平行におかれた 2 円管から流出する脈動噴流*

田畑 隆英¹⁾, 中島 正弘¹⁾, 李鹿 輝²⁾

Pulsating Jet Flow Issuing from Two Parallel Pipes

Takahide TABATA, Masahiro NAKASHIMA and Akira RINOSHIKA

ABSTRACT

The flow visualization of the pulsating parallel jets issuing from two circular pipes was performed by the LIF method. As a result, it has been confirmed that the jet diffusion is promoted by adding the pulsation and this tendency is remarkable in the horizontal direction. Moreover, the jet diffusion was investigated by analyzing the velocity distribution obtained from the PIV. Making a comparison between the pulsating jet and the non-pulsating one, it has been clarified that the jet diffusion becomes large with the increase of the pulsating frequency. Furthermore, in order to study the effects of the pulsation on the structures of the jet, the wavelet multi-resolution analysis was conducted. It has been found that a large scale structure is broken into a small scale one, in adding the pulsation.

Keywords: Jet, Flow visualization, Pulsation, PIV, Wavelet multi-resolution analysis

1. 緒 言

航空機のジェットエンジンからの排気, ディーゼル機関の多孔ノズルからの噴霧や並んだ煙突からの排煙など, 同一方向に流出する複数の噴流は, 様々な産業分野に応用され, これらの多噴流は互いに干渉することが知られている. 2 平行二次元噴流¹⁾において, 2 噴流の互いに接する領域に負圧を生じ, 噴流が互いに引き寄せ合うことが報告されている. また, 2 円形ノズルから流出する噴流の相互作用²⁾や, 二次元平行 3 噴流群における速度分布のフィードバック制御³⁾に関する研究も行われている. しかし, 著者らの知る範囲では, 円管から流出する多噴流の相互干渉については調べられていない.

一方, 自動車の排気管からの噴流などには, ピストン運動や燃焼による脈動成分が含まれている. 単独の円形ノズルから流出する脈動噴流⁴⁾に関しては, 脈動の付加による定常噴流との平均流特性の相違が調べられている. また, 直線上に近接して設置された 3 円形ノズルから流出する噴流⁵⁾では, 円管出口付近において, 噴流中心線上の最大速度が, 脈動の影響を受けて, 他の 2 つの最大速度よりも小さくなることが明らかにされている. しかし, 噴流に逆位相の脈動を付加した例は, 著者らの知る

限り, 報告されていない.

以上のような研究の背景から, 本研究の目的は, 平行におかれた 2 円管から流出する噴流に逆位相の脈動を付加し, その拡散について調べるものである. 逆位相の脈動の付加によって, 噴流は高い速度で円管から交互に流出する. そのため, 噴流と周囲流体の速度差が増加するとともに, 脈動を付加していない場合よりも 2 噴流の干渉が緩和され, 周囲流体の誘引の活性化による拡散の促進が期待される. ここでは, 脈動周波数およびレイノルズ数を種々, 変化させたときの流動状況を LIF 法による流れの可視化によって観察した. また, PIV 法によって得られた速度情報を用いて, 速度分布や半値幅なども調べた. さらに, LIF 法によって得られた可視化画像を用いてウェーブレット多重解像度解析を行い, 脈動の付加が流れの構造に及ぼす影響についても調べた.

2. 実験装置および方法

本研究で用いる座標系を Fig. 1 に示す. 2 円管の出口中心を結ぶ線の中央に座標原点 O をとり, 流れ方向に x 軸, それと直角方向に y 軸, 円管の設置方向に z 軸をそれぞれとる.

