

No.17 管内乱流から発達する乱流噴流の統計値に関する実験

石田 崇, 小田 誠, 松原雅春, 吉田尚史, 土屋良明 (信州大工)

Statistical properties of turbulent jets developed from turbulent pipe flows

T. Ishida, M. Oda, M. Matsubara, T. Yoshida and Y. Tsuchiya

Dept. of Mech. Systems Engng., Shinshu University

ABSTRACT

The turbulence characteristics of air jets issuing from the exit of turbulent duct and pipe flows were investigated using hot wire anemometry. The statistics of turbulence that include turbulence intensity, skewness factor and flatness factor show that the strong entrainment that bring the surrounding fluid at rest into the jet around the early development of the jet and these values saturate to the general turbulence values downstream. The velocity correlations show apparent negative values that suggest certain large scale of the turbulence both in time and the spanwise direction. Though the spectra never indicate any specific peaks, this result suggests that the jet flows from the turbulent duct or pipe flows have a large coherent structure at least in the region close to the jet exit.

Key Words: 2-D, rectangular, circular pipe, jet, correlation, coherent structure

1. 序論

噴出口を層流とする自由噴流は現在までに数多くの研究がなされており、乱流への遷移過程で大規模な渦が存在していることが知られている⁽¹⁾。しかし噴出口がはじめてから乱流である場合の研究は比較的少なく、遷移過程で現れるような大規模渦が存在するかよくわかっていない。また乱流混合層における渦や乱流統計値の解明は工学的応用や、数値計算工学などの立場からも重要である。

本研究は発達した管内乱流速度分布で噴出した自由噴流の発達過程において大規模渦のスケールと乱流統計値の変化に着目し調べることを目的とする。特に噴流のスケールの一般性を調べるため、噴出口形状は二次元チャンネル（縦横比 20）、長方形（縦横比 5）、円の 3 種類のものを使用した。I 型熱線プローブを 2 本用いて噴流軸上中心から距離を変化させながら流速の測定を行い、その時系列データを処理した。特に噴出口付近から噴流断面における速度分布が軸対称へ変化する過程において、乱れの変化が著しい付近に着目し、噴流軸上における歪度、平坦度、速度の 2 点相関等の乱れ特性スペクトルを調べそれらの値とスケールの変化の関係を明らかにする。

2. 実験装置および方法

Fig.1 に二次元チャンネル噴流の実験装置の概略図を示す。本実験では他に 2 種類の実験装置を用いたが、実験装置の構造は前報⁽²⁾までのものに整流部の改良を加え、噴出口形状を変えたものを用いたため図示は省略する。送風機から送られた空気は、一辺 100mm のハニカム、メッシュで構成されている風洞内に入り、整流された空気は長さ 1000mm の平行部を通り発達した管内乱流速度分布を形成し、短辺 $h=5\text{mm}$ で縦横比 20 の二次元チャンネルより噴出

される。座標系は、噴出口中心を原点とし噴流軸方向に x 軸、噴出口短辺方向に y 軸、長辺方向に z 軸をとる。また円は直径 $d=20\text{mm}$ 助走距離を 2000mm とし、噴出口直径方向を r 軸とした。長方形の噴出口形状は短辺 $h=10\text{mm}$ 、縦横比 5 とし、助走距離は 1000mm とした。

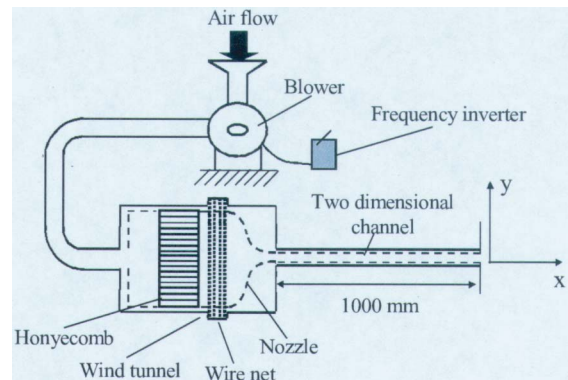


Fig.1 Experimental set-up for the two-dimensional jet.

