

No.6

二次元噴流中に存在する渦構造の合体機構

関下 信正, 蒔田 秀治(豊橋技科大)

Mechanism of the Vortex Pairing in a Parabolic Plane Jet

N. Sekishita* and H. Makita*

* Toyohashi University of Technology

ABSTRACT

Three dimensional deformation and pairing process of vortex tubes were investigated in a two-dimensional parabolic jet exhausted from a nozzle of 10mm×400mm. Hot-wire measurement and multi-smokewire visualization were compared. Vortex pairing occurred periodically around $X/2h=7$ when the bimodal excitation conducted at $u_s/u_f=1$, $\phi=0$ deg, where u_f and u_s were fundamental and subharmonic components, respectively, and ϕ was the phase deference between u_f and u_s . Vortex arrangement shifted into anti-symmetric one after the pairing. At $\phi=120^\circ$, the vortex pairing became to occur occasionally. When two vortices didn't paired, the symmetric arrangement was kept until far downstream. Rib structures elongated from the roll vortices were important role as the interaction between the roll vortices.

Key Words: Jet, Bimodal Excitation, Coherent Structure, Vortex Pairing, Hot-Wire Measurement Flow Visualizaiton

1. 緒言

噴流中の秩序構造は速度せん断によって形成され、合体や変形し、崩壊する。放物線型速度分布を有する二次元噴流の場合、線形干渉領域においてロール渦が成長し、非線形干渉領域で変形し、乱流に遷移する⁽¹⁾。これまでに我々は、この噴流場をバイモーダル励起し、噴流軸に対して対称に配列したロール渦の合体と変形を調べてきた⁽²⁾⁽³⁾。なお、バイモーダル励起は、対称モードの固有周波数成分 u_f (その周波数 f_f) と subharmonic 成分 u_s (その周波数 f_s) の合成波 (それらの位相差 ϕ_{in}) に基づいて音波励起する手法である⁽⁴⁾。

本研究の目的は、二次元噴流中のロール渦が波状に変形する機構を明らかにすることである。ロール渦の変形を熱線流速計による計測と煙線法による可視化実験を行って調べ、噴流場における秩序構造の三次元化について考察した。

2. 実験装置・方法

本研究では、噴流口の高さ 400mm、幅 $2h=10$ mm の二次元噴流風洞⁽³⁾を用いた (図 1)。噴流口での速度分布は放物線型⁽⁵⁾であり、最大流速 $U_0=6$ m/s、 $Re=U_0 \cdot 2h/\nu=3850$ である。励起は整流胴内の両側に設置された二つのスピーカを用い、噴出口断面中心において、次式で定義される速度変動になるように設定した。励起条件を表 1 に示す。

$$u/U_0 = u_s/U_0 \cdot \sin\theta + u_f/U_0 \cdot \sin(\theta + \phi) \quad (1)$$

なお、 $\phi=0^\circ$ の時にロール渦の合体が促進され、 $\phi=120^\circ$ の時に抑制されることが分かっている⁽³⁾。実験は、スピーカの励起信号に基づいて条件付多線式煙線法による可視化と X 型熱線プローブによる条件付計測を行った。

3. 実験結果と考察

ロール渦の配列と合体現象を XY 断面の可視化および計測結果で説明し、ロール渦の変形とリブ構造を XZ 断面の可視化写真で説明した後、ロール渦の変形のメカニズムについて考察する。

図 2 (a)~(c) に $u_s/u_f=1$, $\phi=0^\circ$ で、図 (d)~(e) に $u_s/u_f=1$, $\phi=120^\circ$ で励起した場合の XY 断面の結果を示す。可視化写真の+印は、渦度分布 (図 2c, e) から判断したロール渦の中心位置、白丸は写真と渦度分布から判断したロール渦を示している。バイモーダル励起の励起条件である位相差 $\phi=0^\circ$ に注目すると、式 (1) の位相角 $\theta=0^\circ$ では、上流

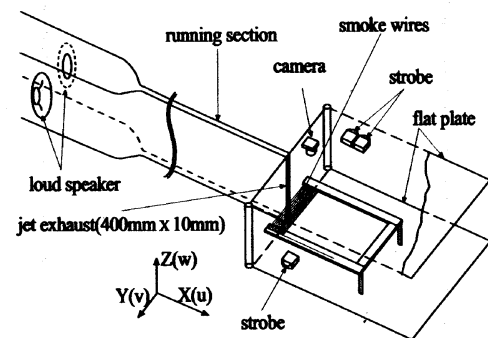


Fig.1 Experimental Setup.

