

# 励起された長方形噴流中の渦構造と拡散促進機構

豊田 国昭\*, 平元 理峰\*

## Vortical Structure and Diffusion Enhancement Mechanism in an Excited Rectangular Jet

by

Kuniaki TOYODA and Riho HIRAMOTO

Hokkaido Institute of Technology

### ABSTRACT

The diffusion mechanism of an excited rectangular jet was investigated by comparing the measured velocity profiles with the deduced vortical structures. Experiments were carried out using an air jet from a sharp-edged rectangular orifice of aspect ratio 4. The jet was excited in the interaction mode, in which the stable interaction of vortices occurred. The results reveal that the jet diffusion mechanism is closely related to the vortical structures in the rectangular jet: the jet width in the major plane decreases due to the inward flow induced by vortices bending downstream, and that in the minor plane increases significantly due to the outward flow induced by stretched vortices and split vortex rings.

**Key Words:** Rectangular Jet, Diffusion, Vortical Structures, Excitation, Turbulent Flow.

## 1. まえがき

非円形噴流中で形成される渦は、周方向の非一様曲率の自己誘起速度効果により、三次元的に変形することが知られている<sup>(1)</sup>。この三次元変形は噴流の拡散を促進するので、励起によって渦を強めることにより、さらに拡散を促進することができる<sup>(2)</sup>。とくに、渦が対になって干渉するような励起(干渉モード)の場合には、アスペクト比(AR)4の長方形噴流の噴流断面積が著しく拡大するので、その工学的応用が期待される。既報<sup>(3),(4),(5)</sup>では、変動圧力プローブにより測定した変動静圧の低圧部が流れ中の渦構造によく対応することを示し、さらに干渉モードで励起されたAR=4の長方形噴流中の変動静圧の位相平均測定を行い、三次元渦構造の変形・干渉・分裂・結合機構を明らかにした。

本報では、既報<sup>(3),(5)</sup>と同様の実験条件で、位相平均変動静圧と長軸・短軸方向の平均速度と乱れ強さ分布を詳細に測定し、長方形噴流の拡散促進機構と渦構造の関連性を検討した。

## 2. 実験方法

実験装置および実験条件は既報<sup>(3),(5)</sup>と同様なので概要を記す。風洞の出口に長方形オリフィス(AR=4)を取り付け噴流を発生させた。また、噴流拡散特性を比較するために、円形オリフィスからの噴流の測定も行った。噴出口中心速度 $U_e$ は4 m/s、等価直径 $De$ (=50mm)に基づくレイノルズ数 $Re=U_e De/\nu$ ( $\nu$ :動粘度)は $1.3 \times 10^4$ で、噴流励起は風洞整流部に取り付けられたスピーカにより $f_n/4=141\text{Hz}$ ( $f_n$ :噴出口近傍混合層の不安定変動周波数)の周波数で行われた。その際、励起強さ $ue'/U_e$ ( $ue'$ :噴出口変動速度の実効値)は0.03とした。この励起条件では、連続的に発生する渦が対になり干渉する。

図1に流れ場の座標系を示す。本研究では、励起された長方形噴流中の渦構造を位相平均変動静圧測定<sup>(5)</sup>により抽出し、また、長方形および円形噴流の'励起なし'と'励起あり'の流れ場の平均速度と乱れ強さ(変動速度実効値)分布をI型熱線プローブにより測定した。平均速度および乱れ強さ分布は、長軸(y軸)および短軸(z軸)方向に測定された。これらの測定における変動圧力プローブ、熱線プローブの移動および計測処理

\* 北海道工業大学

はパーソナルコンピュータにより自動的に行われた。

### 3. 実験結果および考察

位相平均変動静圧測定結果から静圧場の三次元画像を作成した。三次元画像を作成する際の圧力範囲は低圧領域とし、低圧領域が渦度集中領域に対応しているものとして渦構造を検討した。以下、図中の L は先行渦、T は追跡渦、上付記号「'」は下流の渦を表している。図 2 に  $x/De=1.0$  における三次元画像を示す。先行渦 (L) は長軸方向端部が下流方向に傾斜し、逆に追跡渦 (T) は上流方向に傾斜している様子がわかる。図 3 に  $x/De=1.5$  における三次元画像を示す。(a) は 2 周期分をつなぎ合わせた画像で、追跡渦 (T') の長軸方向端部は上流の先行渦 (L) に巻き込まれ、流れ方向に引き伸ばされている。また、先行渦は  $z$  方向に著しく伸ばし小渦が分離しつつあることが推測される。(b) は、等圧面の圧力値をさらに低くし、渦構造の骨格を明瞭にしたものであるが、先行渦と追跡渦が接合した渦構造になっている。すなわち、上部が先行渦、下部は追跡渦の渦部である。

