長方形断面オリフィスから噴出する脈動噴流の可視化

Vortex Behavior of a Pulsating Jet issuing from Rectangular Orifice

○ 劉 東岩 (信州大)
正 飯尾 昭一郎 (信州大)
正 池田 敏彦 (信州大)

学 高橋 清 (信州大・院)
正 羽田 喜昭 (長野高専)

Dongyan LIU, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano
Kiyoshi TAKAHASHI, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano
Shouchiro IIO, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano,
Yoshiaki HANEDA, Nagano National College of Technology, 716 Tokuma, Nagano
Toshihiko IKEDA, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano

Key Words: Vortex Behavior, Pulsating Jet, Rectangular Orifice

1. 緒言

定常噴流に脈動を与えた脈動噴流では、せん断層に形成する渦の挙動が定常噴流の場合とは異なり、流れの混合や拡散が促進される。脈動を伴う流動現象は工学の分野のみならず環境問題、医学・生理学などの分野においても重要であり、従来から多くの報告⁽¹⁾がなされている。

著者らはこれまでの研究において、長方形断面ノズルから噴出する脈動噴流についてその渦挙動に着目し、定常噴流との違い⁽²⁾や噴出口下流に設けた拘束板が渦挙動におよぼす影響⁽³⁾、さらに脈動条件（周波数、振幅）と渦挙動との関係⁽⁴⁾を明らかにしてきた。ここでは、これまでの長方形断面ノズルと同一の断面形状を有する長方形断面オリフィスから噴出する脈動噴流について、噴出口の様々な断面を水素気泡法により可視化し、その渦挙動を明らかにすることを目的とする。また、ノズルでの渦挙動との比較も行った。

2. 実験装置と方法

実験装置の概略図を図1に示す。ヘッドタンクから流出した水は、スコッチヨーク機構やピストンからなる脈動発生装置を経て整流部に入り、長方形断面オリフィスあるいはノズルを通して測定部へ噴出する。安定して水を供給するためにヘッドタンクと測定部にはオーバーフローを設けた。噴出口からの平均流量は測定部のオーバーフローからの流出量を重量法により求めた。脈動は、整流部上流の送水管にある90度ベンド部に設置したスコッチヨーク機構のピストンの往復動により噴流に加えた。噴出口形状と座標系を図2に示す。(a)オリフィス、(b)ノズルのどちらも幅 $w=20\text{mm}$ 、深さ $h=100\text{mm}$ の長方形断面で、縦横比は5、絞り比は10である。オリフィスは厚さ 1mm の樹脂製板である。ノズルは二つの円弧と長さ $\ell=10\text{mm}$ の平行部で構成される。座標系は噴出口中心を原点とし、噴流軸下流方向に x 軸、噴出口幅方向に y 軸、深さ方向に z 軸とした。

噴出口断面平均流速は $\bar{u} = Q_m / (w \cdot h) = 8\text{cm/s}$ とした。このときレイノルズ数は $Re = \bar{u} w / \nu = 1300$ (ν は水の動粘度)である。脈動の周波数は $f_m = 1/T = 0.93\text{Hz}$ (T は脈動の周期)、速度振幅比⁽²⁾は $\alpha = 0.53$ とした。流れの可視化は水素気泡法により行った。陰極となる直径 $50\mu\text{m}$ の白金線を測定断面に設置し、水素気泡を発生させた。流れ模様はハイスピードカメラにより撮影し、任意時間の画像を抽出した。フレームレートは 200fps 、シャッタースピードは $1/400$ 秒である。スコッチヨーク機構に取り付けたロータリエンコーダの信号をもと

に撮影開始時刻を制御した

3. 実験結果と考察

3.1 流れの可視化

フローパターンを図3に示す。最上段が定常噴流、その下が $t=T/4$ 間隔での脈動噴流の可視化画像である。 $0 \leq t \leq T/4$ は脈動の加速期、 $T/4 \leq t \leq 3T/4$ は減速期である。定常噴流の場合

Fig.1 Schematic of experimental facility

(a) Orifice ($h/w=5$)

