167

先頭渦輪に後曳き噴流が伴う puff の実験

加藤拓宏, 角谷義和[○] (名古屋工業大学・院)

山田日出夫, 内藤隆, 中島恵 (名古屋工業大学)

Experiment on Puff Consisting of Leading Vortex and Trailing Jet

Takuhiro KATOH, Yoshikazu SUMIYA, Hideo YAMADA, Takashi NAITOH,
and Kei NAKAJIMA

ABSTRACT

This paper describes spatiotemporal features of a pulsating jet. We restrict our attention, in particular, to a single puff, which is specified as a body of fluid, ejected during one period of pulsation, and consisting of a fully developed vortex ring (called a leading vortex ring) with a trailing jet following behind the ring. The flow fields and the motions of the puff were examined using both smoke visualization and velocity measurement with a hot wire anemometer. We dealt with laminar and turbulent puffs, judged by the initial flow states. The velocity variations in both cases are discussed at first with using the results of smoke visualization. Then, they are analyzed using the results from discrete wavelet transformation. The transformation proved to be adequate to express the specific features of the puffs, which were characterized by highly unsteady and irregular variation, in a time frequency domain.

Keywords : Pulsating jet, Puff, Smoke visualization, Velocity measurement, Discrete wavelet transformation

1. 序論

本研究は, 周期的に噴出する間欠噴流の一周期の流体塊の時間発展に関するものである. 間欠噴流は, 燃料噴射や空調機器の設計等, 工学の分野にとどまらず, 血液流を対象とした医学・生理学の分野においても重要な課題となってくる.

以前, 我々は, 穴を開けた回転円盤で噴流を断続する方法を用いて渦輪列を発生する実験を行った⁽¹⁾. 渦輪列も間欠噴流の一つの流動状態である. ノズルやオリフィス等の開口部から連続的に噴出する通常の噴流と渦輪列の間に, 両者の中間的状态を示す流動状態があることが予想される. この予想が動機となって, 間欠噴流の流動状態を支配するパラメータを系統的に変化させ, その流動状態の分類を行なった⁽²⁾. その結果, 先頭渦 (Leading vortex) に後曳き噴流 (Trailing jet) を伴う構造を持つ流動状態が, 間欠噴流として, 最も一般性のある状態であることが分かった. この流動状態を我々は puff と名付けた

本研究の目的は, 典型的と思われる puff を

発生させ, その時空間発展の様子を明らかにすることである. そのために, まず煙可視化法によって puff の特徴を把握し, 次に熱線風速計によって得られた流速変化の特徴を検討した. 今回, 我々は, 非定常性こそが主要な特徴と考えられる puff の流速波形信号解析のために, 離散 wavelet 変換による解析を試みた.

2. 研究のアプローチ方法

2. 1 実験装置と方法

実験装置と流れ場の座標系を図1に示す. puff を発生させるために開口部を設けた回転円盤を用い, 円管から流出する流れを断続させる. 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4 cm のノズルを通して puff を発生させた. 円盤の開口比は2/3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.

puff の全体的な状況を把握するために, 風

洞箱の拡散部に線香の煙を導入し, その煙をトレーサとして流れ場を可視化した. 次に非定常性の強いことが予想される puff の変化を捉えるために, I 型プローブを用いた熱線風速計によって流速を測定した.

Fig.1 Experimental apparatus and coordinates.

A: blower, B: rotating disk with two openings,
C: Box eliminating disturbances, D: hood.

2. 2 ウェーブレット変換について

ウェーブレット変換の最大の特徴は, 元の波形を変動分と粗い近似に分け, 粗い近似をさらに変換していくデジタル信号処理によって, 信号中の様々なスケールの分布を元の時間軸情報を失わずに取り出すことが出来る点にある. このため, puff の時間発展の様子を捉える信号処理の方法として, 信号を時間と周波数の両面から同時に捉えるウェーブレット変換は威力を発揮することが期待される. 本研究では, Wolfram Research の WAVELET EXPLORER というソフトウェアを用いて, Mathematica で離散ウェーブレット変換を行った. 離散ウェーブレット変換は信号の効率的な時間周波数解析を得る方法である. 今回, マザー・ウェーブレットとして4次の Spline を選んだ.