本研究において, 円管の内径 d は 20mm, 外径は 22mm, 長さは 1200mm である. ここでは, 幾何学的パラメータの 1 つである 2 円管の設置間隔 L が円管外径の 1/2 である $L/d = 1.65$ の場合の流れについて報告する. すなわち,

* 原稿受付 2008 年 4 月 9 日

1) 正会員 鹿児島工業高等専門学校 機械工学科
(〒899-5193 鹿児島県霧島市隼人町真孝 1460-1,
E-mail: tabata@kagoshima-ct.ac.jp)

2) 正会員 山形大学 工学部

2本の円管中心位置は, $z = \pm 0.825$ である. なお, L/d が流れに及ぼす影響については報を改めて報告する.

本研究で用いた実験装置および方法は中島ら⁶⁾の実験と同様であるので, ここではその概略のみを説明する. 下部タンクからポンプにより汲み上げられた水は, Fig. 2 に示す脈動発生装置によって脈動成分を付加された後, 円管から縦 800mm, 横 1500mm, 高さ 800mm の可視化用水槽内に流出し, 脈動自由噴流を形成する.

本研究で用いた脈動発生装置について説明する. 減速装置を備えたモータの回転運動はクランク機構により往復運動に変換され, 連結棒を通じてピストンは, 円管内で往復運動を行う. この様にして生じた往復振動流をポンプにより供給された水噴流に付加することによって, 脈動噴流が生成される. また, 回転する2円板上のクランクピンの位置を回転軸に対して点対称にすることによって, 2円管から流出する脈動噴流は互いに逆位相をもつ. ここで, 円管内に挿入したピストン先端部の外径, 厚み, および行程はそれぞれ 13mm, 5mm, および 90mm である. なお, 噴流に付加する脈動周波数は減速装置付モータの回転数によって制御する.

噴流の可視化には LIF 法を用い, 濃度 0.25×10^{-6} mol/L の蛍光染料ローダミン 6G の水溶液を円管から流出させた. 蛍光染料の励起には, ダブルパルス Nd:YAG レーザー (New Wave Research, Mini Lase-30, 20mJ/pulse) を用い, シリンドリカルレンズによって形成される厚さ約 1mm のレーザーライトシート光を可視化断面に照射した. 蛍光は透過限界波長 560nm のカットオフフィルターを通過して CCD カメラ (SONY, XC-003) により撮影され, キヤプチャーボードを介してパソコン内に画像情報として格納される.

また, 速度計測には PIV 法を用いた. トレーサーとして, 標準粒径 $150 \mu\text{m}$, 比重 1.02 のイオン交換樹脂製の微粒子を用い, 水噴流および周囲流体に混入した. 光源には, 前述の Nd:YAG レーザーのシート光を用いた. 画像の取得にはプログレッシブスキャン型の CCD カメラ (KODAK, Megaplus ES 1.0, 1008×1024 pixel) を用いた. 速度の算出には, 直接相互相関法に基づく PIV 解析ソフト (Image Information Technology, Flow Inside 3.0) を用いた. 検査窓の大きさおよび捜査領域は, それぞれ, 32×32 pixel および検査窓の中心から半径 8 pixel の円内である. ここで, 第2時刻目の画像で移動先を捜査する際, 検査窓の中心を捜査領域内で x 方向, y 方向に 1 ピクセル刻みでシフトさせ, その都度, 相互相関係数を計算する. なお, 検査窓を x 軸および y 軸方向にそれぞれ 100×64 個配置し, オーバーラップは 69% である.

ここで, 予備実験として, 脈動を付加していない状態での噴流の渦放出周波数を調べるために, 光源に Ar-ion レーザー (SOC, Ion Laser GLS3280B, 4W) のシー

Fig. 1 Flow field and coordinate system.

Fig. 2 Piston-crank mechanism.

