二段燃焼用空気導入時のダクト内流動解析[†]

古畑朋彦・青木秀之・丹野庄二
三浦隆利・斎藤正三郎・大谷茂盛

東北大学工学部付属燃焼限界実験施設^{††}

二段燃焼用空気の導入による炉内流動の変化を測定するために、内径0.5m×全長2.0mの亚克力製ダクトを用いて、二段燃焼用空気(80Nm³/hr)を $x/D=0.8$ の地点にダクトの全周から接線方向に導入した。このときの軸方向および接線方向平均速度を $x/D=0.5, 1.5$ の二点においてレーザー・ドップラー・流速計により測定した。また $k-\epsilon$ 二方程式モデルに二段燃焼用空気導入モデルを組み込み円筒軸対称座標系でダクト内流動を数値解析し、測定結果と比較・検討した。その結果、解析値はダクト内流動を良好に表現し、二段燃焼用空気導入モデルは適切であることが示された。さらに、円筒軸対称座標系での解析の妥当性を検討するため、上記と同一の導入位置、空気量で実炉と同様に1本の導入管から二段燃焼用空気を導入し、測定結果を解析結果と比較した。その結果、流れは軸対称ではなく、三次元解析が必要であるとの結論を得た。

緒 言

燃焼に際して、NO_x, SO_x, CO, すず等の発生は不可避である。しかしこれら汚染物質、特にNO_xの低減については環境保護の面から現在でも重要な課題である。

NO_xにはThermal NO_xとFuel NO_xがあり、両者の生成機構は多くの研究者により詳細に研究され、層流燃焼場においては比較的明らかになってきた。しかし工業規模の燃焼過程における生成機構は乱流による拡散、化学反応および熱・物質移動とが複雑に絡み合っている。NO_xの低減には、①窒素分の少ない燃料の使用、②小さい空気比での燃焼、③低い燃焼温度と、滞在時間の短縮等が有効である。これらの点を考慮した実用的NO_x低減法として二段燃焼、排ガス再循環等があり、本研究では多くの工業炉で採用されている二段燃焼法について考察する。二段燃焼法はまず燃料過濃で一次燃焼を行い、その後流で二次空気を導入して二次燃焼を行わせる方式であり、当量比、燃焼温度、滞在時間を制御することでNO_x排出量を低減する。二段燃焼用空気の導入位置およびその空気量は、炉内の温度場、濃度場、速度場に大きな影響を与え、炉毎に最適条件が異なり、燃料種、炉形状、負荷の変更に対して合理的に対応していないのが現状である。その点からシミュレーションを最適な燃焼操作条件の決定手段として用いることが望まれる。しか

しながらシミュレーションに際しては、二段燃焼用空気導入モデルの適用法が問題となる。

そこで本研究では、二段燃焼用空気導入時の流動状態の把握が低NO_x燃焼法の確立に不可欠であるとの観点から、円筒ダクトにおける二段燃焼用空気導入時の流動をLDAを用いて測定し、乱流モデルに二段燃焼用空気導入モデルを組み入れて計算した結果と比較検討することにより、モデルの適用法を検討した。

1. 理 論

1.1 解析方法

円筒炉内の燃焼解析を行う場合、一般的に計算を円筒軸対称座標系で行っている。一方、二段燃焼方式の燃焼炉は通常円筒壁のある一点から二段燃焼用空気を導入しているため、円筒三次元座標系で解析を行う必要がある。しかし三次元解析に必要な計算コスト・時間・記憶容量は二次元解析に比べて非常に多く、その実施には十分な検討を要する。そこで今回は二段燃焼解析の基礎として円筒軸対称座標による二段燃焼流動解析を行う。

基礎となる乱流モデルには、多くの研究例がある $k-\epsilon$ 二方程式モデルを使用する。数値解法はPatankar³⁾に従った。境界条件は、壁面に関してはChiangとLauder¹⁾に従い壁関数モデルを用いた。また乱流生成エネルギーとその消散率の流入値はKhalilら²⁾に従った。

1.2 二段燃焼用空気導入モデル

計算では境界条件を壁関数で与えているが、二段燃焼用空気の導入位置には壁面がないので壁関数を適用せず、

[†] 1989年6月23日受理

^{††} 〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉

Fig.1 Near-wall physical model for two-stage combustion

ノズルの部分と同様に流入面として取り扱う。すなわち二段燃焼用空気導入点に位置する格子点に対して質量、接線方向運動量に相当する諸量を、基礎方程式中の生成項に加えることにより二段燃焼用空気導入を考慮する。

