

Study on a jet with deflectors and tapered annulus

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/42266

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



偏向板およびテーパ環を有する
噴流に関する研究

Study on a jet with deflectors
and tapered annulus

金沢大学大学院自然科学研究科

システム創成科学専攻

機能開発システム講座

臼沢 太一

Abstract

A jet was applied for many industrial devices, for example, a jet engine, air jet loom and so forth. The control of the jet flow is important to enhance a performance of these devices. In recent years, a passive control of air jet that is low in cost compared with an active control, is investigated by many researchers. In the present study, we suggest the new passive control of a jet using the tapered annulus and deflectors, which we got the ideas by control of a coaxial jet with velocity ratio. The experimental and numerical investigations of a coaxial jet, round jet and plane jets with tapered annulus and deflectors were performed in this study. In a coaxial jet, the three-dimensional vortical structures and flow characteristics with different velocity ratios and axisymmetric and helical instability modes were investigated. Then, the divergent and convergent tapered annulus and deflectors was installed inside of the nozzle. The effects of the annulus and deflector length, the angle and the diameter on the mean and fluctuating velocities, and the velocity ratio of the inner jet to outer jet at the nozzle exit were examined by the hot-wire measurement, flow visualizations and numerical simulations. In the case of the jets with the divergent tapered annulus and deflectors the outer jet was accelerated and the inner jet was decelerated. The spread of jet with the divergent tapered annulus and deflectors increased in the near field of the jet. With convergent tapered annulus and deflectors, the outer jet was decelerated and the inner jet was accelerated. The spreads of jet with the convergent tapered annulus and deflectors was smaller than the other jet. Similarities of flow characteristics with velocity ratio of the jet with tapered annulus and deflectors are found.

1. 結論

噴流は、ジェットエンジンやエアジェットルーム、エアカーテンなど様々な産業機器に応用されており、その流れを制御することは機器の性能向上において重要である。噴流の流れ特性は、自由せん断層内に発生する渦構造により支配されており、この渦構造を解明することは噴流の流れ特性の制御につながる。特に、外部からのエネルギー供給を必要としない噴流の受動的制御法が省エネルギーの観点から注目されている。平面噴流の受動的制御法としては、ノズルの断面形状を変化させる方法やノズル出口に Vortex generator や Tab, ブラフボディを設置する手法など⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾がある。それらの研究によって片側平板により自励振動を生じさせて噴流の発達を促進できる⁽¹⁾こと、ノズルの出口形状が平均速度や乱れ強さに与える影響⁽²⁾などが調べられている。また、ノズル出口に設置した鋸歯状タブにより縦渦構造を発生させて渦構造を操作できること⁽²⁾や、小径円柱などによって仮想原点の下流方向へ移動やエントレイメントの減少⁽³⁾などが調べられている。また、ショーケース用エアカーテンの噴流ノズルにリアジェットを付加し、同軸噴流のように噴流を能動的制御することで、エアカーテンの性能向上と消費エネルギーの低減が可能であること⁽⁴⁾が調べられている。円形噴流の受動的制御法として、噴流のせん断層内にタブやブラフボディ・リングなどを設置して乱れを与える方法⁽⁵⁾がある。また、円形噴流のポテンシャルコア内にブラフボディやリングなどを設置して後流による乱れを付加することで噴流を受動的に制御する方法⁽⁵⁾も行われている。このような受動的制御によって円形噴流のエントレイメントの抑制やポテンシャルコア長さの減少が可能となることが明らかとなっている。同軸噴流の制御法の一つとして、内側噴流と外側噴流の速度比によってせん断層の速度勾配を変化させる方法がある。同軸噴流の速度比 U_i/U_o (U_i :内側円形噴流速度, U_o :外側環状噴流速度)を変化させる制御法については多くの研究が行われており、内側噴流の速度が外側噴流の速度よりも速い速度比 1 以上のものと、速度比 1 以下のものに大別できる。速度比 1 以上の同軸噴流では、速度比とポテンシャルコア長さの関係性などが議論されている⁽⁶⁾。一方、速度比が 1 以下の同軸噴流では、内側噴流出口下流に再循環領域が形成され、内側噴流のポテンシャルコア長さも速度比に依存し、内側せん断層内の乱れ特性が内側ノズルの形状に影響されることが明らかにされている⁽⁷⁾。

したがって、同軸噴流は、円形噴流や平面噴流と異なり、速度比によって流れ特性が変化する。すなわち、ノズル内部に噴流を内側噴流と外側噴流に分離する構造を設置し、それによって噴流の受動的制御が可能であると考えられる。Sadeghi ら⁽⁵⁾のように円形噴流にリングを設置することでノズル出口近傍領域から遷移領域の流れ特性が変化することからも、本手法で噴流の流れ特性に変化を与えることができると推測できる。

本研究では、同軸噴流の速度比による制御手法に着想を得て、まず、低レイノルズ数領域における同軸噴流の速度比の変化による流れ特性や不安定モードの渦構造を数値解析によって明らかにする。つぎに、同軸噴流と同様な効果を得るために、円形噴流および平面噴流を内側噴流とその両側の外側噴流とに分割する受

動的制御法を提案し、その流れ特性を明らかにする。つまり、円形および平面ノズル内部にテーパ環や偏向板を設置し、ノズル内で速度差を有する擬似的な同軸噴流を形成させ、静止大気中に噴出する円形および平面噴流の速度分布形状を任意に変化させることで円形および平面噴流発達の制御を試みる。