噴出口より噴出する流れ方向速度を線径 $2.5\mu\text{m}$ の白金線で測定部長さが 1mm の熱線とする I 型プローブと、作成した定温度型熱線風速計を用いて測定する。I 型プローブを三次元トラバース装置に取り付け噴流軸上方向および各断面について測定した。また、相関を測定する際、I 型プローブを 2 本用いそれらを電動スライダに取り付け、噴流軸に直交な 2 方向に対し 2 点間の距離を変化させながら流速の測定を行った。移動方向は流れ方向に

2000mm, 流れ方向の直角方向に 300mm のトラバースを可能にした。長方形と円の噴出口中心の平均流速 $U_0=20\text{m/s}$ としレイノルズ数はそれぞれ約 23000, 29000 である。また二次元チャンネルの噴出口中心の平均流速 $U_0=40\text{m/s}$ としレイノルズ数は約 25000 である。

なお本実験でのデータのサンプリング条件はサンプリング周波数が 20kHz, サンプリング数が 100000 点でサンプリングタイムは 5s である。

3. 実験結果および考察

噴流の発達に及ぼす管形状の違いを示すため、噴流軸上における二次元チャンネル、長方形、円形の噴出口を持つ噴流についての流れ方向の平均速度分布を Fig. 2 に示す。縦軸は流れ方向平均速度 U_x を噴出口中心速度 U_0 で無次元化したもので、横軸は噴出口からの距離 x をそれぞれの噴出口短辺 h または直径 d で無次元化したもので、両対数グラフである。円管噴流が最も早い位置 ($x/d=5$ 付近)、二次元噴流、長方形噴流はほぼ同じ位置 ($x/h=6$ 付近) から中心速度の減衰が始まっている。またこの付近での減衰の傾きの大きさは円管噴流が最も大きく、その後 $x/h=10$ 付近より、軸対称噴流の特徴である -1 の傾きをもって減少していく。長方形噴流、二次元チャンネル噴流は $x/h=20$ 付近まで同様に二次元噴流の特徴である $-1/2$ の傾きをもって減衰し、その後長方形噴流は $x/h=30$ から -1 の傾きをもって減衰する。ここで長方形噴流は二次元的に減衰する領域と、軸対称的に減衰する領域の 2 つの領域をもっていることがわかる。

次に噴流軸上における流れ方向乱れ強さについて Fig. 3 に示す。縦軸は変動速度 u の rms 値 u' を噴出口平均速度 U_0 で無次元化したものである。平均流速の減衰が始まる $x/h, x/d=4$ 付近より、各噴出口とも急激な増加を示し、相対乱れ約 12~13% のピークをとった後減少していく。円管噴流が最も上流側で二次元噴流、長方形噴流に比べ鋭いピークをとり、その後乱れ強さが減少していく。

Fig. 4 に二次元チャンネル噴流、長方形噴流、円管噴流について噴流軸上 ($y=0, z=0$) における歪度、平坦度を示す。管内流からの $S(u)$, $F(u)$ 値は 3 種類の噴出口形状ともにそれぞれ $-0.5, 3.5$ の一定値ではじまり、 $x/h=3$ 付近から急激に変化し $x/h=5, 6$ 付近で歪度 S は最小値、平坦度 F は最大値をとる。この位置でのピークの形は円管噴流が最も鋭い形をとっており、その後 $S=0$, $F=3.5$ へ緩やかに漸近していく。歪度 S の明確な負のピーク値は噴流周囲の小さい速度の流体が噴流軸上に巻き込まれているためと思われる。また $x/h<3$ では 3 種類とも S はほぼ一定な -0.5 となっており、管内乱流の特性を表している。なお、同様に乱れ強さ (rms 値) は $x/h>3$ あたりから急増し、 $x/h=15$ あたりで最大値となる。ここでの x 位置は平均速度 U_0 が二次元噴流と同様な減衰を示している。平坦度 $F(u)$ を見れば、歪度 $S(u)$ と同様の位置でピーク値を示した後、下流において

