

No.9

円形ノズルからの間欠噴流に関する実験

山田日出夫, 内藤隆, 中島恵 (名工大)

内海亨, 加藤拓宏, 角谷義和 (名工大院)

Experiment on Pulsating Jet Ejected from Circular Nozzle

H. Yamada, T. Naitoh, K. Nakajima, T. Utsumi, T. Katoh, Y. Sumiya

Dept. of System Engineering, Nagoya Institute of Technology

ABSTRACT

The flow fields and the motions of vortices characterizing the pulsating jets were experimentally examined using both the smoke visualization method and the velocity measurement by a hot wire anemometer. The results of the velocity variation are found to agree with those of the flow visualization. The pulsating jets can be classified into three kinds of flow state; they are termed a row of puffs, a row of vortex rings in jet column mode, and a row of vortex rings in shear layer mode. In this paper, we defined the "puff" as a lump of fluid consisting of a leading vortex and a trailing jet following the vortex. The puff may be regarded as the state possessing the most fundamental features of a pulsating jet.

Keywords : pulsating jet, vortex ring, puff, experiment

1. 序論

本論文は間欠噴流に関する基本的研究である。これまで、間欠噴流の分類について述べてある文献としては、筆者らの一人が行った渦輪列¹⁾に限定した分類があるのみで、他には見当らない。本実験研究の目的は第一に、間欠噴流の分類を行うことである。分類は、可視化された間欠噴流を構成する流体塊の形状的特徴によって判定する方法でなされた。第二は、間欠噴流の特徴を明らかにするために、可視化実験の他に、熱線流速計による間欠噴流軸上の流速変化の様子を検討することである。

2. 実験装置と方法

実験装置と流れ場の座標系とを図1に示す。間欠噴流を発生させるために開口部を設けた回転円盤を用い、円管から流出する噴流を断続させる。この断続した流れを拡散・整流・縮流の各部分の順序で構成された風洞箱に導き、直径4cmのノズルを通して噴出させることで間欠噴流を発生させた。円盤の開口比は1/3, 1/2, 2/3の3種類であ

る。ここで開口比とは、円盤上で開口している部分が円盤の中心に対して張る角度の全円周角度に対する割合をいう。

間欠噴流を可視化するために、風洞箱内の拡散部に線香の煙を導入し、その煙をトレーサとして用いた。流れの撮影には、必要に応じて8mmビデオカメラ、または35mmスチルカメラを用いた。

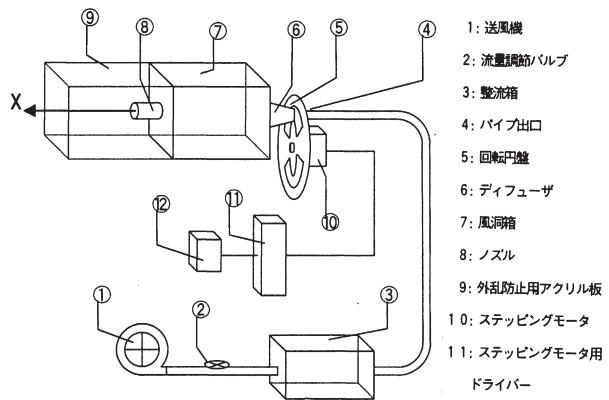


図1. 実験装置と座標系

3. 実験結果と考察

3-1. 間欠噴流の流動状態の分類

間欠噴流の特性を支配する実験パラメータとし

ては、本実験の場合、流れ場の代表速度、回転円盤の開口比、間欠噴流の発生周波数がある。流れ場の代表速度としては、ノズル出口中心における噴流状態での流速を採用した。具体的には、 1.0 m/s , 1.4 m/s , 1.8 m/s の3種類の場合について実験を行った。それぞれの流速に対する Reynolds 数 ($\text{Re}=\text{Ud}/\nu$, ここで, U は上述の流速, d はノズルの内径, ν は空気の動粘性係数) を計算すると 2700 , 3700 , 4800 である。

上述の実験パラメータを系統的に変化させて実験を行った。その結果、観察された流動状態は大別して Puff 列と渦輪列である、図 2。後者については、さらに Jet Column Mode と Shear Layer Mode の2種類の渦輪列に分類した。以下に、間欠噴流の一周期分に対する流体部分の初期段階における形態の特徴に着目し、これらの定義を可視化的視点で行う。