2. 実験装置及び方法

2.1 実験装置

2.1.1 テーパ環を有する円形噴流 本研究で使用した実験装置の概略図を図 1 に、円形ノズルとテーパ環の断面図と画像を図 2 にそれぞれ示す。圧縮機から供給された空気が、整流格子、絞り比 20.25 のノズルを通過後、直径 40 mm、長さ 175 mm の円形流路を経て円形噴流を形成する。速度分布は、定温度型熱線流速計 I 形または X 形熱線プローブと 3 次元トラバース装置で計測した。円形ノズル出口の直径は $D_0=40$ mm である。テーパ環の肉厚は 2 mm であり、テーパ環は 4 個のつばによって円形ノズルの中心に固定されている。テーパ環の開き角度は $\alpha=\pm 6^\circ$ とし、 $\alpha=+6^\circ$ の場合を拡大テーパ環(Divergent tapered annulus, Div.)、 $\alpha=-6^\circ$ の場合を縮小テーパ環(Convergent tapered annulus, Conv.)とそれぞれ呼ぶ。図 1 に示すように、円形ノズル出口面と噴流中心軸との交点を原点とし、原点から流れ方向を x 軸、半径方向を r 軸として実験を行った。

2.1.2 偏向板を有する平面噴流 実験装置とノズルの概略図を図 2 に示す。軸流送風機によって整流部と 2 つの縮流部（縮流比 20, 5.0）を経て、空気が長方形ノズルに供給される。長方形ノズルは平行部が 260mm、出口形状は高さ $H=20$ mm、幅 $B=176$ mm である。ノズル出口短辺側の両端には、流れ場の 2 次元性を保つために側壁を設置した。偏向板は板厚 1mm で、ノズルの中心線に対して対称に支持される。座標の原点はノズル出口面の長方形ノズル中心位置とし、流れ方向を x 軸、ノズル高さ方向を y 軸と定義した。実験に使用する偏向板は、内側の流路を流れ方向に拡大させた拡大偏向板 (Divergent deflectors, Div.)、縮小させた縮小偏向板 (Convergent deflectors, Conv.) である。比較のため、角度 $\alpha=0^\circ$ の平行板 (Parallel plates, Parallel) も実験を行った。

2.2 実験方法および条件

2.2.1 テーパ環を有する円形噴流 噴流のレイノルズ数は $Re_D (=U_0 D_0/\nu, \nu$: 空気動粘性係数, U_0 : $x/D_0=0.1$ 断面の時間平均速度) $\approx 3.3 \times 10^4$ として実験を行い、速度分布は円形ノズル直径 D_0 の 20 倍下流域まで測定した。なお、熱線プローブの信号はリニアライザーによって線形化され、計測点 1 箇所につき 10^5 個のデータをサンプリングした。計測したデータはコンピュータに保存し、時間平均速度、乱れ強さなどを算出した。流れの可視化は、ラスキンノズルによりオイルミストを発生させ、アルゴンイオンレーザーを照射して噴流の $x-r$ 断面をハイスピードビデオカメラで撮影した。また、摺動油の混合液を油膜としてノズル内壁面に塗布し、油膜法によって剥離の状態を可視化した。テーパ環の挿入による圧力損失は、噴流発生装置のチャンバーと周囲流体間の圧力差をマノメータによって計測した。テーパ環を有する円形噴流の実験は、表 1 に示すテーパ環形状について行った。

2.2.2 偏向板を有する平面噴流 平面噴流は、定温度型熱線流速計を使用し、ノズル高さの 20 倍下流域まで測定した。熱線流速計の出力信号は、10kHz のローパスフィルターを適用し、サンプリング数 10^5 点でコンピュータに記録した後、時間平均速度、乱れ強さなどを算出した。噴流のノズル出口平均速度 U_0 は、 $U_0=7.4$ m/s、 $U_0=14.8$ m/s の 2 種類とし、体積流量が一定となるように調整した。 $U_0=7.4$ m/s における噴流のレイノルズ数は $Re_H (=U_0 H/\nu, \nu$: 空気動粘性係数) $\approx 1.0 \times 10^4$ である。流れの可視化はフォグジェネレータから発生した煙を軸流送風機から吸入させ、ノズル下流からシート状の Nd:YAG レーザーを照射して高速度カメラで噴流の $x-y$ 断面を 1kHz で撮影した。偏向板による圧力損失は、偏向板上流の静圧 p_0 の圧力差 Δp を傾斜マノメータによって測定した。偏向板を有する平面噴流の実験は、表 2 に示す偏向板形状について行った。

3. 数値解析手法

3.1 支配方程式および解析手法 同軸噴流の三次元数値解析の支配方程式は、連続の式と Navier-Stokes 方程式である。同軸噴流の数値解析は、離散化手法として有限体積法を用いて行い、商用ソフトである FLUENT 6.3 を使用した。Navier-stokes 方程式の時間項は二次精度完全陰解法で離散化し、対流項は QUICK

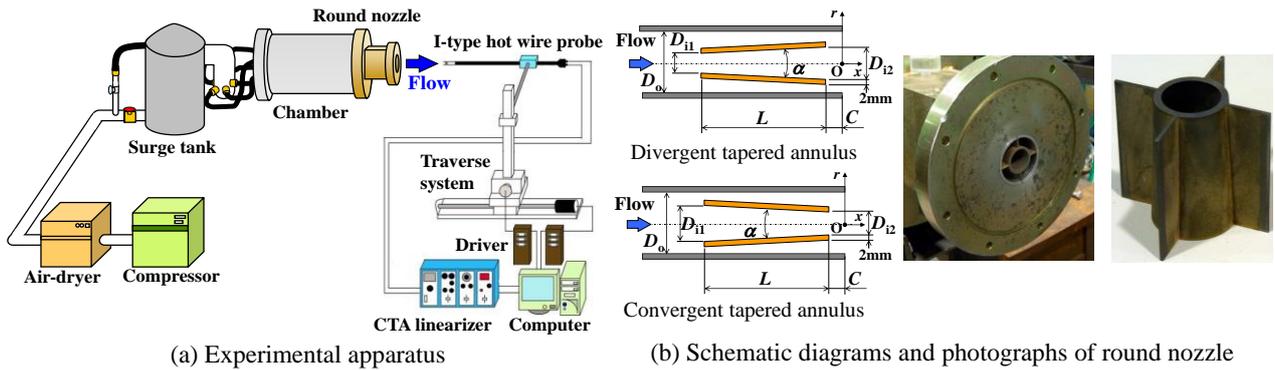


Fig.1 Schematic diagrams and photographs of experimental apparatus (Round nozzle with tapered annulus)

