マッハ数を考慮したサイドジェットの形成条件

Effects of Mach number, momentum thickness ratio and density ratio on the side-jet formation in round jets with variable-density

○正 村松 旦典 (日大・理工) 学 金田 康宏 (日大院・理工)
岩倉 徹 (日大・理工) 高橋 真璃子 (日大・理工)

Akinori MURAMATSU, Nihon University, College of Science and Technology, Narashino-dai, Funabashi 274-8501
Yasuhiro KANEDA, Nihon University, Graduate School of Science and Technology, Narashino-dai, Funabashi 274-8501

Toru IWAKURA, Nihon University, College of Science and Technology, Narashino-dai, Funabashi 274-8501

Mariko TAKAHASHI, Nihon University, College of Science and Technology, Narashino-dai, Funabashi 274-8501

When a low density gas compared with the ambient gas is discharged from a round nozzle, side jets that are radial ejections of jet fluid are generated at the initial region. The density ratio between the jet fluid and the ambient fluid is a main parameter for side-jet formation. Since the side-jet formation is also related to the instability of shear layer, another parameter is a ratio of the momentum thickness and the nozzle diameter at the nozzle exit. Compressibility suppresses the generation of the side jets. The variable-density jets were issued from two round nozzles, which have different area contraction ratio, with various jet-speed. Effects of the density ratio, the momentum thickness ratio and the Mach number, which is defined by the issuing conditions, on the side-jet formation are researched experimentally. An existence of side jets was confirmed by flow visualization using a laser sheet.

Key Words: Side jet, Variable density jet, Round jet, Instability, Mach number, Momentum thickness, Density ratio

1. はじめに

周囲流体より噴出流体の密度が十分に低い円形噴流の初期領域で、サイドジェット^{(1)~(3)}と呼ばれる噴流コア領域から半径方向外側への流出現象を生じる場合がある。サイドジェットが形成されると、噴流初期領域から周囲流体と噴流流体との混合が起こり、噴流による流体混合が促進される。しかし、サイドジェットがどのようなメカニズムで形成されるのか、サイドジェットがどのような条件のもとで形成されるか、といった具体的なことは未だにわかっていない。

サイドジェットの形成条件に関して、Monkewitz ら⁽⁴⁾は加熱した円形空気噴流を対象として線型安定解析を行い、噴流流体と周囲流体との密度比 S が 0.72 以下で、噴流の噴出速度を周囲流体の音速で無次元化したマッハ数 M があまり大きくないとき、噴流が局所的に絶対不安定となることを示した。さらに、Monkewitz ら⁽¹⁾はこの局所絶対不安定となる条件下で実験を行い、噴流が自励振動しサイドジェットが生じることを示した。また、サイドジェットの形成には噴流剪断層の Kelvin-Helmholtz 不安定が関係するので、噴流の剪断層が薄く速度勾配が大きいときにサイドジェットが生じやすい。これを定量的に評価するためのパラメータとして、ノズル出口での運動量厚さ θ_0 とのノズル出口直径 D_0 の比 D_0/θ_0 が使用されている^{(2), (5)}。Kaneda ら⁽⁵⁾はサイドジェット形成のための D_0/θ_0 の下限の値はおおよそ 20 であることを示している。

Monkewitz ら⁽⁴⁾が示したように、圧縮性によりサイドジェットの形成が阻害されると考えられるので、ここでは Kaneda らの実験⁽⁵⁾においてパラメータとした密度比 S と運動量厚さの比 D_0/θ_0 に、マッハ数 M を加えてサイドジェットの形成条件を実験的に調べた。

2. 実験装置および方法

実験に使用した噴出気体はヘリウムガス、ヘリウムガスと空気の混合気体、空気および炭酸ガスである。これらの気体を出口直径 $D_0 = 8 \text{ mm}$ の円形ノズルから鉛直上方に静止大気中へ噴出した。円形ノズルの面積縮流比 CR は 9.8 と 68.1 であり、主に前者のノズルを使用した。噴出気体の密度 ρ_0 と

周囲気体 (ここでは空気) の密度 ρ_∞ で定義される密度比 $S = \rho_0/\rho_\infty$ は 0.14, 0.3, 0.5, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 1 および 1.53 に設定した。なお、同一の噴出速度、すなわち同一の噴流レイノルズ数 Re において、ノズル出口で形成される剪断層の速度勾配、すなわち運動量厚さを変えるために、面積縮流比 CR を変えている。ここで、噴流レイノルズ数 Re は $Re = U_{e0} \cdot D_0/\nu_0$ で定義され、 U_{e0} はノズル出口での中心軸上速度、 ν_0 は噴出気体の動粘性係数である。

ノズル出口より 0.5 mm 下流での噴流の半径方向速度分布を熱線濃度計と熱線風速計を併用して測定した。測定された速度分布の形状を双曲正接関数で近似してから積分を行い、運動量厚さ θ_0 を求めた⁽⁵⁾。ここで、 θ_0 はノズル出口における噴流に形成される剪断層の厚み、すなわち速度勾配を定量化するために用いているので、剪断層に形成される濃度境界層内の密度変化は考慮しない値を用いる⁽⁶⁾。サイドジェット形成の有無は散乱粒子を混入した噴流を厚さ約 1 mm のレーザシートにより可視化して調べた。

