

K7-53

## 二次元噴流のノズル出口における速度分布と密度分布の測定 Measurements of velocity and density profiles at the nozzle exit in a planar jet

○辻村佐和子<sup>1</sup>, 須川貴史<sup>2</sup>, 加藤優志<sup>2</sup>, 村松旦典<sup>3</sup>, 菊池崇将<sup>3</sup>\*Sawako Tsujimura<sup>1</sup>, Takafumi Sugawa<sup>2</sup>, Yushi Kato<sup>2</sup>, Akinari Muramatsu<sup>2</sup>, Takamasa Kikuchi<sup>2</sup>

Side jets, which are radial ejections of fluid, are formed in the near field of low-density, round jets, such as helium gas jets. The side-jet formation depends on many conditions, such as the density ratio between issuing gas and the ambient gas, velocity gradient at the nozzle exit, and relation between density and velocity profiles at the nozzle exit. Recently, the side-jet formation was observed in planar jets. The purpose of this research is to investigate relationships between the side-jet formation and the velocity and density profiles in the planar jet.

### 1. 緒言

サイドジェットとは、円形ノズルから噴出させた気体がノズル出口近傍で主流方向とは異なる半径方向外側へ噴流が流出する現象である<sup>[1]-[4]</sup>。周囲気体に対する噴出気体の密度比  $S$  がおよそ 0.7 以下であることがサイドジェットの発生のための必要条件であるとされている<sup>[4]</sup>。また、サイドジェットの発生にはノズル出口速度勾配が関係し、運動量厚さ  $\theta_0$  を使って評価されている<sup>[2], [4]</sup>。

サイドジェットの形成には渦輪の周方向変形が影響していると考えられてきた<sup>[3]</sup>が、近年、渦輪の周方向の変形が生じない二次元噴流においてもサイドジェットが発生することが示された<sup>[5]</sup>。また、須川らは 2 次元噴流の渦形成における密度の効果調べている。ノズル出口での速度分布と密度分布は一致しないが、近年、ノズル出口での速度分布と密度分布の変曲点の位置関係が噴流の安定性に強く影響することが示された。

本研究の目的は、2 次元噴流でのノズル出口での速度および密度分布を測定し、サイドジェット形成との関係を調べることである。

### 2. 実験装置及び実験方法

実験装置の概略図を図1に示す。実験には縮流比6で4 mm × 12 mmの矩形ノズルを使用した。噴出気体は空気を使用し、矩形ノズルから静止空气中に鉛直上向きに噴出させた。速度分布は熱線風速計を用いて測定する。熱線プローブは主流に対して平行にセットし、ノズル出口から0.5 mm下流の位置で、短辺方向においてノズル両端0.5 mm外側まで測定した。カノマックス社製のI型熱線プローブを使用し、測定部のタングステン線は長さ1 mm、直径5 μmである。熱線風速計のCTAにはカノマックス社のものを使用し、オシロスコープ

でモニタする。空気の流量はオリフィス流量計を用いて調節した。CTAからの出力電圧はデジタルデータに変換しPCに記録するため、16ビットのNational Instruments社製のA/Dコンバータを使用した。測定点1点当たりの計測時間は1秒でサンプリングレート10 kHz、遮断周波数5 kHz、サンプル数32768個に設定した。噴流のレイノルズ数 $Re$ は1000から7000の範囲で測定した。 $Re$ の代表速度は噴流中心線上での噴出速度、代表長さは矩形ノズルの短辺側の幅 $h = 4$  mmである。

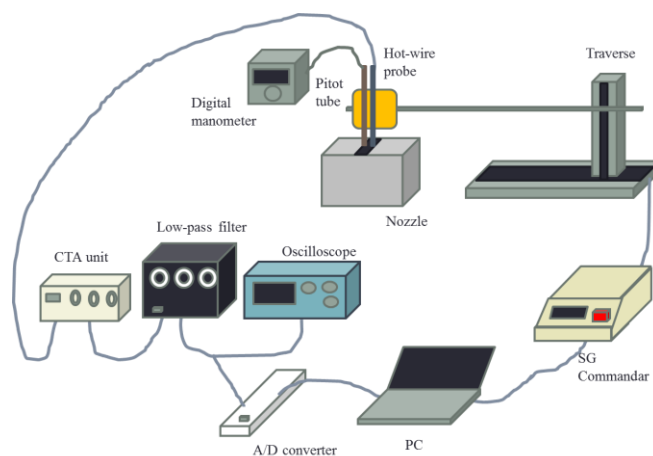


Figure 1. Experiment apparatus

### 3. 実験結果

今回の実験では、噴出気体を空気とし密度比  $S = 1$  において速度分布を測った。無次元したノズル出口での速度分布  $U_0$  を図3に示す。中心線上の速度が必ずしも最大値とはならない<sup>[6]</sup>ので、分布の最大値  $U_{0max}$  で  $U_0$  は無次元化している。座標  $y$  は矩形ノズルの短辺幅  $h$  で無次元化している。平面噴流においても円形噴流<sup>[4]</sup>と同様にレイノルズ数が大きくなるに従って速度勾配が大きくなる。

速度勾配を定量化するために、式 (1) で定義される運動量厚さを導入する。

$$\theta_0 = \int_{\delta} \frac{u_0}{u_{co}} \left(1 - \frac{u_0}{u_{co}}\right) d\delta \quad (1)$$

