脈動が長方形噴流の挙動に及ぼす影響

Effect of Controlled Pulsation on Rectangular Jet Behavior

○学 高橋 清 (信州大院) 正 飯尾 昭一郎 (信州大)
正 羽田 喜昭 (長野高専) 正 池田 敏彦 (信州大)

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: Pulsating Jet, Rectangular Nozzle, Vortex Formation, Flow Visualization, Hydrogen Bubble Method

1. 諸論

定常噴流に脈動を加えた脈動噴流では、せん断層に形成され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がなされている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

著者らはこれまでの研究において、測定部上下の平板により拘束された空間中に長方形断面ノズルから噴出する脈動噴流について、定常噴流との比較や、脈動条件および噴出口形状が渦の挙動に及ぼす影響を明らかにした⁽⁵⁾。しかし、拘束板のない自由空間へ噴出する脈動噴流については明らかにされていない。そこで本研究は長方形断面ノズルから自由空間へ噴出する噴流に及ぼす脈動条件（周波数、振幅）の影響を特に渦の挙動に着目し、明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図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チャンバに入り、長方形断面ノズルから測定部へ噴出する。ヘッドタンクと測定部のオーバーフローにより水位差は一定に保たれる。噴出口からの流量は定常時に配水管からの流出量を重量法により測定して定めた。脈動は送水管の90度ベンド部に設置したピストンの往復運動により噴流に加えられた。脈動の周波数 f_m および振幅はスコッチヨーク機構のクランク部の回転数と回転半径を変えることで容易に調整できる。使用したノズルと座標系を図2に示す。ノズルは2つの円弧と長さ $l=10$ mmの平行部からなり、絞り比は10である。噴出口短辺長さは $w=20$ mm、長辺長さは $h=100$ mm、縦横比は5である。座標系は噴出口中心を原点とし、噴流軸下流方向を x 、噴出口短辺方向を y 、長辺方向を z とした。流れの可視化は水素気泡法により行った。気泡発生電極には直径 $50\ \mu\text{m}$ の白金線を用いた。流れ模様はハイスピードカメラにより撮影した。フレームレートは200 fps、シャッタースピードは $1/400$ sである。脈動噴流を任意の時刻で撮影するために、カメラへのトリガ信号と脈動発生装置に設置したロータリーエンコーダからの信号をコンピュータで制御した。

噴出口断面平均流速は $u_m=8$ cm/s、 w に基づくレイノルズ数は $Re(=u_m \cdot w/\nu)=1300$ である。脈動の周波数は $f_m=1/T$ Hzとし、脈動の振幅は流量振幅比 $\beta=(Q_{\max}-Q_{\min})/(2 \cdot \bar{Q})$ で定義した。 ν は水の動粘度、 T は脈動の周期、 $Q_{\max}$ と $Q_{\min}$ はそれぞれ最大流量と最小流量、 $\bar{Q}$ は平均流量である。

3. 実験結果と考察

定常噴流のフローパターンを図3に示す。白金線を y 軸上に設置し、 z 方向から撮影した。流れ方向は図の左から右である。水素気泡はパルス発生させた。 $x/w=2.5$ において、せん断層の不安定性に起因する渦が噴流軸に対して対称に形成し、下流に進むにつれ成長する。渦の発生周波数は $F=1.64$ Hz、ストローハル数は $St(=F \cdot w/u_m)=0.41$ である。

脈動噴流のフローパターンを図4に示す。白金線の設置位置と撮影方向は定常時と同様であり、撮影時間間隔は $T/4$ である。実験条件を表1に示す。Case 4において、脈動の一周期につき脈動による渦対Aが1つ、噴流軸に関して対称に形成される。この形成位置は図3に示す定常噴流における渦より上流である。渦Aは時刻の経過につれ下流へ進行し、噴出口短辺方向の渦対間隔は広がる。このような挙動は表1の全ての条件で見られた。Case 4とCase 6の可視化結果の比較により β の違いによる変化、Case 6とCase 8の比較により f_m

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Nozzle and coordinate system

の違いによる変化を評価する。Case 4とCase 6を比較すると、渦Aの形成が明確となる。 $t=T/4$ において、その形成位置および渦対の間隔ともに同程度である。Case 6の方が渦が明瞭である。その後、両条件とも時刻の経過につれ渦対の間隔は広がるが、その広がり方はCase 4よりCase 6の方が大きく、これは β の違いに起因するものである。また、渦のパターンは両条件とも周期 T で繰り返される。Case 6とCase 8を比較すると、渦の干渉状態が大きく異なる。Case 8では渦Bと渦Cの干渉が見られる。 $t=0$ において、渦Bと渦Cの相互の誘起速度により渦Bの渦対間距離は渦Cのものより短くなる。渦Bは渦Cにより加速され、 $t=3T/4$ で渦Bが渦Cの中に入り込むようにして合体する。このような干渉は周期 $2T$ で繰り返される。Case 6では渦が可視化領域において他の渦と積極的に干渉する様子は見られないが、 f_m が大きいCase 8では渦対の流れ方向の距離が短くなり、合体・干渉が早期に起こるようになる。

4. 渦輪の干渉モデル

図4および他の断面の可視化結果から脈動により渦輪が形成されることを確認した。図5は渦輪の干渉する様子をモデル化したものである。脈動条件はCase 8である。図中の太い実線は先行渦、二重線は追跡渦を示す。先行渦は $t=3T$, $x/w=4$ において噴出口短辺方向に大きく伸長し、軸交換している。追跡渦は $2T < t < 3T$ において先行渦の影響を受けながら複雑に変形する。 $t=4T$ では追跡渦が先行渦の中に入り込み、2つに分裂する。このような干渉には渦の誘起速度が影響していると考えられる⁽⁶⁾。

Fig. 3 Flow pattern of the natural jet

5. 結論

長方形断面ノズルから自由空間へ噴出する噴流に及ぼす脈動条件の影響について、渦の挙動に着目し検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 脈動周波数 f_m が大きくなると流れ方向の渦間距離が短くなり、合体・干渉が早期に起こるようになる。
- (2) 流量振幅比 β が大きくなると噴出口短辺方向の渦対間隔の広がりが促進される。
- (3) 2つの渦輪が干渉する際は、先行渦は噴出口短辺方向に大きく伸長し、軸交換する。追跡渦は先行渦の影響を受け、複雑に変形し2つに分裂する。

参考文献

- (1) 近江ら他 3名：機論(B), 50, 453(1984), pp. 1231-1239.
- (2) 井口ら他 3名：機論(B), 56, 526(1990), pp. 1659-1664.
- (3) Seno Tadachika, et al. : J. Chem. Eng. Japan, 20, 2(1987), pp. 128-133.
- (4) Yellin, E and L, Peskin C. s. : Trans. ASME, Series G, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 97, 1(1975), pp. 92-95.
- (5) 例えば、池田ら他 6名：可視化情報, 17, 67(1997), pp. 56-61.
- (6) 豊田ら他 1名：機論(B), 55, 514(1989), pp. 1542-1545.

Fig. 4 Flow patterns of the pulsating jet ($Re=1300$)

Fig. 5 Vortex deformation process (Case 8)