

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年4月4日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560160

研究課題名（和文）ノズル内部に設置した偏向板や偏向リングによる噴流の拡散制御に関する研究

研究課題名（英文）Study on Control of a Jet Spread by Divergent or Convergent Ring and Plates

研究代表者

木綿 隆弘（KIWATA TAKAHIRO）

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：40225107

研究成果の概要（和文）：

本研究課題では、円形や平面ノズル出口直前に縮小または拡大する小さな有限長ノズルである偏向板または偏向リングを設置することで、簡易的に速度差を有する同軸噴流を形成させて、噴出後の噴流の拡大とエントレインメントを制御するデバイスの研究開発を行う。その結果、縮小偏向板やリングにおいては噴流の減衰を押さえること、拡大偏向板やリングにおいては噴流の広がりを促進させることが出来ることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The present paper describes the flow characteristics of plane and round air jets with deflectors. The divergent or convergent deflector was installed symmetrically inside of the nozzle. The effects of the deflection angle and length of deflectors 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 visualization and numerical simulation. In the case of the jets with the divergent deflector, the outer jet was accelerated and the inner jet was decelerated. The spread of jet with the divergent deflector increased in the near field of the jet. In the case of the jets with convergent deflectors, the outer jet was decelerated and the inner jet was accelerated. The spreads of jet with the convergent deflector was smaller than the other jet. We found the relation between the velocity ratio of the nozzle exit and the area ratio of the entrance to exit cross section of divergent or convergent deflectors.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2010 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総 計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：噴流工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：噴流，円形ノズル，平面ノズル，同軸ノズル，乱流混合，流れの制御

1. 研究開始当初の背景

噴流は、身の回りの製品や工業における様々な機器などに使われており、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なことである。円形噴流や平面噴流は、昔

から国内外で数多くの研究が行われている。噴流の下流域における混合促進のために、噴流出口でスピーカによる音波、薄板の振動、ピエゾアクチュエータの振動などで噴流全体または壁面せん断層に周期的な擾乱を与

える能動的制御や噴流ノズル形状を変化させたり、ノズル内に渦を発生させる円柱などのブラフボディーを置くなど、外部からエネルギーを加えない受動的制御が行われている。特に、噴流のノズル形状を変えた受動的な噴流の制御方法として、円形噴流のノズル外周にカラーを付けてノズル出口での気柱共鳴とせん断層の不安定による自励現象を利用した方法(Whistler Nozzle)や、下流域に楔などの物体を置いて、そこからの発生する渦がノズル出口へとフィードバックから生じる自励現象を利用した方法、ノズル形状が真円ではない場合に渦輪の非一様曲率による渦構造の三次元変形を利用した混合促進の方法(楕円や多角形ノズル)がある。同軸噴流に関しては、静止または一様流中や管内に噴出する場合の主に速度比やノズルの面積比が噴流の特性や渦構造に及ぼす影響について調べられているが、ノズル構造を改良し、ノズル内部に偏向板・偏向リングを置いて簡易的に速度差を有する同軸噴流の流れに関する研究は見られない。同軸噴流を形成させるためには、通常、別々の圧力源から各ノズルに供給される。もし、1つの流路で噴出直前のところで速度差を生じる同軸噴流を形成させて、噴出後の流れを制御できれば、機器の製造コストや消費エネルギーの低減にも繋がると考え、本研究課題を提案した。

2. 研究の目的

本研究課題では、円形や平面噴流出口直前のノズル内部に縮小または拡大する小さな有限長ノズル（偏向板または偏向リング）を設置することで、簡易的に速度差を有する同軸噴流を形成させて、噴出後のジェットの拡散とエントレインメントを制御するデバイスの研究開発を行うことを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 偏向リング（円形噴流）