一定値となる傾向を示すが、その値はガウス分布における値 3.0 よりやや小さい 2.75 である。

Fig. 5 に二次元チャンネル噴流の噴流軸上 $x/h=0, 5, 10, 20$ における変動速度 u のパワースペクトルを示す。横軸に周波数 f [Hz], 縦軸は流速のエネルギー密度をとり、両軸とも対数をとっている。なおスペクトル分布は移動平均法により平滑化してある。乱れ強さが増加し始める 5~200Hz 付近の低周波数領域における $x/h=0$ から $x/h=20$ でエネルギー密度が約 20 倍の増加が見られた。Fig. 6 に長方形噴流の噴流軸上 $x/h=0, 5, 10, 20$ における変動速度 u のパワースペクトルを示す。5~100Hz 付近の低周波数領域におけるエネルギー密度 ($x/h=0$ から $x/h=20$) に関して約 10 倍の増加が見られた。また 100Hz 以上の周波数領域では下流に向かうに従い $-5/3$ 乗の傾きを持って減少していく傾向が見られる。Fig. 7 に円管噴流の噴流軸上 $x/d=0, 5, 10, 20$ における変動速度 u のパワースペクトルを示す。4~30Hz 付近の低周波数領域における $x/d=0$ から $x/d=20$ のエネルギー密度に関して約 10 倍の増加が見られ、 $x/d=5$ から $x/d=10$ の増加が最も大きい。また $x/d=20$ は低周波数領域では最も高い値を示すが高周波数領域における減少の傾きが最も大きい。各噴出口形状ともに管内乱流速度分布で噴出した流れのため全周波数にわたり明確なピークは見られない。また十分下流では高周波数領域で $-5/3$ 乗則にしたがっている事がわかる。

Fig. 8 に二次元チャンネル噴流の近接した 2 点における速度間の相関係数についての等値線図を示す。横軸は x 軸方向の距離を噴出口短辺 h で無次元化したものであり、縦軸は y 軸方向の距離を噴出口短辺 h で無次元化したものを表す。相関係数の大きさは図の濃淡で表し値が小さくなるのに従い色が濃くなっている。軸上平均流速で減衰の見られない Jet core 領域の $x/h=5$ 付近までは平坦な分布を示しており、 $\Delta y/h=0.25$ 付近までの広がりである。また $x/h=5$ より直線的に広がっていく分布が見られる。また $x/h=6$, $\Delta y/d=0.5$ 付近に存在する負の値は下流に向かうに従い、噴流の広がりを表す半値幅の傾き 0.1 と同様の傾きを持って広がっていることが分かる。負の最小値は -1 である。Fig. 9 に長方形噴流の相関係数についての等値線図を示す。軸上平均流速で減衰の見られない Jet core 領域の $x/h=5$ 付近までは平坦な分布を示しており、 $\Delta y/h=0.25$ 付近までの広がりである。また $x/h=5$ より直線的に広がっていく分布が見られる。また $x/h=6$, $\Delta y/d=0.5$ 付近に存在する負の値は下流に向かうに従い、噴流の広がりを表す半値幅の傾き 0.11 と同様の傾きを持って広がっていることが分かる。負の最小値は -0.2 である。Fig. 10 に円管噴流の相関係数についての等値線図を示す。軸上平均流速で減衰の見られない Jet core 領域の $x/d=5$ 付近までは平坦な分布を示しており、 $x/d=5$ より直線的に広がっていく分布が見られる。

