

令和 4 年 6 月 26 日現在

機関番号：53301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2021

課題番号：19K23500

研究課題名（和文）環状配置された複数ノズルによる円形噴流の混合制御技術の開発

研究課題名（英文）The development of flow control method for the circular jet using surrounding sub nozzles

研究代表者

寺本 裕志 (Teramoto, Hiroshi)

石川工業高等専門学校・機械工学科・助教

研究者番号：70847376

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、円形主ノズル孔の周囲に複数個の副ノズル孔を配置したノズルによって形成される複数噴流の流れ特性を解明することを目的とし、副噴流による円形主噴流の混合制御手法を提案する。円形副ノズルを用いた場合、主・副ノズルの直径比が1/2の場合に得られる出口速度比は1である。主噴流の到達距離はノズル直径の約5倍で、副ノズル孔数の影響はほぼみられない。副ノズル孔数によらず個々の円形噴流が広がることで噴流同士の合流が生じており、円形主ノズルと円形副ノズルの間隔を主ノズル直径の3倍程度に広げることで、主噴流の混合を促進できる。同様の効果は、主・副ノズルの間隔を同じく3倍程度にした楕円形副ノズルでも得られる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により得られた成果は複数噴流利用機器の性能向上や設計に資する知見と考える。これまでに研究報告例が極めて少ない、円形主噴流に対する円形及び楕円形複数副噴流による受動的制御について実験的な手法によって種々の流動特性を明らかにし、円形主噴流の到達距離の短縮・混合の促進が可能な条件を見出した。その他にも噴流の発達過程における速度分布の変化や混合の強さ、また噴流の変形の様子などについて明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to investigate the flow characteristics of multiple jets formed by a circular nozzle surrounded by multiple sub nozzles, and to propose a method to control mixing of the circular main jet by the sub jets. When circular sub nozzles are used, the velocity ratio is 1. When the diameter ratio of the main and sub nozzles is 1/2, the main jet reached about 5 times the nozzle diameter. The merging of the jets is caused by the spreading of the each circular jets, regardless of the number of sub nozzles, and mixing of the main jets can be accelerated by increasing the distance between the main nozzle and the circular sub nozzles to about three times the main nozzle diameter. A similar effect can be obtained with elliptic sub nozzles, where the distance between the main and sub nozzles is also about three times the diameter of the main nozzle.

研究分野：流体工学

キーワード：噴流 複数円形ノズル 流体計測 流体混合 噴流の干渉 熱線流速計

1. 研究開始当初の背景

噴流は種々の産業・エネルギー機器に利用されており、それらの機器の性能向上には噴流の制御技術の確立と発展が望まれる。噴流の混合を促進または抑制する手法には、噴流ノズル出口部分にタブ等の突起を設置することによる噴流自由せん断層への縦渦の発生や、ノズル内部にテーパ状短管を設置することによる中心噴流と環状噴流に速度差を与えるなどの手法がある。これらの噴流制御手法は外部からのエネルギー供給を不要とする受動的制御であり、単純な構造を用いて噴流の流れ特性を大きく変化させられる手法として、未だ発展の余地がある。

一方、多孔ノズルから噴出する複数噴流は、多孔バーナを用いたガスタービン燃焼器や燃料インジェクタなどに応用されている。しかし、複数噴流の流動・発達特性に関する研究は極めて少ないため、複数噴流を利用する機器の設計は試行錯誤的に実施されている。そのため、効果的な機器の設計に資する体系的な複数噴流の流動特性に関する知見が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、円形主ノズル周囲に複数個の副ノズルを環状に配置した多孔ノズルによって形成される複数噴流を取扱う。主円形噴流と複数副噴流による合成噴流の流動特性を解明するとともに、噴流同士の干渉を利用した周囲流体との混合制御手法を提案する。本研究では主ノズル孔直径 d_1 と副ノズル孔直径 d_2 の比を $d_2/d_1 = 0.5$ とし、具体的に以下の事柄を明らかにする。

- (1) 円形副ノズルを用いた場合に、副ノズルの孔数が流動特性に及ぼす影響。
- (2) 円形副ノズルを用いた場合に、主ノズルと副ノズルの間隔が流動特性に及ぼす影響。
- (3) アスペクト比 2 の楕円形副ノズルを用い、副ノズルの形状が流動特性に及ぼす影響。

