B223

フルイディック発振器内の流れの可視化

的場 識義 (同志社大学), 平田 勝哉 (同志社大学), 舟木 治郎 (同志社大学)

Flow Visualization in A Fluidic Oscillator

Noriyoshi MATOBA, Katsuya Hirata and Jiro Funaki

ABSTRACT

A confined jet sometimes causes self-excited oscillations due to an existence of a downstream obstacle. This phenomenon is useful for fluidic oscillators, heat/material mixers and flowmeters, in order to realize a low-cost high-reliability device without mechanically moving components. In the present paper, the authors study this phenomenon at low Reynolds numbers ($Re \leq 1000$), experimentally. More specifically, the authors deal with a two-dimensional confined jet into an abruptly expanding channel with a downstream square-cylinder target. As a result, the authors measured the flow patterns by PIV (Particle Image Velocimetry), and are classified into three types. Moreover, as a result of flow visualization by the digital camera, authors revealed that depends for oscillation frequency on the flow of the downstream of a square cylinder.

Keywords: Fluidic Oscillator, Flowmeter, Fluid Logic, Flow Induced Vibration, Flip-Flop Jet

1. 緒言

拘束噴流は、しばしば、下流の障害物により自励発振する。この現象は、フルイディック発振器や、熱および物質混合器、流量計などへの応用が有望である。なぜなら、機械的可動部がない為、安価で高信頼度の装置を実現することができるからである。流量計への応用を意図して、Yamasaki, Takahashi&Honda(1988)¹⁾は、最も単純な幾何形状の1つ、すなわち、下流に正方形柱を設置した2次元急拡大管を調べた。流体自励発振現象を利用した流量計には、カルマン渦列型流量計や、渦歳差型流量計、噴流発振型流量計などがあり、以下のような共通の長所を持つ。①機械的可動部を持たないことによる高い信頼性。②発振周波数と流量の線形性。③流体の密度や温度、圧力、組成の影響を受けにくい。噴流発振型流量計はしばしば、フルイディック型流量計あるいはフルイディック振動子型流量計と呼ばれる。ここに、“フルイディック”の語源は、流体論理素子(フルードロジック)あるいはフルイディクスにあり、その研究は1960年代に大きく発展した。(例えば、文献²⁾)しかしながら、多くのフルイディック発振器は、コントロールポート、フィードバックループなどにより、構造が複雑である。(例えば、文献³⁾)少数の例外は以上に述べたものと、Shakouchi(1989)⁴⁾によって提案された三次元構造を持つものである。最近、マイクロマシンの高まる必要性が、他の装置と同様に発振器

についても小型化を促している。この研究において、著者らは低レイノルズ数($Re \leq 1000$)でこの現象を取り扱う。より具体的には、著者らは、下流に正方形柱を設置した急拡大管に流れ込む二次元拘束噴流を実験的に扱う。

これまでの研究において、著者らは、レイノルズ数および発振器の形状パラメータが発振周波数と発振領域にあたえる影響を調査し、低レイノルズ数領域($Re \approx 100-1000$)で流量計として適した形状パラメータが存在することを示した⁵⁾。

今回の実験では、著者らは、1周期間のフルイディック発振器内の連続フローパターンをPIV(Particle Image Velocimetry)によって測定し、噴流発振中の発振器内部流れの変遷を明らかにする。また、デジタルカメラを用いて発振器内の流れを可視化し、噴流の発振周波数に関係する流れを特定することを試みる。

2. おもな記号および単位

B	: フルイディック発振器の幅	[m]
b	: ノズル出口の幅	[m]
c	: 正方形柱の一辺の長さ	[m]
D	: フルイディック発振器の長さ	[m]
d	: 噴流出口から正方形柱前縁の距離	[m]
f	: 噴流の発振周波数	[s ⁻¹]
h	: フルイディック発振器の流路高さ	[m]
L_a	: 正方形柱前方に設置した平板長さ	[m]
L_b	: 正方形柱後方に設置した平板長さ	[m]
L_s	: 正方形柱後方S字流れ長さ	[m]

Re : レイノルズ数 $= U_m b / \nu$
 St : ストローハル数 $= fb / U_m$
 T : 噴流の発振周期 [s]
 t : 時間 [s]
 U_m : ノズル出口での x 方向最大流速 [m/s]