上述した三次元静圧場と、 $xy$ 、 $xz$  面の位相平均等圧線図<sup>(5)</sup>を検討して得た三次元渦構造を図 4 に示す。図 4 は、渦が対となり下流方向に変形する様子を示している。先行渦の長軸方向端部（ヘアピン部）は、周方向曲率が大きいため、自己誘起速度により下流方向に傾き「く」の字形になり、追跡渦の噴流中心近傍渦部は、先行渦の中に入り込み逆「く」の字型となる[図 4(a)]。また、追跡渦のヘアピン部は上流方向に引き伸ばされ、上流の先行渦に巻き込まれる[図 4(a), (b)]。先行渦は  $z$  方向に伸ばして先端から小渦が分離し、また、先行渦と追跡渦の結合により複合的な渦構造が形成される[図 4(b), (c)]。さらに、この複合構造の追跡渦部は、噴流中心軸をつなぎ替えにより  $y$  方向に分離する[図 4(d)]。

励起された長方形噴流の長軸および短軸方向に測定した平均速度分布を図 5 に示す。図 5 (a) より、長軸方向の噴流幅は減少し、鞍型速度分布が  $x/De=2.0$  に現れることがわかる。図 5 (b) の短軸方向の  $x/De=2.0$  の平均速度分布は、噴流中心に鋭い凸部、その両側に凹部をもち、特徴的分布となっている。

位相平均変動静圧測定により得た渦構造と関連づけると、図 5 (a) の  $x/De=2.0$  における鞍型の平均速度分布は、複合渦[図 4(b)]のヘアピン部の誘起速度による増速効果の影響である。また、図 5 (b) の  $x/De=2.0$  における平均速度分布の噴流軸両側の増速部は、図 6 に示すように、 $z$  軸方向に伸ばした先行渦から分離した渦輪の誘起速度による効果と思われる。さらに下流の短軸方向の平均速度分布は、これらの渦輪の誘起速度が噴流内部の高速流体を外側の低速域に輸送するために、著しく拡大する。

以上のように、平均速度場は渦構造に支配されており、したがって、渦構造の操作は速度場の制御に極め

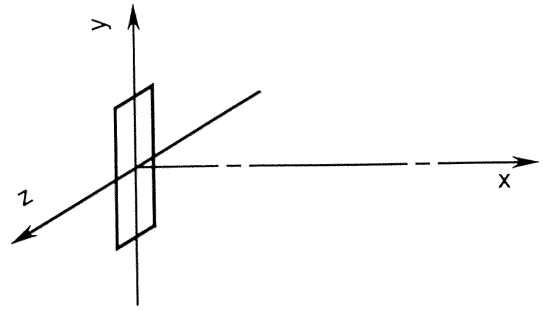


Fig. 1 Coordinate system

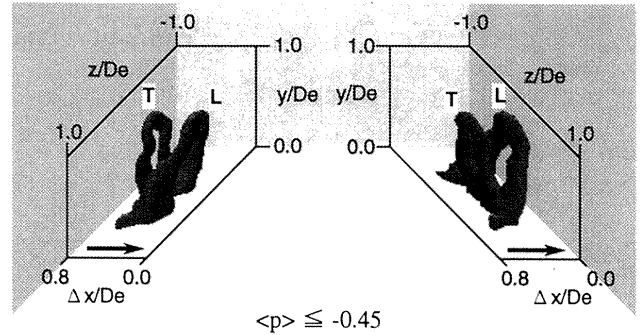


Fig. 2 Three-dimensional pressure field ( $x/De=1.0$ )

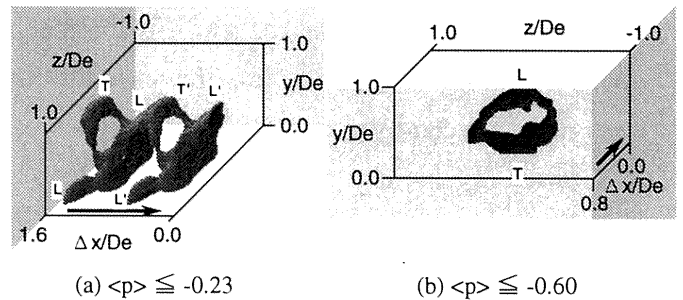


Fig. 3 Three-dimensional pressure field ( $x/De=1.5$ )