ト光, および高速度カメラ (Vision Research, Phantom V5.0, 1024×1024 pixel) を用いた PIV 解析を行った. なお, 撮影速度を 500fps とし, 撮影領域は $162\text{mm} \times 162\text{mm}$ であり, 空間解像度は 0.158mm/pixel である. 座標 $(x/d, y/d, z/d) = (3, 0, -1.4)$ における速度情報を用いてスペクトル解析を行った結果, 噴流のレイノルズ数 $\text{Re} = 1.0 \times 10^4$ とした場合の渦放出周波数は約 4Hz であった. このことを考慮し, 本研究では, 力学的パラメータの1つである噴流に付加する脈動周波数 f を 1, 2, 3 および 4 Hz として実験を行った. また, 脈動を付加していない噴流において, d および円管出口における断面平均速度 U_{mean} に基づく噴流のレイノルズ数 Re は 3.0×10^3 , 5.0×10^3 および 1.0×10^4 とした.

3. 実験結果および考察

3.1 LIF 法による噴流の可視化

噴流拡散の様子を調べるために, LIF 法による流れの可視化実験を行った. その一例として, xOz 面における瞬間の可視化画像を Fig. 3 から Fig. 5 に示す. これらの撮影領域は, 約 $300\text{mm} \times 200\text{mm}$ である. また, それぞれの実験条件における f , d および U_{mean} に基づく脈動のストローハル数 $St_m = f d / U_{\text{mean}}$ を算出し, その結果を Fig. 3 から 5 に付記している.

まず, $\text{Re} = 3.0 \times 10^3$ の場合を Fig. 3 に示す. Fig. 3(a) に示す脈動を付加していない場合, 約 $x/d = 2$ でせん断層が不安定となる. そして, 下流へ進むにしたがって, 2 噴流は次第に近寄り, 3.5 節で後述するウェーブレッ

(a) Non-pulsating jet

 (b) $f = 1 \text{ Hz}$, $St_m = 0.13$

 (c) $f = 2 \text{ Hz}$, $St_m = 0.27$

 (d) $f = 3 \text{ Hz}$, $St_m = 0.40$

 (e) $f = 4 \text{ Hz}$, $St_m = 0.53$

 Fig. 3 Original images
($Re = 3.0 \times 10^3$).

(a) Non-pulsating jet

 (b) $f = 1 \text{ Hz}$, $St_m = 0.08$

 (c) $f = 2 \text{ Hz}$, $St_m = 0.16$

 (d) $f = 3 \text{ Hz}$, $St_m = 0.24$

 (e) $f = 4 \text{ Hz}$, $St_m = 0.32$

 Fig. 4 Original images
($Re = 5.0 \times 10^3$).

(a) Non-pulsating jet

 (b) $f = 1 \text{ Hz}$, $St_m = 0.04$

 (c) $f = 2 \text{ Hz}$, $St_m = 0.08$

 (d) $f = 3 \text{ Hz}$, $St_m = 0.12$

 (e) $f = 4 \text{ Hz}$, $St_m = 0.16$

 Fig. 5 Original images
($Re = 1.0 \times 10^4$).

ト多重解像度解析の Fig. 9 (a) に示す結果から、約 $x/d = 6$ で合流していることがわかる。これは2噴流が向かい合う領域において、周囲流体の巻き込みが制限され、その結果として互いに引き寄せあうためである。Fig. 3 (b) に示す $f = 1 \text{ Hz}$ の場合、座標 $(x/d, y/d, z/d) = (3, 0, 0.825)$ において、噴流の主流部がくびれている。これは脈動の付加により、瞬間的に噴流の速度が増大し、周囲流体の噴流内部への誘引が活性化することによる。そして、2噴流の合流は、脈動を付加していない場合よりも上流の約 $x/d = 5$ で認められる。また、Fig. 3 (c) に示す $f = 2 \text{ Hz}$ では噴流は脈動の影響を受け、円管から交互に

噴流塊となって放出している。さらに、Fig. 3 (d) および Fig. 3 (e) に示す $f = 3$ および 4 Hz の場合、この噴流塊は円管出口近傍で渦輪を伴っており、 $f = 1$ および 2 Hz の場合よりもさらに上流の約 $x/d = 3$ において崩壊する。

