十字形噴流中の渦構造に関する研究*

豊田 国昭^{*1}, Fazle Hussain^{*2}

Study of Vortical Structures in a Cross-Shaped Jet

Kuniaki TOYODA and Fazle HUSSAIN

Vortical structures in a cross-shaped jet have been investigated, using a flow visualization technique by laser-fluorescent dye while controlling vortex evolutions under excitation. The corner regions of vortical structures close to the orifice undergo severe deformation due to the self-induced velocity; the outward corners become flat and the inward corners generate outward ejection. The excitation at low frequencies produces the large-scale vortical structures, the strong self-induced velocity switching over the normal and diagonal axes of the cross-shaped vortices. The deformed vortical structures are stretched under the effect of the mean flow, discharging small vortices from the tips of corners through the cut-and-connect mechanism. The vortex stretching and the splitting to small vortices in the cross-shaped vortical structures are expected to enhance mixing significantly.

Key Words: Jet, Flow Visualization, Turbulent Flow, Vortex, Coherent Structure, Cross-shaped Orifice

1. 緒 言

噴流中には大規模渦構造が存在し、噴流の特性はこの構造により支配されることが良く知られている⁽¹⁾⁽²⁾。とくに円形噴流について、渦構造の形成・成長・干渉過程が詳細に研究され構造の特徴が明らかにされつつある⁽³⁾⁽⁴⁾。一方、非円形噴流は混合促進などの工学的応用が近年注目され⁽⁵⁾、噴流の諸特性(平均流および乱流特性)が実験的に検討されているが⁽⁶⁾⁽⁷⁾、非円形噴流の諸特性も円形噴流の場合と同様に内部に存在する大規模渦構造の挙動に支配されることが予想されるので、非円形渦構造に注目した研究が必要である。Husainら⁽⁸⁾、豊田ら⁽⁹⁾は単純な形状(だ円、正方形、三角形、長方形)の非円形噴流について渦構造を実験的に検討し、噴流の断面形状の変化、混合特性は渦構造に支配されることを明らかにしている。これらの研究結果によると、渦構造の非円形性は噴流中の混合を著しく増大させることが期待される。本研究では、非

円形性の著しい十字形噴流について、渦構造の特徴を明らかにし、噴流の混合を増大させるための基礎資料を得ることを目的としている。

十字形噴流については、藤田ら⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾が大きなアスペクト比について平均流特性および乱流特性を詳細に検討しているが、渦構造については触れていない。十字形噴流中では、外向きおよび内向き角部から形成された渦構造が複雑な挙動を示すことが予想されるので、混合機構の詳細を知るためには渦の挙動に注目した研究が必要である。本報では、等しい辺を有する十字形オリフィスからの噴流について、外部励起法を用いて可視化法により渦構造の詳細を調べた。また、円形噴流との比較検討も行った。

2. 実験方法

図1に実験装置を示す。一定のヘッドを保つオーバーフロータンクからの水は整流部を通りオリフィスから測定部に噴出する。オリフィス形状は図2(a)に示すように等辺十字形および円形(直径 $D_e=50.8$ mm)で、開口面積は等しい。流れを可視化するために、蛍光染料(ウラニン)がオリフィス噴出口周辺部の細い溝部から流れに注入された。染料注入溝の詳細を図2(b)に示す。染料注入に際しては、流れを乱すことのない

* 平成元年7月14日 東海支部岐阜地方講演会において講演、原稿受付 昭和63年11月14日。

^{*1} 正員、北海道工業大学工学部 (〒006 札幌市西区手稲前田419-2)。

^{*2} Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Houston (Houston, Texas, 77004)。

ように注意深く流量が調整された。噴流は Ar-ion レーザ (出力 1~3 W) からのスリット光および円すい光により照射され、流れ方向および横方向断面、流れ場全体の渦構造が染料により可視化された。これらの映像は VHS ビデオテープに記録された後に解析された。

噴流構造に及ぼす外部励起の影響も調べるために、噴流は上流のオーバフロータンクに設けられた加振器により励起された。励起周波数 (f_e) は $f_n, f_n/2, f_n/4, f_n/8$ (f_n : オリフィス出口からのせん断層の自由振動数 = 3.75 Hz) である。オリフィス出口の平均速度 (U_e) は 2.9 cm/s, レイノルズ数 $Re = D_e U_e / \nu$ (ν : 動粘性係数) は 1.5×10^3 である。なお, U_e は染料の浮力効果が無視できる速度の最小値とした。

3. 実験結果および考察

3-1 外部励起のない場合 外部励起のない場合の十字形噴流の可視化結果 (角部付近, 流れ方向断面, 横方向断面) を図 3 に示す。図 3 (a) では, 内向き角部付近のみに染料を注入し渦構造が可視化されている。図中の X はオリフィス板内面からの下流方向距離である。オリフィス出口直後でせん断層の巻き上がりによる渦構造が形成され, 噴流境界の外向き角部は平坦になり, 内向き角部は噴流外側に激しく突出する。これらの挙動は, 図 4 に示すように, 角部を有する渦糸の自己誘導速度の影響による変形として説明される⁽¹²⁾⁽¹³⁾。内向き角部からの突出は下流に行くに従って激しくなり, 噴流内部の流体は外部に噴出し, 流れ方向の渦構造が形成され, 混合が促進されることにな