Fig. 1 に二段燃焼用空気導入モデルの模式図を示した。導入点に相当する格子点に対して、次式で与えられる質量、運動量を加える。

$$\text{Mass} : S_m' = S_m + m_{TSC} \quad (1)$$

$$\text{Tangential momentum} : S_w' = S_w + (mW)_{TSC} \quad (2)$$

$$\text{Kinetic energy} : S_k' = S_k + k_{TSC} \quad (3)$$

$$\text{Dissipation rate} : S_{\epsilon}' = S_{\epsilon} + \epsilon_{TSC} \quad (4)$$

左辺 S_{ϵ}' は各方程式のソース項である。

2. 実験

実験装置を Fig. 2 に示した。ダクトはアクリル製で、内径 $D = \phi 0.5\text{m}$ 、全長 $L = 2.0\text{m}$ である。ノズルからの空気は微粒化用空気と燃焼用空気であり、各々ノズル出口で案内羽根により旋回が掛けられる。以後、ノズルからの微粒化用空気を一次空気、燃焼用空気を二次空気として、二段燃焼用空気と区別する。また二段燃焼用空気は二段空気と略記する。測定は 2ch. LDA を使用し、軸方向速度 (U) および半径方向速度 (W) を測定した。二段空気の導入は Fig. 3 に示す (a), (b) 2 種類の方法で行った。(a) は実炉での二段空気導入法であり、(b) は全周から旋回空気を吹き込む方式で、円筒軸対称座標での解析に対応した空気導入法である。(a) と (b) の導入部面積は等しく設定した。導入位置は流入面から $x/D = 0.8$ の地点とした。

Table 1 に、二段空気導入実験の実験条件を示した。表中の Run 1 は二段空気を導入していない弱旋回流であり、二段空気導入時に対する比較対象とした。Run 2 が二段空気導入時で、二段空気は二次空気の 30% を導入する。以降、前述の 2 種類の空気導入法による実験を、そ

Fig.2 Schematic diagram of LDA measurement system and experimental apparatus

Fig.3 Two different TSC air introduction methods

れぞれ Run 2(a, 一本), Run 2(b, 全周) (Fig. 3 参照) として区別する。測定位置は $x/D = 0.5, 1.5$ の 2 点であり、導入位置 ($x/D = 0.8$) の上流側と下流側に設定した。円筒軸対称座標系で二段空気導入モデルを用いて解析した結果と、実験 Run 2(b, 全周) を比較・検討することにより、二段燃焼用空気導入モデルの是非を検討する。また、Run 2(a, 一本) と Run 2(b, 全周) の実験結果を比較・検討することにより、実炉の二段空気導入法に対する円筒軸対称座標系での流動解析の適用性を検討する。

Table 1 Experimental condition

Run number	Flow rate [Nm ³ /hr]	Vane angle [deg.]	Swirl number S' [-]
Run. 1 Atomizing air	40	10	0.12
Combustion air	260 (100 %)	20	0.32
TSC combustion air	0 (0 %)	—	—
Run. 2 Atomizing air	40	10	0.12
Combustion air	180 (70 %)	20	0.32
TSC combustion air	80 (30 %)	—	—

Fig. 4 Predicted contours of flow characterization (left-hand side: with TSC air introduction right-hand side: without TSC air introduction)

3. 結果および考察

3.1 二段空気導入(全周)時と非導入時との解析結果の比較

円筒軸対称座標系で二段空気導入モデルを用いた解析結果と非導入時の解析結果を比較・検討する。Fig. 4にダクト内流動状態の解析結果を示す。左側が二段空気導入(全周)時、右側が二段空気非導入時の解析結果であり、上段が流線分布図、中段が軸方向速度の等速度線図、下段が接線方向速度の等速度線図である。流線分布図中の点線は、軸方向速度がゼロの等速度線である。始めに流線および軸方向速度の等速度線分布図を比較する。二段空気を導入しないと外部再循環領域は $x/D=3.0$ 以上まで形成されるが、二段空気の導入により、再循環領域が中心軸近傍と導入点上流の壁近傍に形成される結果を得た。さらに中心軸近傍の再循環領域は非導入時に比較して軸方向、半径方向に相当小さくなる。この原因として、①二次空気の30%を二段空気に供給したことから軸