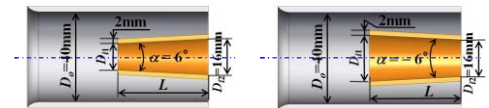
供試偏向リング形状を図1に示す。供試ノズルは円形ノズルと同軸に固定された偏向リングからなり、円形ノズルの直径は $Do=40\text{mm}$ とした。実験は、円形ノズルのスリットに偏向リングを厚さ 1mm の4個のつばによって固定した。また、偏向リング肉厚は 2mm とした。作動流体を空気とし、空気圧縮機によって圧縮された空気は、整流格子、絞り比 20.25 の縮流部を経て、円形ノズル部に供給され円形噴流を形成する。偏向リングの開き角度を α とし、プラスの場合を縮小偏向リング、マイナスの場合を拡大偏向リングとそれぞれ呼ぶ。実験は、縮小及び拡大リング、リング長さ $L/Do=1.0, 2.0, 3.0$ 、偏向リング角度 $\alpha=\pm 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$ と変化させて行った。

(2) 偏向板（平面噴流）

ノズルの概略図を図2に示す。軸流送風機

から空気は、整流部、2つの縮流部（縮流比20および5）を経て、長方形ノズル部に供給される。長方形ノズルは平行部が 260mm であり、出口形状は高さ $H=20\text{mm}$ 、幅 $B=176\text{mm}$ である。ノズルの縦横比は $B/H=8.8$ となる。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 $600\text{mm}\times 800\text{mm}$ の側壁が設置されている。偏向板は板厚 1mm で2枚一組となっており、端部を $70\times 20\times 2\text{mm}$ の板でノズルの中心線に対して対称に支持され、ノズル出口直前に設置される。なお、支持板は剥離しないように上流側を楔形状とした。実験に使用する偏向板は、内側の流路を拡大させた拡大偏向板および縮小させた縮小偏向板の2種類で、偏向板の長さ L を $1H, 2H, 3H$ に変化させ、角度 α を $\alpha=\pm 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ$ に変化させて実験を行った。偏向板の流路幅は上流側を H_{i1} 、下流側を H_{i2} とし、拡大偏向板の場合には $H_{i2}=10\text{mm}$ で一定とした。縮小偏向板の場合には、偏向板長さを変化させる場合は下流側 $H_{i2}=10\text{mm}$ で一定とし、偏向角を変化させる場合には $H_{i1}=10\text{mm}$ で一定とした。

Round nozzle



(a) Divergent deflecting ring (b) Convergent deflecting ring

図1 偏向リングが挿入された円形噴流

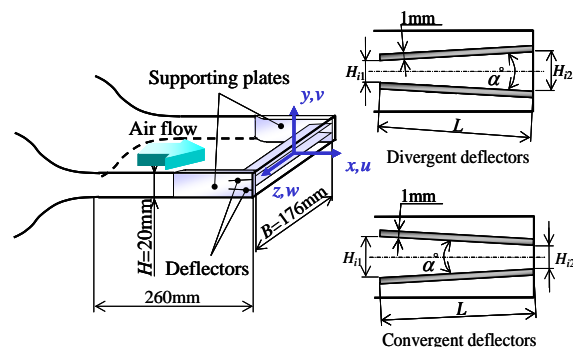


図2 偏向板が挿入された平面噴流

(3) 計測方法

噴流の速度分布計測には、定温度型熱線流速計を使用し、コンピュータで制御されたトラバース装置を使用してノズル高さ・直径の20倍下流域まで測定した。熱線流速計の出力信号は、サンプリング周波数 10kHz でAD変換し、サンプリング数 10^5 点のデータをPCの

ハードディスクに記録した後、時間平均速度、乱れ強さなどを算出した。噴流の速度 U_0 は、偏向板を設置してもノズル出口断面の速度分布から計算し、ノズル出口での平均流速 U_0 が一定となるようにした。

(4) 数値計算方法

解析は ANSYS FLUENT 12.0 を使用し、流れ場を軸対称、非圧縮、定常、粘性流れ、等方性乱流と仮定した。Navier-Stokes 方程式は対流項を QUICK で、その他の項を 2 次精度中心差分法で離散化した。また乱流モデルは Realizable $k-\varepsilon$ モデルを使用し、乱流エネルギー及び散逸率の輸送方程式は 2 次精度風上差分法で離散化した。本研究で使用した計算格子を図 3 に示す。計算領域は半径方向に $15D_0$ 、軸方向に $30D_0$ とし、不等間隔構造格子を用いた。計算格子はノズル壁面の第一格子を $y^+ < 1.0$ とした。x, r 方向の格子点数はそれぞれ 910×380 点で、総格子点数は約 30 万点である。流入条件は円形噴流に一樣分布 U_0 を与え、乱流境界層を発達させるために拡大・縮小リング上流に $4D_0$ の助走区間を設けた。作動流体は 15°C の空気とした。計算領域外側はすべり壁条件とし、出口境界条件を圧力差 $\Delta p = 0$ とした。