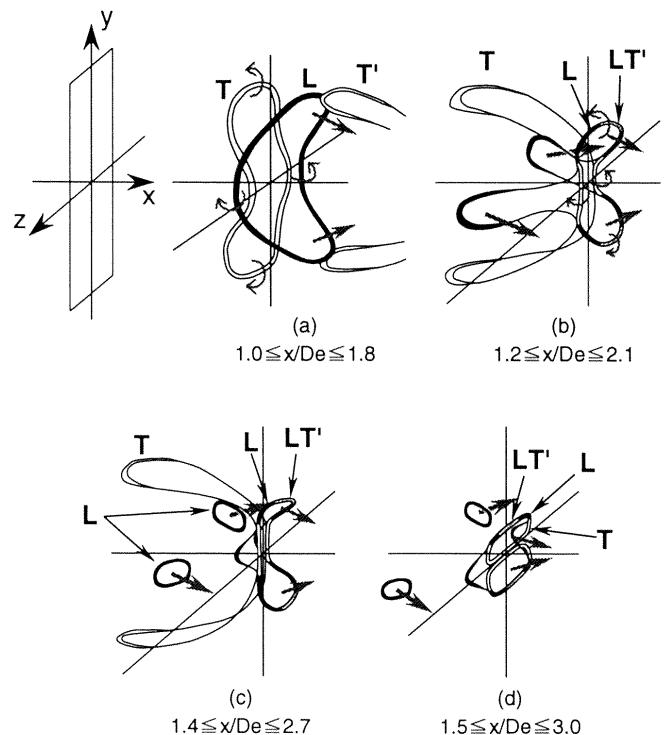


Fig. 4 Three-dimensional vortical structure

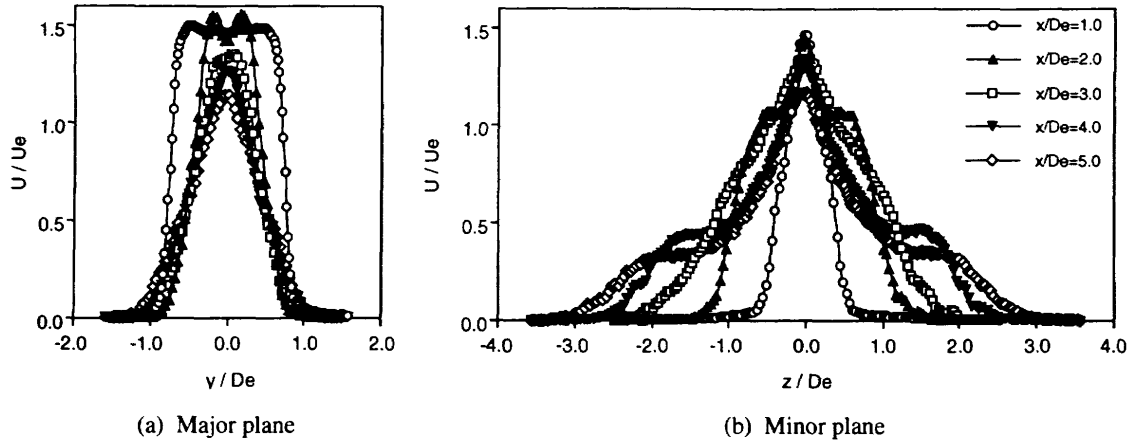


Fig. 5 Mean streamwise velocity profiles of the excited rectangular jet

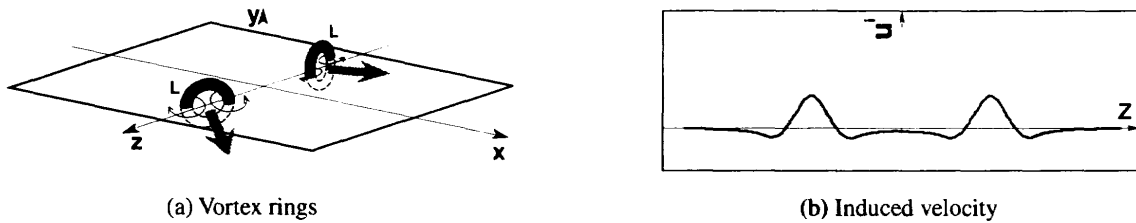


Fig. 6 Induced velocity by vortex rings

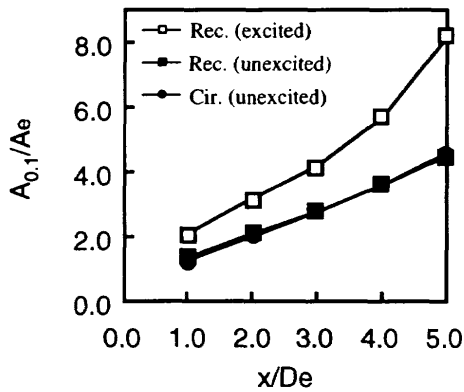


Fig. 7 Variations of the jet cross-sectional area

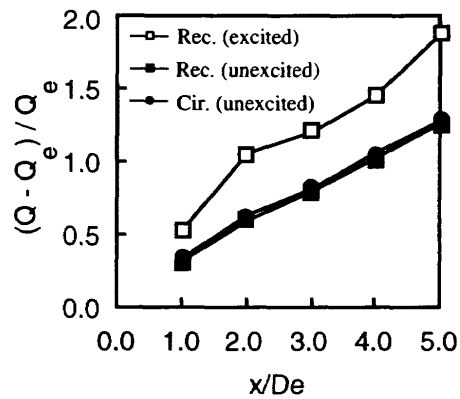


Fig. 8 Variations of the entrainment ratios

で有効であることがわかる。

長方形噴流と円形噴流の拡散特性を比較するために、噴流断面積比の変化を図7に示す。噴流断面積比は、各流れ方向位置における  $yz$  面の等速度線図において、 $U/U_e=0.1$  で囲まれる面積  $A_{0.1}$  と噴出口面積  $A_e$  の比とした。励起されていない長方形と円形噴流の噴流断面積比はほぼ同じであるが、励起された長方形噴流は著しく拡散が促進されている。