方向の運動量が小さくなる、②軸方向運動量を持たない空気の壁からの導入が壁近傍再循環流の運動を抑制する、という2点が挙げられる。次に接線方向速度の等速度線図を比較する。前述①の理由で、導入時のノズル近傍接線方向速度は小さい。しかし導入点近傍に接線方向速度の大きい領域が生じ、また、下流まで接線方向速度の大きい領域が広がるという結果が得られた。

次に断面速度分布図を用いて導入時と非導入時の解析結果を比較・検討する。Fig. 5に軸方向速度分布、Fig. 6に接線方向速度分布を示した。実線が二段空気導入(全周)時、破線が二段空気非導入時の解析結果である。なお黒点は二段空気導入時(Run 2(b, 全周))の実験値である。

始めにFig. 5で導入時と非導入時に対する軸方向速度分布を比較する。 $x/D=0.5$ では中心軸の速度は大きな差はないが、二次空気による $r/D=0.08$ 付近の速度ピークは、非導入時の方が明らかに大きい。また二段空気導入(全周)時には $r/D=0.4$ 付近に軸方向速度が正の部分

Fig. 5 Radial profiles of mean axial velocity

が見られる。次に $x/D=1.5$ において比較すると、 $x/D=0.5$ では大きな差のなかった中心軸の速度が異なった分布を示している。これは接線方向運動量が大きい二次空気と、高速の一次空気の混合が起こったためである。この地点においても、 $r/D=0.4$ 付近の分布は非導入時には逆流を示すのに対して、導入時は正方向速度を示す。

Fig. 6 の接線方向速度分布を比較すると、 $x/D=0.5$ において、二次空気による旋回速度のピークは $r/D=0.05$ 付近に見られるが、二段空気導入（全周）時は二次空気量が少ないことから、軸方向速度の場合と同様に速度ピークは小さくなっている。次に $x/D=1.5$ の結果を見ると、導入時の結果は非導入時の結果と異なり、接線方向速度が中心で小さく、壁近傍で極大値を持つ。また二段空気による旋回の影響が $r/D=0.2$ 付近にまで達している。

以上の結果から二段空気の導入により、ダクト内流動は導入点の上流側、下流側にかかわらず全く異なる状態になることが示された。

3.2 実験結果と解析結果の比較・検討

二段空気導入（全周）時の解析値（実線）と実験 Run 2(b, 全周)（黒点）との比較を行う。Fig. 5 の軸方向速

Fig. 6 Radial profiles of mean tangential velocity

度分布では、 $x/D=0.5$ における壁近傍の速度について実験値の方が若干大きい以外は解析値とほぼ良好に一致した。Fig. 6 の接線方向速度分布を見ると、 $r/D=0.05$ 付近のピークや、壁に近づくとき速度が大きくなる傾向を持つ点で良好な一致を示した。以上の結果から、解析結果は実験の傾向を良好に表現しており、円筒軸対称座標系における二段空気導入モデルは適切であることが示された。

3.3 2種類の二段空気導入法による実験結果の比較・検討

実際の燃焼炉における二段空気導入は、壁面のある1カ所あるいは数カ所から行われる。そこで円筒軸対称座標系での解析がどの程度の妥当性を持つのかを実験的に確認した。すなわち Fig. 3の (a), (b) の2種類の導入法で測定した流れ場がほぼ同様な状態であるならば、円筒軸対称座標系での計算で十分であると言える。しかし一本からの導入法 (a) により、円周方向に対して対称性を欠く流れ場となっている場合には、円筒三次元座標系に二段燃焼モデルを組み込み解析を行う必要がある。

Fig. 7 に (a), (b) 2種類の二段空気導入法による実験値を示した。左側が軸方向距離 $x/D=0.5$ 、右側が $x/D=$

Fig. 7 Comparison of two different TSC air introductions for axial velocity and tangential velocity