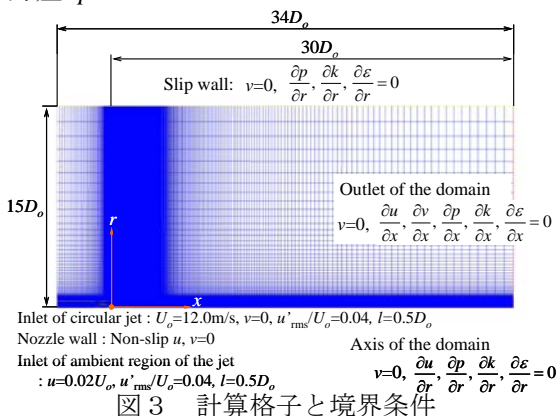


図 3 計算格子と境界条件

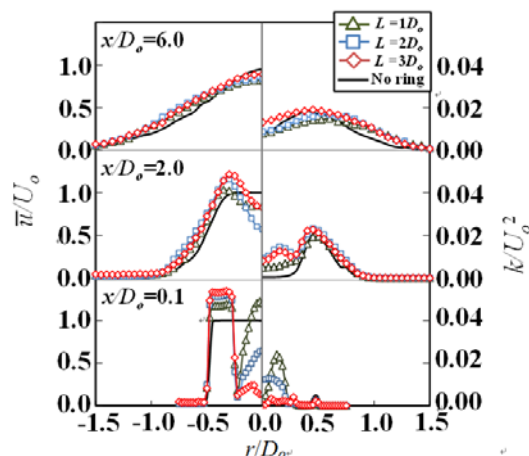
4. 研究成果

(1) 拡大ディフレクターの影響

① 拡大偏向リングを有する円形噴流の流れ特性

図 4 に拡大偏向リングを有する円形噴流の x 方向の時間平均速度分布 u/U_0 および乱れエネルギー分布 k/U_0^2 [$k = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2})/2$] を示す。図 4 (a) を見ると、ノズル出口 ($x/D_0 = 0.1$) においてはリング長さの増加につれて、外側の環状噴流 (以後、外側噴流) ではわずかに増速する。内側の円形噴流 (以後、内側噴流) では減速し、 $L = 1D_0$ において外側噴流と内側噴流の最大速度比 \bar{u}_i/\bar{u}_o はほぼ 1 であるが、 $L = 3D_0$ においては、拡大偏向リングの入口直径が $D_{i1} = 3.4 \text{ mm}$ と極端に小さいため、速度比は小さく $\bar{u}_i/\bar{u}_o = 0.1$ となる。その後、下流域の $x/D_0 = 6$ 付近になると、発達した速度分布となる。図 4 (b) を見ると、ノズル出口において、リン

グ長さの増加につれて内側噴流の速度の減少により乱れ強さは小さくなる。その後、下流域の $x/D_0 = 6$ では $L = 3D_0$ の拡大偏向リングを設置した円形噴流の中心軸の速度が大きいため、それに伴い、乱れ強さも若干大きくなっている。図 5 に中心軸上の速度分布を示す。 $L = 1D_0, 2D_0$ のリングの場合、ノズル出口から $x/D_0 = 3$ と 1.5 付近にかけて速度が極小値をとる。これは、速度が大きい外側噴流側へ内側噴流の流れが引き寄せられるためであり、その後速度は増加し、極大値をとり減少していく。 $L = 3D_0$ のリングの場合は中心軸上の速度分布に極小値が存在せず、 $x/D_0 = 4$ 付近で極大値をとった後、減少していく。 $x/D_0 > 10$ の下流ではリング長さの影響は見られず、分布に差が見られなくなる。図 6 に噴流の半値幅の x 方向変化を示す。拡大偏向リングを有する円形噴流が噴流の広がり $x/D_0 > 2$ で大きくなるが、リング長さによる違いは大きくない。



