論文

脈動噴流に関する研究* (可視化による渦の挙動の観察)

池田 敏彦**, 森 豊***, 土屋良明**,
長澤 忠延†, 堀越 長次††

A Study on Pulsating Jet

(Observation on the Behavior of the Vortices by Means of Flow Visualization)

Tosihiko IKEDA, Yutaka MORI, Yoshiaki TSUCHIYA
Tadanobu NAGASAWA and Tyozzi HORIKOSI

ABSTRACT

Observational study is carried out to clarify the behavior of vortices formed in the free shear layer of pulsating jet, and to compare that of a steady jet. The flow is visualized by hydrogen bubble method, and pulsating flow is generated using Scotch yoke mechanism. Obtained results are as follows: The frequency of vortex formation in the shear layer agrees with that of pulsating velocity at the nozzle exit regardless of the amplitude ratio of pulsating velocity. The contraction width of jets decreased as the amplitude ratio increased. The formation and growth of vortices in the case of pulsating jets are occurred at the upstream position than those in the case of a steady jet.

Key words: Fluid mechanics, Pulsating jet, Flow visualization, Vortex formation

1. はじめに

オリフィスやノズルなどにおける流量測定に関連して工学の分野のみならず、血液流を対象とした医学・生理学の分野においても、絞り部を通る脈動噴流に関する報告がなされている。近江ら¹⁾はオリフィスを設置した円管内振動流れの速度分布と再付着距離を、井口ら²⁾はノズルから急拡大管内へ噴出する乱流脈動噴流の速度分布と乱れ分布を、横田ら³⁾は円管内の脈動流と振動流について、可視化実験により円筒形絞り下流の噴流の挙動を調べている。Seno ら⁴⁾は円筒ノズルから噴出する脈動噴流のせん断層に形成される渦輪の挙動を可視化するとともに、速度分布や乱れ分布を、Yellin ら⁵⁾はオリフィスを設置した円管内脈動流について、流量と圧力降下の関係を求めている。また、村上⁶⁾は非定常流における計測の問題点について、山口⁷⁾はオリフィスの非定常特性について、近江ら⁸⁾は円管内の脈動・振動流や絞り部を通る脈動・振動流についての解説・展望を行っている。Young⁹⁾は動脈中のステノシスが血液流に及ぼす影響やステノシ

スにおける圧力降下などについての解説を行っている。

一方、長方形あるいは円形断面のオリフィスやノズルから噴出する定常噴流の自由せん断層に渦が形成されることは、Rockwell ら¹⁰⁾、Clark ら¹¹⁾、Freymuth¹²⁾、Becker¹³⁾、Beavers ら¹⁴⁾、著者ら¹⁵⁾の実験によりすでに知られている。せん断層に渦を伴う定常噴流に脈動を加えた、いわゆる脈動噴流においては、渦の形成など流れの様子は定常噴流のそれとは大きく異なり、流れの混合や拡散が促進されることが予想される。

渦を伴う脈動噴流の流動特性を明らかにすることは、噴流と周囲流体の混合に関わる燃焼、噴流による板冷却、塗膜の乾燥あるいは各種空調機器の冷暖房効率の向上などに関連して、工学上重要である。

そこで、本研究ではまず、脈動する噴流の自由せん断層に形成される渦の挙動を可視化法を用いて明らかにすることを目的とし、定常噴流における渦の挙動との比較を行う。

2. 実験装置および方法

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。給水管 1 より水槽 2 (幅 900 mm, 奥行き 900 mm, 高さ 900 mm) に蓄えられた水は送水管 4 を通り、脈動流発生装置 12 を経て、整流チャンバ 5 (幅 200 mm, 長さ 1,000 mm, 高さ 100 mm) に入る。チャンバ内で整流格子 6, スクリーン 7 に

* 原稿受付 1996年11月6日

** 正会員 信州大学工学部

*** 三機工業㈱

† 正会員 長野県短期大学

†† 正会員

より整流された水はノズル8より幅920 mm, 長さ900 mm, 深さ100 mmの測定部9へ噴出する。噴流は測定部の上下の透明板により拘束されている。水槽2と測定部下流のオーバーフローにより水位差 H は一定に保たれる。平均流量 Q_m はバルブ11で調節し, その量は排水管10よりの流出量を直接測定して求めた。

