円形噴流のサイドジェットの形成条件(運動量厚さの測定)

Effect on an initial velocity gradient of side-jets formation in a round jets

○加藤優志¹,村松旦典²,大竹智久²,菊池崇将² *Yushi kato¹, Akinori Muramatu², Tomohisa Otake², Takamasa Kikuchi²

Side jets are radial ejections in the core region of a round jet, when the density of the jet fluid is less than that of ambient gas. However, it was recently found that the side jets are formed in a round jet with uniform density. Velocity gradient in the jet shear layer at the nozzle exit is an important parameter for the side-jets formation. Momentum thickness at the nozzle exit is measured using a hot-wire anemometer, because the velocity gradient is estimated by the momentum thickness.

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未解明である^[1].これまでの実 験から,周囲気体密度に比べて密度の小さい気体を円 形ノズルから噴出させることによって,出口近傍にお いてサイドジェットの発生が確認されている.サイド ジェットが形成される条件は噴出気体と周囲気体の密 度比*S*が0.7以下とされていたが^[1],一昨年の実験^[2]で は,*S*=1の空気噴流でもサイドジェットの発生が確認 されている.また,サイドジェットの形成には噴流の 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^[1].

空気噴流の可視化実験結果をもとに、サイドジェットの形成と運動量厚さの関係について調べた^[3]. その 実験はノズルの出口直径 D₀が 12 mm と 16 mm の円形 ノズルを使用して行われたが、運動量厚さの測定値に 誤りがあることが判明した.また D₀=12 mm と 16 mm での必要なデータがすべて取られている訳ではない. そのため、本研究ではデータ処理の見直し及び速度分 布の測定を行う.同じ噴流レイノルズ数 Re の場合,D₀ が小さい方が噴出速度が大きくサイドジェットが激し く噴出するのではないかと考えられており、D₀=8 mm ノズルでの実験も行い、ノズル出口直径の違いによる 影響についても調べる.ここで、噴流レイノルズ数 Re は噴流のノズル出口中心での速度 U_{0max} と D₀ で定義さ れる.

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.静止空気中に円形 ノズルから鉛直上向きに噴出させた空気噴流のノズル

1:日大理工・学部・航宇 2:日大理工・教員・航宇

11111	a .	C* .*	C	1	
Table I	Snec1	fication	IS OF	n077	es
Tablet	opeer	nearion	10 01	HOLL	ic o

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	



Figure 1. Experiment apparatus

出口から 0.5 mm 下流の半径方向 r の速度分布 U_0 を熱線風速計を使用して計測した. ノズルは出口直径 $D_0 = 8$, 12 及び 16 mm のノズルを使用した. これらのノズルの仕様を表 1 に示す. トラバース装置で熱線風速計を水平方向に移動させた. トラバース装置は SG commander を用いて操作した. 熱線プローブで測定したデータは熱線風速計の簡易型 CTA ユニットの出力電圧を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, PC に記録した. 測定する際に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. 使用した熱線プローブは日本カノマックス社製の直径 5 μ m,

長さ1 mm の I 型プローブで, CTA の信号はオシロス コープでモニタした.

3. 実験結果

西川^[3]の実験データ ($D_0 = 8$, 12 mm) から運動量厚 さの再計算を行った.運動量厚さは次式で定義される.

$$\theta_0 = \int_{\delta} \frac{U_0}{U_{c0}} \left(1 - \frac{U_0}{U_{c0}} \right) d\delta \tag{1}$$

積分範囲の δ は噴流の剪断層を示す. 噴流剪断層の運 動量厚さ θ_0 を求めるために,図 2 のように測定された 速度分布を安定論で使用されてきた双曲線正接関数で 近似を行う. 西川は上側にフィッティングするように 近似したのに対し、ここで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近似曲線を設 定した. そうして得られた近似曲線を用いて,式(1) から数値積分して θ_0 を算出した. 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、 θ_0 は $1/\sqrt{Re}$ に比例することが知られている. 昨年の西川の計算結 果と、今回再計算した $D_0 = 12$ mm と 16 mm での無次 元運動量厚さ θ_0/D_0 と $1/\sqrt{Re}$ の関係を図 3 に示す.

 $D_0 = 8 \text{ mm} \mathcal{O} / \overline{X} \mathcal{V} \mathcal{O}$ 場合, Re = 800, 1000, 1500, 2000, 3000, 3500 及び 4000 で / $\overline{X} \mathcal{V}$ 出口の速度分布の 測定を行い, $D_0 = 12 \ge 16 \text{ mm}$ で $\mathcal{O} / \overline{X} \mathcal{V}$ と同様に運 動量厚さを求めた.無次元運動量厚さ $\theta_0 / D_0 \ge 1 / \sqrt{Re} \mathcal{O}$ 関係を, 今回実験を行った 8 mm の結果を再計算した 12 $\ge 16 \text{ mm} \mathcal{O} / \overline{X} \mathcal{V}$ での結果と合わせて図 4 に示す. $\theta_0 / D_0 \ge 1 / \sqrt{Re} \mathcal{O}$ 関係を表す実験式は図 4 より切片を 0 $\ge 1 c$ 最小二乗法を用いて式 (2) ~ (4) のように表 わせる.しかし, θ_0 / D_0 の測定値にばらつきがあるので さらに検討を行う必要がある.

 $\theta_0/D_0 = 0.8079 (1/\sqrt{Re}) \ (D_0 = 8 \ mm)$ (2)

$$\theta_0/D_0 = 0.7108(1/\sqrt{Re}) \quad (D_0 = 12 \, mm)$$
 (3)

$$\theta_0/D_0 = 0.6982(1/\sqrt{Re}) \quad (D_0 = 16 \, mm)$$
 (4)

4. 今後の課題

サイドジェットが形成する条件を調べるには、噴流 を可視化してサイドジェットの発生の有無を調べるこ とが必要である.今後は可視化実験を行い、サイドジ ェットの形成と運動量厚さとの関係を明確にする.さ らに、速度変動の空間増幅率を求め、サイドジェット の発生との関係を調べる.



Figure 2. Approximation by the hyperbolic function $(D_0 = 12 \text{ mm}, Re = 800)$



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



Figure 4. Relationship between θ/D_0 and $1/Re^{0.5}$

5. 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] 齋藤真興,円形噴流の初期領域に形成されるサイド ジェットの構造,平成26年度卒業論文,(2015).
[3] 西川尚哉,等密度な円形気体噴流のサイドジェットの形成条件,平成27年度卒業論文,(2016).