(b) Nozzle

Fig.2 Exit shapes and coordinates

合、長辺せん断層からの渦は噴流軸に対してほぼ対称に形成されており、その発生周波数 F はノズルの場合 (a) が $F=1.65$ Hz、オリフィスの場合 (b) が $F=7.2$ Hz である。それぞれストローハル数 $St(=Fw/\bar{u})$ は、0.41, 1.8 である。オリフィスの場合には縮流が見られ、渦の形成が噴出口直後から見られる。オリフィスの短辺せん断層 (c) については $x/w \approx 4$ で渦形成が見られ、その上流では z 方向に様な速度分布となっている。一方、脈動を与えた場合には両せん断層ともに脈動の一周期に一对の大規模渦が形成される。長辺せん断層において、脈動時の渦の発生周波数はノズルの場合が $F_m=0.93$ Hz、オリフィスの場合が $F_m=9.0$ Hz である。(a) のノズルの場合には $t=0$ で形成した渦 A が成長して大規模渦となるのに対して、(b) のオリフィスでは $t=0$ でせん断層不安定による複数の小規模渦列の形成・合体により渦 A となり、それが時間経過とともに下流へ移動しながら大規模化する。この大規模渦 A は脈動の一周期に一つ形成する。また、渦 A の成長とともに、 $t=2T/4$ では渦 A の上流側に小規模渦列 B が形成する。渦 A はこの渦列 B を取り込みながら y 方向へと広がっていく。(c) のオリフィスの短辺せん断層には脈動による大規模渦対のみが形成されており、複数の渦が合体する様子はなく時間経過とともに噴流軸に近づく様子がわかる。

3. 2 渦挙動の定量化

図 4, 5 に長辺せん断層に形成する大規模渦対の渦中心間距離 B_{ow} および短辺せん断層に形成する渦対間の距離 B_{oh} の $t=T/8$ ごとの定量化結果を示す。渦の中心は目視により判断した。図 4 の時間変化に着目すると、 B_{ow} はどちらの噴出口でも $t=T$ まではほぼ一定値をとり、その後急激に増加する。 B_{ow} はオリフィス (Δ) がノズル ($\blacktriangle$) よりも大きな傾きを持つことから、噴流の拡散が大きいことがわかる。 B_{oh} は、オリフィス ($\square$) では、渦は発生直後に一度 z 方向へ広がったのちに噴流軸へ急激に近づく、その速度がノズル ($\blacksquare$) よりも大きいことが見て取れる。また、 $t=3T/4$ においてノズル ($\blacksquare$) の減少勾配が直線的であることから、短辺せん断層の渦が噴流軸へ等速で近づくことがわかる。 B_{ow} と B_{oh} の大小関係の逆転は噴流の長短軸の変換を示唆している。オリフィスの軸変換はノズルよりも早期に起こることがわかった。図 5 は渦の空間的な移動を示す。この結果より、オリフィスで形成する渦の方がノズルのそれよりも移流速度が大きいことがわかる。その傾向は特に短辺せん断層の渦 (B_{oh}) について顕著である。また、オリフィスの場合、軸変換が起こる位置は $x/w \approx 4$ でノズルよりも下流である。

4. 結論

長方形断面オリフィスから自由空間へ噴出する脈動噴流について、渦の挙動を可視化した結果、以下の結論を得た。

- (1) 脈動時には噴出口長辺せん断層に大規模渦が形成する。この渦は複数の小規模渦列の合体により形成することがわかった。大規模渦の発生周期は脈動周期と同一である。
- (2) 脈動時には噴出口短辺せん断層からの渦の形成位置は定常時よりも上流となる。この渦は時間経過とともに噴流軸に近づく。
- (3) 渦輪の変形および移流速度とともにノズルよりもオリフィスの方が大きい。一方、噴流の長短軸の変換位置はオリフィスの方がノズルよりも下流であった。

参考文献

- (1) たとえば, Seno et al.: J. Chem. Eng. Japan, 20-2(1987), 128-133.
- (2) Iio et al.: JSME Int. J. Ser. B, 49-4(2006), 988-994.
- (3) 飯尾ら他 3 名: 可視化情報学会論文集, 27-1(2007), 1-6.
- (4) Iio et al.: J. Visualization, 11-2(2008), 125-132.

Fig.3 Flow pattern in xy-plane and xz-plane ($Re=1300, f_m=0.93$ Hz)

Fig.4 Variation of B_{ow} and B_{oh} vs. t ($Re=1300, f_m=0.93$ Hz)

Fig.5 Variation of B_{ow} and B_{oh} vs. x/w ($Re=1300, f_m=0.93$ Hz)