二つの円弧と長さ ℓ の平行直線部からなる長方形断面ノズルと座標系をFig. 2に示す。ノズル幅 $w=20$ mm, 深さ $h=100$ mm, 絞り比 $200[\text{mm}]/w=10$ である。本実験において, $\ell=10$ mmとした。この場合, 流

Fig. 1 Apparatus

Fig. 2 Nozzle and coordinates

Fig. 3 Equipment of pulse generator

れが定常のとき, ノズル内壁面上に発達する薄い境界層を除いて一様な速度分布が噴出口で得られる。¹⁵⁾ 使用した座標は噴出口中心を原点として, 噴流軸下流方向, ノズル幅方向, 深さ方向をそれぞれ x, y, z とした。

脈動流は, スコッチ・ヨーク機構を用いて発生させた。脈動流の発生装置の全体図をFig. 3に示す。回転軸中心とピン中心距離 R とモーターの回転数を変えることにより, 脈動流の振幅と周波数を変化させた。90度ベンド部分から内径50 mmの送水管中に設置された内径20 mm, 長さ280 mm, 肉厚5 mmのシリンダー内をピストンが往復し, 脈動を発生させている。

流れの可視化は水素気泡法を用いた。陰極として, 直径 $50 \mu\text{m}$ の白金線を y 軸上($z=0$)に設置した。陽極として銅板を用いた。印加電圧を40~100 Vにして水素気泡を連続発生させた。流れの様子の撮影はモータドライブ付きカメラを用いて行った。自由せん断層に形成される渦の周波数 F はストップウォッチにより計時した。このときの渦形成のストローハル数 S_t は $S_t = F \cdot w / u_m$ で定義する。ここで, $u_m (= Q_m / (w \cdot h))$ は噴出口における平均軸速度である。また, 噴出口中心における速度 u_0 の測定はホットフィルム・熱線流速計を用いた。

可視化が容易であることから, 本実験において, $u_m = 8 \text{ cm/s}$ (一定) にした。このときのレイノルズ数 $Re (= u_m \cdot w / \nu)$ は1,290である。ここで, ν は水の動粘度である。著者らは, さきに定常噴流の場合について, S_t と Re の関係を求めている。すなわち, $\ell/w=0.5$ のとき, S_t と Re の関係は実験式 $S_t = 0.012 Re^{1/2}$ で表される。¹⁵⁾ $Re=1,290$ のときの S_t の値は0.43であり, $F=1.72 \text{ Hz}$ になる。この流れに後述のTable 1に示すような周波数と振幅の脈動を加えて実験を行った。なお, 脈動の周波数は1.72 Hzより小さい場合の2条件と大きい場合の2条件の計4条件に設定した。

3. 実験結果

3.1 速度変動波形

噴出口中心における速度 u_0 の時間変化の測定例をFig. 4に, u_0 のモデル図をFig. 5に示す。本実験において, 脈動速度の無次元周波数 F_m および速度振幅比 α は

Fig. 4 Pulsating velocity

Fig. 5 Model of pulsating velocity

それぞれ, $F_m = f_m \cdot w^2 / \nu$, $\alpha = A_m / u_m$ で定義する。ここで, $f_m (= 1/T)$ は脈動速度の周波数, T は脈動速度の周期, A_m は脈動速度の振幅である。Fig. 4 より, u_0 はほぼ正弦波状の脈動をしていることがわかる。

Table 1 に実験条件を示す。実験は f_m を 4 通りに設定して, α を変化させて行った。以後の実験を表中の記号で表示する。表中の St_m は脈動速度のストローハル数であり, $St_m = f_m \cdot w / u_m$ で定義する。