3. 研究の方法

本研究では、円形主噴流と円形及び楕円形副噴流による複数噴流の流れ場について、実験的に調べた。図 1 に実験装置の概略図を示す。風洞の縮流胴出口部分にノズル板を設置することで、噴流を発生させた。

図 2 に座標系及びノズル板の概略図を示す。主ノズル出口中心を原点とし、 x, y, z 各方向の速度成分を u, v, w で定義する。後述する各条件におけるノズル板は、厚さ 10 mm のアクリル樹脂製平板をレーザ加工することによって製作した。主ノズル孔と副ノズル孔の直径比は $d_2/d_1 = 0.5$ である。まず、円形副ノズルの場合に、副ノズル孔数が噴流の流動特性に及ぼす影響を調べるために、 $d_1 = 24$ mm, $d_2 = 12$ mm の主・副ノズルを用いてノズル間隔比を $r/d_1 = 1.5$ で一定としたまま、副ノズル孔数 n を $n = 2, 4, 6, 8, 10$ に変化させた。続いて、円形副ノズルの場合に、主ノズルと副ノズルの間隔が及ぼす影響を調べるために、副ノズル孔数を $n = 8$ としてノズル間隔比を $r/d_1 = 1.5, 3, 4$ に変化させた。最後に、副ノズルの形状による影響を調べるために、副ノズル孔数 $n = 8$ 、ノズル間隔比 $r/d_1 = 3$ として副ノズルを長軸 $2a = 11.2$ mm, 短軸 $2b = 5.6$ mm (アスペクト比 2. 断面積に基づく等価直径 $d_{e2} = 7.9$ mm. ノズル直径比 $d_{e2}/d_1 \approx 0.5$) の楕円形へ変化させた。表 1 に各ノズル間隔比におけるノズル寸法を示す ($n = 8$ の場合)。

実験手法については、主ノズル直径 d_1 と代表速度 U_{cl} に基づくレイノルズ数を、完全な乱流噴流となっている $Re (= \rho U_{cl} d_1 / \mu, \rho, \mu$: 空気の密度と粘性係数) $= 1.21 \times 10^4$ として実験を行った。こ

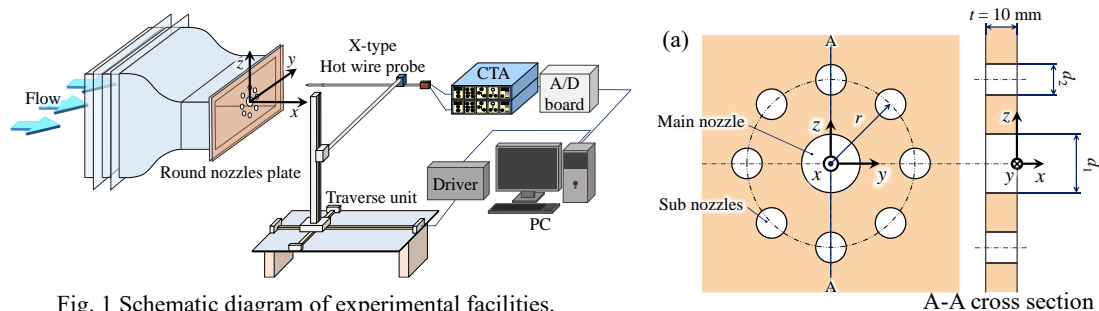


Fig. 1 Schematic diagram of experimental facilities.

Table 1 Dimensions of the nozzles.

Sub-nozzle shape	r/d_1	d_1	d_2	D_e
Round	1.5	24 mm	12 mm	41.6 mm
Round	3	16 mm	8 mm	27.7 mm
Round	4	17 mm	7 mm	24.2 mm
Elliptic	3	16 mm	7.9 mm ($= 2\sqrt{ab}$)	27.5 mm

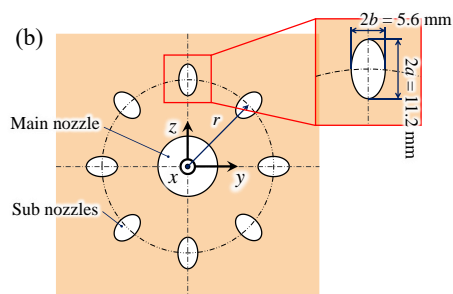


Fig. 2 Round nozzle surrounded by (a) round and (b) elliptic multiple sub nozzles.