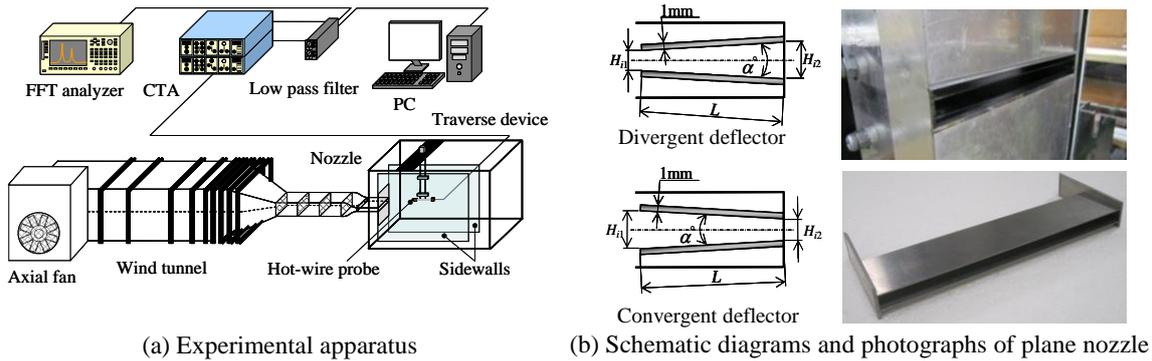


Fig.2 Schematic diagrams and photographs of experimental apparatus (Plane nozzle with deflectors)

Table 1 Conditions of experiments of round jet with tapered annulus

(a) Divergent tapered annulus										(b) Convergent tapered annulus						
Index	DR1	DR2	DR3	DR1'	DR2'	DR3'	DRC1	DRC2	DRC3	Index	CR1	CR2	CR3	CR1'	CR2'	CR3'
L/D_o	1.0	2.0	3.0	1.0	2.0	3.0	2.25			L/D_o	1.0	2.0	3.0	1.0	2.0	3.0
α [°]	6									α [°]	-6					
D_{ii}/D_o	0.30	0.19	0.085	0.4			0.17			D_{ii}/D_o	0.51	0.61	0.72	0.4		
D_{i2}/D_o	0.4			0.51	0.61	0.72	0.4			D_{i2}/D_o	0.4			0.30	0.19	0.085
A_{ii}/A_{i2}	0.54	0.23	0.05	0.63	0.43	0.31	0.17			A_{ii}/A_{i2}	1.59	2.32	3.19	1.84	4.41	21.9
C/D_o	0						0	0.5	1.0							

Table 2 Conditions of experiments of plane jet with deflectors

(a) Divergent deflectors							(b) Convergent deflectors						
Index	DD1	DD2	DD3	DD1'	DD2'	DD3'	Index	CD1	CD2	CD3	CD1'	CD2'	CD3'
α [°]	6			6	8	10	α [°]	-6			-6	-8	-10
L [mm]	1H	2H	3H	2H			L [mm]	1H	2H	3H	2H		
H_{ii} [mm]	8.1	5.8	3.7	5.8	4.4	3.0	H_{ii} [mm]	12.1	14.2	16.3	10		
H_{i2} [mm]	10			10			H_{i2} [mm]	10			5.8	4.4	3.0
A_{ii}/A_{i2}	0.81	0.58	0.37	0.58	0.44	0.30	A_{ii}/A_{i2}	1.2	1.4	1.6	1.7	2.3	3.3

法で離散化した。圧力と速度のカップリングには PISO 法を使用した。

円形噴流の乱流数値解析では、RANS と LES の二種類の手法によって解析を行った。LES による数値解析は、ANSYS FLUENT を使用し、解析の離散化手法は有限体積法である。Navier-Stokes 方程式の離散化手法は、対流項を有界中心差分法、粘性項を 2 次精度中心差分法、時間進行法を 2 次精度陰解法で離散化した。乱流モデルには Dynamic Smagorinsky-Lilly model を使用した。

3.2 解析モデルおよび境界条件 同軸噴流は、図 3 に示すように解析領域を円筒形として解析を行った。同軸噴流のノズル形状は、図 4 に示すように外側ノズル内径を $D_o=40\text{mm}$ 、外側ノズル長さを $L_c=10\text{mm}$ 、外側ノズル厚みを $b_{oc}=2\text{mm}$ とした。内側ノズルは内径を $D_i=16\text{mm}$ 、内側ノズル厚みを $b_{ic}=4\text{mm}$ とし、ノズルの座標原点は内側ノズル出口の中心点とした。円筒形の解析領域は半径方向に $5D_o$ 、角度方向に 2π 、主流方

とよく一致する．速度比が $0.4 < U_{ic}/U_{oc} < 0.6$ の範囲において St_c 数は極大値をとる傾向も実験結果と解析結果で一致しており，本研究における CFD 解析は噴流の非定常な流れ場や渦放出の状態を良く再現していると言える．また， St_c 数は実験結果及び解析結果共に $0.4 < U_{ic}/U_{oc} < 0.8$ の範囲において $St_c=1.75$ の値をとっている．

図 8 に速度比 $U_{ic}/U_{oc}=0.65$ の場合の軸対称モードとヘリカルモードの軸方向時間平均速度分布を示す．軸対称モードとヘリカルモードの速度分布の差異は同軸ノズル近傍で生じ，ヘリカルモードの場合に内側噴流の速度の欠損が生じる．ノズル近傍の速度欠損は，下流域に影響を与え， $x/D_o=1.5$ 付近まで影響が残る．また，乱れ強さ分布は速度分布と逆の傾向を示し，ヘリカルモードの内側噴流の領域で増加した．