次に、 $Re = 5.0 \times 10^3$ の場合を Fig. 4 に示す。Fig. 4 (a) に示す脈動を付加していない場合と比較して、Fig. 4 (b) に示す $f = 1 \text{ Hz}$ の場合、噴流主流部にわずかな蛇行が認められる。Fig. 4 (c) に示す $f = 2 \text{ Hz}$ の場合、噴流はさらに蛇行して大きく拡散する。Fig. 4 (d) に示す $f = 3 \text{ Hz}$ では、円管から交互に噴流塊が放出される。このとき、可視化動画による観察では、噴流塊は成長しながら下流へ

Fig. 6 Velocity distributions in xOz plane.

進み, 他方の円管から放出された先行する噴流塊を後方から $|z|$ が大きくなる方向へ排除するのが認められた. そして, 約 $x/d = 5$ で噴流塊は崩壊し, 噴流は大きく拡散する. また, Fig. 4(e) に示す $f = 4\text{Hz}$ の場合, 噴流塊は渦輪を伴っており, 他方の円管から流出する噴流および周囲流体との速度差の増加によって, $f = 3\text{Hz}$ の場合よりも噴流はさらに拡散する. このように, 高周波数の脈動の付加により, 噴流の瞬間の速度が増大し, その結果, 周囲流体との速度差が大きくなるので, 周囲流体の噴流内部への誘引が活性化する.

$\text{Re} = 1.0 \times 10^4$ の場合を Fig. 5 に示す. Fig. 5(a) に示す脈動を付加していない場合, 2 噴流は並進し, 下流へ進むにしたがって互いに近寄る. そして, Fig. 5(b), 5(c), 5(d), および 5(e) に示すように, f の増加とともに噴流は大きく蛇行するようになり, 下流で大きく拡散する.

3.2 速度分布

毎秒 10 対で 10s 間, すなわち, 200 枚の可視化領域が $344\text{mm} \times 350\text{mm}$ の画像を用いて PIV 解析を行い, 得られた xOz 面における u の時間平均速度分布を Fig. 6 に示す. ここで, u は脈動を付加していない噴流の $x/d = 0.5$ における最大速度 $u_{0\text{max}}$ で無次元化されており, また Fig. 6 では, z が正の領域のみを示す. さらに, 図中に円管中心位置を破線で示している. また, 脈動を付加していない場合における 2 噴流の干渉を調べるために, この位置から単一の円管噴流が流出すると仮定した場合の結果を ●印で示す.

まず, $\text{Re} = 3.0 \times 10^3$ の場合を Fig. 6(a) に示す. $x/d = 5$ において, 2Hz 以上の脈動を付加すると, 周波数の増

加とともに, 最大速度の位置は, 単一円管噴流の場合よりも z の大きな側に移動する. これは前述したように, 噴流塊の放出によって, 比較的上流部で拡散が促進されるためである. そして, $x/d = 10$ において, 2Hz 以上の場合の速度分布は, 単一円管噴流の場合よりも平坦になっている.

次に, $\text{Re} = 5.0 \times 10^3$ の場合を Fig. 6(b) に示す. 脈動を付加していない場合, ならびに, $f = 1$ および 2Hz の場合, $x/d = 5$ における最大速度の位置は, 単一円管噴流の場合よりもわずかに z の大きな側にある. これは, $\text{Re} = 3.0 \times 10^3$ の場合よりも噴流の速度が高く, 周囲流体を巻き込みやすいためと考えられる. また, $f = 3$ および 4Hz での最大速度をとる位置は, 他の場合よりもさらに z の大きな側にあり, 拡散が促進されている. これは, 前述したように, 噴流塊が外側へと互いに排除しあうためであると考えられる. さらに, Fig. 6(a) および Fig. 6(b) を比較すると, 高い周波数の場合に $\text{Re} = 3.0 \times 10^3$ の場合よりも噴流は下流で大きく拡散しており, Re の増加によって, 脈動の影響を受けやすくなると思われる.