ここで、 U_{cl} は主ノズル出口中心($x = 1.5 \text{ mm}$, $y = z = 0$)における速度である。速度分布の測定には、線形化器及び温度補償器を備えた定温度型熱線流速計(Continuous Temperature type Anemometer, CTA)とX形熱線プローブを使用した。プローブの位置決めには図1に示したような x, y, z 各軸のステップモータをパーソナルコンピュータで制御する三次元トラバース装置を用いた。CTAからの出力信号について、PCに備えられた14bitのAnalog/Digital(A/D)変換器によって、サンプリング周波数10kHz、測定座標1点あたり 5×10^4 個(5秒間)のデータを取得した。取得したデータから各方向の時間平均速度や速度変動の乱れ強さを算出した。また、本研究における速度分布測定実験では、流れ場の対称性から噴流の1/4の領域(第1象限)のみを測定対象とした。

4. 研究成果

(1) 副ノズルの孔数による影響

図3に噴流中心軸上の x 方向時間平均速度分布 \bar{u}_c/U_{cl} を、副噴流なしの円形単噴流($d = 24 \text{ mm}$)の結果と併せて示す。主噴流のポテンシャルコア長さ x_c を $\bar{u}_c/U_{cl} \geq 0.95$ である距離と定義すれば、副噴流のノズル孔数に関わらず $x_c/d_1 \approx 5$ で円形単噴流と同等であり、副ノズル孔数の変化は主噴流のポテンシャルコアの延伸には寄与しないといえる。 $n = 4 \sim 10$ の場合、 $5 < x/d_1 \leq 20$ での速度減衰は円形単噴流に対して緩やかであり、概ね $x^{-1/2}$ に比例するが、この範囲では主噴流と副噴流との合流が生じており、噴流が未発達であるためと考えられる。 $x/d_1 \geq 20$ では完全発達した円形単噴流と同様に速度減衰はほぼ x^{-1} に比例する。

図4にノズル中心断面($y = 0$)主ノズル直径で無次元化した時間平均速度分布の半値半幅 $b_{1/2}/d_1$ の x 方向変化を示す。円形単噴流が x の約0.08倍で広がることに対して、副噴流を有する場合にはいずれの副ノズル孔数の場合でも広がりが抑制されており、 $n = 8$ の場合には x の約0.04倍である。したがって、円形複数副ノズルを用いることで流れの広がりを抑制できるといえる。

図5にノズル中心断面($y = 0$)における x 方向時間平均速度分布 \bar{u}/U_{cl} を円形単噴流の結果と併せて示す。本研究で用いた複数ノズルでは主噴流と副噴流の出口速度差はほぼ得られず、主噴流と副噴流の速度比が1の複数噴流となった。 $1 < x/d_1 \leq 5$ の速度分布をみると、いずれの副ノズル孔数の場合でも副噴流のポテンシャルコアが消滅する $x/d_1 = 3$ の位置で主噴流と副噴流間の速度が増加し、噴流同士が合流し始めている。副ノズル直径 d_2 を考慮すれば、副噴流は円形自由噴流として発達し、各々の噴流の広がりによって主噴流との合流を生じるといえる。一方、主噴流のポテンシャルコア領域は $x/d_1 = 5$ で消滅しており、中心軸上速度分布と一致している。 $x/d_1 \geq 10$ では副噴流の速度のピークは消滅し、主噴流と完全に合流してひとつの噴流を形成・発達していく。

(2) 円形副ノズルを用いた場合に、主ノズルと副ノズルの間隔が流動特性に及ぼす影響

図6に噴流の中心軸上 x 方向時間平均速度分布 \bar{u}_c/U_{cl} を、副噴流なしの円形単噴流($d = 24 \text{ mm}$)の結果と併せて示す。図6には後述する副ノズル孔形状を楕円形に変化させた場合の結果も掲載している。間隔比が $r/d_1 = 1.5$ の円形副ノズルの場合にはポテンシャルコア長さは $x_c/d_1 \approx 5$ であり、円形単噴流のポテンシャルコア長さとはほぼ等しい。単噴流では $x/d_1 > 5$ において x^{-1} に比

