ダンプディフューザ内の流動機構に関する研究*

佐藤 篤^{*1}, 志沢 高朗^{*2}, 本阿弥 眞治^{*2}

Study on the Flow Behavior in a Dump Diffuser

Atsushi SATO, Takaaki SHIZAWA and Shinji HONAMI

The paper presents the cold flow measurements in a two-dimensional dump diffuser. The laser Doppler velocimeter was used for the measurements of mean velocity components and its fluctuation in order to clarify the flow regimes in a sudden expansion region. Wall friction velocity on the outer wall was also measured by a wall flow sensor. The rolling up of flow from the outer wall is observed in a sudden expansion region near the reattachment point. Such behavior contributes to the favorable characteristics on the flow rate distribution to the branched channels, while it produces turbulence energy which causes a large pressure loss in the dump diffuser. Wall friction velocity and its fluctuation in a sudden expansion region decrease toward the base of the prediffuser.

Key Words: Diffuser, Turbulence, Vortex, LDV, Reattachment

1. 緒 言

近年, ジェットエンジンの高性能化に伴い高負荷燃焼が進み, 高温下に置かれるタービン部材の寿命を維持することが課題となっている。そのため, 新材料の開発などのほか, 燃焼器出口温度分布を一様化することが重要である。燃焼器ディフューザ部にプレディフューザおよび急拡大部を有し, 燃焼器先端部を鈍頭化させたダンプディフューザでは, ディフューザ入口速度分布が空気流量配分に与える影響が小さく, また小形軽量化が図れる利点を持つことから急速に実用化が進んでいる。しかし, 一方では圧力損失が大きいという欠点を持ち, このため流量配分性能に優れ, かつ圧力損失の低いディフューザ形状を設計する必要がある。

従来の研究では, プレディフューザ形状, 入口流入諸条件を変化させた場合の流量配分および圧力損失への影響を検討するという性能評価が行われた^{(1)~(4)}。森岡らは, ダンプディフューザの二次元模型にレーザドップラー流速計(LDV)を用いて急拡大領域の流れの測定を行った⁽⁵⁾⁽⁶⁾。著者らは, 急拡大領域の流れの方向

を考慮した平均速度成分および変動速度成分を測定したが⁽⁷⁾, 本研究では, さらに速度の詳細な測定を行い, 併せて壁面センサを用いて順流率, 壁面摩擦速度およびその変動分の測定を実施した。これらの結果より, ダンプディフューザ形燃焼器内の急拡大部における流動機構を明らかにし, 流動機構と性能評価との因果関係を解明することを本研究の第1の目的とする。併せて, 逆流を伴う流れ場の数値計算コードの検証データを提供することを第2の目的とする。

2. 記 号

D : ダンプギャップ
 H_1 : 入口流路長さ (=20 mm)
 H_L, H_R : 左右分流路高さ (=20 mm)
 k : 乱流運動エネルギー
 L : プレディフューザ長さ (=20 mm)
 U, V, W : X, Y, Z 方向速度成分
 u, v, w : X, Y, Z 方向変動速度成分
 v^* : 壁面摩擦速度
 v_{rms}^* : 壁面摩擦速度の RMS 値
 U_{ref} : 基準点主流速度
 X, Y, Z : 座標系
 α : プレディフューザ広がり角

* 原稿受付 平成3年6月3日。

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

- γ_D : 順流率
 ρ : 密度
 τ_0 : 壁面せん断応力
 ϕ : 燃烧筒先端部角度

3. 実験装置および実験方法

図1に実験装置を示す。実験に用いた流路は空気を作動流体とする回流形密閉風洞であり、送風機、三次元ディフューザ、整流部、二次元ノズル、助走流路、測定部、回収部サージタンクより構成される。図2に測定部概略を示す。本装置では、ダンプディフューザの二次元模型を採用している。測定部の大部分はアクリル製であるが、LDVを用いた測定の際、得られるドップラー信号のSN比を向上させるため、LDVの収光系と受光系に挟まれる部分はガラス板を用いる。助走流路は二次元性を確保するために、高さ $H_1=20$ mm、幅300 mmでアスペクト比は15であり、またその長さは200 mmである。境界層を遷移させるため、ノズル出口の両壁には $\phi 0.5$ mmのトリッピングワイヤを取付けた。左右分流路高さ H_L, H_R は共に20 mmであり、したがってディフューザの面積拡大比は2.0である。燃烧筒のモデルは、先端部が半径50 mmの半円形で、それに続く壁面は平行である。プレディフューザは広がり角 $2\alpha=10^\circ$ を用い、長さ L は20 mmである。プレディフューザ出口から燃烧筒先端部までの距離であるダンプギャップ D を可変とし、 $D/H_1=1$ および3を用いて測定を行った。 $D/H_1=3$ は圧力回復が良好で、1は圧力損失が大きい場合に対応する⁽⁵⁾。

