円形シンセティック・ジェットの渦輪列に及ぼすレイノルズ数の影響

Effect of Reynolds Number on Vortex Array in Circular Synthetic Jets

○ 赤星智也 (九州大・院) 正 高曾 徹 (九州大) 草野貴典 (九州大・院)

Tomoya AKAHOSHI, Toru KOSO and Takanori KUSANO
Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University
6-1, Kasuga-koen, Kasuga-shi, Fukuoka, 816-8580 Japan

Evolution and breakdown of vortex rings in a circular synthetic jet are studied by smoke visualization. The smoke particles engulfed by the vortex rings are illuminated by thin sheet of laser light and the motion the mushroom shaped smoke patterns by vortex rings are recorded by a high-speed digital camera. The experiments are carried out for 15 driving conditions of dimensionless stroke L/d range from 0.711 to 2.42 and Reynolds number Re range from 2470 to 18400. The visualized images show that the vortex rings rolled up from the orifice form an array of vortex rings and travel to downstream. In some distance from the orifice, the vortex rings are collapsed. During the collapse of the vortex ring, no direct interferences with other vortex rings are observed. The spacing of vortex rings and location of vortex collapse are measured from the movies and found that they are independent of the Reynolds number.

Key Words: Synthetic Jet, Vortex Ring, Vortex Collapse, Smoke Visualization

1. はじめに

円形シンセティック・ジェットとは、オリフィスの往復振動流によって生じる平均噴流である⁽¹⁾。正味の流出流量は零であるが平均流と強い乱れが発生するので、はく離の能動制御、噴流の方向制御⁽²⁾、流れの混合促進⁽³⁾などの流動制御に応用する研究が行われてきた。しかし、シンセティック・ジェットの流動特性についての研究は比較的少ない。著者らは円形シンセティック・ジェットの流動特性を実験的に調べ、平均噴流の拡大が往復振動流のストロークによって変化することを明らかにした⁽⁴⁾。この平均噴流の拡大の変化は、シンセティック・ジェットの渦輪列の崩壊の変化による⁽⁴⁾ものなので、アンサンブル平均速度を計測して渦輪列の特性を調べてきた⁽⁵⁾⁽⁷⁾。また、平均噴流の特性や渦輪列の構造に及ぼすレイノルズ数の影響は小さいことを明らかにしてきた⁽⁴⁾⁽⁶⁾。

本研究では、より高いレイノルズ数におけるシンセティック・ジェットの流れを調べるため、煙霧法による可視化を行った。渦輪列の瞬間的な挙動を観測して渦輪列の構造に及ぼすレイノルズ数の影響を調べた。

2. 実験装置および方法

本実験ではオリフィス直径 $d = \phi 30\text{mm}$ と $\phi 50\text{mm}$ の円形シンセティック・ジェット発生装置を製作した。著者らの従来の研究 (オリフィス直径は $\phi 5\text{mm}$) より高レイノルズ数の実験を行うことができる。図1に本実験の円形シンセティック・ジェット発生装置の概略図を示す。駆動源としてコーン直径 $\phi 300\text{mm}$ のスピーカ (Sony SA-W3000) を用いた。(a)に装置の側面断面図、(b)に正面図を示す。オリフィス板の厚みはオリフィス直径 $\phi 30\text{mm}$ の時は 5mm 、 $\phi 50\text{mm}$ のときは 8mm とした。スピーカに正弦波電圧を印加して振

動させ、円形オリフィスに往復脈動流を生じさせた。

シンセティック・ジェットの流れ場は、レイノルズ数 $Re = u_s' d / \nu$ と無次元ストローク $L/d = (\sqrt{2}/\pi)(u_s' / f_s d)$ の二つの無次元数に支配されると考えることができる⁽⁴⁾。ここで、 f_s は脈動周波数、 u_s' は脈動強さで、円形オリフィス孔中央での往復振動流の速度 rms 値である。またストローク L は往復振動流の噴出過程における流体の移動距離である。

本実験では脈動速度 u_s' を I 形熱線プローブの熱線流速計で測定して、駆動信号条件 (電圧と周波数) を調べておき、その信号条件でスピーカを駆動して煙霧法で可視化した。

表1に実験条件を示す。無次元ストローク $L/d = 0.711 \sim 2.42$ 、レイノルズ数 $Re = 2470 \sim 18400$ の範囲で変化させた。煙発生器で発生させた煙を空洞に充填させた後にスピーカを駆動して、シンセティック・ジェットを発生させた。オリフィスから噴出する煙霧を高速デジカメ (Casio EX-FH25) で毎秒 240 フレーム (画素 448×336) で撮影した。レーザーシート光で噴流軸を含む面を照明して、渦輪の断面を可視化した。また、正弦波電圧の同期信号で LED を点滅させて同時に撮影し、撮影画像と脈動速度の位相の対応を記録した。

Table. 1 Condition of synthetic jets.

d (mm)	f_s (Hz)	u_s' (m/s)	L/d	Re
30	28.0	1.35	0.725	2480
50	12.0	0.95	0.716	3000
50	13.0	1.05	0.726	3300
50	17.0	1.36	0.718	4270
50	22.0	1.74	0.711	5470
30	20.0	1.35	1.01	2470
50	13.0	1.46	1.01	4610
50	17.0	1.92	1.02	6050
50	22.0	2.48	1.01	7790
30	14.0	1.35	1.45	2470
50	17.0	2.70	1.43	8480
50	22.0	3.46	1.42	10900
30	9.0	1.45	2.42	2660
30	22.0	3.51	2.39	6450
50	22.0	5.84	2.39	18400