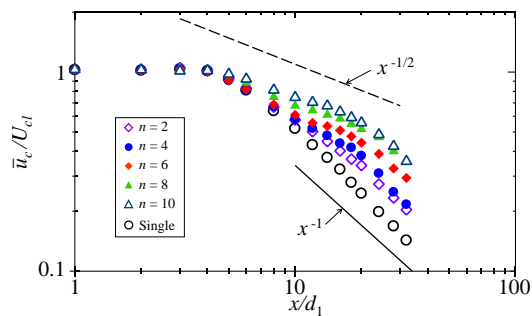


Fig. 3 Distributions of dimensionless centerline velocity along x -axis, \bar{u}_c/U_{cl} , for number of sub nozzles, $n = 2 \sim 10$.

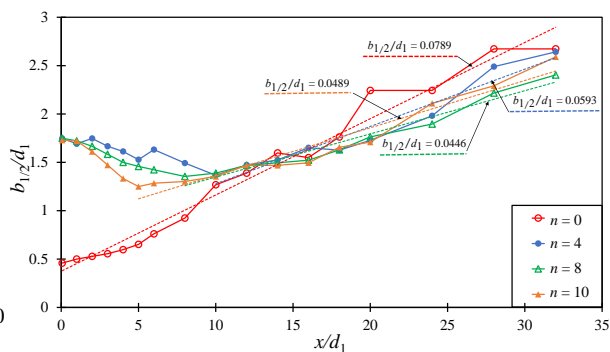


Fig. 4 Variation of the jet half width of dimensionless mean velocity profiles, $b_{1/2}/d_1$, for number of sub nozzles $n = 2 \sim 10$.

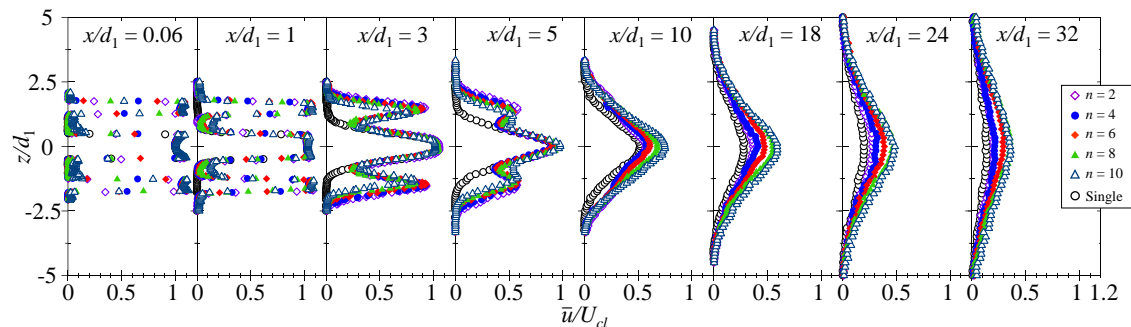


Fig. 5 Profiles of dimensionless mean velocity, \bar{u}/U_{cl} , along x -axis for number of sub nozzles, $n = 2 \sim 10$ at the nozzle center plane of $y/d_1 = 0$.

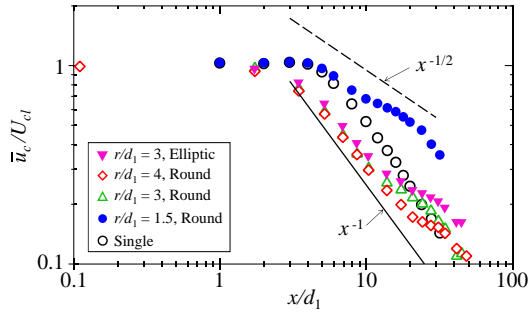


Fig. 6 Distributions of dimensionless centerline velocity along x -axis, \bar{u}_c/U_{cl} .

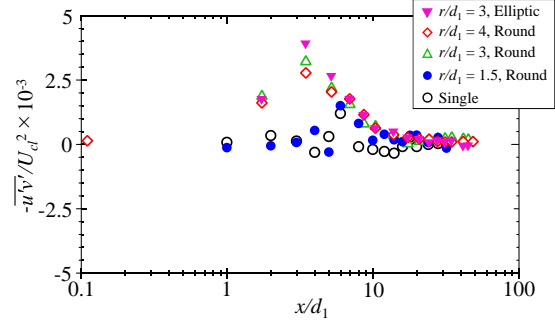


Fig. 7 Distributions of dimensionless centerline Reynolds shear stress, $-\overline{u'v'}/U_{cl}^2$ on the centerline.

