A 1 1 1

脈動噴流に関する研究* —拘束板が流れ特性におよぼす影響—

飯尾 昭一郎[○] (信州大学), 池田 敏彦 (信州大学)

A Study on Pulsating Jet —Influence of Bounded Plates on Flow Characteristics— Shouichiro IIO and Toshihiko IKEDA

ABSTRACT

The development of a large vortex structure in fluid flow is responsible for some of the most fascinating aspects of fluid dynamics, such as mixing, transport, and instability. This paper describes an experimental study on the vortex nature of a pulsating jet issuing from a rectangular nozzle of an aspect ratio of 5 which has short parallel section upstream of the jet exit. The visualized images by hydrogen bubble method revealed the influence of the bounded plates upon the vortex nature.

Keywords: Pulsating jet, Visualization, Bounded plates

1. 緒 論

定常噴流に脈動を加えた脈動噴流においては、せん断層に形成される渦の挙動など、定常噴流とは異なり流れの拡散や混合が促進される。脈動を伴う流動現象は、流量測定、内燃機関の燃焼や熱交換器の熱伝達などに関連して工学の分野のみならず、汚染物質の拡散などの環境問題、血液流を対象とした医学・生理学の分野において重要であり、従来から数多くの報告や展望がなされている^{1)~8)}。

著者らは、平行部の短いノズルからの脈動噴流のせん断層に形成される渦の挙動を可視化し、脈動の周波数や振幅比の影響を調べ、定常噴流との比較を行った⁹⁾。次に、ナビエ・ストークス方程式を差分法により数値解析し、脈動周波数や振幅比およびレイノルズ数が渦の挙動に及ぼす影響を調べて実験結果と比較した¹⁰⁾。さらに、平行部の短いノズル、平行部の長いノズル、オリフィスを用いて、噴出口形状が渦の挙動に及ぼす影響を調べた¹¹⁾¹²⁾。四種類の長さの異なる長方形断面絞りからの脈動噴流について、絞り長さの違いがせん断層に形成される渦の挙動に及ぼす影響を明らかにした¹³⁾。平行部の短いノズルからの脈動噴流について、噴出口の幅方向と深さ方向のいろいろな断面の可視化から流れ特性を調べた¹⁴⁾。しかしながら、著者らの一連の報告において噴流は上下の拘束板により拘束されており、拘束板のない自由空間に噴出する脈動噴流の流れ特性は明らかにしていない。そこで本研究では、自由空間に噴出する脈動噴流の可視化を行い、拘束板が存在する場合の流れと比較することで、拘束板が流れ特性におよぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略図を Fig.1 に示す。ヘッドタンクから流出する水は、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幅 460mm、長さ 550mm、深さ 330mm の測定部へ噴出する。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。流量は排水管からの流出量を直接測定して求めた。測定部の概略図を Fig.2 に示す。ノズルは二つの円弧と長さ $l=10\text{mm}$ の平行部からなり、幅 $w=20\text{mm}$ 、深さ $h=100\text{mm}$ 、絞り比 10 である。既報^{9)~14)}では Fig.2 に 2 点鎖線で示す拘束板があった。本研究では拘束板を取り除いた場合の流れ特性を拘束板がある場合と比較することで、拘束板の流れへの影響を明らかにする。座標は噴出口中心を原点として、噴流軸下流方向を x 、ノズル幅方向を y 、深さ方向を z とした。スコッチ・ヨーク機構を用いた脈動発生装置を Fig.3 に示す。回転軸中心とピン中心間距離 R およびモータの回転数を変えることによ

Fig.1 Apparatus without bounded plates

り、脈動流の振幅と周波数を変化させることができる。90度ベンド部分から内径50mmの送水管中に挿入した内径20mm、長さ280mm、厚さ5mmのシリンダー内をピストンが往復運動することにより脈動を発生させている。この機構を用いると噴出口形状に無関係に脈動流の流量特性をほぼ同じにすることができる。本実験において、既報^{9)~14)}と同様に、噴出口中心での平均流速 $\bar{u}$ を8cm/s、脈動の周波数 $f_m(=1/T)$ を0.93Hzとした。このときのレイノルズ数 $Re(=\bar{u} \cdot w/\nu)$ は1290である。ここで T は脈動の周期、 ν は水の動粘度である。既報⁹⁾において、ホットフィルム・熱線流速計で測定した噴出口中心の速度 U_0 の時間変化のモデル図をFig.4に示す。速度振幅比 α は $\alpha=A_m/2[U_0]_{\alpha=0}$ で定義した。ここで、 A_m は U_0 の最大値と最小値の差、 $[U_0]_{\alpha=0}$ は定常噴流の場合の噴出口中心速度である。流れの可視化は水素気泡法により行った。陰極として、直径 $50\mu\text{m}$ の白金線を噴出口に設置し、陽極には銅板を用いた。脈動する噴流を任意の時刻で撮影するために、CCDカメラへのトリガ信号とスコッチ・ヨーク機構に取り付けたロータリーエンコーダからの信号をパソコンにより制御した。撮影は長方形ノズルの深さ方向(z 方向)と幅方向(y 方向)から行った。