3. 実験結果および考察

噴出気体がノズルより層流境界層を形成して噴出されるとき、図 1 に示されるように運動量厚さ θ_0 は $1/\sqrt{Re}$ に比例し、密度比 S にほとんど依存しない⁽⁵⁾。 θ_0/D_0 は面積縮流比 CR によって変わり、次式で近似できる。

$$\begin{aligned} \theta_0/D_0 &= 1.09/\sqrt{Re} \quad (CR=9.8) \\ &= 0.837/\sqrt{Re} \quad (CR=68.1) \end{aligned} \quad (1)$$

図 2 に噴流を可視化した写真を示す。サイドジェットは噴流が乱流へ遷移する前のコア領域からの噴流半径方向外側への流出現象として判断している⁽⁷⁾。すなわち、図 2(a)がサイドジェットを形成する場合、図 2(c)が形成しない場合となる。図 2(b)のような微小な周囲方向への噴出がある噴流は空気噴流でも観察されることがあり形成の有無を判断できないとする。図 2(a), (b), (c)の噴流に対して、それぞれ記号を●, ▲, ◆を使って識別結果を表わすことにする。

サイドジェット形成の有無を S と D_0/θ_0 ついて、上述の記

Fig. 1 A relationship between momentum thickness ratio and jet Reynolds number

(a) Side jet ● (b) Undecided ▲ (c) No side jet ◆

Fig. 2 Examples for determination of side-jet formation

- (a) $S=0.17$, $D_0/\theta_0=26$, $M=0.03$
 (b) $S=0.80$, $D_0/\theta_0=58$, $M=0.03$
 (c) $S=0.14$, $D_0/\theta_0=22.5$, $M=0.02$

Fig. 3 A domain for side-jet formation by density ratio and momentum thickness ratio

Fig. 4 A domain for side-jet formation by density ratio and Mach number

Fig. 5 A domain for side-jet formation by Mach number and momentum thickness ratio

号●, ▲, ◆を使って整理すると図3のようになる。サイドジェットが形成される領域(赤), 判別が出来ない領域(青)とサイドジェットが生じない領域(緑)として色分けした。 D_0/θ_0 が大きくなると, すなわち, 速度勾配, または Re が大きくなってもサイドジェットが形成されない領域があることがわかる。サイドジェットが形成される領域(赤)の D_0/θ_0 の上限値は約 130 であり, Kyle らの自励振動が生じる上限値 120⁽²⁾ とほぼ一致している。また, S の上限値は約 0.7 であり, Monkewitz らの実験値⁽¹⁾ と一致する。

次に, S と M について, 図3と同様に整理した結果を図4に示す。赤色で示されるサイドジェット形成領域に上限と下限の値が存在する。 M の下限値は S の値によらず約 0.03 の値をとる。一方, M の上限の値は S が小さいほど大きく, S の上限値である 0.7 では M は約 0.06 となった。Monkewitz らの安定解析では $S=0.5$ で $M=0.3$ が上限値である⁽⁴⁾ が, 本実験では $M=0.21$ となり, おおよそ一致している。なお, M の増加によって, 一般的に乱れの増幅が抑えられる傾向にあることが知られている。

密度比 S をパラメータにして, 運動量厚さの比 D_0/θ_0 を横軸に, マッハ数 M を縦軸にしてサイドジェット形成領域の関係を表した図を, 図5示す。 D_0/θ_0 が小さくなると, Kelvin-Helmholtz 不安定による剪断層のロールアップが起こらずサイドジェットが形成されないと考えられるので, D_0/θ_0 には M に応じて下限が存在するはずであるが, 現時点では不明であり, 図5において色をつけていない。

引用文献

- (1) P. A. Monkewitz, D.W. Bechert, B. Barsikow and B. Lehmann, Self-excited oscillation and mixing in a heated round jet, *J. Fluid Mech.*, 213 (1990), pp. 619-639.
- (2) D. M. Kyle and K. R. Sreenivasan, The instability and breakdown of a round variable-density jet, *J. Fluid Mech.*, 249 (1993), pp.619-664.
- (3) A. Muramatsu, M. Gamba, and T. N. Clemens, Side jets generated in a round helium gas jet, 2nd International Conference on Jets, Wakes, and Separated Flows, CD-R (2008).
- (4) P. A. Monkewitz and K. D. Sohn, Absolute instability in hot jets, *AIAA J.*, 26 (1988), pp.911-916.
- (5) Y. Kaneda and A. Muramatsu, Effects on momentum thickness and density ratio for side-jet formation in round jets with variable-density, *Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011*, USB (2011).
- (6) Michalke, A., Survey on jet instability theory, *Prog. Aerospace Sci.*, 21, (1984), pp.159-199.
- (7) Muramatsu, A., Side-jet formation in pulsed air jets. 3rd International Conference on Jets, Wakes, and Separated Flows, CD-R (2010).