座標系は、プレディフューザ入口を $X=0$ 、プレディフューザの高さ中央を $Y=0$ とし、下流方向に X 軸、高さ方向に Y 軸を設定した。また $X-Y$ 平面に垂

直方向の流路中央を $Z=0$ とし、流路幅方向に Z 軸をとる。測定は $X=-2H_1, Y=0$ の基準点における流速 U_{ref} を $30.7 \text{ m/s} \pm 1.0\%$ の条件の下で行い、この場合、 H_1 を代表長さとしたレイノルズ数は 3.84×10^4 である。

本測定に用いたLDVの光学配置を図3に示す。このLDVは前方散乱形であり、4枚のミラーを用いて流路中央($Z=0$)の $X-Y$ 平面内で交差角 2.39° の測

図2 測定部概略

図1 実験装置

図3 LDV 光学配置

定体積 ($0.22 \times 0.22 \times 5.30 \text{ mm}^3$) を移動させることができる。図4に本LDVシステムのブロック線図を示す。本LDVシステムは、15 mWのHe-Neレーザを光源とし、逆流測定用の周波数シフタを備えている。トレーサにはサラダ油をネブライザにより霧状にした後、流路入口部に設置したシーディングプロブより噴霧したものを用いる。このシーディングプロブは、測定部の流れに影響を及ぼさないことが確認されている。信号処理にはトラッカタイプを用い、速度信号の出力電圧は12 bitのA/Dコンバータを介してマイクロコンピュータのメモリに取り込まれ、所定のサンプリング数(2048点)に達した後、フロッピーディスクに記録される。サンプリングでは、バイアス効果、トレーサ粒子1個につき1出力信号の抽出およびトラッカの応答遅れによる不確実信号の除去を考慮している。ディスクに記録されたデータは、3 σ 法による統計処理を行い、不良データを除去した。速度ベクトル、変動速度成分およびレイノルズ応力を個別の測定値から得るため、レーザ光面をX軸に対し、0°, $\pm 45^\circ$ 傾けた場合のそれぞれの速度信号を求め、これをベクトル演算することにより算出した⁽⁸⁾。

壁面センサ(マイクロフローセンサ)は、壁面近傍の流れの方向と壁面摩擦速度を測定できるセンサである⁽⁹⁾。このセンサにより壁面摩擦速度を求めるため、高さ10 mm、長さ2000 mmの十分発達した二次元流路を用いて検定した。出力電圧は、A/Dコンバータを介してマイクロコンピュータに取り込まれ、このとき、サンプリング数は32768点で、サンプリング周波数は1 kHzである。また順流率とは、ある一定時間内に流れが下流方向に向かう時間的な割合を示し、本研究では、サンプリングされた32768個の全データに対し、正の符号を持つデータの割合を順流率とする。

図4 LDVシステムブロック線図

4. 実験結果および考察

4.1 時間平均流動機構 図5(a)に $D/H_1=3$ 、図5(b)に $D/H_1=1$ の速度ベクトル線図を示す。プレディフューザを出た流れは、自由噴流のように徐々に拡散し、燃焼筒に衝突後それに沿って流れる。それに対し $D/H_1=1$ では、プレディフューザを出た流れは燃焼筒により急激に偏向され、直ちに分流路に流入する。図6に $D/H_1=3$ と1の急拡大部における速度ベクトル線図を示す。これは図5の速度ベクトルを拡大したものである。 $D/H_1=3$ の場合、急拡大部に存在する再循環渦内の分流路入口付近において、それよりサイズの小さい渦が確認できる。この渦は再循環渦と同じ回転方向を持つが、ベクトル線図から明らかなように、その角速度は大きい。すなわち、燃焼筒に衝突した流れは、外側に向かい外壁面に再付着し、分流路に流入するものと外壁面に沿って逆流する流れにわかれる。ここで、再付着後、逆流した流れの一部は巻き上がり、分流路入口付近に付加的な巻上り渦が発生する。このように再循環領域に二つの渦が形成されることが詳細な測定により確認された。