3. 実験結果および考察

撮影した動画から渦輪列の時間的・空間的变化、渦輪の間隔、渦輪の崩壊位置を調べた。

3-1 煙霧法による渦輪列の可視化 図2に可視化画像の一例を示す。振動の1周期中の4時刻の画像を示している。時刻 t はオリフィス中央での正弦波脈動速度の位相 0 を $t=0$ としている。図2の噴流軸に対称なキノコ状の煙分布は渦輪に巻き込まれて生じた煙のパターンで、下流に移動していく様子が観察できる。下流側に見られるパターンは以前の脈動周期で生じた渦輪によるパターンである。噴流軸に対称な煙分布は、下流で変形し対称性を失ったのちに消滅した。この

Fig.1 Circular synthetic jet actuator.

Fig. 2 Smoke visualization of vortex array in a circular synthetic jet ($L/d = 1.01$, $Re = 2470$).

Movies are available in <http://aes.cm.kyushu-u.ac.jp/aes/sj-smoke.htm>

Fig. 3 Contours of ensemble averaged velocities⁽⁷⁾ ($L/d = 1.02$, $Re = 2500$).

Fig. 4 Effect of Reynolds number on initial spacing of vortex ring.

Fig. 5 Effect of Reynolds number on location of vortex collapse.

消滅は渦輪の崩壊に対応していると考えられる。なお、動画などで詳細に観察しても崩壊過程において隣り合う渦輪との干渉は観測されず、自己崩壊していた。

図3にほぼ同じ無次元ストローク、レイノルズ数で計測したアンサンブル平均速度カラー等値図⁽⁷⁾を示す。両者を比較すると、 $t/T = 0.25$ においてオリフィス出口に形成された渦輪が、 $t/T = 0.50$ まで成長を続け、その後下流方向に流れていく様子が良く一致している。両者の画像は異なる物理量で、平均と瞬間の違いがあるものの、共に渦輪列が形成され下流に流れてやがて崩壊する様子を調べることができる。

3-2 渦輪間隔 可視化画像から渦輪の間隔を測定した。噴出過程が終わって渦輪が成長し終わった $t/T = 0.50$ における渦輪と下流の渦輪との間隔を初期渦輪間隔とした。図示しないが、初期渦輪間隔はストロークにほぼ比例して大きくなり、アンサンブル平均速度から求めた結果⁽⁷⁾とよく一致した。

図4に初期渦輪間隔 Δx_0 のレイノルズ数による変化を示す。ばらつきはあるものの、どのストロークでもレイノルズ数によらずほぼ一定の値を示した。特に、無次元ストローク $L/d = 2.40$ の場合、レイノルズ数を $Re = 2660 \sim 18400$ と7倍大きくしても変化は生じなかった。

3-3 渦輪崩壊位置 渦輪が崩壊した位置は、動画を観察して、渦輪断面の核の対が崩れて噴流軸に対して対称性を失った位置として計測した。図5に渦輪崩壊位置 x_{co} の測定結果を示す。渦輪崩壊位置はストロークが長いほど下流に移動しており、アンサンブル平均速度から求めた結果⁽⁷⁾と同様の傾向を示した。また、渦輪崩壊位置は、どのストロークでも、レイノルズ数に依らずほぼ一定の値を示した。

4. まとめ

円形シンセティック・ジェットの渦輪列を煙霧法による可視化実験で調べた。渦輪がオリフィスから放出されて、時間経過によって下流へ移動し、さらに下流で崩壊する様子が観測された。また、渦輪の崩壊に際して、隣り合う渦輪による干渉は見られなかった。レイノルズ数 $Re = 2500 \sim 10^4$ 程度の範囲において、初期渦輪間隔と渦輪崩壊位置はレイノルズ数に依らずほぼ一定を保つことが分かった。

参考文献

- (1) Glezer, A. and Amitay, M., "Synthetic Jets", *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **34**, (2002) 503-529.
- (2) Smith, B.L. and Glezer, A., "Jet vectoring using synthetic jets", *J. Fluid Mech.*, **458** (2002) 1-34.
- (3) Koso, T. and Kinoshita, T., "Agitated Turbulent Flowfield of a Circular Jet with an Annular Synthetic Jet Actuator", *J. Fluid Sci. Tech.*, **3** (2008) 323-333.
- (4) Koso, T. and Morita, M., "Effect of Stroke and Reynolds Number on the Characteristics of Circular Synthetic Jets", *Int. Conf. Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF-2010)*.
- (5) 松田・高曾・増田, "円形シンセティック・ジェットの空間的な構造の可視化", 可視化情報 **30-S2** (2010), 57-58
- (6) 増田・高曾・赤星・松田, "円形シンセティック・ジェットの渦輪列に及ぼすストロークとレイノルズ数の影響", 機講論 No.128-1 (2012), 69-70.
- (7) 高曾・赤星・増田, "円形シンセティック・ジェットの渦輪列の展開と崩壊", 機講論 No.12-1 (2012), S052021.