音響励起と二次フィルム流を用いた噴流拡散制御に関する研究 薄い環状流の局所的変動について

Diffusion control of jet by Acoustically driven Secondary Film Flow

○正 宮城 徳誠 (日大短大)

正 木村 元昭 (日大)

Norimasa Miyagi, Department of Engineering Science, Junior College, Nihon University

Motoaki Kimura, Department of Mechanical Engineering, College of Science & Technology, Nihon University

The velocity field of the controlled jet is measured x-type hot wire probe. From the result of power spectrum analysis of streamwise velocity fluctuation at the nozzle exit, in the case of $VR=1.0$, a resonant mode is found for the frequency of acoustic excitation, and this resonant mode contributes to the promotion jet diffusion. In the case of $VR=0.5$, a lot of mode are found and non-linear interference between different modes. This non-linear interaction between different modes seems to suppress the radial direction velocity fluctuation of the film flow, and seems to restrain the diffusion of the jet.

Key Words : Jet, Flow Control, Acoustic Control, Secondary Film Flow, Mixing

1. 緒言

著者らは、今まで噴流の初期領域におけるエントレイメントの制御を念頭に、速度均一型ノズルから噴出される自由噴流の外側に、薄い環状流れ(二次フィルム流)をつくり、さらにスピーカによる音響励起を与え、噴流混合の抑制・拡散、双方を目的とした噴流制御を行っている¹⁾²⁾。主流とフィルム流との流速比 $VR=0.5$ の場合、音響励起を与えても噴流の拡散は抑制され、 $VR=1.0$ でさらに主流に対して $St=0.3$ となるように音響励起を与えると最も噴流が拡散すると示している。本報告では、音響励起された薄い環状流の速度変動が主流噴流にどのように影響を与えるかに着目し、熱線流速計によって得られた速度分布にスペクトル解析を行った。

2. 実験装置および方法

Fig.1 に本研究で使用するノズルの概略図を示す¹⁾。ノズルは、主流ノズル内径 $d=8\text{mm}$ 、リム厚さ 0.5mm (主流ノズル外径 9mm)の軸対称均一速度ノズルである。その外側に内径 12mm の二次ノズルを同軸に設定し、2次フィルム流を形成した(2次フィルム流の厚さは 1.5mm)。Fig.2 に実験装置の概要図¹⁾を示す。エアーコンプレッサーによって、主流側とフィルム流側へそれぞれの流体が供給され、それぞれフローコントローラによって流量が設定される。主流の噴出速度 V_0 は、主流ノズル内径 $d=2r$ を代表長さとし、レイノルズ数 $Re=3,000$ に合うように設定した。フィルム流速 V_f は主流噴出速度 V_0 を基準に速度比 $VR(=V_f/V_0)=0.5$ および 1.0 に合わせて流速を調整した。フィルム流はその後、スピーカの正弦波を加え脈動させ、フィルム流としてノズルから噴出させた。フィルム流に加える音波の圧力は、空気がノズルに入る直前の圧力変動を計測し、その変動の実効値 P_s が 5Pa となるようにアンプで設定した。圧力波形はオシロスコープにも投影し、共鳴などの影響がないことを確認している。音波の周波数 f は主流ノズル内径 d を用いて、ストローハル数 $St_0=0.3$ となるように $f_a=220\text{Hz}$ と設定した。測定した座標系は、ノズル出口中央を原点として、噴出方向を x 、ノズル半径方向を y とした。

速度変動の測定は、 x 型熱線流速計を用いて測定した。小型 x 型熱線プローブ(TSI 1248A-10)を流れ方向に平行になるように設置し、2チャンネル分のCTAユニットを介して、流れ方向(x 方向成分 U)と半径方向(y 方向成分 v)とに分けて測定する。AD ボードにて2成分速度変動とスピーカとの同期信号を同時に取り込み、PC 上にて速度への変換と時間平均処理・位相平均処理を行った。熱線プローブの測定点はプローブとノズルとの干渉を避けるために、プローブ先端が出口から 1mm 離れた断面で、主流ノズル中心を原点として、

Fig 2 Experimental apparatus

流れ方向に $x=0\sim40\text{mm}$ ($x/d=0\sim5$)を 1mm 間隔で、半径方向に $y=8\sim12$ ($y/r=2\sim3$) mm を 0.5mm 間隔とした。

スペクトル解析はスピーカの同期信号をもとに速度データを位相平均化し、PC 上で 4096 サンプル(2^{12} サンプル)のデータに対して DFFT 演算を行った。

3. 実験結果

Fig.3 は、 $VR=0.5$ および $VR=1.0$ の場合の流れ方向速度分布 U/V_0 。流れ方向 x/d ごとに縦方向の座標を移動しており、各分布線図の両端の値が $U/V_0=0$ を示す。同図(a)の U/V_0 においてどの測定点においても中心軸付近での流速は