3. 実験結果と考察

$Re=1290$ ($\bar{u}=8\text{cm/s}$), $f_m=0.93\text{Hz}$, $\alpha=0.53$ の場合についての噴流の流れ模様をFig.5に示す。図中の時刻 t はFig.4のそれと一致させてある。 $T/4 \leq t \leq 3T/4$ は U_0 の減速期、 $0 \leq t \leq T/4$, $3T/4 \leq t \leq T$ は U_0 の加速期である。Fig.5(a)の可視化写真は、白金線を噴出口高さの中心(y 軸上)に設置して、 z 方向から撮影したものであり、水素気泡はパルス発生させてある。“Free”は噴出口に拘束板がなく、噴流は自由空間に噴出する。“Bounded”は噴出口の上下に拘束板を設置した場合である。“Free”のタイムラインの周期は100ms、パルス幅は40ms、“Bounded”のタイムラインの周期は40ms、パルス幅は20msである。 $t=0$ において、噴流軸に対称に一对の渦Aが形成されている。噴出口と渦Aの間で、噴流幅は流れ方向に減少している。 $t=T/4$ において、噴出口近傍に渦Bが形成されており、 t の増加($t=2T/4$, $3T/4$)とともに下流に進みながら成長する様子がよくわかる。このように、脈動の一周期 T の間にせん断層に噴流軸に関して対称に一对の渦が形成される。これらの傾向は、拘束板の有無に関係なく見られる。一对の渦の噴出口幅方向(y 方向)の間隔は拘束板がある場合にはほぼ一定であるのに対し、拘束板がない場合には下流にいくにつれて広がることがわかる。(b)の可視化写真は、白金線を噴出口高さの中心(y 軸上)および $z/w=\pm 1.5$ の3ヶ所に設置して、噴出口幅方向(y 方向)から撮影したものである。 $z/w=0$ からの流れは“Free”と“Bounded”ともに下流へと直進している。“Free”について $z/w=\pm 1.5$ からの流れは、下流へいくほど z 方向に波打っており、さらに下

流で噴流軸に漸近していく。図中Aで示す同時期に発生した3つの渦について、 $z/w=0$ の渦に比較して $z/w=\pm 1.5$ の渦は下流へ早く移動する。一方、“Bounded”について $z/w=\pm 1.5$ からの流れの z 方向の波打ちはわずかであり、その程度は“Free”よりも明らかに小さく、下流において噴流中央断面に漸近する様子は見られない。同時期に発生した3つの渦(AまたはB)の噴出口からの距離はほぼ一致しており、“Free”で見られた $z/w=\pm 1.5$ の

Fig.2 Test section

Fig.3 Equipment of pulse generator

Fig.4 Model of pulsating velocity

渦が先行する様子はない。このことは噴出口長辺のせん断層から円柱状の渦が形成され、下流まで維持されていることを示唆している。一方、拘束板がない場合は、上流で発生した円柱状の渦が下流へ進みながら曲率を持って z 方向へ縮む様子が見られる。また拘束板の有無によらず、 $z/w=\pm 1.5$ に形成された渦の中心部で噴流中央断面に向かう流れが観察された。その発生時期は “Bounded” が “Free” よりも早期であり $t=3T/4$ 、 $z/w=\pm 1.5$ の渦 B から確認できる。また “Bounded” においては、その発生期間が長く、撮影範囲においては下流にいくほどスパイラル状の構造が成長することがわかった。拘束板から離れた位置にある渦においては遠心力と圧力勾配は釣り合う。一方、拘束板近くの渦では、境界層により遠心力が弱められる。このため渦の外部から渦内部に向かう流れが生じる。この流れが渦中心部で噴流中央断面に向かう流れの原因だと考えられる¹⁵⁾。