$\text{Re} = 1.0 \times 10^4$ の場合を Fig. 6(c) に示す. この場合はさらに噴流の速度が高く, 速度が減衰しにくいので, xOz 面内の速度分布には, z の正および負の領域にそれぞれ 1 つずつ, 計 2 つの最大速度が下流まで存在する. また, $x/d = 5$ における脈動を付加していない場合の最大速度の位置は, 単一円管噴流の場合よりも z の小さい側にある. これは田中・中田ら¹⁾によって確認されているように, 他方の噴流の存在により, $z/d = 0$ 付近のエントレインメントが制限され, 結果として, 互いに噴流が引き

寄せあうためである。また、3Hz以下の周波数での最大速度の位置は、単一円管噴流の場合よりもわずかに z の小さな側へ移動している。さらに $x/d=10$ において、 $f=3$ および4Hzの速度分布が最大速度をとる位置は、 z の大きな側へ移動するが、他の Re の場合と比較すれば小さい。これは、噴流の速度が高いため、Fig. 5に示すように、高い周波数の脈動を付加しても噴流は蛇行し、他の Re の場合のように噴流塊が放出されない。したがって拡散は促進するが、その程度が小さいためである。

3.3 噴流幅

逆位相の脈動が噴流の拡散に及ぼす影響を定量的に調べるために、 xOz 面における半値幅 $2b_z$ および xOy 面における半値幅 $2b_y$ の x 軸方向への変化を求め、それらをFig. 7に示す。ここで、 xOz 面における速度分布は上流で最大速度を2つもつので、それらの平均値の1/2の値をとる z の値を $2b_z$ と定義した。なお、Shinoharaら⁵⁾と同様に、2円管を $z = \pm 0.825$ の位置に配置し、これらから流出する独立した自由噴流の速度分布を仮想的に並べ、これから得られた結果をFig. 7に◎印で示す。なお、この場合の噴流を、以降では、重合噴流と呼ぶことにする。また、図には比較のため、 xOy 面における単一円管噴流の場合の半値幅 $2b_y$ を★印で示す。

$Re = 3.0 \times 10^3$ の場合をFig. 7(a)に示す。脈動周波数の増加とともに半値幅は増加する。そして、重合噴流の場合と比較して脈動を付加していない場合、噴流が互いに引き寄せ合い拡散が抑制されるために $2b_z$ は小さくなる。また、 $f=1\text{Hz}$ における $2b_z$ は、噴流の引き寄せ現象が緩和され、重合噴流の場合と同様の値が得られる。さらに、2Hz以上での $2b_z$ は重合噴流の場合よりも増加し、その増加率も大きい。これは前述したように、噴流塊の放出によって周囲流体の誘引が活性化し、噴流の拡散が促進されたためである。一方、 xOy 面においては、 $f=3\text{Hz}$ 以上の $2b_y$ は、単一円管噴流の場合よりも大きな値となる。また、2Hzの場合も噴流塊は放出されるが、3Hz以上の場合よりもその規模は小さいので、この平面での拡散を促進するまでには至らず、半値幅は小さな値のままになったものと思われる。さらに、単一円管噴流では噴流の主流部がこの平面を通過するが、脈動を付加していない場合、噴流外縁部が xOy 面を通過する。そのため、単一円管噴流の場合より $2b_y$ の値は小さくなる。

次に、Fig. 7(b)に示す $Re = 5.0 \times 10^3$ の場合、 $f=3$ および4Hzにおける $2b_z$ は、重合噴流の場合と比較して大きな値をとる。これは、 $Re = 3.0 \times 10^3$ の場合と同様に、噴流塊の放出によるものと考えられる。また、 xOy 面においても同様の傾向が認められる。以上のことから、 $Re = 5.0 \times 10^3$ の場合、および、 $Re = 3.0 \times 10^3$ の場合、どちらも同様の傾向をとるものと思われる。なお、 $Re = 5.0 \times 10^3$ の場合、 $Re = 3.0 \times 10^3$ の場合よりも下流で噴流

(a) $Re = 3.0 \times 10^3$

(b) $Re = 5.0 \times 10^3$

(c) $Re = 1.0 \times 10^4$

Fig. 7 Variations of jet width.