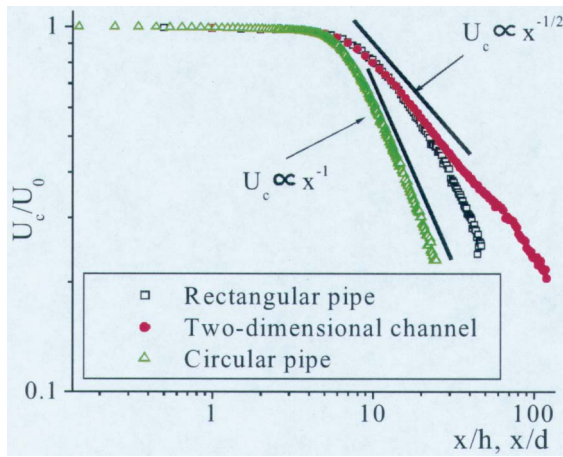


Fig. 2 The streamwise distributions of mean velocity.

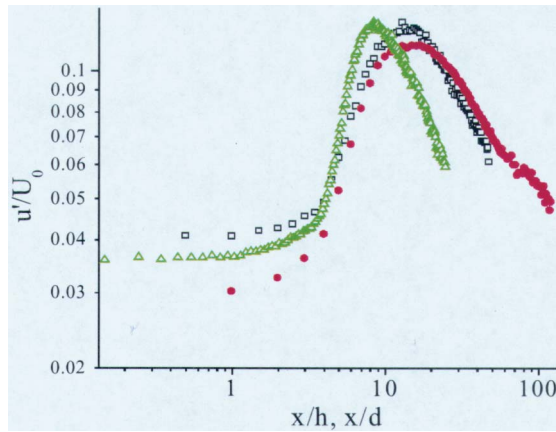


Fig. 3 The streamwise distribution of the velocity fluctuation.

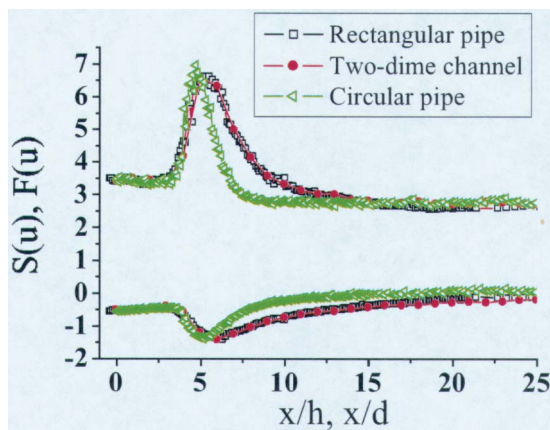


Fig. 4 Streamwise distribution of the skewness factors and flatness factors.

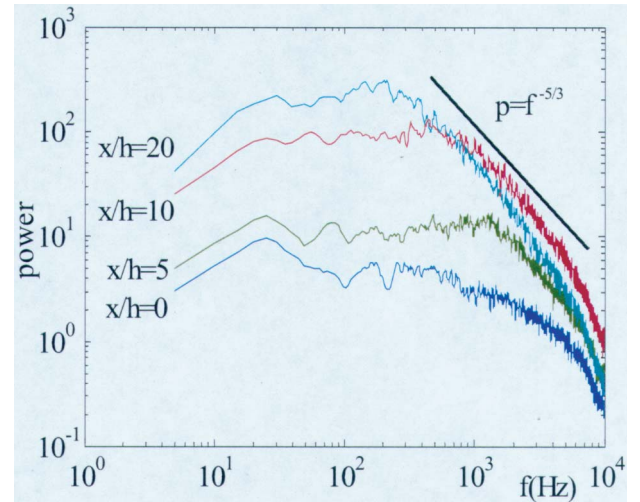


Fig. 5 Spectrum of the streamwise velocity in the two-dimensional jet.