3. 1. 2 放出渦の挙動と三次元渦構造 図 9 に軸対称モードとヘリカルモードの外側混合領域の渦(+O)および内側混合領域の渦(-I₁, +I₂)の挙動をプロットしたものを示す．軸対称モードでは，内側噴流の下流域に渦が存在せず，放出された渦がほぼ直線状に流れる．一方，ヘリカルモードの場合には，内側混合領域の渦が噴流の中心軸を横切って流れており，三次元的な渦構造が生じていることがわかる．この内側混合領域の渦によってヘリカルモードでは内側混合領域の乱れ強さが増加すると考えられる．

図 10 に軸対称モードおよびヘリカルモードの $x-r$ 断面で切断した速度勾配テンソルの第 2 不変量 Q の等値面図を示す．軸対称モードの場合に内側混合領域の 2 つの渦構造(-I₁, +I₂)は， $x/D_o=1.0\sim 1.5$ の領域で軸方向に引き伸ばされている．この領域では，渦-I₁ が外側混合領域の反時計回りの渦+O との相互作用によって噴流出口速度で下流に流れていく．さらに下流領域では，渦構造は幾つかの小さな渦構造に分離される．ヘリカルモードの場合には，3 つの渦(渦+O, -I₁, +I₂)が内側および外側混合領域に生じている．渦-I₁ の渦輸送速度は反時計回りの外側混合領域の渦+O との相互作用によって増加する．下流領域においては，渦の崩壊現象がヘリカルモードの場合に観測され，渦構造が非常に複雑であることが明らかとなった．つまり，同軸噴流の混合特性は混合領域の三次元渦構造の相互作用とその力学的関係によって決定される．

3. 2 偏向板を有する平面噴流の流れ特性

3. 2. 1 時間平均速度分布および乱れ分布 図 11 に $\alpha=+6^\circ, -6^\circ, 0^\circ$ の拡大偏向板，縮小偏向板および平行板を有する平面噴流の x 方向時間平均速度分布 \bar{u}/U_o を示す．速度分布は偏向板によって中心線側の

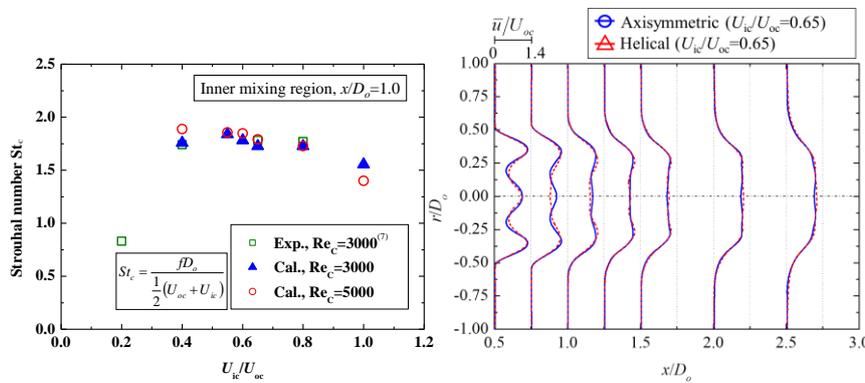


Fig.7 Variations of the Strouhal number of coaxial jet St_c with U_{ic}/U_{oc}

Fig.8 Mean axial velocity profiles of the coaxial jet with axisymmetric and helical instability modes

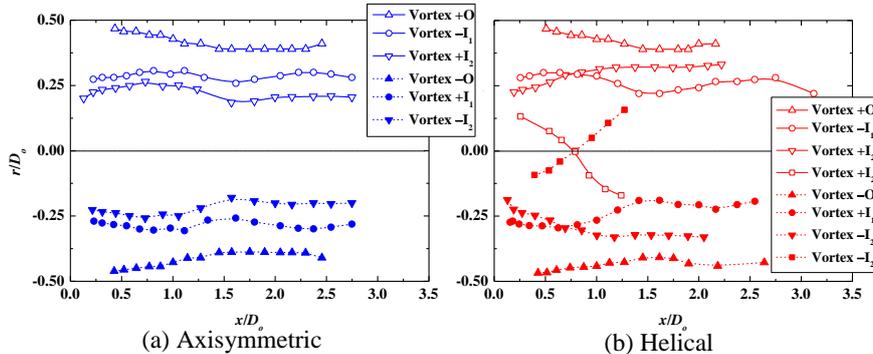
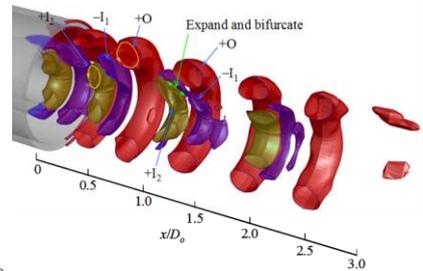
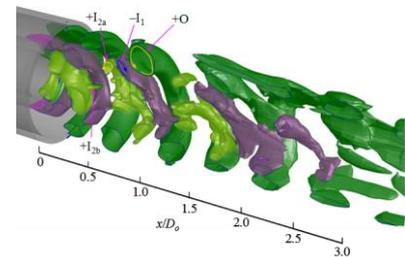


Fig.9 Vortical trajectories of coaxial jet with axisymmetric and helical instability modes



(a) Axisymmetric



(b) Helical

Fig.10 Three-dimensional vortical structures of coaxial jet with axisymmetric and helical instability modes

内側噴流，ノズル壁側の外側噴流に分けられ，偏向板を設置しても中心線に対して良好な対称性を示す．ノズル出口($x/H=0.1$)の速度分布を見ると，拡大偏向板の場合には，外側噴流が増速，内側噴流は減速し，外側噴流の最大速度 $\bar{u}_{o\max}$ に対する内側噴流の最大速度 $\bar{u}_{i\max}$ の比は， $\bar{u}_{i\max}/\bar{u}_{o\max}=0.80$ となる．縮小偏向板の場合には，外側噴流が減速，内側噴流は増速し，速度比は $\bar{u}_{i\max}/\bar{u}_{o\max}=1.6$ となる．平行板の場合には，偏向角が $\alpha=0^\circ$ であるため速度比は $\bar{u}_{i\max}/\bar{u}_{o\max}=1.0$ である． $x/H \geq 1.0$ の下流では，拡大偏向板の場合には，外側噴流の減速とともに，速度の小さい内側噴流の速度欠損は徐々に回復し， $x/H=6.0$ では発達した速度分布となる．縮小偏向板の場合には，ポテンシャルコア領域を有する内側噴流はわずかに減速する一方で，外側噴流は内側噴流に融合されながら減速し，下流域で発達した速度分布となる．