(a) 平均速度 (b) 乱流エネルギー

図 4 拡大偏向リング付き円形噴流の流れ特性

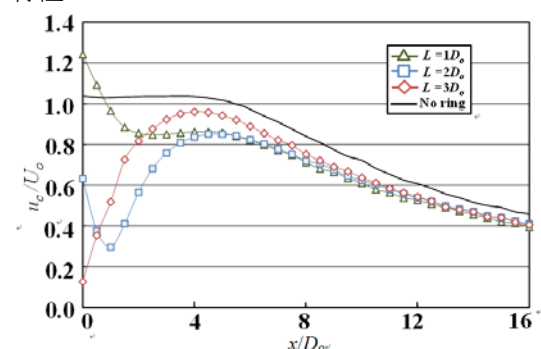


図 5 拡大偏向リング付き円形噴流の中心軸上の速度分布

② 拡大偏向板を有する平面噴流の流れ特性

図 7 に拡大偏向板を有する平面噴流の x 方向の時間平均速度分布 \bar{u}/U_0 および乱れエネルギー分布 k/U_0^2 を示す。円形噴流と同様に、ノズル出口の速度分布を見ると、偏向板の長

さの増加につれて、外側噴流では増速、内側噴流では減速が生じる。図 7 (b)を見ると、偏向板内部で生じた乱れのためにノズル出口での内側噴流の乱れは増加するが、外側噴流は加速されて噴出するためいずれの噴流においても乱れ強さは小さい。図 8 に噴流の半値幅の x 方向変化を示す。半値幅は $x/H=1.5$ 付近から急激に増加する。これは円形噴流の場合にも見られ、外側噴流の速度の増加により周囲流体との速度勾配が大きくなり乱れが増加して噴流が拡大したと考えられる。

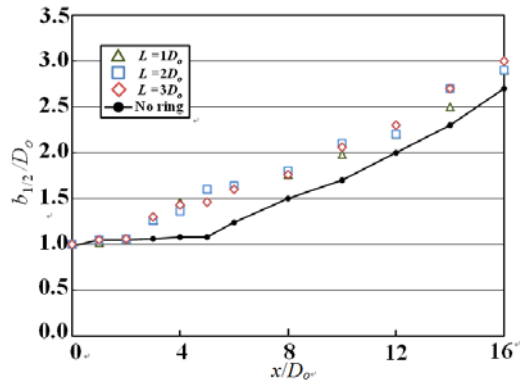
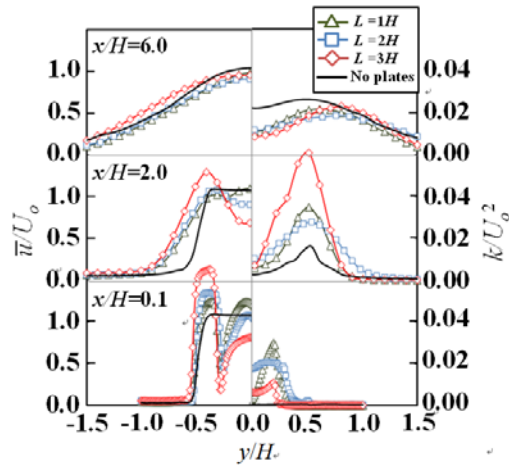


図 6 拡大偏向リング付き円形噴流の半値幅の x 方向変化



(a) 平均速度 (b) 乱流エネルギー
図 7 拡大偏向板付き平面噴流の流れ特性

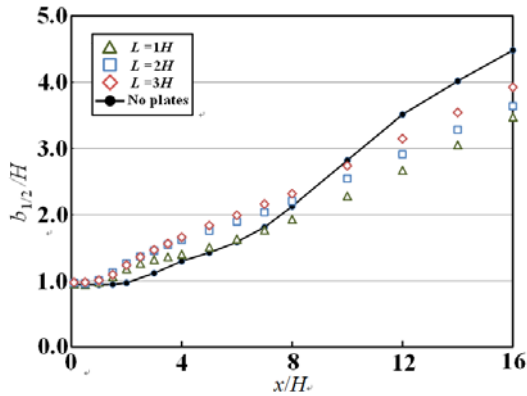
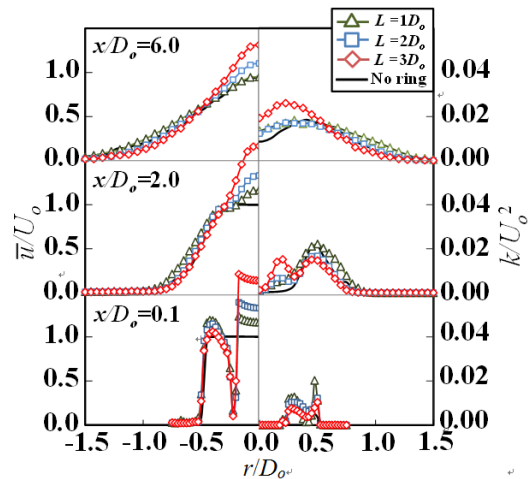