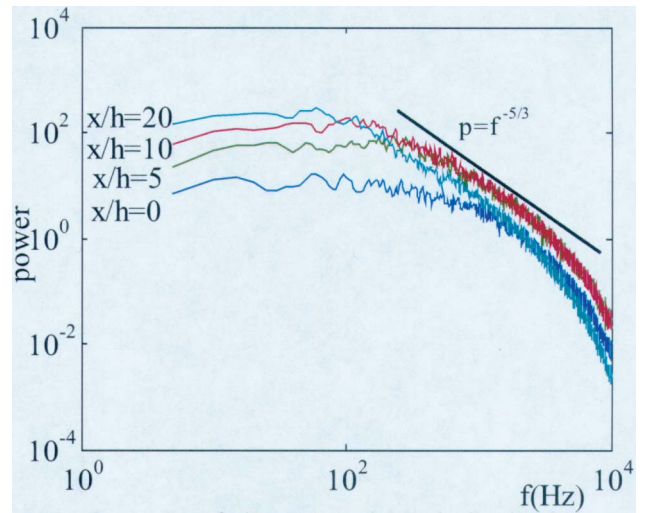


Fig. 6 Spectrum of the streamwise velocity in the rectangular jet.

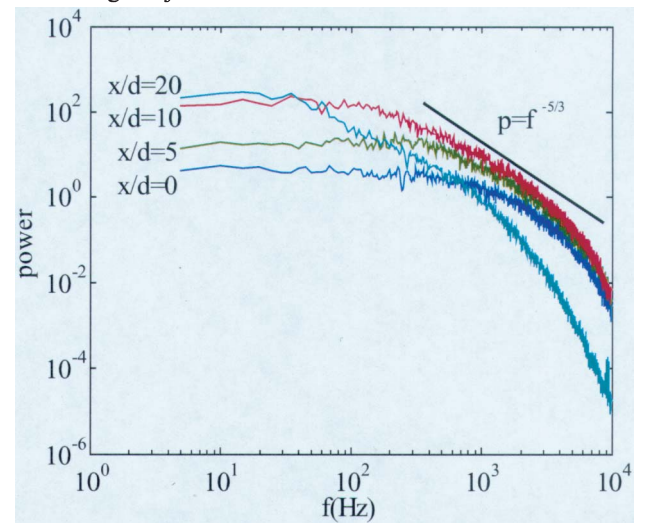


Fig. 7 Spectrum of the streamwise velocity in the circular jet.

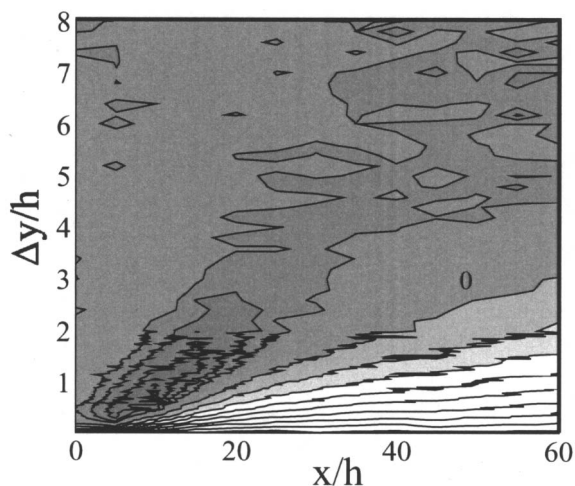


Fig. 8 Contour map of correlation in the two-dimensional jet. Contour spacing is 0.1.