1.5における図であり、黒点がFig. 3の一本からの導入法(a)、実線が全周からの導入法(b)の実験値に対応している。なお、(b)の導入法については測定点を半径方向に細かくとり、流れ場の軸対称性を確認したため実線で示した。上段が軸方向速度であり、下段が接線方向速度である。 $x/D=0.5$ の軸方向速度分布では、(a)の一本からの導入法における中心付近の測定値は(b)の全周からの導入法における測定値と似た分布を示すが、中心から壁に近づくにつれて軸対称性が失われる。接線方向速度についても軸方向速度の場合より相違は少ないが、軸対称性が失われるのは同様である。 $x/D=1.5$ の実験値を見ると、接線方向速度分布は比較的軸対称性を示すが、軸方向速度分布は軸対称とは言えない。以上より導入点近傍では、接線方向運動量については導入した空気流の運動量が大きいため上流、下流ともに比較的対称性を保つが、軸方向速度は壁から軸方向運動量を全く持たない空気が導入されるので周方向に分布を生成しやすいことが推察される。また、導入管が内径 $\phi 0.1\text{m}$ と大きく、その存在自体が流れ場に及ぼす影響も大きいと考えられる。

以上の結果から、2種類の導入法では流れ場が全く異なり、特に導入点下流側では軸対称性はほとんど見られなくなることが示された。したがって実炉の二段燃焼を二段空気導入モデルを使用して数値解析するには、円筒三次元解析が必要と考えられる。

結 言

本研究では、実炉の円筒三次元的二段空気導入に対する円筒軸対称座標系での流動解析の適用性を検討する目的で、一本の導入管から二段空気を導入する三次元的導入と、ダクトの全周から軸対称に導入する場合について流動実験を行い比較した。その結果、両者の流動が大きく異なることから、円筒軸対称座標系での計算には限界があることが示された。しかし、円筒軸対称座標系における乱流場の解析法に二段空気導入モデルを組み込んだ解析結果と軸対称なダクト全周からの空気導入における実験値とは良好に一致し、モデル自体は適切であることが示された。このことから、本二段空気導入モデルを用いた解析法を円筒三次元座標系に拡張することにより実炉の二段燃焼三次元解析が十分可能であると考えられる。

Nomenclature

D	= duct diameter	[m]
k	= kinetic energy of turbulence	[m ² /s ²]
L	= duct length	[m]
m	= mass	[kg]
R, r	= radial coordinate or radius	[m]
R_h	= radius of hub	[m]
S'_ϕ	= swirl number	
	= $\tan \alpha * 2 \{1 - (R_h/R)^3\} / 3 \{1 - (R_h/R)^2\}$	[-]
S	= volumetric source/sink term of quantity ϕ	
U	= axial velocity	[m/s]
W	= tangential velocity	[m/s]
x	= axial coordinate	[m]

α	= cone angle	[deg.]
ε	= dissipation rate of turbulence	[m ² /s ³]
ϕ	= variables for turbulence transport equation	
<Subscripts>		
in	= inlet condition	
TSC	= two-stage combustion	
ϕ	= generalized variable	

Literature cited

- 1) Chieng, C.C. and B.E. Spalding: *Numerical Heat Transfer*, 3, 189 (1980)
- 2) Khalil, E.E., D.B. Spalding and J.H. Whitelaw: *Int. J. Heat & Mass Transfer*, 18, 775 (1975)
- 3) Patankar, S.V.: "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill Co., (1980)

Numerical Analysis of Turbulent Flow in a Duct Introducing Two-stage Combustion Air

Tomohiko Furuhashi, Hideyuki Aoki, Shoji Tanno, Takatoshi Miura,
Shozaburo Saito and Shigemori Ohtani

Res. Inst. of Comb. Eng. for Effective Use of Energy, Tohoku Univ., Sendai 980

Key Words : Two-stage Combustion, k - ε Model, Numerical Simulation, Turbulent Flow, Laser-Doppler-Anemometer, Velocity Distribution

To investigate the change of flow characteristics in a duct caused by introducing two-stage combustion (TSC) air, TSC air (80 Nm³/hr.) was introduced tangentially at an axial position of $x/D=0.8$ through the circumference of a circular duct (0.5m I.D.×2.0m length) of acrylic resin. Two components (axial and tangential) of the mean velocities at $x/D=0.5$ and 1.5 were measured using a laser-doppler-anemometer. By combining the k - ε two-equation model with a model developed for TSC air, the flow in the duct was analyzed numerically in cylindrical coordinates to compare the results with the measured turbulent flow quantities. Numerical results agreed well with experimental ones and the model developed for TSC air was thus found to be appropriate. These results did not agree, however, with the results by introducing TSC air through one tube as applied to a practical furnace. Three-dimensional analysis must therefore employed.