エントレインメントを検討するために流量  $Q$  を次式で計算し求めた。

$$Q = \int_{A_{0.1}} U dA \quad (1)$$

図8にエントレインメント変化率  $(Q-Q_e)/Q_e$  を示す。ここで、 $Q_e$  は  $Q_e=U_e A_e$  である。図7の噴流断面積比の変化と同様の傾向がみられ、励起された長方形噴流のエントレインメントが著しく促進されている。

噴流中の渦は速度変動を生じさせるので、速度変動特性との関連性を以下に検討する。励起された長方形噴流の長軸および短軸方向の乱れ強さ分布を図9に示す。乱れ強さの増大する位置は、位相平均変動静圧測定<sup>(5)</sup>で得られた流れ方向長軸断面および短軸断面の渦の通過位置とほぼ一致しており、速度の変動成分は渦の通過により増大すると考えられる。長軸方向の分布における、 $x/De=1.0$  の噴流中心の乱れの増大は、先行渦の中に入り込んだ追跡渦による誘起速度の影響である。 $x/De=2.0$  では、噴流中心付近に小さな二つの極大が見られるが、これは渦の存在を示唆しており、複合渦の変形過程で生じる渦によるものと思われる。

短軸方向の分布は、短軸方向への渦の変形が大きいために、その分布形状の変化も著しい。 $x/De=1.0$  の分布では、追跡渦の影響により噴流中心に、また、先行渦の通過により噴流中心の両側に極大が現れ

