

スタガード・アレイ・ジェットによる流れ場の空間制御

学籍番号 80121822 桑原暁 指導教員 菱田公一 教授

1. 緒言

噴流は化学反応器、加熱や冷却といった様々な工業分野で用いられているため、混合や熱伝達の制御を目的とした数多くの研究が行われている^[1]。しかしながら、その多くは単噴流を対象にしたものであり、複数の噴流を設置した噴流群を対象とした制御の研究はあまり行われていない。噴流群は各噴流が相互に干渉することで、単噴流とは流動構造が著しく異なることが知られている^[2]。そこで、本研究では、千鳥状に配置した7本の円管(スタガード・アレイ・ジェット)を1つの噴流群とし、各噴流の出口流速比を変化させることにより、ノズル形状を変化させることなく下流域での速度分布形状や濃度分布形状を時空間的に制御する手法を提案する。

2. 実験装置および計測方法

Fig.1 に実験装置の概略を示す。作動流体である空気は、間隔 $s=17\text{mm}$ で千鳥状に配置されたノズル径 $D=13\text{mm}$ の7本の軸対称ノズルから吐出する。円形の中に書かれた数字を各ノズルのノズル番号と定義する。座標系は Fig. 1 に示すように流れ方向を x , x 軸に垂直な方向を y, z とし, x 方向の平均流速を U とした。本研究の出口流速条件を Table 1 に示す。

本研究で用いたノズルは、ノズル出口までの助走区間が $40D$ 以上で、出口流速分布は発達した円管流れと同様の分布であった。7本のノズルの出口流速は、ブローアをインバータによって制御することにより、それぞれ独立に制御される。また、インバータは PC によって制御されているため、任意の信号を PC からインバータに送ることにより、各ノズルの出口流速を時間的に変化させることができる。本研究で用いた流速制御方法の有効性を評価するために、出口流速が 8m/s から 2m/s へとステップ状に変化する信号 $x(t)$ を PC からインバータに送った時の入力信号と熱線流速計にて計測した位相平均出口流速 $y(t)$ を Fig.2 に示す。これより、本研究で用いた流速制御装置は一次遅れ系で近似でき、時定数 0.1 、無駄時間 0.09 秒であるといえる。ブローアの機械的な制限により、 2Hz 以上の周波数で出口流速を制御することは不可能であったため、本研究では出口流速の時間的な制御を 1Hz で行った。

速度計測には熱線流速計(HWA)、粒子画像流速計(PIV)を用いた。PIV のトレーサ粒子には、作動流体がノズルに入る直前に噴霧された油液滴を用いた。また、CCD カメラによって撮影されたトレーサ粒子の輝度値を約 0.2mm 四方毎に平均した値を濃度分布(数密度分布)とし、計測は xy, yz 平面で行った。ノズル出口の時間平均速度 $U_0=1\text{m/s}$ とノズル直径 D より算出したレイノルズ数 Re は 850 である。