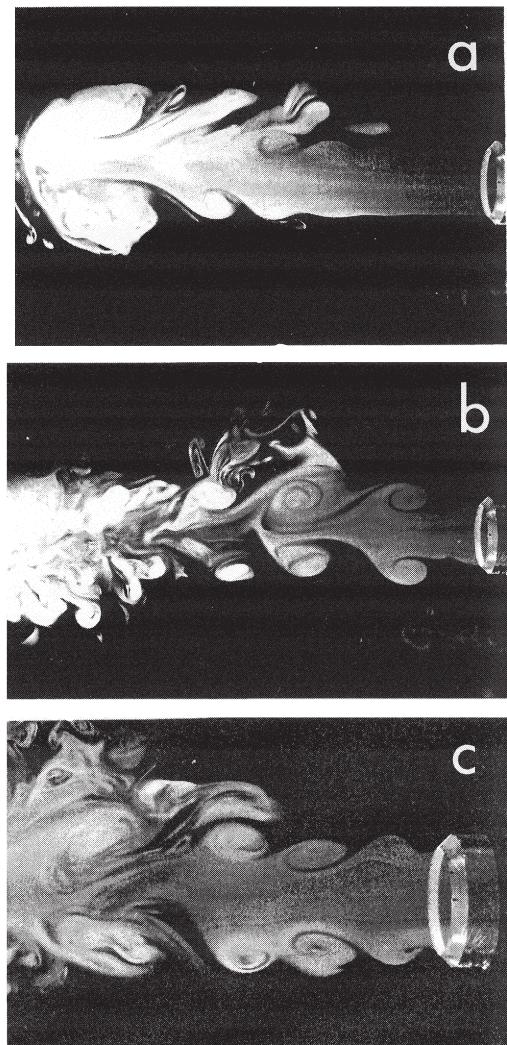


図 2. $\text{U}=1.0\text{ m/s}$ のときの煙を用いて可視化された間欠噴流：(a)puff 列 ($f=1\text{ Hz}$), (b)jet column mode の渦輪列 ($f=8\text{ Hz}$), (c)shear layer mode の渦輪列 ($f=16\text{ Hz}$)

Puff : 先頭の渦輪(Leading Vortex Ring)の後ろに、後曳き噴流(Trailing Jet)が続いている流动状態を指す、図 2 (a). Puff では Kelvin-Helmholtz の不安定性によって後曳き噴流の外縁が巻き上がる。このとき、外縁より内側の流动する中央部分の流体は噴流的性質を残している。本報告では、この流体部分を噴流コア部と呼ぶことにする。

Jet Column Mode の渦輪列：Puff 状態から後曳き噴流がなくなった場合を指す。後述する Shear Layer Mode の場合と異なり、噴流コア部がほとんど存在しない。そのため、この渦輪列は個々の渦輪の独立性が強い、図 2 (b)。

Shear Layer Mode の渦輪列：初期時に渦輪列を形成した時の状態が Puff の後曳き噴流と同じように噴流コア部を持つ場合を Shear Layer Mode の渦輪列と呼ぶ。ただし、この Mode では、渦はノズルからの噴出直後に形成される点で、Puff の場合とは異なる点に留意、図 2 (c)。

本実験での間欠噴流を以上の3種類の流动状態に分類し、横軸に流量に関する量 m^*U (開口比と平均流速の積) をとり、縦軸には f をとった平面上に安定な流动状態に対応する点をプロットした、図 3。予想したように各々の流动状態は、ほとんど互いに混在することなく、境界線によって明瞭に分けられた領域に分布していることが分る。

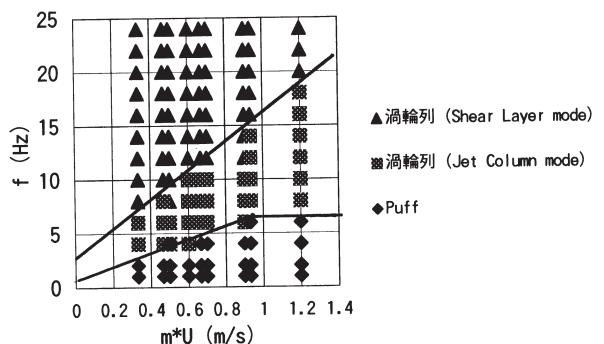


図 3. 間欠噴流の各流动状態が安定に存在する領域

3-2. 間欠噴流軸上の流速変化

噴流状態での流速 U が 1.0 m/s の場合において、噴流を断続させて間欠噴流にしたとき、ノズル近傍における初期段階の状態は層流である。それに對し、 U が 1.4 m/s または 1.8 m/s の場合には、初期の状態において乱れた状況を示す特徴がすでにいくつか見られる。この節では前者の初期段階の状態が層流状態の場合を詳しく述べ、後者の乱流の場合について、 $\text{U}=1.8\text{ m/s}$ の場合についてその特徴を簡単に指摘するにとどめる。

