

K3-12

## 円形・等密度噴流のサイドジェットの形成と速度勾配の関係

## Effect on initial velocity gradient on side-jets formation in a round jet with uniform density

○加藤優志<sup>1</sup>, 村松旦典<sup>2</sup>\*Yushi Kato<sup>1</sup>, Akinori Muramatsu<sup>2</sup>

Side jets are radial ejections formed at the initial region of a jet. It is known that the side jets are generated in a sufficiently low density jet. However, it was recently found that the side jets are formed in the initial region of a round jet when the density ratio is unity. Relationship between the side-jets formation and the non-dimensional momentum thickness is experimentally examined in isothermal air jets.

## 1. 緒言

円形ノズルから噴出させた気体がノズル出口近傍において、噴出気体が主流方向の他に半径方向外側へ噴出する現象が起こる。この現象はサイドジェットと呼ばれ、周囲気体との混合を促進する働きが期待されているが、その発生条件や構造はいまだよく分かっていない<sup>[1]</sup>。従来の実験では、サイドジェットの形成条件は噴出気体と周囲気体の密度比  $S$  が約 0.7 以下とされていたが<sup>[1]</sup>、近年、 $S=1$  の空気噴流でもサイドジェットの発生が確認された<sup>[2]</sup>。また、これまでの研究によると、サイドジェットの形成には噴流の密度比だけではなく、ノズル出口での噴流の剪断層の速度勾配が関係し、それを評価するために噴流剪断層の運動量厚さが使われている。本実験では、 $S=1$  の空気噴流について、サイドジェットの形成と無次元化した運動量厚さの関係について調べた。サイドジェットの形成の識別は噴流の可視化により行った。運動量厚さを求めるための速度分布の測定はノズル出口近傍においてレイノルズ数  $Re = 800 \sim 20,000$  の範囲で測定を行った。実験の結果、サイドジェットが発生する条件として噴流剪断層の無次元化した運動量厚さの値に上限値と下限値が存在することが示された。

## 2. 実験装置及び実験方法

空気噴流を円形ノズルから静止空気中に鉛直上方へ噴出した。実験で使用した出口直径  $D_0$  の異なる 3 種類のノズルの仕様を表 1 に示す。実験はそれぞれのノズルについて  $Re$  が 800 から 20,000 の範囲で行った。 $Re$  の代表速度にはノズル出口中心での噴出速度  $U_{c0}$ 、代表長さには  $D_0$  を使っている。実験条件を表 2 に示す。厚さ 1 mm のレーザーシートがシリンドリカルレンズにより作成し、ノズル出口中心軸を通る噴流に照射した。可視化された噴流はハイスピードカメラを用いて撮影をした。速度分布  $U_0$  はノズル出口から下流 0.5 mm

Table.1 Specifications of nozzles.

Exit diameter $D_0$	8 mm	12 mm	16 mm
Nozzle length	100 mm	100 mm	100mm
Area contraction rate	68.1	30.3	17.0

Table.2 Experimental conditions.

Gas	Air
Density ratio, $S$	1
Nozzle diameter, $D_0$ (mm)	8, 12, 16
Jet Reynolds number	800 – 20,000
Issuing velocity $U_{c0}$ for $D_0 = 8$ mm (m/s)	1.49 – 37.2
Issuing velocity $U_{c0}$ for $D_0 = 12$ mm (m/s)	0.98 – 24.9
Issuing velocity $U_{c0}$ for $D_0 = 16$ mm (m/s)	0.74 – 18.4

の位置をノズル出口として、熱線風速計を使用して測定した。熱線風速計には直径 5  $\mu\text{m}$ 、長さ 1 mm の I 型プローブを使用し、得られた信号はローパスフィルタを介して、16 ビットの A/D コンバータによってデジタルデータに変換して PC に記録した。計測条件は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。

## 3. 実験結果

噴流の可視化結果からサイドジェット発生の有無を判断した結果を表 3 に示す。表 3 の○と×印はそれぞれサイドジェットの形成が確認されたことと、確認されなかったことを示し、一印は実験装置の都合上、計測が行うことができなかったことを表している。この結果よりサイドジェットが形成される  $Re$  の範囲があることが分かる。ノズル出口から下流 0.5 mm での半径方向の無次元化した速度分布  $U_0/U_{0\text{max}}$  を、代表として 4 つの  $Re$  について  $D_0 = 8$  mm のノズルを使用したときの結果を図 1 に示す。図 1 に示されるように、必ずし

1 : 日大理工・院 (前)・航宇 2 : 日大理工・教員・航宇

も噴流中心軸上の値が最大値  $U_{0max}$  とはなっていない。図 1 の速度分布は  $U_{0max}$  で無次元化して示されている。速度分布の測定結果から運動量厚さを求めた。速度勾配を評価するためであるから、運動量厚さは次式で定義される  $\theta_0$  を使用する。ここで、 $U_{0max}$  は  $U_0$  の最大値である。

$$\theta_0 = \int_{\delta} \frac{u_0}{u_{0max}} \left(1 - \frac{u_0}{u_{0max}}\right) d\delta \quad (1)$$