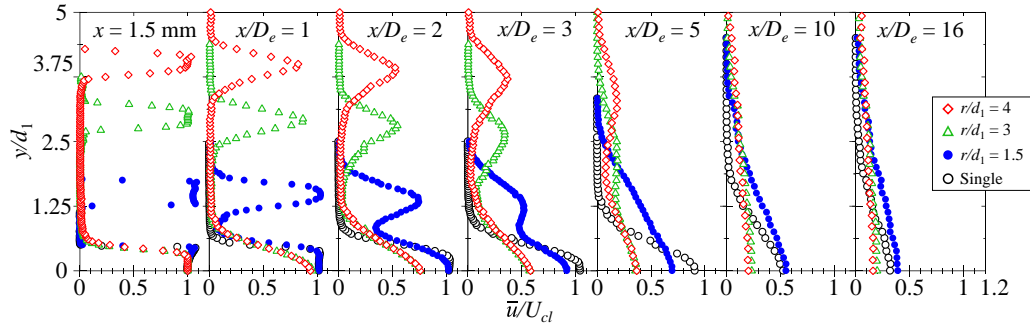


Fig. 8 Profiles of dimensionless velocity mean velocity, \bar{u}/U_{cl} , along x -axis for the nozzle spacing ratios, $r/d_1 = 1.5, 3$ and 4 at the nozzle center plane of $z/d_1 = 0$.

例した速度減衰となるが、間隔比 $r/d_1 = 1.5$ では $5 < x/d_1 < 10$ で概ね $x^{-1/2}$ に比例した速度減衰となる。その後は単噴流と異なり、 $10 < x/d_1 < 20$ では減衰が一旦緩やかに変化し、 $x/d_1 > 20$ ではほぼ x^{-1} の減衰となる。速度減衰の傾きが変化する位置は主噴流と副噴流の合流が完了、ひとつの噴流として発達する位置である。一方、間隔比 $r/d_1 = 3, 4$ では $x_c/d_1 \approx 2$ であり、ポテンシャルコア長さを短縮する効果がみられた。速度減衰については、間隔比 $r/d_1 = 3$ では $x/d_1 \leq 15$ ではほぼ x^{-1} に比例して減衰し、 $15 < x/d_1 < 30$ で傾きが緩やかに変化した後、再び x^{-1} で減衰する。間隔比 $r/d_1 = 4$ では、主・副噴流の間隔が広く $r/d_1 = 3$ よりも合流が遅れるため、速度減衰が緩やかになるのは $x/d_1 \approx 20$ からである。

図7に噴流中心軸上でのレイノルズせん断応力分布 $-\overline{u'v'}/U_{cl}^2$ を示す。主噴流ポテンシャルコア長さが短縮された $r/d_1 = 3, 4$ の円形副ノズルの場合、 $x/d_1 \approx 2$ で $-\overline{u'v'}/U_{cl}^2$ が最大となり、その大きさも円形単噴流及び $r/d_1 = 1.5$ の円形副ノズルの場合に比べてほぼ倍増している。したがって、間隔比 $r/d_1 \geq 3$ で円形副ノズルを配置すれば主噴流の混合を促進する効果が得られるといえる。