$U/V_0=1.0$ となり、ハット型の速度分布を形成する。 $x/d=0$ において、主流とフィルム流との間のギャップの影響が現れるが($y/r=1.0\sim 1.125$)、 $x/d=2$ 以降はその影響は解消され、その外側にゆるやかな剪断層を形成している。出口付近 $x/d=0$ での乱流強度 u'_{rms}/V_0 は、音響励起による薄い環状流への変動がフィルム流中($y/r=1.25$)で 9.7%、主流中心付近では 11.8%の変動となった。これにより薄い環状流の変動が主流全体へ影響を与えていることが分かる。同図(b)VR=1.0の場合、主流と2次フィルム流とのギャップの影響が大きく、この0.5mmの間における速度は主流、フィルム流の25%程度の速度となった。このギャップの影響も $x/d=2$ 以降は主流とフィルム流との付着により解消され、その後、主流中心から丸みを帯びた速度分布となった。音響励起によるフィルム流の速度変動は出口付近で20%、フィルム流付着後の中心付近までの乱れ強度は10%程度となった。

次にスペクトル解析を行った結果を示す。フィルム流の内側と外側の影響を確認するため、其々の周波数 f を $St=fD/U$ を用いて無時限化するために、流速 U を速度が遅くなるフィルム流側のみ各測定点における時間平均速度 $U(y)$ を使い、代表直径 D は、主流側は主流ノズル内径 $D=8\text{mm}$ 、フィルム流内縁 $y/r=1.125$ で主流ノズル外形 $D=9\text{mm}$ 、フィルム流中と外縁ではフィルム流ノズル内径 $D=12\text{mm}$ を適用した。これにより速度の遅くなるフィルム流側は無時限周波数が大きくなり、図中では右にずれることになる。Fig.4にVR=0.5の場合の周波数 f を無時限周波数 St としたスペクトル強度分布を示す。これらの図も縦軸を移動させながら示している。 $y/r=0\sim 1.0$ が主流に対応し、 $y/r=1.125\sim 1.5$ がフィルム流に対応している。同図より、音響励起周波数 $f_a=220\text{Hz}$ だけではなく様々な周波数でスペクトル強度が高くなっていることが分かる。とくに音響励起周波数の半分の周波数 $f_n=110\text{Hz}$ が立ち上がっており、110Hz ごとにスペクトル強度が高くなった。主流側の $f_a=220\text{Hz}$ に相当するストローハル数は $St=0.34$ であり、これはフィルム流側の周波数 $f=110\text{Hz}$ に相当する。また、フィルム流内縁の $f_a=220\text{Hz}$ に相当するストローハル数は $St=0.58$ であり、これは主流側でのスペクトル強度も高くなっている。これにより、音響励起による速度変動は、フィルム流内縁における変動により主流側に影響を与え、影響を与えられた主流側はフィルム流側に2倍の周期となる影響を与えるように変動を与えていると考えられる。VR=0.5の場合は、これらの変動の伝播より、様々な周波数のスペクトル強度があらわれ非線形干渉を起こしている。

Fig.5はVR=1.0の場合のスペクトル強度分布図である。元のスペクトル強度では $f_a=220\text{Hz}$ に対する $f=110\text{Hz}$ の高い強度はあらわれないが、周期が半分となる $f=440\text{Hz}$ での高い強度があらわれ、 $f=220\text{Hz}$ ごとに高い強度分布となった。同図、フィルム流内縁 $y/r=1.125$ の $f_a=220\text{Hz}$ に対応するストローハル数は $St=0.65$ となり主流側の周波数 $f=440\text{Hz}$ に相当する。また、フィルム流が主流に付着する $x/d=1$ において主流側の $f=220\text{Hz}$ に相当するストローハル数は $St=0.34$ となりフィルム流側の周波数 $f=110\text{Hz}$ 相当する。また、 $x/d=1$ 以降ではVR=0.5の場合と同様に $f=110\text{Hz}$ の高いスペクトル強度があらわれ、フィルム流の変動によって主流は励起され、その変動がフィルム流の2倍の周期となるように変動を与えていることが分かった。

最後にこれらの変動の影響を記述する。VR=0.5の場合、ノズル付近での多数の周波数による非線形干渉は、主流中心軸上($y/r=0$)でも、フィルム流中($y/r=1.25$)でも $x/d=5$ まであらわれた。しかし、 $y/r=1.25$ での変動は、主流に比べて流速が遅く、 $y/r=0$ での無時限周波数が $St=0.34$ から大きくはなれており、互いに干渉が効きにくくなった。これによりフィ

ルム流の外側に大規模渦を励起できず、噴流の拡散が抑制されたと考えられる。また、VR=1.0の場合、主流中心とフィルム流ともに無時限周波数 $St=0.34$ の変動が維持されており、積極的にフィルム流の外側にも大規模渦を励起し、噴流が拡散したと考えられる。このようにフィルム流と音響励起によって、主流とフィルム流が相互に局所的な干渉しあうことにより、噴流拡散の抑制・促進両面の制御が可能である。

4. まとめ

音響励起を与えたフィルム流は、まず主流に音響励起周波数と同じ変動を与える。主流とフィルム流との流速比により、局所的な無時限周波数が変わり、相互の干渉が抑制にも促進にも影響を与えている。

参考文献

- (1) 宮城, 木村 他 機論 B 71 巻 712 号, (2005)
- (2) Miyagi, Kimura, et.al 13th International Heat Transfer Conference, CD-ROM, 2006

Fig.3 Velocity profiles (a) as VR=0.5, (b) as VR=1.0

Fig.4 Power Spectrum at VR=0.5

Fig.5 Power Spectrum as VR=1.0