3. 実験結果と考察

3. 1 可視化実験

本研究では, 2つの異なる Re 数について, 発生周波数が 1 Hz の puff の流動状態を調べた. 実験装置の都合上 puff は周期的に噴出され, puff 列となるが, 本研究で調べる puff は近似的に単独 puff として取り扱っても差し支えない事が, 可視化と流速変化の結果からわかっている.

puff 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, 1.8 m/s の2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 ($Re=Ud/\nu$, 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, 4800 である.

$Re=2700$ の puff を層流 puff, $Re=4800$ の puff を乱流 puff と呼ぶことにする. このことは, puff の噴出後初期段階における煙可視化の様子から判断したものであり, それぞれの初期段階の様子を図2, 3に示す.

Fig.2 Laminar puff in early stage exhibited by smoke.

A spiral streak is observed in the core region.

Fig.3 Turbulent puff in early stage. No spiral streak

is observed in the core region.

図4, 5に, x 軸を含んだ鉛直な平面で puff を光切断して撮影した様子を示す. 図4は, 層流 puff の煙可視化写真である. puff の前方部分が乱れているものの, 先頭渦が後曳き噴流を伴う構造をしていることが確認できる. 先頭渦に近い下流の方の後曳き噴流部分は, 先頭渦と後曳き噴流の前方部(下流部)に発生した渦とが干渉する結果, 乱れが激しくなる.

図5は乱流 puff の煙可視化写真である. puff 構造を持つことがわかるが, 先頭渦と後曳き噴流は分離しており, 時間が経過するにつれてこの距離は増大する. この現象は層流 puff に比べて噴出流速が速く, puff 噴出後の初期段階に形成される先頭渦が強い循環を持つため, 大きな自己誘導速度を誘起することと, 後曳き噴流の乱流化が激しく, この部分の平均流速が下がるために生じたものと推測される.

Fig.4 Laminar puff in later stage. The greater part of the puff has become turbulent.

Fig.5 Turbulent puff in later stage. The leading vortex ring is clearly separated some distance from the trailing jet.

3. 2 波形解析

3. 2. 1 流速波形の変化

ノズル中心軸上, $x=3, 9, 16, 23$ cm において測定された層流 puff の流速変化の様子を図6に示す。これらは各点での1秒間の流速変化を示しており、従って1周期分の puff 構造を流速変化として捉えている。この流速変化からも、今回の puff を単独 puff と取り扱ってもよいことが窺える。puff は下流方向に行くにつれ、先頭渦と Kelvin-Helmholtz 不安定性（以下、K-H 不安定性と略記）による渦が形成された後、それぞれの渦が干渉して乱流化していく様子が確認できる。

図7に乱流 puff の、ノズル中心軸上の、 $x=3, 6, 13, 22$ cm における流速変化の様子を示す。 $x=1$ cm でかなりの変動が見られ、すでに乱れを含んだ流体がノズルから噴出されていることが窺える。下流に行くにしたがい、波形には高周波成分が増加し、乱流化が進行していることが確認できる。なお、先頭渦も乱れを含んでおり、可視化結果を支持している。また、先頭渦は大きな速度を誘起することから依然として大きな循環を保っているのに対し、後曳き噴流部分は全体的に速度の減衰が大きい。この減衰は、K-H 不安定性によって、ノズル近傍で渦が発生し、その幾つかの渦同士が早い段階で干渉し、煙の拡散が激しいことから、乱流化が促進されていることを示唆している。

Fig.6 Velocity variations of laminar puff at four measured locations along x-axis when the frequency of ejection of a puff, f , is 1 Hz and velocity at the exit of nozzle, U , is 1.0 m/s.

Fig.7 Velocity variations of laminar puff at four measured locations along x-axis when $f = 1$ Hz, and $U = 1.8$ m/s.