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、図 2 のように測定された速度分布を線形安定論で使用されてきた双曲線正接関数で近似を行う。近似曲線は剪断層の速度勾配を重視し速度勾配をフィッティングするようにした。得られた近似曲線から、式 (1) に基づいて数値積分して、 $\theta_0$  を算出した。噴流はノズル出口では層流境界層を形成して噴出しているため、 $\theta_0$  は  $1/\sqrt{Re}$  に比例することが知られている。3つのノズルについて、無次元運動量厚さ  $\theta_0/D_0$  と  $Re$  の平方根の逆数  $1/\sqrt{Re}$  との関係を図 3 に表す。 $\theta_0/D_0$  と  $1/\sqrt{Re}$  の関係を表す実験式は図 3 より切片を 0 とした最小二乗法を用いて式 (2) ~ (4) で与えられる。

$$\theta_0/D_0 = 0.8312(1/\sqrt{Re}) \quad (D_0 = 8 \text{ mm}) \quad (2)$$

$$\theta_0/D_0 = 0.7367(1/\sqrt{Re}) \quad (D_0 = 12 \text{ mm}) \quad (3)$$

$$\theta_0/D_0 = 0.6844(1/\sqrt{Re}) \quad (D_0 = 16 \text{ mm}) \quad (4)$$

可視化実験と比較した結果、供給できる空気流量の関係で高い  $Re$  が測定できなかった  $D_0 = 16 \text{ mm}$  を除いた 2 つノズルでは、サイドジェット形成には  $\theta_0/D_0$  に上限値及び下限値が存在することが分かる。以前の研究 [1] では  $\theta_0/D_0$  の上限値の存在のみ明らかにされていたが、本研究では上限値と下限値の両方が確認された。上限値の存在は、噴流の剪断層がロールアップすることがサイドジェット形成の必要条件であるためである。下限値はサイドジェットの形成と同じ位置で乱流に移ってしまうために存在すると考えている。また、 $\theta_0/D_0$  の上限と下限にばらつきが残っているのでさらに実験を行う必要がある。

#### 4. 参考文献

- [1] 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, 日本大学大学院修士論文, p.117, (2012).
- [2] 村松 旦典, 齋藤 真興, 川邊 健太, 菊池 崇将, 円形等密度気体噴流中に形成されるサイドジェット, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 0209 (2015).

Table 3. Relationship between Re and Side-jets formation

Re	D <sub>0</sub> (mm)			Re	D <sub>0</sub> (mm)		
	8	12	16		8	12	16
800	×	×	×	5,000	○	○	○
1,000	×	×	×	7,000	○	○	○
1,500	×	○	○	10,000	×	○	○
2,000	○	○	○	15,000	×	×	—
3,000	○	○	○	20,000	×	×	—
4,000	○	○	○				

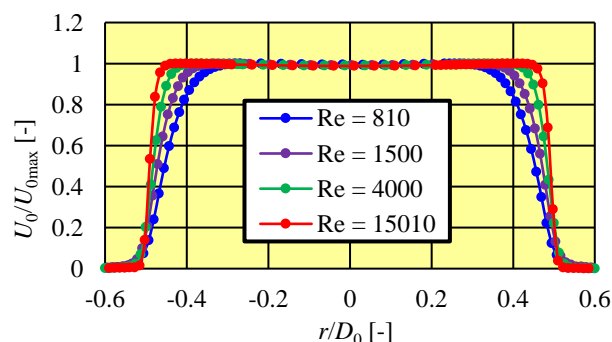


Figure 1. Velocity profiles ( $D_0 = 8 \text{ mm}$ ).

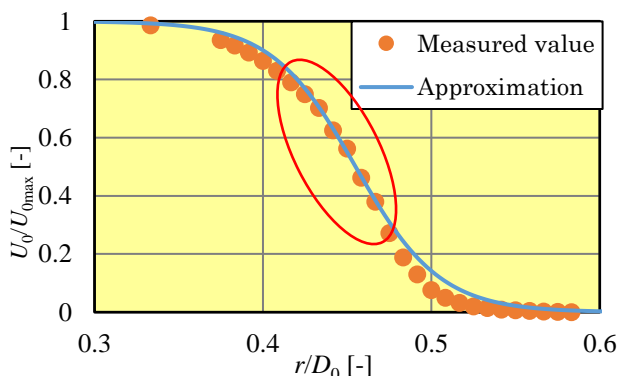


Figure 2. Approximation by the hyperbolic function

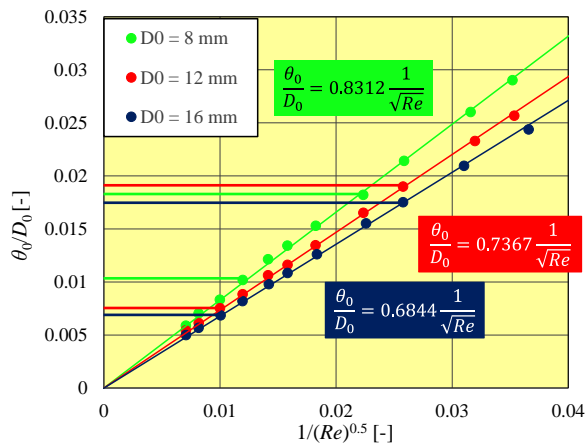


Figure 3. Relationship between  $\theta_0/D_0$  and  $1/Re^{0.5}$ .