Table 1 Excitation Condition.

u_s/u_f	u_s/U_0	u_f/U_0	ϕ
1	1	1	0°
2	2	1	
3	3	1	
1/1	1	1	120°
1/2	1	2	
1/3	1	3	

の 6 つの渦は対称配列であるが、その下流の渦 F と H は合体する直前であり、次の時刻 $\theta=45^\circ$ では $X/2h=8$ 付近で渦構造が合体し、一つの大きな渦になると同時に、逆対称配列に移行している。この時、合体した渦によって反対側の渦 E はわずかに外側へ押出される。その結果、さらに θ が進むと、上流の渦 C が時間の経過とともに、渦 E に引き寄せられるように近づき、これらが合体する。ここでは図示しないが、同じ位相差 $\phi=0^\circ$ の $u_s/u_f=2$, 3 の場合も同様の傾向であった。 $\phi=0^\circ$ では渦の合体が常に生じることによって、合体後の渦構造は逆対称配列になる。

一方、 $u_s/u_f=1$, $\phi=120^\circ$ の条件では、図 2(a)~(b) と同様に、渦 F と H が $X/2h=7$ 付近で合体し、合体後は逆対称になっているものもあるが、 $\phi=0^\circ$ のように常に合体が生じているわけではなく、対称配列のまま渦構造が下流へ流れていく場合も観察された (図 2d, e)。このように $\phi_{in}=120^\circ$ の場合、渦の合体が定常的に起こっているわけではない。

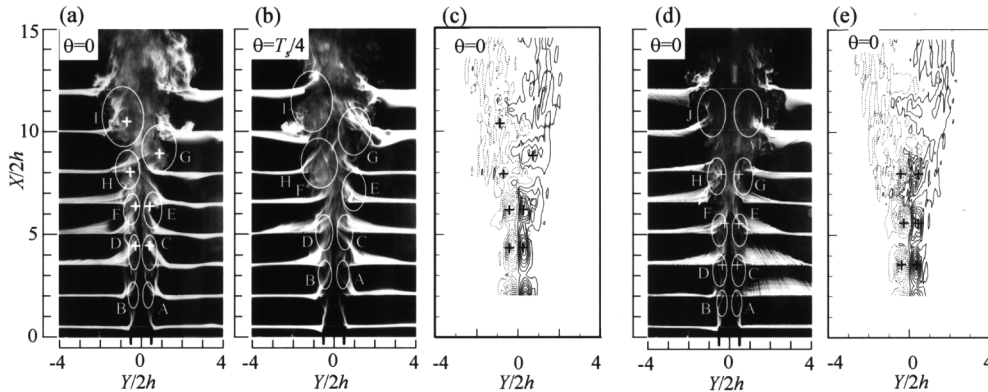


Fig. 2 Vortex arrangements for (a, b, c) $u_s/u_f=1$ at $\phi=0^\circ$ and (d, e) $u_s/u_f=1$ at $\phi=120^\circ$. (a, b, d) Smokewire visualization, (c, e) contour maps of $\langle \omega_z \rangle \cdot 2h/U_0$, the lowest level: 5×10^{-4} , the other levels: 1×10^{-3} steps, solid line: positive value, dotted line: negative value, +: vortex center.

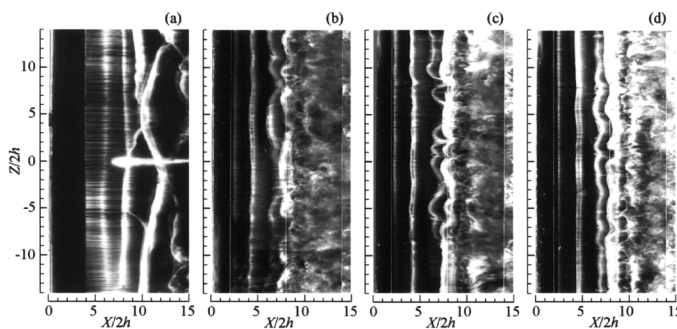


Fig. 3 Vortex tubes for non-excited (a) and excited jets of (b) $u_s/u_f=1$, $\phi=0^\circ$, (c) $u_s/u_f=2$, $\phi=0^\circ$ and (d) $u_s/u_f=1$, $\phi=120^\circ$.