図 8 拡大偏向板付き平面噴流の半値幅の x 方向変化

(2) 縮小ディフレクターの影響

① 縮小偏向リングを有する円形噴流の流れ特性

図 9 に縮小偏向リングを有する円形噴流の x 方向の時間平均流速分布 \bar{u}/U_o および乱れエネルギー分布 k/U_o^2 を示す。図 9 (a)を見ると、ノズル出口において、リング挿入による流路面積の減少と壁面から境界層の発達のため、内側および外側噴流ともに増速が生じ、リング長さの増加につれて内側噴流での増速が大きいが、外側噴流の速度はほとんど変化しない。速度比 \bar{u}_i/\bar{u}_o は $L=1D_o, 2D_o, 3D_o$ でそれぞれ 1.0, 1.2, 1.6 となる。図 9 (b)を見ると、ノズル出口において、内側噴流の乱れ強さは小さく、外側噴流では外側噴流と周囲流体の間の速度勾配と外側噴流内の剥離による乱れにより、乱れ強さに 2 つのピークが存在する。図 10 に噴流の半値幅の x 方向変化を示す。縮小リングを設置した円形噴流の場合、内側噴流の速度が増加するため半値幅は 1 より減少し、噴流の広がりとは拡大偏向リングの場合と比較して小さい。



(a) 平均速度 (b) 乱流エネルギー
図 9 縮小偏向リング付き円形噴流の流れ特性

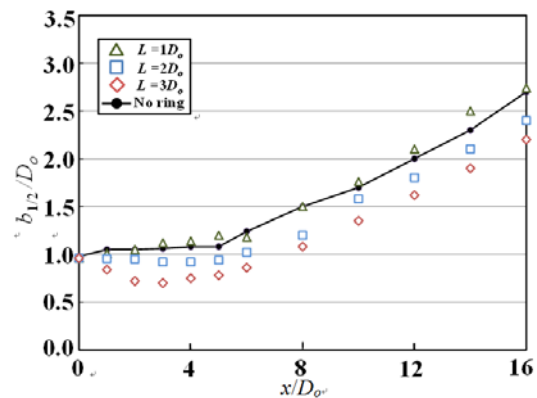
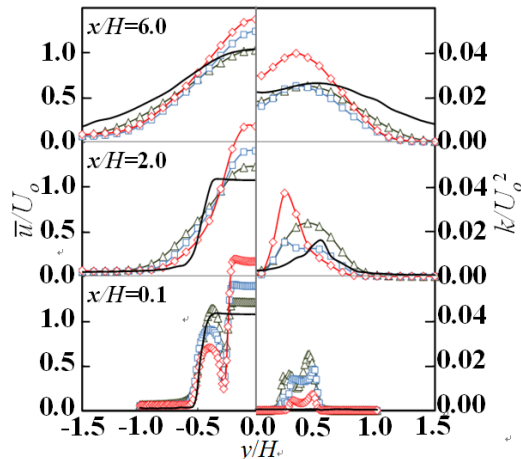


図 10 縮小偏向リング付き円形噴流の半値幅の x 方向変化

②縮小偏向板を有する平面噴流の流れ特性

図 11 に縮小偏向板を有する平面噴流の x 方向の時間平均速度分布 \bar{u}/U_0 および乱れエネルギー分布 k/U_0^2 を示す。図 11(a) を見ると、ノズル出口では偏向板の長さの増加につれて、外側噴流では減速、内側噴流では増速する。しかし、外側噴流の減速割合が大きく、速度比は $L=1H, 2H, 3H$ でそれぞれ 1.0, 1.6, 2.4 となる。図 11(b) を見ると、ノズル出口において外側噴流の乱れ強さが大きくなるが、内側噴流ではポテンシャルコアを有しているため乱れ強さが小さい。図 12 に噴流の半値幅の x 方向変化を示す。縮小偏向板を有する平面噴流は外側噴流と周囲流体との速度勾配が小さいため噴流の広がりが抑制される。