(a) $D/H_1=3$

(b) $D/H_1=1$

図5 速度ベクトル線図

図7に等 U 線図を示す。これは、速度ベクトルに対し三次の補間式を用いて求めたものである。 $D/H_1=3$ では、プレディフューザを出た流れは、燃焼筒に近づくにつれ減速する。分流路入口付近では等値線が密になり、速度こう配が大きいことがわかる。この領域は、速度ベクトル線図より巻上り渦の流れが急激に湾曲する部分に相当する。外壁面に沿って逆流する流れは、プレディフューザ基部($X/H_1=0$)の壁面の存在により減速する。また $U=0$ の軌跡より、再付着点の位置が $X/H_1=5.5$ 付近であることが予測される。 $D/H_1=1$ のケースでは、分流路入口付近の速度こう配が大きい領域が広い。この場合、再付着点の位置が $X/H_1=4$ 付近であることが予測される。

図8に等 V 線図を示す。 $D/H_1=3$ の場合は、 $X/H_1=4$ から5の範囲の外壁面付近は V が負の値を持つ領域であり、この領域において流れが巻き上がることを示す。また、巻き上がる流れと燃焼筒に沿う流れとは互いに干渉し合い、巻上りは燃焼筒に沿う流れによる影響を受け、そこで急拡大部方向に向かう。逆に燃焼筒に沿う流れは巻上りによる影響を受け、燃焼筒先端部 $\phi=45^\circ$ の付近で燃焼筒に沿う流れの幅が狭められ、そこで増速している。燃焼筒に沿う流れに与

(a) $D/H_1=3$ (b) $D/H_1=1$ 図7 等 U 線図 (a) $D/H_1=3$ (b) $D/H_1=1$

図6 急拡大部の速度ベクトル線図

(a) $D/H_1=3$ (b) $D/H_1=1$ 図8 等 V 線図

える巻上りの影響が、ダンプディフューザの流量配分機構に大きく影響すると考えられる。

4.2 乱流運動エネルギー 図9に乱流運動エネルギー k を基準点流速 U_{ref} で無次元化した分布を示す。ここで、 Z 方向の変動速度成分を w とし、 $\overline{w^2}$ を $\overline{u^2}$ と $\overline{v^2}$ の相加平均と近似することにより、乱流運動エネルギー k を以下のように定義する。

$$k = \frac{3}{4}(\overline{u^2} + \overline{v^2})$$

$D/H_1=3$ における分布は、噴流のせん断層において高い値を示し、急拡大部では低い値を示す。しかし下流に向かうにつれ、 $X/H_1=3.5$ および 4 において見られるように二つのピークを持つ分布となる。流路の中心線側のピークは噴流のせん断層によるものであり、外壁面側のピークは巻上り渦によるものである。この場合、巻上り渦付近に見られるピークは、その渦の分流路側の領域に対応する。 $X/H_1=4.5$ および 5 に至り、燃焼筒に沿う流れのせん断層によるピークと巻上り渦によるピークと重なり、さらに高い値を示す。この領域で生成された乱流運動エネルギーは、分流路に向かい減少するが、一部は逆流によって急拡大部に運ばれ、徐々に拡散する。そのため急拡大部では、逆流領域でわずかに高い値を示す。よって急拡大部では、分流路

入口付近で発生する大きな乱れのエネルギーが拡散していると考えられる。 $D/H_1=1$ では、巻上り渦の領域において $D/H_1=3$ のケースよりもさらに大きな値を示す。

4.3 レイノルズせん断応力 図10に等レイノルズせん断応力線図を示す。 $D/H_1=3$ および 1 のどちらの場合も、乱流運動エネルギーと同様に、巻上り渦の分流路側の領域において高い値を示す。これより、この領域では平均流と変動流間のエネルギー交換が顕著であり、つまり乱流運動エネルギーが生成され、平均流のエネルギー損失となる。 $D/H_1=1$ の場合、この領域でのレイノルズせん断応力の値は、 $D/H_1=3$ の場合

(a) $D/H_1=3$

(b) $D/H_1=1$

図10 等レイノルズせん断応力

(a) $D/H_1=3$

(b) $D/H_1=1$

図9 乱流運動エネルギー分布

図11 壁面摩擦速度分布

図 12 壁面摩擦速度の RMS 値分布

に比してかなり大きい。よって $D/H_1=1$ の場合、この領域における損失がより大きく、ディフューザ出口での圧力損失の測定結果⁽⁵⁾⁽⁶⁾によると、 $D/H_1=3$ の場合よりも大きな圧力損失を示す。そこで、この領域におけるエネルギー損失が、ダンプディフューザの圧力損失の大きな原因の一つと考えられる。