3-2-1. 初期状態が層流($U=1.0$ m/s)の場合

間欠噴流発生周波数 f が 1 Hz であるときの流速波形を図 4 に示す。この実験条件下では、間欠噴流は Puff 列の状態である。流速の測定位置を X 軸上にとり、 $X=0, 4, 10, 20$ cm と下流方向に移動した位置での結果が示されている。 $X=0$ cm では、流速波形は台形状であり、渦輪はまだ形成されていないことを示唆する。 $X=4$ cm では、台形状波形の左端がふくらみを持つことから明らかに先頭渦輪が形成されているものと判断される。 $X=10$ cm では、後曳き噴流の通過に伴って発生したと考えられる波形(以後、簡単のために後曳き噴流部での波形というように表現する)において 10 個の山形のふくらみが生じていることから、Kelvin-Helmholtz 不安定性にもとづく渦輪が発生したことが確認できる。この山形のふくらみは下流に進むにつれて成長するが、 $X=20$ cm では波形が不規則になり、かつ急峻な立ち上がり部分も見られることから乱流状態になっていることが窺える。以上の流速波形の様子は図 2 の可視化写真とも基本的には一致している。

次に、間欠噴流が Jet Column Mode の渦輪列の状態である場合を検討する。具体例として、 f が 8 Hz のときの流速波形を図 5 に示す。測定位置は $X=0, 8, 16, 23$ cm の 4 個所である。 $X=0$ と 8 cm では共に波形の山は 8 個であり、この間、渦の個数が変化していない。このことは、渦輪が独立性を保って(つまり、隣り合う渦同士が強く干渉し合うことなく)運動していることを示唆する。しかし、 $X=16$ cm では波形に不規則性と若干の乱れが生じ始めており、 $X=23$ cm と下流に進むにつれて典型的な乱流波形に変化していることが分る。

最後に、間欠噴流が Shear Layer Mode の渦輪列の状態である場合を検討する。このモードは Jet Column Mode にくらべ、隣り合う渦輪の渦核同士の距離が近いので pairing が起こりやすいことが予想される。実際に pairing が起こることが図 6 で確認できる。測定位置は $X=0, 4, 7, 9$ cm の 4 個所である。 $X=0$ cm では波形から 16 個の山、すなわち渦と見ることができる。 $X=4$ cm では波形が大小の対になった波形に変化し、pairing が起き始めたことが示唆される。 $X=7$ cm では、山の数が 8 個となるが、 $X=9$ cm では、若干の不規則性はあるものの、再び山の状態が大小の対に戻っている。以上の状態から pairing 運動が起こっていることが十分推測される。