3. 実験方法

3.1 実験装置

Fig. 1 に、この研究に使用した実験装置を示す。水は、ポンプ⑦によりメインタンク①へ汲み上げられ、発振器④に流れ込む。圧力差は、メインタンク①に取り付けられたオーバーフローによって常に一定に保たれる。そして、流量は圧力差を一定にしておくことで一定に保つことができる。流量はバルブ②によって調整する。ノズル出口(幅 $b=1.2 \times 10^{-2}$ m, 高さ $h=1.2 \times 10^{-1}$ m)から発振器(長さ $D=6.0 \times 10^{-1}$ m)へと流れ込む噴流は、ノズル出口の下流に置かれた正方形柱⑤の存在により発振を起こす。(Fig. 2 に、この研究のために使用されたフルイディック発振器の詳細を示す。)そして、水はサブタンク⑥に溜められ、ポンプ⑦によりメインタンク①へと再び汲み上げられ、水は循環する。

Fig. 1 Experimental apparatus.

Fig. 2 Fluidic oscillator.

3.2 可視化実験(可視化写真および PIV)

フルイディック発振器内のフローパターンを撮影し、相互相関法による PIV (Particle Image Velocimetry) によって解析する。YAG レーザーをフルイディック発振器の側面から照射する。そして、 x - y 平面内の流れをフルイディック発振器上部に設置した CCD カメラにより撮影す

る。(Fig. 1 を参照) また、可視化写真も同様に発振器側面から YAG レーザーを照射し、フルイディック発振器上部に設置したデジタルカメラにより撮影する。なお、PIV、可視化写真ともに、トレーサー粒子として、比重の調整やレーザーに対する反射を強めるため、蛍光塗料を表面にコーティングしたポリスチレン粒子を用いた。平均粒子径は 5.5×10^{-5} [m] である。

4. 実験結果および考察

4.1 流れの可視化

4.1.1 一周期間のフローパターン

一周期間の発振器内のフローパターンを PIV によって可視化した。Fig. 3 は $1/8$ 周期ごとの連続したフローパターンを示す。Fig. 4 は Fig. 3 に対応する渦度分布図である。2つの再循環領域 A および B が、全時間を通して正方形柱の上流で観察できる。 $t=T/8$ では、2つの大規模渦構造 C および D は正方形柱の下流で観察できる。また、噴流が上方へ偏向している。正方形柱下流で C から D 方向への流れが、若干優勢である。 $t=2T/8$ では、渦構造 C が下流に流される。正方形柱下流で D から C への流れが優勢となる。 $t=3T/8$ で噴流は、下方へ偏向する。 $t=4T/8$ で、渦構造 C および D は下流に流され、 $t=5T/8$ では、新たな渦構造 E が正方形柱の下流に再び観察できる。 $t=6T/8$ で、最初から存在していた渦構造 D は下流に流される。 $t=8T/8$ で、新たな渦構造 F が再び観察できる。

Fig. 3 Flow pattern in one cycle, at $B/b=15$, $d/b=2.5$ $d/b=7$ and $Re=500$.

Fig. 4 Vorticity distribution in one cycle, at $B/b=15$, $d/b=2.5$ $db=7$ and $Re=500$.

4.1.2 フローパターンの分類

多くの PIV 解析の結果、著者らはフローパターンを3つのタイプに分類した。これらのフローパターンのタイプを Fig. 5 に示す。また、各フローパターンが現れる発振器形状の領域を Fig. 6 に示す。typeA では噴流は発振している。Fig. 3 ように、正方形柱下流で、交互に2つの渦構造が生成され、下流に流される。

B/b を増加、あるいは、 db を増加、 db を減少させると、フローパターンは typeA からの typeB に移る。typeB に関しては、流れは上下対称であり、発振はしない。対称な2組の渦構造が正方形柱の上流と下流に存在し、それらは下流に流されない。typeA と B の境界を次の方程式により近似的に与える。

$$db=0.18B/b+1.50db+0.60 \quad (1)$$

(発振範囲, $0.5 \leq db \leq 4$, $10 \leq B/b \leq 60$)

B/b を減少あるいは、 db を増加させると、フローパターンは typeA からの typeC に移る。ただし、 db の変化でフローパターンはあまり影響を受けない。typeC に関しては、噴流発振はせず噴流は片側に偏向し、正方形柱にはほとんど衝突しない。typeA と typeC の間の境界は、次の近似式によって表わすことができる。また、1つの

支配的な渦構造だけが正方形柱の上流と下流に各一個のみ存在する。

$$db=0.33B/b+4.10 \quad (2)$$

$$db=23 \quad (3)$$

(発振範囲, $0.5 \leq db \leq 4$, $10 \leq B/b \leq 60$)

Fig. 5 3 types of flow pattern.

