ダンプディフューザ形燃焼器内の流動機構* (燃焼筒高さと急拡大部における傾斜壁の影響)

坪井 渉^{*1}, 志澤 高朗^{*2}, 本阿弥 眞治^{*2}

Flow Behavior in the Dump Diffuser of Gas Turbine Combustor (Effects of Flame Tube Depth and Inclined Wall in a Sudden Expansion Region)

Wataru TSUBOI, Takaaki SHIZAWA and Shinji HONAMI

The cold flow experiments are made in a two-dimensional dump diffuser. Flow behavior over a flame dome head and its reattachment to the casing wall are presented, when a symmetric or distorted flow is provided at the diffuser inlet. A Laser-Doppler Velocimeter was used for the velocity measurements. The effects of three types of flame tube depth and two types of vertical and inclined wall in a sudden expansion region on the diffuser performance are clarified. Both flame tube depth and inclination of the combustor wall are the dominant parameters affecting the diffuser performance of total pressure loss and flow rate distribution into the branched channels.

Key Words: Dump Diffuser, Flame Tube Depth, Inclined Wall, Total Pressure Loss, Flow Rate Distribution, LDV

1. 緒 言

近年, 航空用ガスタービンエンジンの高性能化に伴い, タービン入口温度が上昇しており, タービン部材の熱疲労を緩和するためにも燃焼器出口温度分布の一樣化が非常に重要である。そこで, 環状流路への流量配分特性が良好で, 一樣的燃焼器出口温度分布が得られるダンプディフューザが多くの航空用エンジンに採用されている。

最近の傾向として, 安全性のため高空における再着火性の向上が求められ, また環境保護のため NO_x 規制が厳しい。そこで, 高負荷燃焼用と低負荷燃焼用に多段燃焼させる方式が考案され, その場合, 半径方向に多段燃焼させる方式が増えている⁽¹⁾⁽²⁾。その結果, 燃焼筒高さが増大し, その一方で軽量化および損失低減のため, 急拡大部の形状に検討が加えられている。

本研究は, 燃焼筒高さと急拡大部における傾斜壁がディフューザ性能に与える影響を評価すると同時に, レーザドップラー流速計(LDV)を用いてその流動機

構について調べ, 両者の因果関係を解明することが目的である。

2. 記 号

C_{PW} : 壁面静圧回復係数

D : ダンプギャップ

H : 流路高さ

k : 乱流運動エネルギー

Q : 流量

Re : レイノルズ数

U, V, W : 時間平均速度成分

u, v, w : 変動速度成分

X, Y, Z : 座標系(図1参照)

α : プレディフューザ半頂角

λ : 流量平均全圧損失係数

ϕ : 燃焼筒におけるよどみ点からの角度

添 字

1: ディフューザ入口

2: プレディフューザ出口

3: ディフューザ出口

L : 燃焼筒左側

R : 燃焼筒右側

ref: 基準点

* 原稿受付 1998年1月19日。

^{*1} 三菱重工業(株)長崎造船所(☎850-8610 長崎市飽の浦町1-1)。

^{*2} 正員, 東京理科大学工学部(☎162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3)。

FI: 燃焼筒

3. 実験装置および方法

図1にダンプディフューザの二次元模型を示す。入口流路高さ H_1 は 20 mm, 幅 300 mm でアスペクト比は 15 である。左右分流路高さ H_L と H_R は共に 20 mm であり, ディフューザの面積拡大比は 2.0 である。なお, 前報⁽³⁾⁽⁴⁾に実験装置と実験方法の詳細を記す。本研究では, 燃焼筒高さ H_{FI}/H_1 を 3, 5, 7 の 3 種類用意した。また, ディフューザ部の圧力損失低減⁽⁵⁾と軽量化を目的として, 急拡大部の形状を検討した。すなわち, プレディフューザからケーシング壁まで X 軸に対して 45° 傾けた壁を取付け, 装着しない場合を垂直壁 (VW), 装着した場合を傾斜壁 (IW) とする。ダンプギャップは $D/H_1=2$ で, プレディフューザの開き角 (2α) は 10° に固定した。入口で非対称流入させる実験では, $X/H_1=-11.5$ に高さ $0.2H_1$ のディストーションバーを設置した。なお, LDV の信号処理器

