領域の中央部を貫通して下流側に流れてゆく。

4.3 流動形式変化とスワール数 流動様式は流路形状、炉による制約の有無、一次噴流の強さ、スワール数などにより変化することが経験的に知られている。観察された流動様式について、各形式の流れが発生する条件範囲を表 1 に示す。

再循環領域が形成されるには $U_p/U_a=0.5$ では $Sa=0.2\sim0.4$ 以上、 $U_p/U_a=1.0$ では $Sa=0.4\sim0.5$ 以上の旋回強度が必要であり、一次噴流速度の高いほ

うが再循環領域が形成されにくいことがわかる。また、一次噴流全体が非定常三次元的に変動する形式 B の流れは、 $U_p/U_a=0.5$ では $Sa=0.2\sim1.2$ 程度、 $U_p/U_a=1.0$ では $Sa=0.4\sim1.3$ 程度の範囲で観察される。形式 B の流れは著しい非定常三次元的挙動を示すので、このような流れの乱流モデルでは、マクロ的な変動といわゆる乱れとの区別を行った取扱いが必要となるものと考えられる。 $Sa=1.2\sim1.3$ 以上の流れでは、このような一次噴流の非対称性は見られないので、二次元定常流としての取扱いが可能になるものと考えられる。

炉直径により制約された流れと大気開放自由噴流との相違は、高いスワール数の条件において自由噴流では形式 C の流れ、制約流れでは形式 D の流れが形成されやすいことである。

5. 結 言

等温環状旋回流の可視化試験を行い、微粉炭燃焼器のバーナ近傍の流れについて以下の知見が得られた。

(1) 直円管中の流れと拡大管中の流れでは、後者において下流側の再循環領域の影響を受けて一次噴流の挙動が異なってくる。

(2) 直円管中の流れで見られるように、高いスワール数では角運動量が速やかに中心軸上まで輸送されるとともに、これに対応した急激な流跡線の変化が観察される。

(3) 拡大管の流れは、一次噴流速度、スワール数、制約の有無によってさまざまな流動形式が観察される。特に、 $Sa=1.2\sim1.3$ 以下の流れでは一次噴流が著しい非定常三次元運動をしていることがわかった。

本報は IFRF(国際火炎研究所)で実施した試験の結果を報告するものである。IFRF の関係各位に謝意を表する。

文 献

- (1) 田中訳, 燃焼の空気力学, (1976), 95-138, 省エネルギーセンター。