Fig. 6, 7, 8 に示す可視化画像から渦の挙動を計測した結果について述べる。いずれの図においても白抜きの

プロット (添え字 c) が拘束板あり、塗り潰しが拘束板なしの結果である。Fig. 6 に、噴出口高さの中心 $z/w=0$ に白金線を設置したときに観察された渦対において、噴流軸から渦中心までの y 方向距離の時間変化を示す。 $t=10T/8$ までは拘束板の有無に関わらず、渦中心と噴流軸との距離はほぼ一定である。 $t=11T/8$ では、拘束板なしの値が急激に増加し、噴出口の幅方向へ噴流が広がっている様子がわかる。拘束板ありではその距離はわずかに増加するだけで、拘束板が噴流の幅方向への広がりを抑制していることがわかる。Fig. 7 に噴出口から渦中心までの x 方向距離の時間変化を示す。 $t=T$ までは拘束板の有無による差異は見られない。 $t=9T/8$ では、拘束板ありにおける距離の増加率がわずかに大きく、渦の下流への移動速度が大きいことがわかる。これは拘束板の存在により Fig. 6 に示した噴出口幅方向への噴流の広がりが抑制されたためだと思われる。Fig. 8 に $z/w=\pm 1.5$ に形成された渦と噴流軸との z 方向距離の時間変化を示す。拘束板なしでは、 $t=4T/8$ 以降に渦の中心が噴流軸へと漸近

Fig.5 Flow patterns ($Re=1290, \alpha=0.53$)

していくのに対し、拘束板ありではその距離は一定である。拘束板がある場合、 z 方向への渦の収縮が抑制されることがわかった。

4. 結論

拘束板の有無による流れ特性を比較した結果以下の結論を得た。

噴出口長辺のせん断層において、噴流軸をはさみ一對の円柱状の渦が発生する。この渦は拘束板がない場合には z 方向へ曲率を持って縮み、拘束板がある場合には円柱状のまま下流へ移動する。一對の渦の噴出口幅方向の間隔は、拘束板がある場合にはほぼ一定であり、拘束板がない場合には下流へいくほど広がる。また、拘束板がある場合、 $t=3T/4$ で渦中心部から噴流中央断面へ向かう流れが観察された。

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)，pp. 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)，pp. 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)，pp. 469-475.
- 4) Seno, T., Kageyama, S and Ito. : Effect of controlled pulsation on axisymmetric jet behavior, J. chem. Eng. Japan, 20-2(1987)，pp. 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)，pp. 92-95.
- 6) 近江ほか1名：管路系内の非定常流れ，機論，48-430(1982)，pp. 981-987.
- 7) Young, D. F. : Fluid mechanics of arterial stenoses, Trans. ASME, J. Biomech., 101-3(1979)，pp. 157-175.
- 8) 弓野 崇ほか3名：開口端を有するダクトにおける脈動流に関する研究，可視化情報，17-67(1997)，pp. 120-127.
- 9) 池田ほか3名：脈動噴流に関する研究(可視化による渦の挙動)，可視化情報，17-67(1997)，pp. 292-297.
- 10) 石川ほか5名：脈動噴流に関する研究(第2報 数値解析による定量的検討)，可視化情報，19-73(1999)，pp. 147-153.
- 11) T. Ikeda, T. Nagasawa, T. Yoshida, K. Fukami, M. Araki, Y. Tsuchiya: A study on the vortex behavior formed in the shear layer of pulsating jets, 3rd ASME/JSME Joint Fluids Eng. Conf. s-282, FEDS99-6949, 1-8(1999).
- 12) 池田ほか6名：脈動噴流に関する研究(第3報 渦の挙動に及ぼす噴出口形状の影響)，可視化情報，20-78(2000)，pp. 228-234.
- 13) 吉田ほか5名：脈動噴流に関する研究(第4報 長方形断面絞りからの渦形成)，可視化情報学会論文集，23-3(2003)，pp. 24-30.
- 14) 幡野ほか5名：長方形ノズルからの脈動噴流の可視化とその定量化，機構論，No. 01-3(2001)，226.
- 15) Schlichting H. : Boundary layer theory, New York, McGraw-Hill(1968).

Fig.6 Distance of a vortex pair

Fig.7 Travel distance of vortex core

Fig.8 Vertical distance of vortices