Fig. 1 Test section

Fig. 2 Static pressure recovery coefficient

Fig. 3 Total pressure loss coefficient

は, 従来のトラック方式やカウンタ方式に代わって, FFT 方式の周波数プロセッサを導入した。ディフューザ入口部 ($X/H_1=-1.0$) ①および左右分流路下流部 ($X/H_1=20.0$) ③における全圧は, 流れに正対させて全圧管を挿入し, Y 方向にトラバースし, 沈鐘式精密微差圧計により測定した。速度を LDV により測定し, 時間平均速度および乱流値を算出した。測定は, 基準点流速 $U_{ref}=30.0$ m/s, 入口流路高さ $H_1=20$ mm を代表高さとしたレイノルズ数 $Re_{H1}=4.0 \times 10^4$ のもとで行った。

4. 実験結果および考察

4.1 ディフューザの圧力損失特性 本研究で用いた二次元ダンプディフューザ模型のディフューザ出口壁面静圧回復係数 C_{PW1-3} を図2, ディフューザ出口全圧損失係数分布 λ_{1-3} を図3に示す。ここで全圧損失は, 分流路下流部において Y 方向にトラバースして得た全圧分布を質量流量平均して求めた。黒丸は垂直壁, 白丸は傾斜壁の結果を示す。垂直壁において, 燃焼筒高さの増大に伴い, 静圧は回復せず, 全圧損失係数は増加する。また, $H_{FI}/H_1=3$ と 5 は, 傾斜壁の圧力損失が垂直壁を上回っているのに対し, $H_{FI}/H_1=7$ の場合は, $H_{FI}/H_1=5$ の傾斜壁の損失より減少し, 垂直壁よりも小さい。

4.2 燃焼筒高さの影響 図4~6にそれぞれ

Fig. 4 Velocity vector ($H_{FI}/H_1=3$, VW)

Fig. 5 Velocity vector ($H_{FI}/H_1=5$, VW)

Fig. 6 Velocity vector ($H_{Fl}/H_1=7$, VW)

Fig. 9 Turbulence Energy ($H_{Fl}/H_1=7$, VW)

Fig. 7 Turbulence Energy ($H_{Fl}/H_1=3$, VW)

Fig. 10 Velocity vector ($H_{Fl}/H_1=5$, IW)

Fig. 8 Turbulence Energy ($H_{Fl}/H_1=5$, VW)

Fig. 11 Velocity vector ($H_{Fl}/H_1=7$, IW)

$H_{Fl}/H_1=3, 5, 7$ (VW)の速度ベクトル線図を示す。図7～9に同様に乱流運動エネルギー分布を示す。

$H_{Fl}/H_1=3$ においてプレディフューザからの噴流は、燃焼筒に衝突後、流れの方向を大きく変えずに、分流路に流入する。 $H_{Fl}/H_1=7$ において燃焼筒に衝突後、急激に方向を変え、分流路に向かう。その際、急拡大部で大規模な再循環流れが形成される。なお、図には示さないが、燃焼筒壁面に平行な速度成分を計測した結果、燃焼筒から分流路に至る壁面近傍では、はく離は発生していない。このように、燃焼筒高さが増大すると、再循環流れの長さのスケールが大きくなり、そのため噴流との間のせん断領域も拡大する。乱流エ

ネルギーは、プレディフューザを出た噴流外縁部において速度こう配の大きい時間平均せん断流から生じ、さらに、ケーシング壁に再付着する過程で生じる。 $H_{Fl}/H_1=7$ において、再循環流れの領域が拡大し、再付着過程における乱流エネルギーが増大し、その結果、全圧力損失が増大すると考えられる。

4.3 傾斜壁の影響 4.1節において、燃焼筒高さの増大に伴い、全圧損失が増加することを示した。一方、実際の燃焼筒高さは増大する傾向にあるので、全

圧損失の低減を図るためには、図5, 6に示した急拡大部に存在する再循環流れを抑制すること、ならびに再付着過程を制御することが効果的であると考え、急拡大部に傾斜壁を設置した。

図10, 11に傾斜壁を装着した $H_{Fl}/H_1=5, 7$ の速度ベクトル線図を示す。図12, 13に乱流運動エネルギー分布を示す。

$H_{Fl}/H_1=5$ では噴流が傾斜壁ではなくケーシング壁に再付着し、分流路近傍の再付着点から逆流が見られるのに対し、 $H_{Fl}/H_1=7$ ではプレディフューザ直後にはく離渦が見られるのみで噴流は傾斜壁に再付着する。つまり、 $H_{Fl}/H_1=5$ では偏平な形状で存在していた再循環流れが、 $H_{Fl}/H_1=7$ ではプレディフューザ出口近傍に限定されていることがわかる。