3. 2. 2 ウェーブレット解析

層流 puff の $x=9$ cm での流速波形をウェーブレット変換した結果を、図8(a)に示す。レベル4に後曳き噴流の通過を示す部分に K-H 不安定性により発生した渦を示す波形の信号が現れている。ウェーブレット成分のスパイクは正負交互に現れており、流速波形の変動の立ち上がりや立ち下りをよく現している。すなわち、相当に規則的な変動であることが窺える。レベル5の200~300 msあたりに先頭渦の変動分を示す複数のスパイクが現れているこ

とから, 後曳き噴流中の K-H 不安定性により発生した渦の時間スケール(近似的に空間スケールと見なせる)は, 先頭渦の約半分ということになる. 図 8 (b)に, $x=16\text{ cm}$ での流速波形をウェーブレット変換した結果を示す. 後曳き噴流の通過を示す部分では, レベル 5 のスパイクが大きくなっており, 図 8 (a)のレベル 4 に現れていた, K-H 不安定性により発生した渦同士が合体してスケールが大きくなっていることを示唆している. また, レベル 1 の成分が現れていることから, 渦同士の干渉により, 細かい変動成分が発生していることが窺える.

乱流 puff の $x=1\text{ cm}$ での流速波形をウェーブレット変換した結果を, 図 9 (a)に示す. レベル 1 からスパイクが現れており, puff 全体に細かい変動成分が含まれていることを示している. 図 9 (b)に, $x=13\text{ cm}$ での流速波形をウェーブレット変換した結果を示す. 先頭渦はレベル 6 および 5 あたりのスパイクに現れており, 層流 puff の先頭渦よりも大きなスケールであることがわかる. また, 高いレベルの成分がかなり検出されており, 高周波成分が増加していることがわかる.

このように, ウェーブレット変換は, 時間軸情報を残したまま周波数解析の結果が得られるため, 局所的な周波数変化の傾向を調べることが出来る. 従って本研究で測定した流速波形のような, データの局所的な変動の解析を試みようとすると, 時間との対応関係を見出すことが出来る.

Fig.8 Time and frequency analysis based on discrete wavelet transformation for velocity in a laminar puff on the x axis when $U = 1.0\text{ m/s}$, $f = 1\text{ Hz}$
(a); $x = 9\text{ cm}$, (b); $x = 16\text{ cm}$.

Fig.9 Time and frequency analysis based on discrete wavelet transformation for velocity in turbulent puff on the x axis when $U = 1.8\text{ m/s}$, $f = 1\text{ Hz}$
(a); $x = 1\text{ cm}$, (b); $x = 13\text{ cm}$.

4. 結論

開口部分を持つ回転円盤により噴流を間欠的に遮断して, 発生周波数 1 Hz の puff を発生させた. この puff の流れ場を, 煙可視化実験と, 熱線風速計による流速測定により調べた結果, 次のような結論を得た.

- (1) puff 噴出後の初期段階のノズル近傍においては, 層流 puff はほとんど乱れの成分がないのに対して, 乱流 puff はかなりの乱れ成分を含んでいる. 初期段階のこの乱れの有無は, 先頭渦の形成から乱流化に至る過程に強い影響を及ぼす.
- (2) Re 数の大きな乱流 puff では, 先頭渦の並進速度が大きく, 下流に進むにつれて後曳き噴流との距離が広がる傾向がある.
- (3) 本研究で測定した puff のような非定常性のきわめて強い渦構造を持つ流れの流速変化の時系列データに対し, ウェーブレット変換は有効な解析方法であることが示された.

参考文献

- (1) 山田, 望月, 山辺, 松井, 渦輪列の実験(干渉モードと運動の様子), ながれ第3巻, 第4号, pp.364-377(1984).
- (2) 角谷, 山田, 内藤, 中島, 円形ノズルからの間欠噴流に関する実験, 可視化情報, Vol.19, Suppl. No.1, pp17-20, (1999).