塊が崩壊するので、 $x/d=10$ 以降においても噴流の拡散は促進している。

$Re = 1.0 \times 10^4$ の場合をFig. 7(c)に示す。 f の増加とともに $2b_z$ は増加し、 f が3および4Hzでの $2b_z$ は重合噴流の場合よりも大きな値をとる。また、その増加率は、 f が2Hz以上で重合噴流の場合よりも大きい。これは前述したように、脈動周波数の増加とともに脈動がこの平面内の拡散に及ぼす影響が大きくなるからである。一方、 $2b_y$ は f によらず、単一円管噴流の場合よりも小さくなる。これは、脈動の影響は xOz 面へ強く現れ、 xOy 面へ

はほとんど現れないためである。

3.4 位相平均速度ベクトル図

逆位相の脈動の付加が噴流の流出状況に及ぼす影響を調べるために、前述の Ar-ion レーザーのシート光および高速度カメラを用いた PIV 解析により得られた速度の時系列情報を用いて、位相平均した速度ベクトル図を作成した。一例として、 $f = 4\text{Hz}$ で座標 $(x/d, y/d, z/d) = (0.5, 0, -0.825)$ における u が最大となる位相での xOz 面における速度情報を抽出し、15 周期分を平均した結果を Fig. 8 に示す。

まず、Fig. 8(a) に示す $\text{Re} = 3.0 \times 10^3$ の場合について考察する。噴流塊は円管から交互に高い速度で噴出して並進する。ここで、飯尾ら⁷⁾が求めた（脈動成分の最大振幅）／（円管出口中心における時間平均速度）で定義される脈動の速度振幅比 $\alpha = 0.53$ と比較すれば、本実験の場合、この Re における α は 0.62 と大きい。すなわち、脈動周波数の増加によって噴流の速度が増加し、周囲流体との速度差が増加するので、円管出口近傍の噴流と周囲流体との境界の領域において渦の発生が認められる。さらに先行する噴流塊の内側においても渦が認められるので、円管から流出した直後から噴流は大きく拡散する。

次に、Fig. 8(b) に示す $\text{Re} = 5.0 \times 10^3$ の場合について考察する。この場合の α は 0.4 と小さくなるが、 $\text{Re} = 3.0 \times 10^3$ の場合と同様に、円管出口付近における噴流塊の後方に渦が認められる。ここで、 x 軸近傍に着目する。この領域では、逆位相の脈動の付加によって、先行する噴流塊の後方内側にある渦輪と他方の円管から流出した速度の高い噴流主流部が、 x 軸を挟んで相対して存在している。したがって、この渦輪の回転方向と噴流主流部の向きは、互いに逆方向であるので、せん断によって渦輪は崩壊していく。これらの結果として、それぞれの噴流塊において、 $|z|$ の大きい側の渦輪のみが残存することとなる。噴流塊はこれの影響を受けて、下流へ進むにしたがって、 $|z|$ の大きい方向へも進みながら崩壊していく。その結果、 $\text{Re} = 3.0 \times 10^3$ の場合と比較して、下流においても周囲流体の誘引が活性化され、噴流は大きく拡散している。

Fig. 8(c) に示す $\text{Re} = 1.0 \times 10^4$ の場合、 α は 0.22 とさらに小さくなる。すなわち、噴流の速度がさらに増加することによって、脈動によって増加する噴流の速度が相対的に小さくなり、周囲流体との速度差が小さくなるので、噴流の周囲流体との境界における渦はほとんど認められなくなる。また、噴流塊は発生せず、噴流は蛇行している。すなわち、高い速度の領域は、約 $x/d = 5.5$ で他方の噴流側に湾曲するように分布する。これは脈動の付加により、先に流出した高い速度の噴流の後方に他方の噴流が誘引されるためであり、これが交互に繰り返されることにより噴流は蛇行する。

Fig. 8 Phase averaging velocity vectors in xOz plane ($f = 4\text{Hz}$).