3. 2. 2 噴流の広がり流れの可視化 図 12 に $L/H=2.0$ ， $\alpha=+6^\circ$ ， -6° ， 0° の拡大偏向板，縮小偏向板および平行板を有する噴流の x 方向速度分布から求めた半値半幅 $b_{1/2}/H$ の流れ方向変化を示す．拡大偏向板の場合，半値半幅は， $x/H=1.0\sim 2.0$ において急激に増加し，図 11 で示した外側噴流と周囲流体とのせん断層における乱れ強さの急激な増加と対応しており，周囲流体とのせん断層の乱れ強さの増加によって噴流の広がりが大きくなっている． $x/H \geq 2.0$ では外側噴流と周囲流体との間のせん断層の x 方向乱れ強さが減少するのに対応して半値半幅の増加率も小さくなっている．一方，縮小偏向板の場合には，ノズル出口から半値半幅が減少し， $x/H=2.5$ 付近で最小幅となる． $x/H=20$ では拡大偏向板および平行板と同じ半値半幅となる．図 11 の x 方向乱れ強さ分布で示したように，縮小偏向板の場合には外側噴流の乱れ強さはノズル出口で大きいですが， $x/H=1.0$ で減少するため，半値半幅は増加しない．そして，噴流下流では外側噴流と周囲流体とのせん断層の乱れ強さが小さく，周囲流体との混合が進まないために，噴流の広がりは小さくなる．しかし，拡大偏向板および平行板の場合， $x/H \geq 2.0$ の領域で外側噴流と周囲流体とのせん断層の乱れ強さが増加するため，周囲流体との混合が進み，縮小偏向板とは逆の傾向を示す．図 13 に $L/H=2.0$ の拡大偏向板，縮小偏向板および平行板を有する平面噴流のミスト法による可視化結果を示す．平面噴流は平行板の場合と比較して，拡大偏向板の場合に広がりが大きく，縮小偏向板の場合に広がりが小さいことが可視化画像からも確認できる．

3. 2. 3 速度変動周波数 図 14 に $L/H=2.0$ の偏向板なし，拡大および縮小偏向板を有する噴流の U_0 で無次元化した x 方向速度変動のパワースペクトルを示す．速度変動周波数 f は x 方向の各断面における半値半幅の位置で測定を行い，ストローハル数 $St_H (=fH/U_0)$ で示す．周波数測定の結果，偏向板なしの場合には卓越周波数が認められたが，拡大偏向板，縮小偏向板の両方において明確な卓越周波数は見られなかった．これは，拡大・縮小偏向板によってノズル出口で噴流が乱れているためであると考えられる．

3. 3 テーパ環を有する円形噴流の流れ特性

3. 3. 1 テーパ環の長さ流れ特性 図 15 にテーパ環長さが $L/D_0=1.0$ ， 3.0 の場合の軸方向速度分布を拡大テーパ環と縮小テーパ環の場合についてそれぞれ示す．図 15 の上側に示す縮小テーパ環ではテーパ環長さが $L/D_0=1.0$ から 3.0 に増加すると， $x/D_0=0.1$ における内側噴流の最大軸方向平均速度は $1.5U_0$ に増加し，外側噴流の最大軸方向平均速度は 0.88 倍に減少する．これは，テーパ環が長い場合には，外側噴流のテーパ環入口側の断面積が小さくなる一方で内側噴流のテーパ環入口側の断面積が大きくなったためである．下流では，内側噴流と外側噴流の間のせん断層の速度欠損が回復し， $x/D_0 \geq 3.0$ の領域において発達した速度分布となる．図 15 の上側に示す縮小テーパ環の場合，軸方向平均速度分布はノズル出口($x/D_0=0.1$)においてテーパ環長さが $L/D_0=3.0$ に増加すると外側噴流で減速し，内側噴流で増速し，速度比は $L/D_0=1.0$ で $\bar{u}_{i\max}/\bar{u}_{o\max}=0.99$ ， $L/D_0=3.0$ で $\bar{u}_{i\max}/\bar{u}_{o\max}=1.57$ となる．一方，図 15 の下側に示す拡大テーパ環の場合，軸方向平均速度分布はノズル出口($x/D_0=0.1$)においてテーパ環長さが $L/D_0=3.0$ に増加すると外側噴流で増速し，内側噴流で減速し，速度比は $L/D_0=1.0$ で $\bar{u}_{i\max}/\bar{u}_{o\max}=1.0$ ， $L/D_0=3.0$ で $\bar{u}_{i\max}/\bar{u}_{o\max}=0.10$ となる．また，これらの長さによる影響は平面噴流でも同様に確認された．

3. 3. 2 テーパ環の長さ噴流の広がり 図 16 にテーパ環長さを変化させた場合の各噴流の半値半幅 $B_{1/2}/D_0$ の x 軸方向変化を示す．半値半幅は $L/D_0=3.0$ の縮小テーパ環の場合にテーパ環のない円形噴流よりも減少し，拡大テーパ環の場合にテーパ環のない円形噴流よりも増加する．したがって，比較的長い縮小テーパ環を円形ノズル内に設置することで円形噴流の広がりを抑制することが可能となる．これは， $L/D_0=3.0$ の縮小テーパ環を設置することで図 15 に示すようにノズル出口において内側噴流が増速されるのに対して外