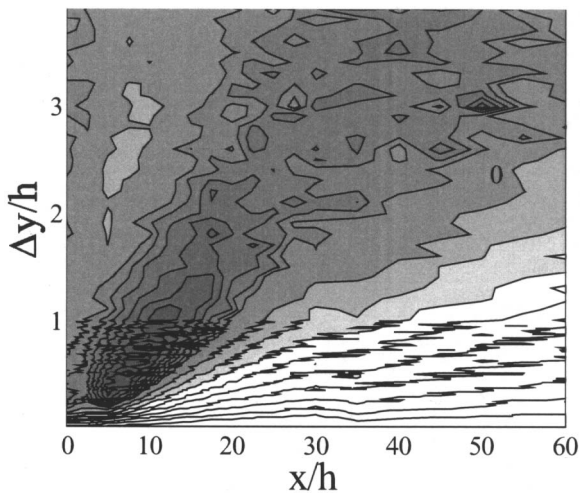


Fig. 9 Contour map of correlation in the rectangular jet. Contour spacing is 0.1.

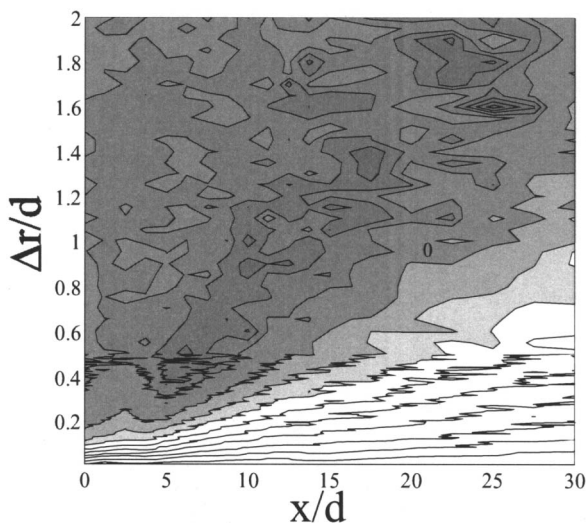


Fig. 10 Contour map of correlation in the circular jet. Contour spacing is 0.1.

また $x/d=6$, $\Delta y/d=0.5$ 付近に存在する負の値は下流に向かうに従い、噴流の広がりを表す半値幅 0.06 の傾きと同様の傾きを持って広がっていることが分かる。負の最小値は -0.8 である。ここでの相関係数の負の値は渦の主に存在する大きさを示唆するものであると思われ、この渦の大きさは半値幅と同様の傾きをもって増加していくことが分かる。

4. 結言

- (1) 3 種類の噴出口形状ともに平均速度が減衰し始める x 位置で歪度、平坦度が急激に変化し、パワースペクトルでも低周波数領域のエネルギー密度が噴出直後に比べ 10~25 倍増加している。
- 3 種類の噴出口形状ともに平均速度が減衰し始める x 位置で歪度、平坦度が急激に変化し、パワースペクトルでも低周波数領域のエネルギー密度が噴出直後に比べ 10~25 倍増加している。
- (2) 長方形噴流と二次元噴流の歪度、平坦度が流れ方向にほぼ同様の分布に変化するのに対し、円管噴流における歪度、平坦度のピークは長方形噴流、二次元噴流に比べ上流側に位置する。これは長方形噴流や二次元チャンネル噴流では短辺方向からのみ噴流軸上への混合が起こっているが、円管噴流では両軸方向からの混合が起こっているためと思われる。
- (3) 各噴出口形状における流れ方向速度の相関係数の等値線図より負の値の塊はそれぞれ $x/h=5$ 付近に存在し、その極小値の距離は半値幅とほぼ一致し下流に向かうに従い広がっている。
- (4) 長方形噴流における y 軸方向の相関値は $x/h=5$ 付近で大きな負の値をとり、この付近で明確な渦構造があることが示唆される。しかしながら全周波数にわたりパワースペクトルでピークが見られないため、その渦構造のスケールがある程度分散していると考えられる。

参考文献

- (1) 高曾, 西野, 栗山, 妹尾, 円形噴流における乱流大規模構造, 機論, 54-504 (昭 63-8), 1929-1937
- (2) 石田, 他 4 名, 日本機学会流体工学部門講演会講演論文集, (2002.10.23・蔵王), 1107.