図8にノズル中心断面 ($z=0$) の x 方向時間平均速度分布 \bar{u}/U_{cl} を円形単噴流の結果と併せて示す。いずれの間隔比の場合も、 $x/D_e = 1 \sim 2$ (D_e : ノズル出口総断面積に基づく等価直径) で副噴流の速度減衰が始まっており、発達した乱流噴流の速度分布に漸近している。 $x/D_e = 1 \sim 3$ をみると、いずれの場合でも副噴流中心位置はわずかに主噴流側へ移動するが、移動量は $0.25d_1$ 程度である。 $x/D_e \geq 5$ では副噴流が個々の円形単噴流として発達して広がることで主噴流と合流し、副噴流の速度のピークはやがて消滅する。 $r/d_1 = 1.5$ の副ノズルの場合には $x/D_e = 10$ で発達した円形乱流噴流と同様の速度分布となり、全体が単噴流を形成していることがわかる。この位置では、図6の中心軸上速度分布において速度減衰の傾きが緩やかになっており、副噴流との合流が主噴流中心軸上速度分布に影響しているといえる。 $r/d_1 = 3, 4$ では、主噴流と副噴流の距離が離れているため、 $r/d_1 = 1.5$ の場合に比べて主・副噴流の合流が遅く、 $x/D_e = 10$ の位置でも副噴流の影響が残る速度分布となる。 $x/D_e = 16$ 以降の下流では発達した速度分布となり、噴流中心軸上速度は $r/d_1 = 1.5$ の場合に比べて減少し、 $\bar{u}/U_{cl} \approx 0.2$ である。

(3) アスペクト比2の楕円形副ノズルを用い、副ノズルの形状が流動特性に及ぼす影響。

先に示した図6の噴流の中心軸上 x 方向時間平均速度分布 \bar{u}_c/U_{cl} から、楕円形副ノズルの場合、主噴流のポテンシャルコア長さは $x_c/d_1 \approx 2$ であり、 $r/d_1 = 3, 4$ の円形副ノズルと同様に円形主噴流のポテンシャルコア長さを短縮する効果がみられた。また、図7に示した噴流中心軸上でのレイノルズせん断応力分布 $-\overline{u'v'}/U_{cl}^2$ から、楕円形副ノズルの場合にも $x/d_1 \approx 2$ で $-\overline{u'v'}/U_{cl}^2$ が最大、大きさも $r/d_1 = 3, 4$ の円形副ノズルの場合と同等である。したがって、円形主噴流の混合促進には、副ノズル形状はあまり影響せず、ノズル間隔比の方が大きく影響するといえる。

図9に副ノズル形状を円形及び楕円形に変化させた場合の噴流断面 ($y-z$ 断面) における x 方向時間平均速度 \bar{u}/U_{cl} の等値線図を示す。縦・横両軸は y 及び z 座標を等価直径 D_e で無次元化している。円形副ノズルの場合には $x/D_e = 1$ では主噴流・副噴流ともにノズル出口から円形の形状で噴出している。 $x/D_e = 2, 3$ での副噴流の速度分布形状をみると、副ノズルピッチ円の周方向へわずかに伸長している。このような噴流の変形は隣接する噴流同士のエンタインメントによるが、円形副噴流では影響はあまり大きくない。また、 $x/D_e = 3 \sim 10$ にかけて、副噴流の速度が大き

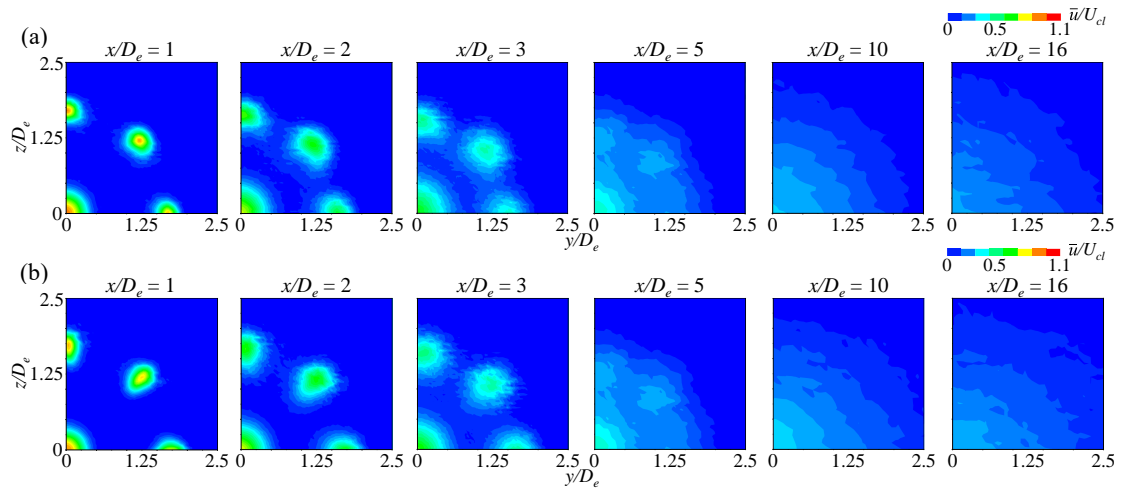


Fig. 9 Contour plots of dimensionless velocity along x -axis, \bar{u}/U_{cl} at the y - z cross section for (a) round sub jets and (b) elliptic sub jets with the nozzle spacing ratio, $r/d_1 = 3$.