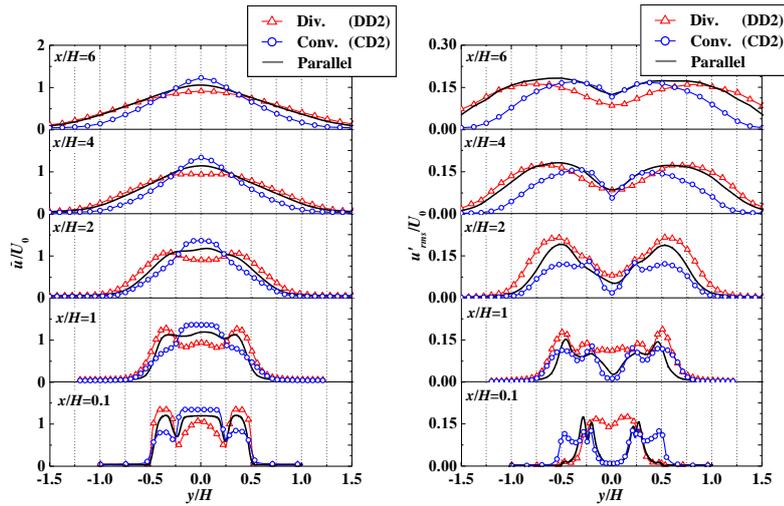
側噴流が減速するため、周囲流体との速度勾配が緩くなるためである。一方、拡大テーパ環の場合は外側噴流の増速により外側噴流と周囲流体の速度差が大きくなるため、せん断層の乱れ強さが増加してエントレイメントも増加するために噴流の広がりが増加すると考えられる。これらの長さによる流れ特性の傾向は、平面噴流でも同様に確認された。

3. 3. 3 テーパ環を有する円形噴流の乱流数値解析 図 17 に円形噴流の乱流数値解析による速度変動周波数のストローハル数を速度比の変化と共に示す。外側混合領域での $f=693\text{Hz}$ のストローハル数は $St_{D_o}(=D_o f/U_o)=2.31$ 、内側混合領域での最も大きなスペクトルを示す $f=1132\text{Hz}$ のストローハル数は $St_{b_i}(=b f/U_o)=0.19$ となり、それぞれ図 17 に示す木綿ら⁽⁷⁾の実験結果の速度比 0.5 の同軸噴流のストローハル数とほぼ一致する。一方、縮小テーパ環を設置した場合のストローハル数は $St_{D_o}=1.04$ となった。

図 18 に速度勾配テンソルの第 2 不変量の等値面 Q によるテーパ環を設置した円形噴流の三次元渦構造を示す。図 18(a)の拡大テーパ環の場合、 $x/D_o=0.5$ 付近までは外側混合領域内に渦輪が形成され、下流域の三次元的な渦構造へと変化する。 $x/D_o \geq 1.5$ ではヘアピン渦や馬蹄形渦が多数存在することがわかる。図 18(b)の縮小テーパ環の場合、 $x/D_o=0.5$ 付近では外側混合領域内に渦輪は形成されておらず、細かい渦が形成されている。 $x/D_o=1.0$ 付近からは馬蹄形渦と似た渦が形成されるが、拡大テーパ環の場合と比較すると渦のスケールが小さい。

3. 4 噴流の速度比と流れ特性の関係

3. 4. 1 圧力損失係数 図 19 にテーパ環および偏向板の形状変更による圧力損失係数 $\zeta_{umax}[=2\Delta p/(\rho u_{max}^2)]$ と速度比 $\bar{u}_{imax}/\bar{u}_{omax}$ の関係を示す。縮小テーパ環・偏向板の場合、長さ、直径、角度を変化させると速度比の増加と共に圧力損失係数 ζ_{umax} も増加する。一方、拡大テーパ環・偏向板の場合には、長さ、



(a) Mean axial velocity profiles (b) Axial velocity fluctuation profiles

Fig.11 Mean axial velocity profiles and velocity fluctuations of the plane jet with divergent and convergent deflectors

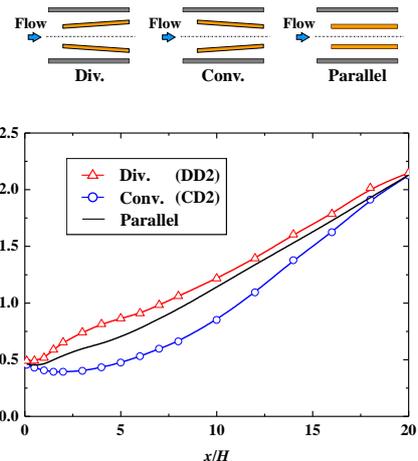


Fig.12 Half width at half maximum of the plane jet with divergent and convergent deflectors

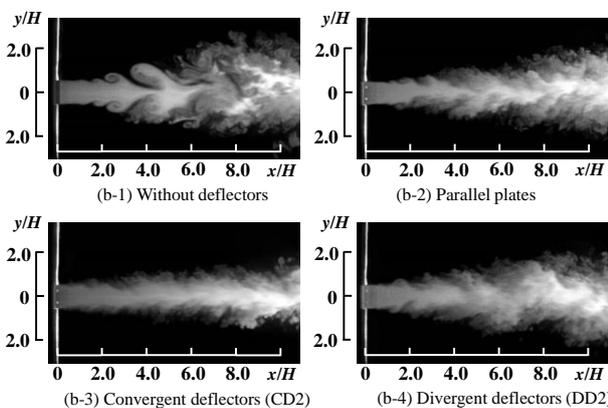
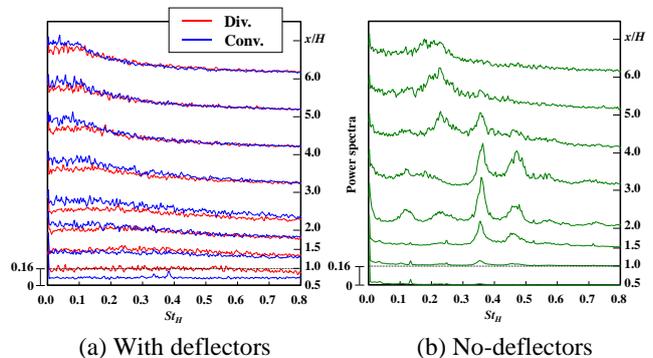