4・4 壁面摩擦速度およびその変動 図 11 に壁面センサにより求めた壁面摩擦速度の分布を示す。 $D/H_1=3$ の場合、分流路入口付近で巻上り渦が発生する領域である $X/H_1=5$ から 6 の範囲で、特に大きなこう配を持つ。また、急拡大部では $X/H_1=5$ で最小値に達した後、プレディフューザ基部 ($X/H_1=0$) に向かい減衰するが、これは外壁面に沿って逆流する流れが徐々に減速することを示し、LDV の結果と良く一致している。 $D/H_1=1$ の場合も同様に、 $X/H_1=3$ 付近で壁面近傍における逆流方向の流速が最大に達した後、プレディフューザ基部に向かうにしたがい $v^*=0$ に近づく、そのこう配は $D/H_1=3$ の場合に比べて大きくなる。これは、 $D/H_1=1$ の場合は急拡大部が小さく、プレディフューザ基部の壁面の影響が、分流路入口付近まで及んでいることを示す。

次に、壁面摩擦速度の時系列データからその RMS 値を求め、 $D/H_1=3, 1$ のそれぞれの場合を図 12 に示す。 $D/H_1=3$ および 1 は共に、巻上り渦が生じる領域でピークを示す。 $D/H_1=3$ の場合、ピークの前後で変動値は急激に減少し、 $X/H_1=4.5$ 付近から $X/H_1=0$ に向け緩やかに減少する。よって外壁面に沿って逆流する流れは、小さな変動成分しか持たないと考えられる。 $D/H_1=1$ の場合は、 $X/H_1=3$ 付近から $X/H_1=0$ へ変動値は減衰するが、そのこう配は $D/H_1=3$ に比べて小さい。

4・5 順流率 図 13 に順流率分布を示す。 $D/H_1=3$ の場合、 $X/H_1=5$ から X 方向へは、後方ステップ流れに見られる再循環渦の長さスケールと比較して急激な順流率の上昇が見られ、再付着点の移動範囲が狭い

図 13 順流率分布

ことを示す。

5. 結 論

ダンプディフューザの急拡大部において、LDV 計測システムにより、平均速度、乱流運動エネルギーおよびレイノルズせん断応力を求め、さらに壁面センサにより外壁面における壁面摩擦速度およびその変動成分、順流率の測定を行った。その結果、以下の結論を得た。

(1) 燃焼筒に衝突し、外壁面に再付着した流れの一部が巻き上がるにより再循環領域に付加的な渦が形成される。

(2) この渦が大きな乱流運動エネルギーを発生し、圧力損失の原因の一つとなる。

(3) 鈍頭形の燃焼筒先端部は、高い損失の原因となり、急拡大部は乱流運動エネルギーの拡散を促進する。

(4) 急拡大部の外壁面に沿う流れは、プレディフューザ基部の壁面の存在により徐々に減速し、巻上り渦の領域で発生する乱れは減衰する。

(5) ダンプディフューザの外壁面における再付着点の移動範囲は狭い。

最後に、LDV に関して多くの貴重なご意見をいただいた慶応義塾大学理工学部 前田昌信氏、菱田公一氏、また本研究の実施に際し多大な協力をいただいた本学卒研 橋詰勇、緒方秀樹、槌谷浩の各氏に感謝の意を表す。また、本研究は谷川熱技術振興基金より平成 2 年度の研究助成を受けた。ここに謝意を表す。

文 献

- (1) Biaglow, J. A., NASA TM, X-2216 (1971).
- (2) Stevens, S. J., ほか 2 名, AIAA, 76-726(1976).
- (3) Klein, A., ほか 2 名, Trans. ASME, J. Fluid Eng., 102 (1980), 236.
- (4) 佐藤・ほか 3 名, 第 12 回ガスタービン講演会論文集, (1984), 307.

- (5) 森岡・本阿弥, ガスタービン学会誌, 16-61 (1988), 81.
 - (6) Honami, S. and Morioka, T., *ASME*, 90-GT-90 (1990).
 - (7) 佐藤・本阿弥, ガスタービン学会誌, 18-71 (1990), 73.
 - (8) 菱田・ほか 2 名, 機論, 51-467, B (1985), 2176.
 - (9) 久保田・ほか 7 名, 機論, 56-530, B (1990), 2858.
-