(a) 平均速度 (b) 乱流エネルギー
図 11 縮小偏向板付き平面噴流の流れ特性

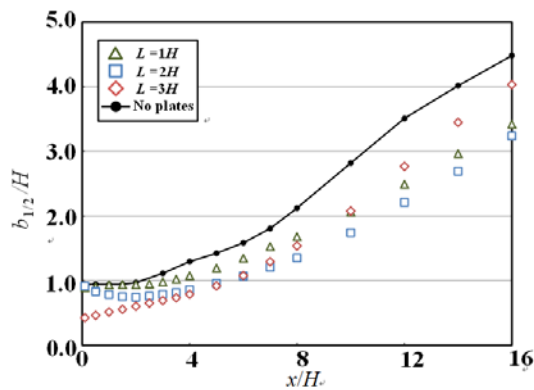


図 12 縮小偏向リング付き平面噴流の半値幅の x 方向変化

(3) 数値計算との比較

図 13 に円形噴流及び拡大・縮小偏向リングを設置した場合の中心線上軸方向平均速度分布を実験値及び CFD 解析結果を合わせて示す。実験値と CFD 解析結果は定性的に一致し、 $x/Do > 6.0$ の領域で中心線上平均速度分布は指数関数で減衰する。偏向リングを設置した場合の中心線上速度の減衰は、 x/Do の -1.25 乗に比例して減衰する。これは乱流軸

対称噴流の理論解である Tollmien 解により得られる減衰率 ($n=-1.0$) よりも低い値となり、理論解と比べて中心軸速度の減衰が大きくなっている。また、拡大偏向リングの場合は縮小偏向リングの場合と比較して、 $x/Do=1.0$ から $x/Do=7.0$ の領域で中心線上速度が減少する。

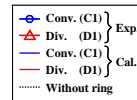


図 13 偏向リング付き円形噴流の中心軸上の速度分布

(4) ディフレクター形状と速度比の関係

拡大・縮小ディフレクターを有する円形および平面噴流の内側および外側ノズルの絞り比と速度比 u_i/u_o の関係をすべてのノズル形状においてプロットしたものを図 14 に示す。図 14(a) の拡大ディフレクターを有する噴流は内側ノズルの絞り比 (内側絞り比) $A_{i1}/A_{i2} < 0.6$ では絞り比と速度比はほぼ比例しているが、 $A_{i1}/A_{i2} > 0.6$ では速度比 $\bar{u}_i/\bar{u}_o = 1.0$ と変化しなくなる。次に縮小ディフレクターを有する円形および平面噴流の外側ノズルの絞り比 (外側絞り比) A_{o2}/A_{o1} と速度比 \bar{u}_i/\bar{u}_o の関係をまとめた図 14(a) を見ると、縮小ディフレクターを有する噴流は外側絞り比と速度比がほぼ比例することがわかる。