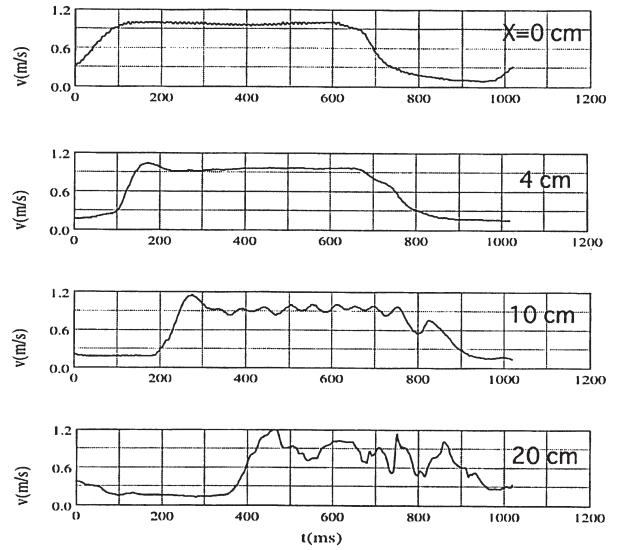


図 4. $U=1.0$ m/s, $f=1$ Hz の puff 列の軸上の速度変化

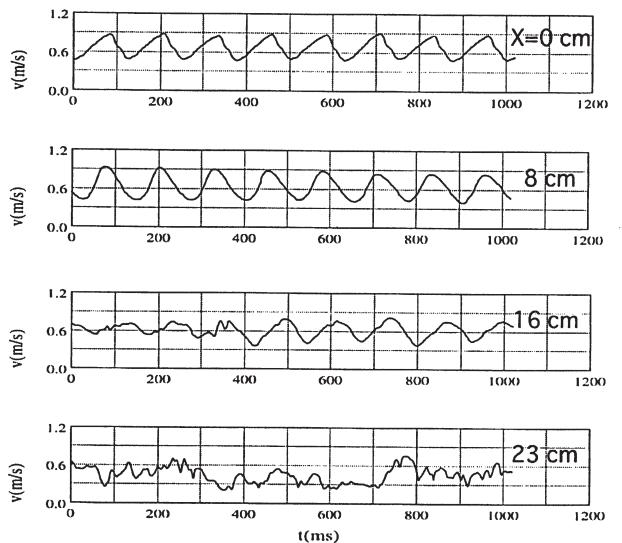


図 5. $U=1.0$ m/s, $f=8$ Hz の jet column モードでの渦輪列軸上の速度変化

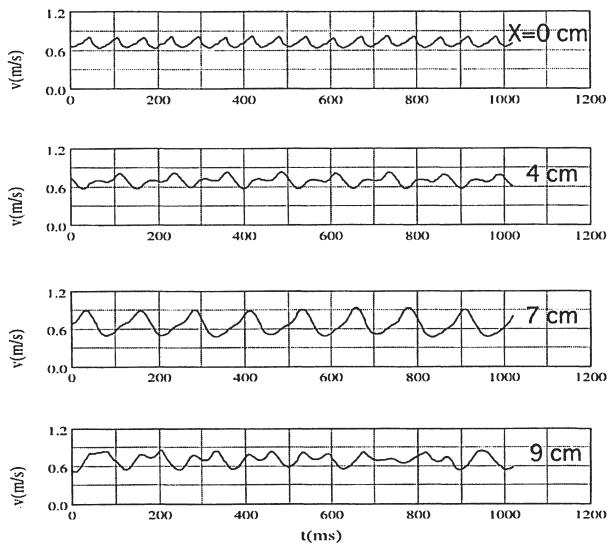


図6. $U=1.0 \text{ m/s}$, $f=16 \text{ Hz}$ の shear layer モードでの渦輪列軸上の速度変化

3-2-2. 初期状態が乱流状態の場合

この場合、初期時において、流れの中に乱れ成分が混じっていた。ここでは、 $U=1.8 \text{ m/s}$ の場合を例示する、図7. $X=0 \text{ cm}$ では、すでに高調波成分を持つ小振幅の乱れ成分が加わっていることが分る。 $X=5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}$ と下流に行くに従い、変動速度の振幅が大きくなり、特に、 $X=10 \text{ cm}$ ではスパイク状の波形が現われている。 $X=20 \text{ cm}$ では、後曳き噴流部分にスケールの大きな渦構造を示唆するような低周波の流速成分を見ることができる。

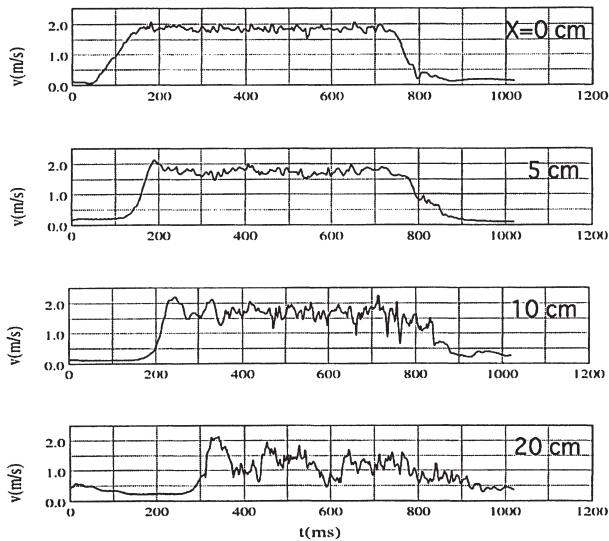


図7. $U=1.8 \text{ m/s}$, $f=1 \text{ Hz}$ の puff 列の軸上の速度変化. puff は初期時に乱流化している

4. 結論

本実験によって得られた結果を要約すると、以下のようにまとめられる。(1)間欠噴流は Puff 列, Jet Column Mode の渦輪列, Shear Layer Mode の渦輪列に分類される。(2)Puff 列は噴流と渦輪列の中間状態の間欠噴流と言える。本研究で定義した puff は、先頭渦輪と後引き噴流とで構成される流動状態を指すが、基本的には、多くの間欠噴流に見られる普遍性の高い状態であると推測される。(3)間欠噴流の流動状態を決めるパラメータとして、間欠噴流発生周波数とノズルからの流量をとることが有効であることが示された。

引用文献

- (1) 山田, 中嶋, 山辺, 望月, ながれ, 第5巻, 第1号 (1986), p.45-53.