3.2 流れの可視化

$Re = 1,290$ について, 流れに脈動を加えない場合 ($F_m = 0$, $\alpha = 0$), すなわち定常噴流の場合の流れの模様を, Fig. 6 に示す。水素気泡は連続発生させてある。脈動噴流との比較のため, Re は脈動噴流のそれと同じくしてある。最初の写真を任意の時刻 $t = 0$ s として, 以後 0.2 s の時間間隔での連続写真である。 $t = 0$ s において, 下流から順に渦 A, B, C が存在している。 $t = 0.2$ s で, 渦 A, B, C は成長しながら下流へ進み, 上流に新しく渦 D が形成される。 $t = 0.4$ s において, 渦 B は内側(噴流軸側)から渦 A の内部に, 同様に渦 D は内側から渦 C の内部に入り込もうとしている。 $t = 0.6$ s では渦 B は渦 A の内部に, 渦 D は渦 C の内部に入り込み, 合体が起こる。これは A と B, C と D において, 下流にある渦が上流の渦の径を縮め, 上流の渦が下流の渦の径を拡げ, 結果として下流の渦の進行速度が遅く, 上流が早くなる相互作用である。渦の形成, 成長, 合体は噴流軸に関して対称であり, 渦の形成, 成長に伴って噴流幅の拡大, 収縮が観察される。

$Re = 1,290$, $F_m = 297$ の場合について, α を変化させたときの脈動噴流の流れの模様を Fig. 7, 8, 9 にそれぞれ示す。写真は $T/4$ 間隔ごとの流れの模様を示しており, 図中の時刻 t は Fig. 5 のそれと対応させてある。すなわち, $0 \leq t \leq T/4$ は u_0 の加速期, $T/4 \leq t \leq 3T/4$ は u_0 の減速期, $3T/4 \leq t \leq T$ は u_0 の加速期である。 u_0 は $t = T/4$ で最大値, $t = 3T/4$ で最小値をとる。 $\alpha = 0.16$ の場合を Fig. 7 に示す。 $t = 0$ において, 噴流軸に対称に渦 A が形成されている。噴出口と渦 A の間で, 噴流幅は流れ方向 (x 方向) に減少している。 $t = T/4$ において,

Table 1 Experimental conditions

f_m (Hz)	0.57	0.93	1.92	3.03
F_m	181	297	619	1006
St_m	0.14	0.23	0.48	0.78
α (symbol)	0.50 (○)	0.53 (△)	0.50 (◇)	0.50 (□)
	0.37 (●)	0.37 (▲)	0.34 (◆)	0.33 (■)
	0.16 (◐)	0.16 (◑)	0.20 (◒)	

$$Re = 1290 (u_m = 8.0 \text{ cm/s})$$

Fig. 6 Flow patterns of steady jet
 $Re = 1,290$ ($u_m = 8.0$ cm/s),
 $F_m = 0$ ($f_m = 0$),
 $\alpha = 0$,
 $St = 0.44$ ($F = 1.76$ Hz)

噴出口の近傍で噴流幅のふくらみが観察される。 $t = 2T/4$ において, 噴流幅のふくらみ部分の幅は著しく増加しており, この位置で噴流軸に対称に渦 B が形成されている。 $t = 3T/4$ において, 渦 B は下流へ進みながら明白な渦に成長している。 $\alpha = 0.37$ の場合を Fig. 8 に示す。 $t = 0$ において, 渦 A が形成されており, 噴出口と渦 A の間で噴流幅は流れ方向に減少している。 $t = T/4$ において, 噴出口のすぐ近傍では噴流幅が広がり, そこでは渦 B が形成されている。 t の増加 ($2T/4$, $3T/4$) と

Fig. 7 Flow patterns

$Re = 1,290$ ($u_m = 8.0$ cm/s),
 $F_m = 297$ ($f_m = 0.93$ Hz),
 $\alpha = 0.16$,
 $St = 0.23$ ($F = 0.93$ Hz)

Fig. 8 Flow patterns

$Re = 1,290$ ($u_m = 8.0$ cm/s),
 $F_m = 297$ ($f_m = 0.93$ Hz),
 $\alpha = 0.37$,
 $St = 0.23$ ($F = 0.93$ Hz)

Fig. 9 Flow patterns

$Re = 1,290$ ($u_m = 8.0$ cm/s),
 $F_m = 297$ ($f_m = 0.93$ Hz),
 $\alpha = 0.53$,
 $St = 0.23$ ($F = 0.93$ Hz)

ともに、渦 B は下流へ進みながら成長する。 $\alpha = 0.53$ の場合を Fig. 9 に示す。 $t = 0$ において、Fig. 7, 8 の $t = 0$ のときと同様に、噴流軸に対称に渦 A が形成されており、噴出口と渦 A の間で噴流幅は流れ方向に減少している。 $t = T/4$ において、噴出口のすぐ近傍に渦 B が形成されており、 t の増加 ($2T/4$, $3T/4$) とともに下流へ進みながら成長する様子がよくわかる。