$H_{Fl}/H_1=5$ において図8と図12を比較すると、 $X/H_1=3.0\sim 4.5$ の再付着点近傍における乱流エネルギーの分布が異なる。 $X/H_1=4.0$ 近傍の再付着点において、傾斜壁の場合、垂直壁に比べ、拡散が進んでいない噴流がケーシング壁に再付着するため、多くの乱流エネルギーを発生していることがわかる。また、プレディフューザ直後のはく離渦およびケーシング壁と

傾斜壁からの逆流のため、噴流の時間平均流から乱流エネルギーへのゲインが増大し、そのため急拡大部の面積を減少したにもかかわらず傾斜壁の全圧損失が垂直壁を上回る原因と考えられる。

$H_{Fl}/H_1=7$ において傾斜壁のほうが圧力損失が小さい理由として、再循環流れが抑制されたので、平均流からの乱流エネルギーの供給が少ないことが挙げられる。これは、図9で乱流エネルギーの再循環領域側への拡散が見られるのに対し、図13では見られないからである。また、垂直壁の噴流は、ケーシング壁に約 45° の角度で再付着するために、 $X/H_1=4.0\sim 5.0$ で多くの乱流エネルギーを発生している(図9)。図13では傾斜壁に対してかなり浅い角度で噴流が再付着するために乱流エネルギーの発生も垂直壁に比べて少なく、損失が減少した原因と考えられる。

図14, 15に $H_{Fl}/H_1=5, 7$ の燃焼筒先端部の壁面静圧分布を示す。 $H_{Fl}/H_1=5$ では傾斜壁と垂直壁に大きな相違は見られないので、燃焼筒に沿った壁面噴流の挙動はほぼ同じである。しかし、 $H_{Fl}/H_1=7$ において垂直壁では $\phi=45^\circ$ まで壁面噴流が加速するのに対し、傾斜壁では、噴流は、 30° まで加速し、それより下流で減速を開始し、分流路における圧力回復は良好となる。

Fig. 12 Turbulence Energy ($H_{Fl}/H_1=5$, IW)

Fig. 13 Turbulence Energy ($H_{Fl}/H_1=7$, IW)

Fig. 14 Static pressure on flame dome ($H_{Fl}/H_1=5$)

Fig. 15 Static pressure on flame dome ($H_{Fl}/H_1=7$)

Fig. 16 Flow rate distribution in asymmetric flow

4・4 非対称流入における流量配分特性 傾斜壁を設置することにより性能向上の可能性を見いだしたが、一方で、左右分流路への流量配分特性に及ぼす影響を検討する必要がある。そこで、ディストーションバーでディフューザ入口に非対称な速度分布を与えた場合の結果を以下に示す。

図 16 に全圧管によって求めた分流路③における左右流路の流量比を示す。流量比が 1 に近いほど、流量配分特性に優れることを意味する。いずれの燃焼筒高さにおいても、傾斜壁が垂直壁よりも流量配分特性に優れており流量配分の改善に有効であることがわかる。

結局、燃焼筒高さが増大する傾向にあるダンプディフューザにおいて、急拡大部に傾斜壁を装着することにより、装着しない場合と比較して、全圧損失が低減し、併せて、良好な流量配分特性を有することが判明した。したがって、傾斜壁の採用は、最適なディフューザ形状の設計に際し、重要な示唆を与えると考えら

れる。

5. 結 言

燃焼筒高さおよび急拡大部における傾斜壁のディフューザ性能に与える影響を全圧測定により評価し、また、LDV 測定および静圧測定によって流動機構を調べた結果、以下のことが判明した。

(1) 燃焼筒高さ、ならびに、急拡大部における傾斜壁は、ダンプディフューザの性能を支配する重要なパラメータである。

(2) 垂直壁において、燃焼筒高さの増加に伴い、圧力損失が増加する。

(3) 噴流が傾斜壁に再付着する場合、圧力損失および流量配分は優れた特性を示す。

(4) 燃焼筒高さが増大する場合、ディフューザ性能を向上させるには、急拡大部に傾斜壁を設置することが効果的である。

最後に、本研究の実施に多大な協力をいただいた当時本学卒研究生であった月岡誉唯、長谷川俊の両氏に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 遠崎良樹・ほか 1 名, 日本ガスタービン学会誌, **23**-89(1995), 31-38.
- (2) 藤秀実, 日本ガスタービン学会誌, **21**-84(1994), 34-39.
- (3) 佐藤篤・ほか 2 名, 機論, **57**-544, B(1991), 4029-4034.
- (4) 緒方秀樹・ほか 2 名, 機論, **60**-580, B(1994), 4039-4044.
- (5) Klein, A., *Prog. Aerospace Sci.*, **31**(1995), 171-237.