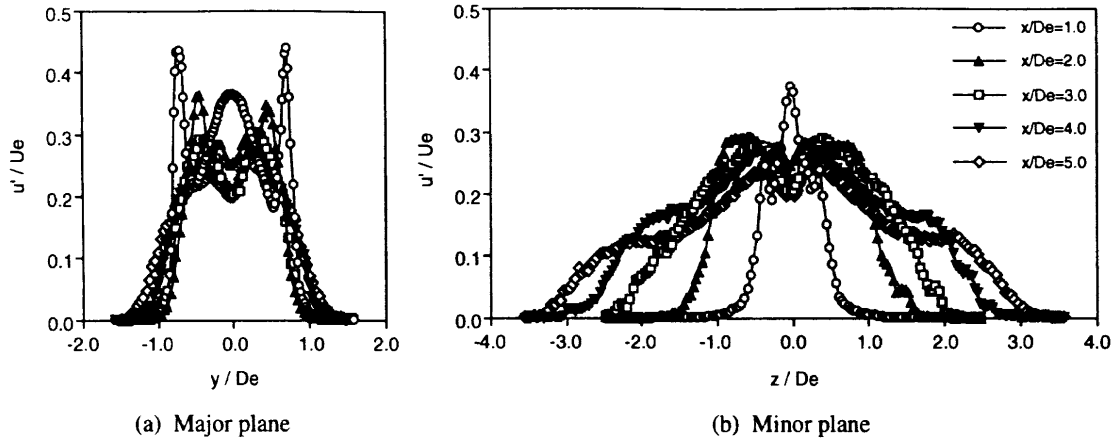


Fig. 9 Turbulence intensity profiles of the excited rectangular jet

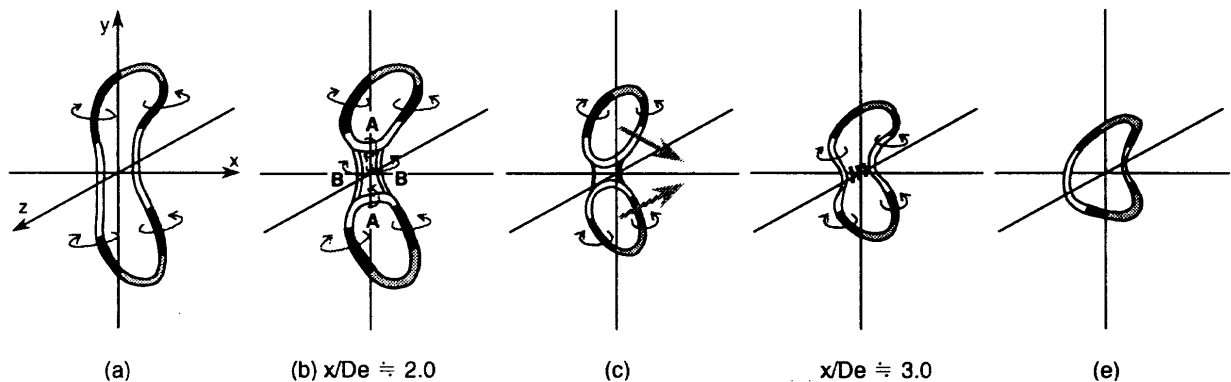


Fig. 10 Bifurcation-and-reconnection model of the compound vortex ring

る.  $x/De=2.0$  では, 先行渦から分裂した小渦輪[図 4(c)参照]の影響により,  $0.5 < z/De < 0.9$  に乱れ増大域が現れる. また, 噴流中心近傍の極大は乱れ強さの長軸方向分布  $x/De=2.0$  に現れている小さな 2 つの極大と同様, 複合渦の変形によるものと考えられる.

先行渦と追跡渦の干渉によってできた複合渦の変形モデルを図 10 に示す. 噴流中心近くの渦部はその間隔を狭め, 図 10(b) のような渦のつなぎ替えが始まりブリッジ(橋)状の渦(図中の A)が生成され, 図 10(c) のように長軸方向に分裂する. この分裂機構は, 楕円渦輪の分裂<sup>(6)</sup>と同様である. 分裂した二つの渦輪は噴流中心方向に傾いているために衝突し[図 10(d)], 噴流中心近傍で再び渦のつなぎ替えにより結合し一つの渦輪[図 10(e)]を形成する. この再結合過程は, 数値計算により示された機構<sup>(7)</sup>と同様である. このような分裂の際に生じるブリッジ状の渦[図 10(b)中の渦部 A]により, 図 9(a)の  $x/De=2.0$  における噴流中心近くの極大が現れたと思われる. また, 図 10(b)の B の渦部の通過により, 乱れ強さの短軸方向分布  $x/De=2.0$  に小さな 2 つの極大が現れたと考えられる.

#### 4. あとがき

励起されたアスペクト比 4 の長方形噴流の噴流拡散

機構を渦構造と関連させて検討した. 得られた結果を要約すると以下ようになる.

- (1) 速度場と渦構造の関連性を明らかにした.
- (2) 励起された長方形噴流の拡散促進は渦の三次元的な変形・干渉挙動によるものである.
- (3) 三次元複合渦の変形・干渉模様の詳細を検討した.

#### 文献

- (1) 豊田, Hussain, F., 日本機械学会論文集, **55**-514, B(1989), 1542.
- (2) 豊田・白浜・小谷, 日本機械学会論文集, **58**-545, B(1992), 7.
- (3) 白浜・豊田・岡本, 日本機械学会論文集, **61**-581, B(1995), 7.
- (4) 豊田・石田・平元・白浜, 航空宇宙技術研究所特別資料, SP-33, 「境界層遷移の解明と制御」研究会講演論文集, 第 17 回・第 18 回, 1996 年 9 月.
- (5) 平元・豊田, 日本機械学会論文集, **62**-598, B(1996), 2202.
- (6) Hussain, F. and Husain, H.S., J. Fluid Mech., **208** (1989), 297.
- (7) Kida, S., Takaoka, M. and Hussain, F., Phys. Fluids., A1-4 (1989), 630.