Fig.13 Flow visualizations of plane jet with convergent and divergent deflectors ($L/H=2.0$, $\alpha=\pm 6^\circ$)



(a) With deflectors (b) No-deflectors

Fig.14 Variations of the power spectra of streamwise velocity fluctuations of plane jet in the velocity of the jet half-width at half maximum

直径，角度を変化させて速度比が減少すると圧力損失は逆に大きくなる。したがって，拡大，縮小テーパ環および偏向板を設置することで速度比を 0.1~1.6 に変化させることが可能であるが， $\bar{u}_{\max}/\bar{u}_{\max}$ が 1.0 から離れた値になると圧力損失が増加するため，性能と損失のトレードオフを考慮する必要がある。

3. 4. 2 仮想原点位置 図 20 にテーパ環なし，拡大テーパ環，縮小テーパ環における仮想原点位置 x_0/D_0 ， x_0/H と速度比 $\bar{u}_{\max}/\bar{u}_{\max}$ の関係を示す。比較のため Sadeghi ら⁽⁶⁾による実験の仮想原点位置を合わせて示す。また，拡大・縮小偏向板を有する平面噴流の仮想原点位置もあわせて示す。テーパ環なしの場合の仮想原点位置は-0.46 となった。CR1~CR3 の縮小テーパ環では，テーパ環長さの増加に伴って速度比が 1.0 以上に増加すると仮想原点位置は下流側($x/D_0 > 0$)へ移動していることがわかる。ただし，CR1'~CR3' の場合，CR1~CR3 と比較すると縮小テーパ環直径が小さい場合には速度比 1.0 付近で仮想原点位置が増加する。したがって，テーパ環長さが長くなるほど噴流の広がり減少する現象は縮小テーパ環を設置することで仮想原

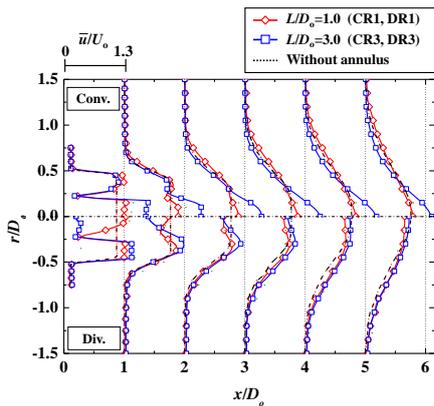


Fig.15 Mean axial velocity profiles of the round jet with convergent and divergent tapered annulus (Effect of length)

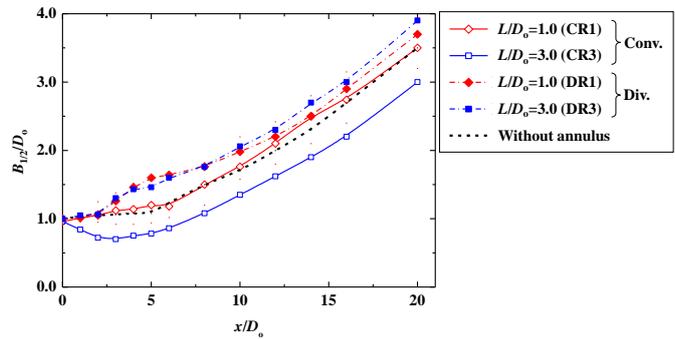


Fig.16 Half-width of round jet with divergent and convergent tapered annulus (Effect of length)

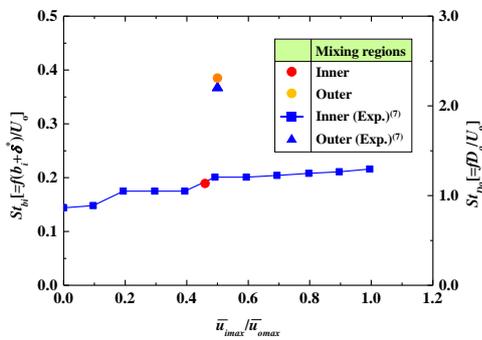
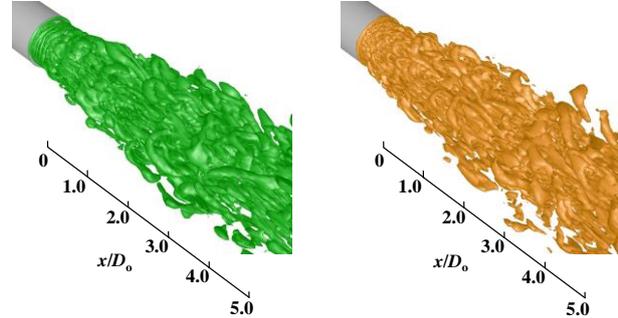


Fig.17 Variations of the Strouhal number of the radial velocity fluctuations with velocity ratio



(a) Divergent tapered annulus (b) Convergent tapered annulus

Fig.18 Three-dimensional vertical structures of round jet with divergent and convergent tapered annulus