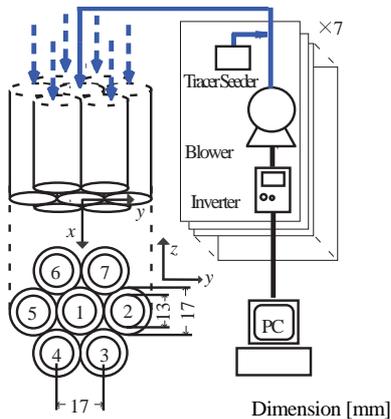


Fig.1 Schematic of the experimental apparatus

3. スタガード・アレイ・ジェットの流動構造

3.1 中心噴流の拡散に対する周囲噴流出口流速の影響

Fig.4 に周囲噴流の出口流速を変化させた時の中心噴流 ($U_0=2.0\text{m/s}$) の噴流幅 b の変化を示す。噴流幅は Fig.3 に示すように得られた濃度分布より、その最大濃度の 95% と 5% を取る座標の間隔を混合層の大きさとし、噴流幅と定義した^[3]。これより、周囲噴流の出口流速を変化させることにより、中心噴流の拡散が変化することがわかる。噴流間の干渉による中心噴流の拡散を定量的に評価するために外側噴流のエントレインメント量と中心噴流の拡散との関係を示す(Fig.5)。 x 軸は各出口流速に対するエントレインメント量変化の増加の傾き k_e , y 軸は Fig.5 に示した各周囲噴流出口流速における中心噴流の拡散増加の傾き k_b を示している。これより、外側噴流のエントレインメント量と中心噴流の噴流幅はほぼ線形な関係が成り立つことがわかる。複数の噴流を設置した時に起こる拡散の大小は噴流のエントレインメント量に支配されていることが示された。

3.2 濃度分布形状の制御

上記で得られた知見を基に濃度分布形状の制御を試みた。出口流速の組み合わせを Fig.6 に示す。円形の中に書かれた数字は各ケースにおけるノズル中心での出口流速を示している。Fig.6 に $x/D=5.0$ における断面の時間平均濃度分布を示す。濃度は噴流中心における最大濃度で無次元化した。中心噴流の拡散を観察するために、トレーサ粒子は中心噴流のみに添加されており、その出口流速は 2m/s に固定されている。(a), (b) における全噴流の出口流量は同一である。周囲噴流が 4m/s の(a)では濃度分布形状は軸対称型だが、周囲噴流が $2, 8\text{m/s}$ の(b)では拡散が y 方向に増大し、 z 方向に抑制されている。様々な濃度分布形状を形成するために群噴流を用い、流速比を変化させることは有効である。

4. 流動構造の時系列制御

4.1 出口流速の時間変化による流動構造変化

Fig.7 に単噴流の出口流速を 5m/s を中心に振幅 3m/s 、周波数 1Hz で変化させた時の中心軸上の PIV により計測した位相平均速度分布を示す。これより、各 x/D において速度の位相差のずれは起きておらず、また、 $x/D=2.5$ までの領域では位相の違いによる流動構造の変化は起きていない。しかし、

Table 1 Exit velocity condition

single jet	$U_c = 2.0 \sim 11.0 \text{ m/s}, 5.0 + 3.0 \sin(2\pi t / 1.0) \text{ m/s}$
all jets (surrounding jets velocity is equivalent)	$U_c = 2.0 \sim 10.0 \text{ m/s}$ $U_{out}(U_2 \sim U_7) = 2.0 \sim 11.0 \text{ m/s}$
all jets (surrounding jets velocity is not equivalent)	$(U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_7)$ $= (2.0, 8.0, 2.0, 2.0, 8.0, 2.0, 2.0) \text{ m/s}$
all jets (time sequential control)	$(U_c, U_{out}) = (2.0, 4.0 + 4.0 \sin(2\pi(t/1.0 + \phi_n/360))) \text{ m/s}$ $(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5, \phi_6, \phi_7) = (-, 0, 120, 240, 0, 120, 240) \text{ deg.}$