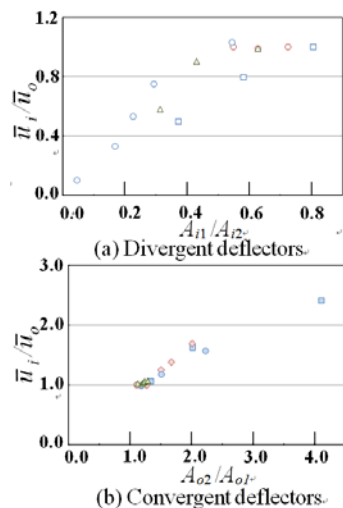


図 14 拡大・縮小ディフレクターを有する円形および平面噴流の内側および外側ノズルの絞り比と速度比 \bar{u}_i/\bar{u}_o の関係

(5) まとめ

拡大・縮小ディフレクターを有する円形及び平面噴流の流れ特性を調べ、以下の結果を得た。

- ①拡大ディフレクターを有する円形及び平面噴流は、ディフレクターの長さの増加につれて外側噴流では増速、内側噴流では減速が生じ、噴流の広がりは大きくなる。
- ②縮小ディフレクターを有する円形及び平面噴流は、ディフレクターの長さの増加につれて外側噴流で減速、内側噴流で増速が生じ、噴流の広がり小さくなる。
- ③拡大ディフレクターを有する噴流出口の速度比 \bar{u}_i/\bar{u}_o は、内側絞り比 $A_{i1}/A_{i2} < 0.6$ ではほぼ比例し、 $A_{i1}/A_{i2} > 0.6$ では $\bar{u}_i/\bar{u}_o \approx 1.0$ となる。一方、縮小ディフレクターを有する噴流出口の速度比 \bar{u}_i/\bar{u}_o は外側絞り比 A_{o2}/A_{o1} にほぼ比例する。

以上のように、簡易的に速度差が生じる同軸噴流を形成させ、噴出後のジェットの開散とエンタインメントの制御可能なノズルを開発し、同軸噴流における大規模な渦構造と縦渦構造との干渉による噴流の混合開散のメカニズムが明らかにされ、今後同軸噴流を利用した機器などに応用されていくことが期待される。

これらの研究成果は、日本機械学会の国内と国際会議の講演会、可視化情報学会で報告しており、今後、日本機械学会論文集にこれらの結果を投稿予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ①Kiwata, T., Usuzawa, T., Komatsu, N., Kimura, S., Oshikai, P., Flow Structure of a Coaxial Circular Jet with Axisymmetric and Helical Instability Modes, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 6, No. 4, pp. 437-452, (2011), 査読有

〔学会発表〕(計 12 件)

- ①Usuzawa, T., Kiwata, T., Yoshida, Y., Kimura, S., Komatsu, N., Flow Characteristics of a Round Jet with Divergent or Convergent Ring, Proceedings of The 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, pp.1-6, Nagoya, JAPAN, (2013. 9. 18).
- ②平野大慈, 臼沢太一, 木綿隆弘, 木村繁男, 小松信義, 拡大・縮小ディフレクターを有する円形及び平面噴流の流れ特性に関する研究, 日本機械学会 2012 年度年次大会・DVD-ROM 論文集, S054082, 金沢大, (2012. 9. 10).
- ③樋本航, 臼沢太一, 木綿隆弘, 木村繁男,

小松信義, ノズル内部に偏向板を設置した平面噴流の流れ特性 (鋸歯状タブの影響), 日本機械学会 2012 年度年次大会・DVD-ROM 論文集, S054082, 金沢大, (2012. 9. 10).

- ④Hinomoto, H., Kiwata, T., Kimura, S., Komatsu, N., Flow characteristics of a Plane Jet with Deflectors inside a Nozzle, Proceedings of The 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, GSF28-010 (USB), pp.1-4, Incheon, KOREA, (2012. 3).

⑤平野大慈, 木綿隆弘, 木村繁男, 小松信義, 内側拡大・縮小リングを有する円形噴流の流れに関する研究, 可視化情報全国講演会 (富山 2011)・講演論文集, 2011 Vol. 31 Suppl. No. 2, pp. 9-10, 富山, (2011. 9. 26).

⑥樋本航, 木綿隆弘, 木村繁男, 小松信義, ノズル内部に偏向板を設置した平面噴流の流れ特性, 日本機械学会 2011 年度年次大会・DVD-ROM 論文集, S054082, 東工大, (2011. 9. 13).

⑦臼沢太一, 木綿隆弘, 小松信義, 木村繁男, 拡大・縮小リングを有する円形噴流の数値シミュレーション, 日本機械学会北陸信越支部第 48 期総会・講演会講演論文集, No. 117-1, pp. 87-88, 上田, (2011. 3. 5).

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ms.t.kanazawa-u.ac.jp/~fluid>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木綿 隆弘 (KIWATA TAKAHIRO)
金沢大学・機械工学系・教授
研究者番号: 40225107

(2) 研究分担者

木村 繁男 (KIMURA SHIGEO)
金沢大学・環日本海域環境研究センター・教授
研究者番号: 70272953

小松 信義 (KOMATSU NOBUYOSHI)
金沢大学・機械工学系・助教
研究者番号: 20436827