3.5 ウェーブレット多重解像度解析

噴流に含まれる組織構造を調べるために、ウェーブレット多重解像度解析を行った。ここでは、Fig. 3 から Fig. 5 に示す可視化画像（ 512×512 pixel, 0.646 mm/pixel ）に対して、20 次の Daubechies 関数⁸⁾のウェ

ーブレットを用い、6つのウェーブレットレベルに分解した。ここで、レベル4以下の結果にはノイズが多く含まれていたが無効とし、レベル1を大規模構造、レベル2を中規模構造、そしてレベル3を小規模構造とした。

このようにして得られた、それぞれの結果をFig. 9からFig. 11に示す。最も高いウェーブレット成分の領域は赤紫色で示されており、最も低い領域を赤色で示す。ここでは、脈動を付加していない場合、および $f = 4\text{Hz}$ の場合

Fig. 9 Wavelet multi-resolution analysis ($\text{Re} = 3.0 \times 10^3$).

Fig. 10 Wavelet multi-resolution analysis ($\text{Re} = 5.0 \times 10^3$).

Fig. 11 Wavelet multi-resolution analysis ($\text{Re} = 1.0 \times 10^4$).

合について、噴流の構造の相違を考察する。

まず、 $Re = 3.0 \times 10^3$ の場合を Fig. 9 に示す。Fig. 9(a) に示す脈動を付加しない場合、レベル 1 において噴流主流部は赤紫色で、噴流外縁部は水色と緑色の境界線でそれぞれ示されている。それぞれの円管から流出したレベル 1 の構造は、下流へ進むにしたがって近寄り、 $x/d=5$ 以降で合体している。Fig. 9(d) に赤紫色で示す領域は Fig. 3(e) に示す噴流塊を表しており、逆位相の脈動の付加により、このレベル 1 の構造が x 軸に対して非対称で交互に分布し、 $x/d=6$ より下流で次第に消滅している。また、Fig. 9(b) に示すレベル 2 の構造は、噴流外縁部に下流まで分布するが、Fig. 9(e) に示す $f = 4\text{Hz}$ の場合、約 $x/d=4$ より下流で認められなくなる。さらに、Fig. 9(c) に示すレベル 3 の構造は、円管出口近傍および約 $x/d=5$ より上流の噴流外縁部に認められる。しかし、Fig. 9(f) に示すように、脈動の付加によって、レベル 3 の構造は円管出口近傍で z 方向に広く分布し、 $x/d=3$ より下流では消滅する。以上のことから、 $\alpha = 0.62$ の逆位相の脈動の付加により、円管出口近傍において、大規模構造は中規模構造および小規模構造に分断され、比較的上流部で消滅することがわかる。

次に、 $Re = 5.0 \times 10^3$ の場合を Fig. 10 に示す。Fig. 10(a) に示す脈動を付加しない場合のレベル 1 の構造の分布は、 $Re = 3.0 \times 10^3$ の場合と同様である。脈動を付加した場合、Fig. 10(d) に示すレベル 1 の構造は x 軸から徐々に遠ざかるように分布し、 $x/d=6$ より下流で次第に消滅する。また、レベル 2 の構造は、Fig. 10(b) に示す脈動を付加しない場合、ほとんど認められないが、Fig. 10(e) に示す $f = 4\text{Hz}$ では、 $x/d=5$ より上流に存在するようになる。さらに、Fig. 10(c) に示すレベル 3 の構造は、約 $x/d=4$ より上流の噴流外縁部に認められるが、Fig. 10(f) に示す $f = 4\text{Hz}$ では約 $x/d=5$ より上流で認められるとともに、 z 方向に広く分布する。以上のことから、 $\alpha = 0.4$ の逆位相の脈動が付加されることにより、各レベルの構造は、 $Re = 3.0 \times 10^3$ の場合よりも下流で消滅することがわかる。