Fig. 6 Regime of flow patterns at $Re=500$.

4.2 発振器内部流れと発振周波数

4.1.1 より発振器内では4つの渦 A, B, C, D が存在し、後方の渦 C と渦 D によって正方形柱後方に S 字型の流れを形成することが確認できた。これらの渦、流れが噴流発振に関係すると考えられるため、発振器内に制御物体を設置し、流れ場への影響や St への影響を調べた。

4.2.1 制御平板設置による流れ場への影響

四角柱前方に存在する2つの再循環領域 A および B が発振周波数に与える影響を調べるため、Fig. 7 の(a)のように制御平板 Plate A を設置し、A および B の大きさを变化させ、 St への影響を調べた。結果を Fig. 8 の(a)に示す。Fig. より $db=7, 9$ のどちらにおいても St にはあまり影響しないことが分かる。また、 $L_a=10$ 以上では A および B は存在せず、噴流は発振しない。以上の結果から角柱前方の二つの渦は発振には必要不可欠だが、その大きさは St に影響しないことが分かる。

Fig. 7 The position of a control plate.

次に、四角柱後方に存在する渦構造 C および D が発振周波数に与える影響を調べるため、Fig. 7 の(b)のように制御平板 Plate B を設置し、 St への影響を調べた。結果を Fig. 8 の(b)に示す。Fig. より平板を長くしていくと $d/b=7, 9$ とともに St は直線的に減少していき、 $L_b/b=12.5$ 以降では噴流は発振しなくなることがわかる。

以上の結果より、四角柱後方の流れが噴流の発振周波数に関係しており、また、噴流が発振するためには、噴流が四角柱後方で偏向している側から偏向してない側へ流れ込む必要があることがわかる。

Fig. 8 Strouhal number St against Control plate length L_a and L_b , at $d/b=2.5$, $B/b=15$ and $Re=500$.

4.2.2 発振周波数の決定

4.2.1 より、噴流の発振周波数は正方形柱後方の S 字流れが関係していることが確認された。そこで、S 字流れの長さ L_s と St との関係を、 L_b/b および d/b を変化させ、調査した。なお、 L_s は Fig. 9 に示すように定義する。結果を Fig. 10 に示す。Fig. より L_b/b および d/b を変化させた時共に、プロットはほぼ同じ 1 つの直線上

$$St = -0.309 L_s/b + 17.3 \quad (4)$$

に並ぶ。このことから L_s/b の長さが発振周波数に影響することが確認できる。

Fig. 9 The definition of length L_s/b .

Fig. 10 Strouhal number St against length of a flow L_s/b , at $B/b=15$, $d/b=2.5$ and $Re=500$.

5. 結言

今回の拘束噴流に関する実験により、著者らは、噴流発振 1 周期分のフルイディック発振器内の連続したフローパターンを明らかにした。また、発振、非発振でフローパターンを 3 つのタイプに分類し、境界となる経験式を提案した。さらに、噴流発振には正方形柱後方の S 字流れが大きく関係していることを示し無次元発振周波数 St と S 字流れの長さ L_s との関係式を示した。

参考文献

- 1) H, Yamasaki, A, Takahashi, S, Honda. : A new fluidic oscillator for flow measurement, Proceedings of FLUCOM(Sheffield), (1988) pp. 16-20.
- 2) 尾崎省太郎, 原美明, : 純流体素子入門, 日刊工業新聞社 (1967).
- 3) J, R, Tippetts, H, K, Ng, J, K, Royle. : A fluidic flowmeter, Automatica (1973) pp. 35-45.
- 4) T, Shakouchi. : A new fluidic oscillator, flowmeter, without control port and feedback loop, Transactions of ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 111 (1989) pp. 535-539.
- 5) N, Matoba, K, Hirata, J, Funaki. : A Study on a fluidic oscillator at low Reynolds numbers, International Symposium on Micro-Mechanical Engineering, (2003) pp.357-362.