次に、ロール渦の変形について説明するために、XZ断面の可視化写真を図3に示す。励起しない自然噴流の場合(図3a)、ロール渦が大きく湾曲しており、この写真では流れ方向に並ぶ渦同士が絡み付いているところが捉えられているが、この場合、図3(a)に示したような合体は不規則に発生していた。一方、バイモーダル励起した場合(図3b~d)、線形干渉領域($X/2h \leq 3$)では真直ぐなロール渦が、その下流で波状に変形している。図3(b), (c)はいずれも $\phi=0^\circ$ の場合であるが、 $X/2h=7 \sim 8$ 付近において波状に変形したロール渦同士が合体していることから、ロール渦の波状変形が合体を引き起こしていると考えられる。一方、 $\phi=120^\circ$ の場合(図3d)、非線形干渉領域でのロール渦は波状に変形するものの、流れ方向に並んだロール渦の変形が揃っているために、それらが合体せずに、乱流に遷移するため、乱雑化領域で崩壊している。

次に、リブ構造について説明するために、リブ構造が顕著に観察された $u_s/u_f=2$, $\phi=0^\circ$ の拡大写真を図4に示す。位相角 $\theta=0^\circ$ では Z 軸方向に軸を持つロール渦同士をつなぐように筋状の構造が観察でき、これはリブ構造であると考えられる。位相角 $\theta=45^\circ$ では、ロール渦が波状に変形して下流側に突き出た部分にリブ構造が観察でき、波状変形にリブ構造が重要な役割を果たしていることが考えられる。各励起条件について、約100枚の可視化写真から、波状変形の平均流れ方向スケール L_x 、および、平均鉛直方向スケール L_z を算出した(表2)。このスケールと奥出らの結果⁽⁶⁾を比較する。奥出らは、静水槽の中で円柱(直径 d)を回転させ、その近傍にできる渦との間隔 p/d と回転レイノルズ数 Re_r の関係を調べた。本研究のロール渦が回転円柱、それに巻きつくリブ構造を渦と考えると、回転レイノルズ数からリブ構造の間隔を推定してみる。本噴流場の場合、渦度分布(図2c)の渦Fについて検討すると、ロール渦の直径 $D \approx 1.1 \times 10^{-2} \text{m}$ 、循環 $\Gamma = 1.0 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ であ

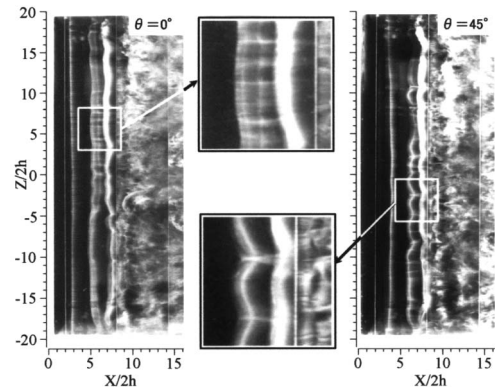


Fig. 4 Rib structure in the bimodally excited jet for $u_s/u_f=2$ and $\phi=0^\circ$.

Table 2 Streamwise and vertical scales of wavy structure.

u_s/u_f	$L_x/2h$	$L_z/2h$
1/1	1.0	3.0
2/1	1.3	2.7
3/1	2.3	2.4

り、それらから算出される回転の速度 $V=3.1 \times 10^{-2} \text{m/s}$ から、回転レイノルズ数は $Re_r=VD/\nu \sim 20$ であり、奥出の実験結果からリブ構造の間隔 p/d は4~5となる。ロール渦の直径は $D \approx 1.1 \times 10^{-2} \text{m} \approx 2h$ であることから、いま算出した $p/d=4 \sim 5$ は表2に示す $L_z/2h$ の値とほぼ同一のオーダーであり、ロール渦の回転によってリブ構造ができ、それがロール渦を歪めて三次元化するものと考えられる。

4. 結論

2次元噴流をバイモーダル励起し、ロール渦の変形と合体について明らかにした。バイモーダル励起の位相差 $\phi=0^\circ$ の場合、対称配列で流れ方向に並ぶ大小のロール渦の合体が噴流軸に対して左右交互に生じ、合体後の渦配列は逆対称配列に移行する。一方、 $\phi=120^\circ$ の時、渦の合体が定常的に起こらず、合体が生じなかった場合には対称配列の渦構造がより下流側まで維持された。渦の合体はロール渦の波状変形によって引起されるが、波状変形はロール渦を繋ぐリブ構造によって起こるものと考えられる。

参考文献

- (1) Makita, H., & Hasegawa, T., in *Eddy Structure Identification in Free Turbulent Shear Flows* (1993), 77, Kluwer
- (2) 関下・蒔田・三好, 日本流体力学会誌, 19 巻別冊 (2000), 523.
- (3) 三好・蒔田・関下・山口, 日本機械学会 2000 年度年度大会講演論文集IV, 00-1 (2000), 137.
- (4) 豊田・Hussain, F., 機論 B, 55-514 (1989), 1542.
- (5) 蒔田・大谷・石角, 機論 B, 54-504 (1988), 1938.
- (6) 奥出・大蔵・早藤, ながれ, 21 (2002), 78.