以上の実験により次のことがわかる。

(1) α に無関係に T の間にせん断層に噴流軸に関して対称に一对の渦が一つ形成される。すなわち、本実験範囲において、 f_m と F は等しい。

(2) α の値の増加とともに渦 B の形成時刻は加速によるせん断力の増加のために早められる。

(3) 定常噴流の場合の渦の形成、成長位置は下流であるのに比べて、脈動噴流の場合の渦の形成、成長位置は明らかにノズル近傍になる。

以上の観測結果より、 u_0 の変化と流れの模様との関係を数値化するために、水素気泡を連続発生させて得られた流れの模様のモデル図を Fig. 10 に示す。それぞれの時刻において、一对の渦の外側間距離 (y 方向距離) を B_0 、渦の中心間距離を B_v 、噴流幅の最小値 (縮流幅) を B_i と定義する。また、噴出口端から渦中心までの x 方向

Fig. 10 Model of flow patterns

距離を L_{ex} 、噴出口端と渦中心を結ぶ直線が L_{ex} とのなす角 (渦中心の広がり角) を θ と定義する。

3.3 渦の挙動

本節では、まず S_t と F_m あるいは S_{tm} の関係について述べる。次に、前節で定義した B_0 , B_v , B_i , L_{ex} , θ と t の関係を求める。

$Re = 1,290$ の場合について、Fig. 11 に S_t と F_m あるいは S_{tm} の関係を示す。図中の記号は Table 1 に示したが、図示すると重なるため、記号+で代表して表している。なお、◎印は同じ Re における定常噴流の場合の S_t の値である。図より、 α の値に無関係に、 S_t は S_{tm} と等しく、 F_m とともに直線的に増加していることがわかる。

Fig. 11 Relation between St and F_m Fig. 12 Relation between B_0 and t

連続流でできる渦と比較すると、強制的に作られる渦ではその脈動周波数が渦の挙動を決定し、連続流でできる渦の相互作用は弱いようにみえる。

B_0 , B_v , B_i , などの数値化は $F_m = 181$ と 297 の場合について行った。 t に対する B_0 , B_v , B_i , などの値の変化は二つの F_m について同様な傾向を示す。 $Re = 1,290$, $F_m = 181$ の場合について、 B_0 と t の関係を Fig. 12 に示す。図には横軸として u_0 のモデル図も併記した。 $\alpha = 0.5$ の場合(記号○印), 図中に矢印 a で示した時刻に噴出口のすぐ近傍に一对の渦が形成される。この時の B_0 の値は約 3.5 cm である。 B_0 の値は t の値とともに増加した後, 最大値に達する。その後, ゆるやかな減少傾向を示す。 t に対する変化の傾向は $\alpha = 0.37$ と 0.16 (記号●と●) の場合も同様である。なお, 図中の矢印 b, c は $\alpha = 0.37$ と 0.16 のそれぞれの場合について, 噴出口のすぐ近傍で形成されたばかりの一对の渦の B_0 を示す。図より, α が大きいほど, B_0 の値が大きくなる傾向を示す。

B_v と t の関係を Fig. 13 に示す。図中の破線は t の値が小さい順に時刻 $t = T/4, 2T/4, 3T/4, T$ を表す。

Fig. 13 Relation between B_v and t Fig. 14 Relation between B_i and t Fig. 15 Relation between L_{ex} and t Fig. 16 Relation between θ and t

矢印 a, b, c は $\alpha = 0.5, 0.37, 0.16$ のそれぞれの場合について、それぞれの時刻に噴出口のすぐ近傍で形成されたばかりの一对の渦の B_v を示す。 α の違いによる B_v の明確な差異はみられない。 B_i と t の関係を Fig. 14 に示す。 t の値が増加すると B_i は減少し、 α の値が大きいほど B_i の減少の割合は急激になっている。また、 t の値の大きい領域では α が大きいほど B_i は小さくなる。 $\alpha = 1$ のとき、ある時刻で $B_i = 0$ になることが予想されることから、この傾向は容易に理解できる。