さらに、 $Re = 1.0 \times 10^4$ の場合を Fig. 11 に示す。Fig. 11(a) に示す脈動を付加しない場合、レベル 1 の構造の分布は、Fig. 9(a) および Fig. 10(a) と同様である。これに対して、 $f = 4\text{Hz}$ の場合、Fig. 11(d) に示すレベル 1 の構造は、 x 軸に対して非対称で大きく波打っている。また、Fig. 11(b) および Fig. 11(e) に示すレベル 2 の構造、ならびに、Fig. 11(c) および Fig. 11(f) に示すレベル 3 の構造については、脈動を付加しても分布状況は同様であった。以上のことから、 $\alpha = 0.22$ の逆位相の脈動の付加によって、大規模構造のみがその影響を受けることがわかる。

4. 結 言

平行におかれた 2 円管から流出する噴流に逆位相の脈動を付加し、脈動が噴流の拡散に及ぼす影響について、LIF 法による流れの可視化および PIV 法による速度計測により調べた。その結果、噴流に脈動を付加すると円管設置方向の拡散は促進されること、および、円管から噴流塊が放出する場合に噴流の拡散がさらに促進されることがわかった。また、脈動が噴流中に含まれる組織構造に及ぼす影響を調べるために、ウェーブレット多重解像度解析も行った。その結果、脈動の付加によって大規模構造は中規模構造、小規模構造に分断されること、および、脈動の速度振幅比が大きいほど、これらの構造はさらに上流部で消滅していくことがわかった。

本研究の遂行にあたり協力をいただいた当時、鹿児島高専専攻科学生であった森山瞬君（現日本精工株式会社）、および宇宿史彦君（現九州大学大学院）に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 田中栄一, 中田修一: 二次元平行噴流の干渉 (第 1 報, 平行 2 噴流の干渉の実験), 日本機械学会論文集(B), Vol. 35, No. 274 (1969) pp. 1527-2164.
- 2) 岡本哲史, 八木田幹, 渡辺晃, 川村高星: 二つの平行円形乱流噴流の相互作用, 日本機械学会論文集(B), Vol. 50, No. 456 (1984) pp. 1848-1853.
- 3) 山本和之, 村上俊之, 菱田公一: 2次元平行3噴流群による速度分布のフィードバック制御, 日本機械学会論文集(B), Vol. 70, No. 696 (2004) pp. 2005-2011.
- 4) 井口学, 山田栄二: 脈動自由噴流の平均流特性, 日本機械学会論文集(B), Vol. 55, No. 514 (1989) pp. 1524-1529.
- 5) Shinohara, E., Okamoto, F., Kitaoka, Y., Tatsumi, K. and Nakabe, K.: Mixing Characteristics of Multi-jets Modified by Cycle Perturbation, Jets Wakes and Separated Flows (2005) pp. 255-260.
- 6) 中島 正弘, 李鹿 輝, 田畑 隆英, 西田 雅, 野崎 勉: 柔らかいフィンをもつ円管から流出する噴流, 可視化情報学会論文集, Vol. 26, No. 1 (2006) pp. 6-12.
- 7) 飯尾昭一郎, 川村崇之, 幡野勝士, 池田敏彦: 脈動噴流に関する研究—渦の挙動に及ぼす拘束板の影響—, 可視化情報学会論文集, Vol. 27, No. 1 (2007) pp. 1-6.
- 8) Li, H., Takei, M., Ochi, M., Saito, Y. and Horii, K.: Application of Two-dimensional Orthogonal Wavelets to Multi-resolution Image Analysis of a Turbulent Jet, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Science, Vol. 42 (1999) pp. 120-127.