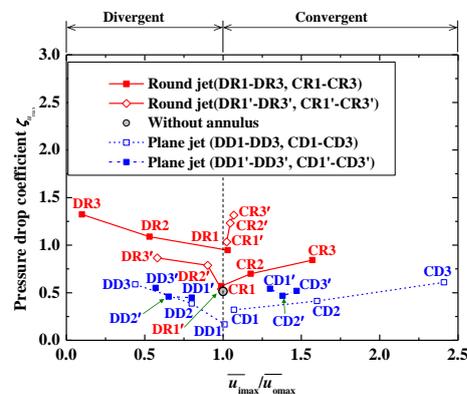


Fig.19 Variations of the Pressure drop coefficient with velocity ratio

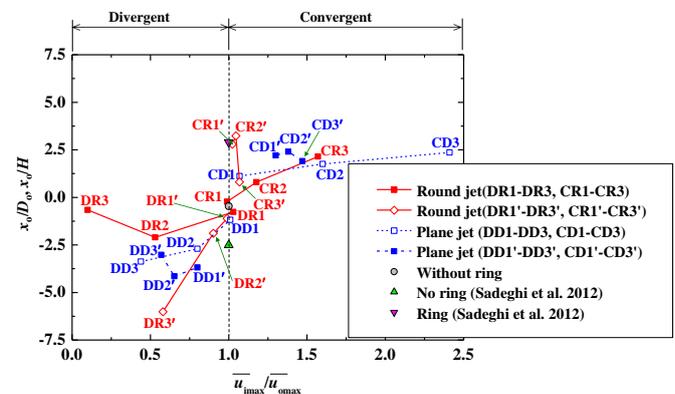


Fig.20 Variations of the virtual origin with velocity ratio

点が下流へ前進していることに起因すると考えられる。また、縮小テーパ環直径が小さい場合(CR1'~CR3')には、仮想原点位置は上流側($x/D_0 < 0$)へ移動するが、結果的に噴流の広がりにはテーパ環直径を変化させない場合と同程度となる。拡大テーパ環では、テーパ環の長さの増加に伴って速度比 $\bar{u}_{i\max}/\bar{u}_{o\max}$ が1.0以下に減少すると仮想原点位置は上流側($x/D_0 < 0$)に移動する。拡大テーパ環直径が大きい場合(DR1'~DR3')には、速度比が大きく減少すると仮想原点位置も下流へ移動する。したがって、円形噴流および平面噴流においてテーパ環や偏向板を設置することで、速度比に対する圧力損失や仮想原点位置などの変化が流れ場の変化に伴って生じ、噴流の速度分布噴流の広がりなどの流れ特性を変化させることが明らかとなった。

4. 結論

本研究では、テーパ環および偏向板による噴流の受動的制御手法を提案し、空気噴流実験および数値シミュレーションによって以下の結論を得た。

- (1) 同軸噴流の内側円形噴流と外側環状噴流の速度比を変化させることで同軸噴流の時間平均流れ特性、非定常特性および三次元渦構造を変化させることを示した。
- (2) 同軸噴流の速度比による制御手法に着目し、拡大・縮小偏向板およびテーパ環を平面ノズルおよび円形ノズル内部に設置することで、内側噴流と外側噴流にノズル出口の上流で噴流を分離し、速度比の生じる簡易同軸平面噴流および簡易同軸円形噴流を形成できることを示した。
- (3) テーパ環および偏向板によって噴流は縮小の場合に拡散が抑制され、拡大の場合に拡散が増大する。テーパ環および偏向板による噴流拡散の増減は仮想原点位置の変化によって生じている。
- (4) 拡大・縮小テーパ環を有する円形噴流について数値シミュレーションを行い、拡大・縮小テーパ環によって外側混合領域と内側混合領域に形成される渦構造が異なり、噴流の拡散に影響を与えることを示した。

参考文献

- (1) Kiwata, T., Kimura, S., Komatsu, N., Murata, H. and Kim, Y. H., "Flow Characteristics of a Plane Jet with an Extended Lip-Plate and Serrated Tabs", *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 4, No. 2 (2009), pp. 268-278.
- (2) Deo, R. C., Mi, J. and Nathan, G. J., "The influence of nozzle-exit geometric profile on statistical properties of a turbulent plane jet", *Experimental Thermal and Fluid science*, Vol. 32 (2007), pp. 545-559.
- (3) Rajagopalan, S. and Antonia, R. A., "Turbulence reduction in the mixing layer of a plane jet using small cylinder", *Experiments in Fluids*, Vol. 25 (1998), pp. 96-193.
- (4) 平田賢二, 浅田 規, "オープンショーケース (エアカーテン)", *冷凍*, Vol. 81, No. 945 (2006), pp. 7-10.
- (5) Sadeghi, H. and Pollard, A., "Effects of passive control rings positioned in the shear layer and potential core of a turbulent round jet", *Physics of fluids*, Vol.24, No.115103, (2012), pp. 1-21
- (6) Ko, N.W.M. and Kwan, A.S.H., "The Initial Region of Subsonic Coaxial Jets", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 73, (1976), pp. 305-332.
- (7) 木綿隆弘, 同軸二重円管噴流に関する研究, 博士論文 (1996), 金沢大学

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

偏向板およびテーパ環を有する噴流に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所 属 システム創成科学専攻

(2) 氏 名 白沢 太一

3. 審査結果の要旨（600～650字）

当該学位論文に関し、平成27年1月29日12時00分よりに第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文及び関係資料に基づき内容を検討した。さらに同日16時30分よりに口頭発表を行い、発表後に第2回学位論文審査委員会を開催し、協議の結果、以下の通り判定した。

申請論文は、同軸円形噴流自体の流れ特性と、平面噴流および円形噴流のノズル内部に偏向板およびテーパ環を設置した噴流の流れ特性を実験及び3次元数値解析によって明らかにしたものである。同軸円形噴流の速度比による軸対称モードからヘリカルモードの渦構造変化とノズル出口近傍での速度分布変化との対応を明らかにした。さらに、円形と平面ノズルに偏向板またはテーパ環を挿入して、その形状（長さ、角度、直径、位置）によって噴流に速度差を付けることで、噴流の広がりや仮想原点位置の変化によって生じることを示し、同軸噴流と同様な速度比変化による噴流制御を受動的に行うことが可能であることを明らかにした。

以上のように、本論文は、円形や平面ノズルの設計において流れ場を制御する有用なデータを示した研究であり、関連する噴流工学の分野に寄与するところが大きいと判定し、博士(工学)に値するものと認定した。

4. 審査結果 (1) 判 定 (いずれかに○印) 合 格・ 不合格

(2) 授与学位 博 士 (工 学)