L_{ex} と t の関係を Fig. 15 に示す。図中の矢印 a, b, c はそれぞれの α に対して、形成されたばかりの渦の L_{ex} を示す。 t の値とともに L_{ex} は直線的に増加する。また、同じ t の値に対して、 α が小さいほど L_{ex} は大きくなる傾向を示す。 θ と t の関係を Fig. 16 に示す。図中の矢印 a, b, c はそれぞれの α に対して、形成されたばかりの渦の θ を示す。 t の値が増加すると θ は減少する。また、 α が大きいほど θ は大きくなる傾向を示す。

4. 結 論

- (1) 噴出口中心における脈動速度の一周期 T に対応して、脈動する噴流の流れの様子が明らかになった。
- (2) 本実験範囲において、脈動速度の振幅比 α に無関係に脈動速度の周波数 $f_m (= 1/T)$ に一致して、噴流の自由せん断層に噴流軸に関して対称な一对の渦が一つ形成される。すなわち、自由せん断層に形成される渦の周波数 F と f_m は等しい。
- (3) α の値の増加とともに噴出口のすぐ近傍に形成される一对の渦 B (Fig. 7, 8, 9 参照) の形成時刻は加速によるせん断力の増加のために早められる。
- (4) 定常噴流の場合の渦の形成、成長位置は下流であるの比べて、脈動噴流の場合の渦の形成、成長位置は明らかにノズル近傍になる。
- (5) 噴出口のすぐ近傍に形成された一对の渦 B の外側間距離 B_o は t とともに増加した後、最大値に達する。その後、ゆるやかな減少傾向を示す。また、 α が大きいほど B_o の値は大きくなる。
- (6) 噴出口のすぐ近傍に形成された一对の渦 B の中心間距離 B_v の α の違いによる明確な差異はみられない。

- (7) 噴流幅の最小値 (縮流幅) B_i は t の値が増加すると減少し、 α の値が大きいほど B_i の減少の割合は急激になっている。また、 t の値の大きい領域では α が大きいほど B_i は小さくなる。

最後に、実験に協力いただいた当時信州大学学生、金谷聡君 [現：伸光製作所(株)] に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 近江ほか 3 名: オリフィスを設けた円管内の振動流れにおける速度分布と再付着点距離, 機論, 50-453 (1984), 1231-1239.
- 2) 井口ほか 3 名: 急拡大管内乱流脈動拘束噴流の速度と乱れ強さ, 機論, 56-526 (1990), 1659-1664.
- 3) 横田ほか 2 名: 円筒形絞りの噴流領域における振動流の挙動 (第 1 報 流れの可視化実験), 油圧と空気圧, 17-6 (1986), 469-475.
- 4) Seno, T., Kageyama, S. and Ito, R.: Effect of controlled pulsation on axisymmetric jet behavior, J. Chem. Eng. Japan, 20-2 (1987), 128-133.
- 5) Yellin, E. L. and Peskin, C. S.: Large amplitude pulsatile water flow across an orifice, Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control, 97-1 (1975), 92-95.
- 6) 村上: 非定常流の計測の問題点, 機械の研究, 31-8 (1979), 905-910.
- 7) 山口: オリフィスの非定常特性, ターボ機械, 7-2 (1979), 95-100.
- 8) 近江ほか 1 名: 管路系内の非定常流れ, 機論, 48-430 (1982), 981-987.
- 9) Young, D. F.: Fluid mechanics of arterial stenoses, Trans. ASME, J. Biomech., 101-3 (1979), 157-175.
- 10) Rockwell, D. O. and Niccolis, W. O.: Natural breakdown of planar jets, Trans. ASME, J. Basic. Eng., 94-4 (1972), 720-730.
- 11) Clark, J. A. and Kit, L.: Shear layer transition and the sharp-edged orifice, Trans. ASME, J. Fluids Eng., 102-2 (1980), 219-225.
- 12) Freymuth, P.: On transition in a separated laminar boundary layer, J. Fluid Mech., 25-4 (1966), 683-710.
- 13) Becker, H. A. and Massaro, T. A.: Vortex evolution in a round jet, J. Fluid Mech., 31-3 (1968), 435-448.
- 14) Beavers, G. S. and Wilson T. A.: Vortex growth in jets, J. Fluid Mech., 44-1 (1970), 97-112.
- 15) 堀越ほか 2 名: 長方形噴流のせん断層に形成されるうずの挙動に関する研究, 機論, 52-473 (1986), 305-311.