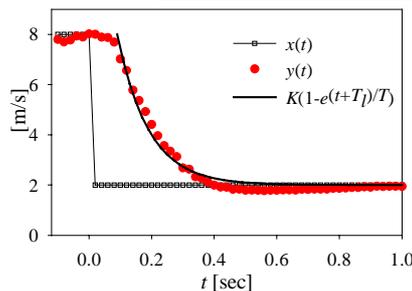


Fig.2 Exit velocity response for blower and inverter

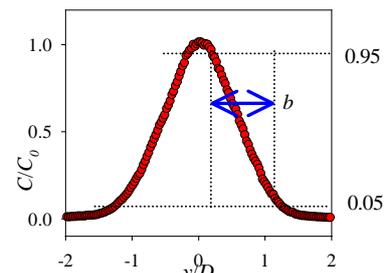


Fig.3 Definition of jet width

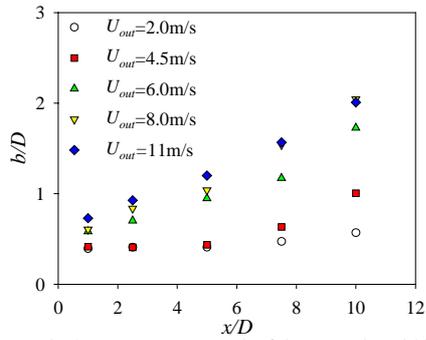


Fig.4 Downstream growth of the center jet width

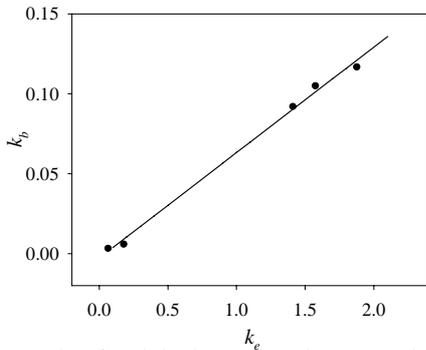
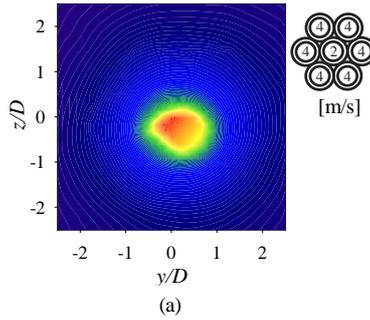
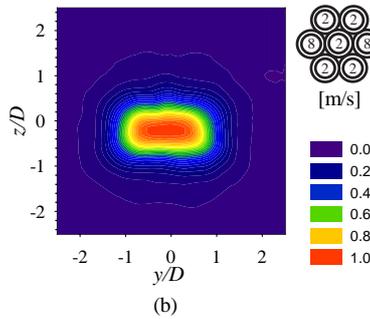


Fig.5 Correlation between entrainment quantity ratio of out-side jet and center jet width



(a)



(b)

Fig.6 Mean concentration profile of the center jet seeded at $x/D=5.0$

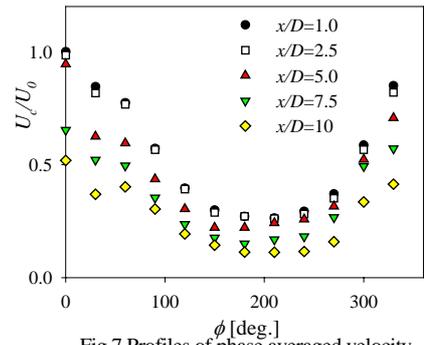


Fig.7 Profiles of phase averaged velocity

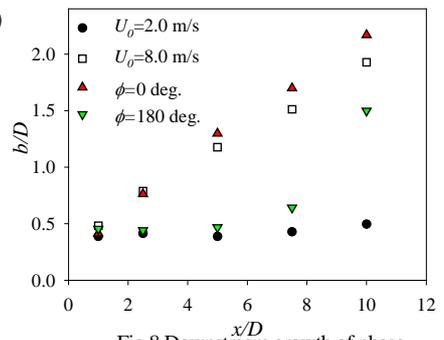


Fig.8 Downstream growth of phase averaged center jet width

$x/D=5.0$ 以降においては $\phi=60, 240$ を比較すると顕著だが、初期流速は同一だが、加速度の正負が異なるため、流速の減衰比に違いがみられる。