積分範囲の  $\delta$  は噴流の剪断層を示す。噴流剪断層の運動量厚さ  $\theta_0$  を求めるために、測定された速度分布を双曲線正接関数で近似を行った<sup>[4], [6]</sup>。噴流はノズル出口で層流境界層を形成して噴出しているため、 $\theta_0$  は  $1/\sqrt{Re}$  に比例する<sup>[4], [6]</sup>。今回の実験で測定した速度分布より得られた結果と矢崎の実験結果<sup>[5]</sup>を直した結果との無次元運動量厚さ  $\theta_0/h$  と  $1/\sqrt{Re}$  の関係を図 4 に示す。新たに  $Re = 5000, 6000, 7000$  測定した今回の実験でも、 $\theta_0/h$  は  $1/\sqrt{Re}$  に比例することが確認されたが、矢崎の実験結果<sup>[5]</sup>とは一致していない。

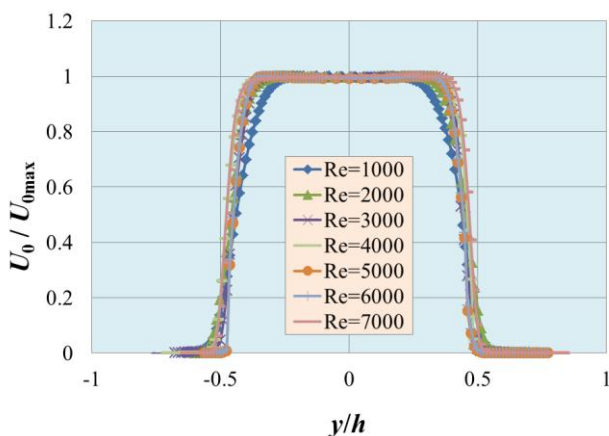


Figure3. Velocity profiles of air-jets

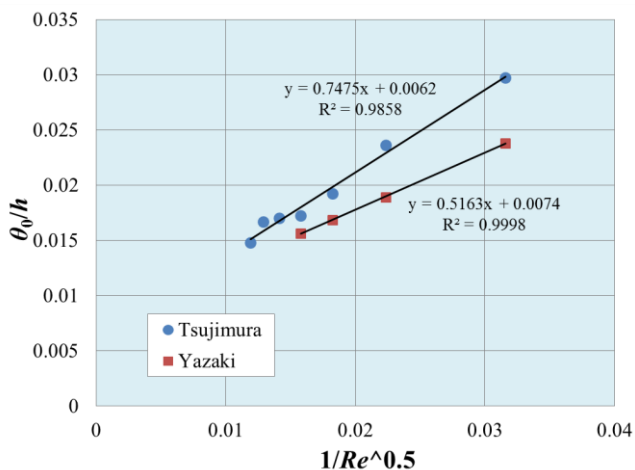


Figure4. Relationship between  $\theta_0/h$  and  $1/Re^{0.5}$

#### 4. 今後の課題

サイドジェット形成の有無を判断するため、可視化実験を行う必要がある。熱線濃度計<sup>[4]</sup>を製作し、ヘリウムガス、空気とヘリウムガスとの混合の噴出気体に

ついても速度分布を計測し、サイドジェットの形成との関係を調べる。

#### 5. 熱線濃度計

空気と物性値が異なる気体をノズルから噴出させた場合、噴出気体と周囲気体との混合層において、熱線風速計では正しい速度の値が示されない。これは、熱線からの放熱量が流速と物性値（おもに熱伝導率）により変化するためである。物性値の変化を測定して、熱線風速計の出力電圧を補正することにより混合気体の速度を求めることができる<sup>[4]</sup>。熱線濃度計は濃度計内を減圧することによって先端のパイプより流体を吸入し、内部に設置された熱線周りの流速はほぼ一定となり、物性値のみによる変化を熱線の出力電圧から計測するものである<sup>[4]</sup>。現在、製作中の熱線濃度計の断面図を図 5 に示す。

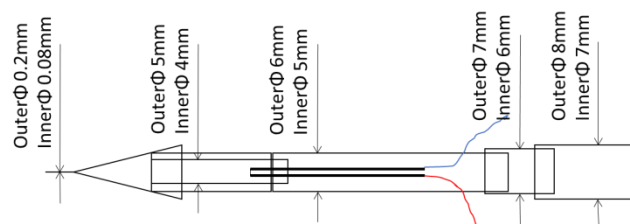


Figure5. Hot-wire concentration probe

#### 6. 参考文献

- [1] P. A. Monkewitz, D. W. Bechert, B. Barsikow and B. Lehmann, J. Fluid Mech., Vol. 213, pp. 611-639, (1990).
- [2] D. M. Kyle, D. M. Sreenivasan, K. R., J. Fluid Mech., vol. 249, pp. 619-664, (1993).
- [3] Muramatsu A., Gamba, M., and Clemens, T. N., Proceeding of 2nd international Conference on Jets, Wakes, and Separated Flows, (2008).
- [4] 金田康宏, サイドジェット発生のための噴出条件と非対称構造, 日本大学大学院理工学研究科修士論文, (2012).
- [5] 矢崎亮助, 「二次元低密度気体噴流におけるサイドジェットの形成」, 平成 26 年度日本大学理工学部航空宇宙工学科卒業論文, (2015).
- [6] 加藤優志, 「円形・等密度気体のサイドジェットの形成条件と速度勾配の関係」, 平成 28 年度日本大学理工学部航空宇宙工学科卒業論文, (2017).
- [7] Lesshafft, L. and Marquet, O., Optimal velocity and density profiles for the onset of absolute instability in jets, J. Fluid. Mech., vol. 662, pp. 398-408, (2010).