い部分が徐々に消滅しながら、 $x/D_e = 16$ 以降では最大速度が $\bar{u}/U_{cl} \leq 0.2$ の円形の速度分布へと変化する。したがって、円形副噴流を有する円形主噴流の場合、概ね個々の円形噴流が発達して広がることで噴流同士が合流・混合し、最終的に円形単噴流が形成される。一方、楕円形副ノズルの場合、 $x/D_e = 1$ では円形副ノズルの場合と同様にノズル出口形状に沿った速度分布である。 $x/D_e = 2, 3$ では副噴流の速度分布形状は円形に変化しており、 $x/D_e = 3 \sim 10$ にかけて副噴流は減速しながら主噴流と混合していく。一般に、アスペクト比 $a/b = 2$ 程度の楕円形単噴流では楕円形の長軸と短軸が入替わる軸スイッチング現象が生じるが、今回の結果より、円形主噴流周囲に配置された副噴流として $r/d_1 = 3$ のノズル間隔比をもって噴出する場合、軸スイッチングを生じずに噴流同士の合流に至ることが明らかになった。 $x/D_e = 16$ 以降では、円形副ノズルの場合と同様に最大速度が $\bar{u}/U_{cl} \leq 0.2$ の円形単噴流が形成される。

(4) 成果のまとめ

本研究から得られた成果は以下のとおりである。

- ① 主ノズルと副ノズルの直径比が $d_2/d_1 = 0.5$ の場合、円形主噴流と副噴流のノズル出口速度の比は 1 である。
- ② 円形副ノズルの場合、噴流のポテンシャルコア長さは円形主噴流で $x/d_1 \approx 5$ 、円形副噴流で $x/d_1 \approx 3$ ($x/d_2 \approx 6$) であり、円形主噴流のポテンシャルコア長さには副噴流のノズル孔数 n は影響しない。また、中心軸上速度の減衰は、主噴流と副噴流の合流後の未発達な領域では $x^{-1/2}$ に比例し、完全発達後は x^{-1} に比例する。
- ③ ノズル間隔比 $r/d_1 \geq 3$ で円形副ノズルを配置することで混合を促進することができ、主噴流のポテンシャルコア長さを短縮する。
- ④ 中心軸上速度の減衰には主噴流と副噴流の混合・合流が影響しており、合流が完了する位置で速度減衰の傾きが緩やかに変化する。
- ⑤ 円形副噴流は、ノズル間隔比によらず副噴流中心がほぼ移動せず、個々の円形副噴流が発達して広がることで隣接する副噴流同士、また主噴流との合流を生じる。充分下流では全体が円形単噴流を形成する。
- ⑥ ノズル間隔比 $r/d_1 = 3$ の楕円形副噴流は、同じ間隔比の円形副噴流と同様に円形主噴流の混合を促進する効果が得られる。
- ⑦ $r/d_1 = 3$ の楕円形副噴流は、軸スイッチングを生じることなく円形噴流状の速度分布に変化しながら広がり、合流する。また、円形副噴流の場合と同様に下流では単噴流を形成する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hiroshi TERAMOTO, Takahiro KIWATA, Kako YAJIMA	4. 巻 Vol.15, No.2
2. 論文標題 Influence of nozzle aspect ratio and orientation on flow characteristics of multiple elliptic jets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jfst.2020jfst0012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 寺本裕志, 木綿隆弘
2. 発表標題 円形噴流の流れ特性に及ぼすノズル周囲に配した副噴流の影響
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寺本裕志, 木綿隆弘, 矢嶋華子
2. 発表標題 ノズル周囲に円形副噴流を配した円形噴流の流れ特性
3. 学会等名 日本機械学会第98期流体工学部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Teramoto, Takahiro Kiwata, Kako Yajima
2. 発表標題 Influence of Nozzle Aspect Ratio and Orientation on Flow Characteristics of Multiple Elliptic Jets
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------