時間変化させた噴流の特徴を比較するために、噴流幅の下流方向への推移を示す(Fig.8)。比較のため、出口流速を 2.0m/s、8.0m/s に固定した場合における噴流幅の推移も示す。上述の中心軸上における速度分布の推移と同様に、 $x/D=2.5$ までの領域では各位相の噴流幅はその出口流速に依存しており、定常状態の噴流幅の推移と変化しないことがわかる。しかし、 $x/D=5.0$ 以上の領域では $\phi=0\text{deg.}$ 、 180deg. の各位相で定常状態の噴流幅よりも値が大きく、周囲流体との混合が促進されていることがわかる。これは、 $x/D=5.0$ 付近において、出口流速の 1Hz の脈動に起因する流れ方向の乱れが円周方向の乱れを誘発することで、拡散が促進されているからと考えられる。

4.2 濃度分布形状の時間制御

濃度分布形状の時系列の制御を試みた。周囲噴流の出口流速を Fig.9(b) に示すように周期的に変化させた。中心噴流の出口流速を 2m/s に固定し、周囲噴流の出口流速を 4 m/s を中心に振幅 4m/s、周波数 1Hz とし、隣り合う噴流の位相差を 120deg. とした。その条件における周囲噴流のノズル出口での流速は Fig.9(a) のように変化している。Fig.9 に $x/D=2.5$ における中心噴流の断面の位相平均濃度分布を示す。3.2 で示した長方形型の濃度分布形状が出口流速の変化に伴って回転していることがわかる。これは周囲噴流の出口流速の変化に伴って、周囲噴流のエントレインメント量が時間的に変化し、中心噴流が外側噴流に引き寄せられる方向が変化するためである。このことより、噴流の拡散する方向はエントレインメント量が大きい方向と一致するという群噴流の性質は、本実験装置では 1Hz の時間スケールにおいて成立することが確認された。

6. 結言

本研究では、複数の軸対称噴流を千鳥状に配置したスタッ

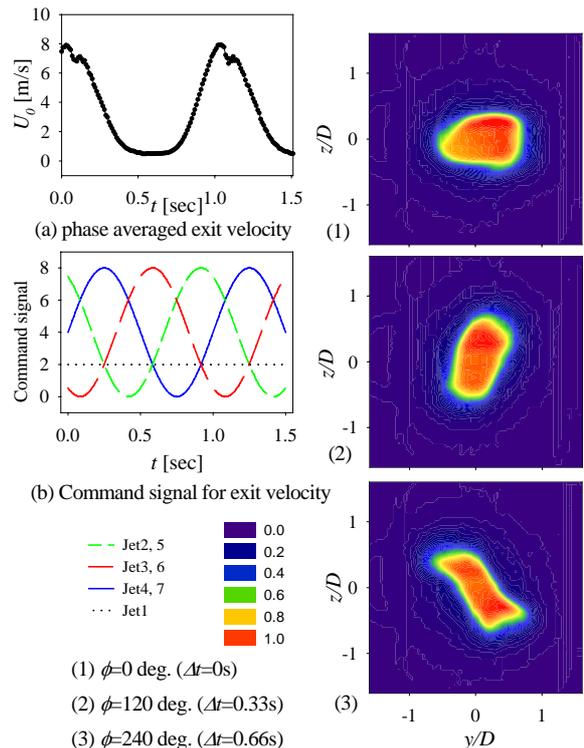


Fig. 9 Phase averaged concentration profile at $x/D=2.5$

ガード・アレイ・ジェットを用い、各噴流の出口流速比を変化させることで、噴流のエントレインメント量を操作し、下流域での濃度分布形状を変化させることに成功した。また、群噴流における拡散現象はエントレインメント量に支配されていることを定量的に示した。時系列制御に関しては、周囲噴流の出口流速比を時間的に変化させることで、濃度分布形状を制御することが可能であることを示した。

参考文献

- [1] A. Glezer. et al., AIAA-99-0447 (1999)
- [2] A. Nasr. et al., *I. J. Trans. Phenomena*, Vol. 2, pp. 57-70 (2000).
- [3] B. D. Ritchie. et al., AIAA 99-0448(1999).