図 1 実験装置

図 2 オリフィス

る。十字形凸部では, 外向き角部から成長した渦構造が交わり突出部を形成する。このように, オリフィス直後で形成された十字形渦構造は激しく変形し, さらに下流では合体により大きな渦構造が形成される。この大規模渦構造は互いの干渉と噴流内外部への伸長に

(a) 角部付近

(b) 流れ方向断面

(c) 横方向断面

図 3 十字形噴流の可視化 (外部励起なし)

図 4 渦糸の変形モデル

より変形し下流で崩壊するが、これらの挙動は空間的・時間的に不規則である。

3・2 外部励起のある場合 噴流を外部から励起すると渦構造が強められ安定化され、十字形噴流中の渦構造の挙動が明確になる。また、現象の再現性は $X/D_e \leq 2$ の範囲で非常に良い。図5に $f_e = f_n$ で励起した場合の結果を示す。オリフィス直後の渦形成が強められ、図3に示す構造が顕著になる。出口直後で形成された渦の合体により大規模渦構造が形成され、さらに下流では再び合体し変形する。 $X/D_e = 2$ では、渦構造の突出部は引き裂かれて噴流外側に放出され、内部に新たな渦輪構造が形成されていることが推測される。なお、横方向断面写真は各位置を渦構造が通過する瞬間を示しており、流れ方向断面写真中の渦構造の位置に必ずしも対応していない。

$f_e = f_n/2$ で励起した場合の結果を図6に示す。励起効果によりオリフィス出口直後で安定な合体渦が形成

され変形する。内向き角部から突出した渦部は噴流外側に著しく伸長し先端部から小規模渦が分離しているように見える。下流 ($X/D_e = 3 \sim 4$) で形成された大規模渦構造は噴流内外部への伸長により崩壊し、崩壊直前 ($X/D_e \approx 4$) の大規模渦のストローハル数 $St = fD_e/U_e$ (f : 画像より求めた大規模渦の通過周波数) は $0.4 \sim 0.8$ で円形噴流の場合に近い値となる。

噴流を $f_e = f_n/4$ で励起するとさらに大きな十字形合体渦が形成され、合体渦は強い渦構造を保持しながら自己誘導速度により図7のように変形する。すなわち、凸部は下流内側方向に、凹部は上流外側方向に曲がり、その結果、渦構造の形状は初期の状態と凹凸が入れ替わることになる。渦構造は、平均速度と自己誘導速度の影響により噴流中心付近では下流方向に、外側では上流方向に著しく伸長し崩壊する。その際、図7(b-2), (c-3, 4)によると、凸部先端から小規模渦が分離しているように見える。

図5 励起効果 ($f_e = f_n$)

図6 励起効果 ($f_e = f_n/2$)

噴流を $f_e = f_n/8$ で励起するとさらに強い十字形合体渦構造がオリフィス直後に形成され、十分下流まで隣の渦と干渉することなく自己誘導速度の影響により図8のように変形する。凹部は、図8(a-2), (b-2)に見られるように、急激に噴流外側に突出し、突出部先端から小規模渦が放出される。小規模渦が大規模渦から分離した後には、渦の切断再結合過程により再び十字形渦構造が図8(b-3)のように形成される。また、形成直後の十字形渦構造の凸部は激しく下流内側方向に曲がり、その後、図8(a-1) $\Delta t_A = 1.49$, (b-4)によると、先端部からの小規模渦の分離が推測される。この分離は二つの角部だけに生じている。小規模渦を分離した後の十字形渦構造は自己誘導速度による変形を繰返し、図8(b-5)のように形状は初期の状態に戻る。これらの変形モデルを図9に示す。この変形は、外部励起のない場合の大規模渦構造においても予想され、十字形噴流中の渦構造の基本的特性のように思わ

図7 励起効果 ($f_e = f_n/4$)

れる。渦構造の分裂は、静止流体中の単一渦輪について実験的⁽¹⁴⁾および理論的⁽¹⁵⁾に確認されており、噴流中でも起こりうる現象である。噴流中では渦構造は平均速度場の影響を受けて変形するので、平均速度場のない単一渦輪の場合より渦の伸長が著しくなり、したがって、渦の分裂も伸長を伴いながら発生すると思わ

図8 励起効果 ($f_e = f_n/8$)

図9 十字形渦構造の変形モデル

図 10 円形噴流の可視化

れる。小規模渦への分裂は内外流体の接触面積を著しく増大し、混合を促進することになる。また、円形噴流中の渦構造の崩壊過程においても図9と同様の構造が予想され⁽¹⁶⁾、この構造の詳細を今後検討する必要がある。

3.3 円形噴流との比較 図10(a), (b)に円形噴流の可視化結果を示す。十字形噴流の場合と比較して、渦構造は下流まで安定で、外部励起($f_e = f_n$)により安定な合体渦が十分下流まで持続される。また、 $f_e = f_n/2 \sim f_n/8$ の場合にも十分下流($X/D_e \approx 6$)まで安定な合体渦が持続される。円形噴流と比較すると、十字形噴流では渦構造の変形・干渉・崩壊が著しくなり、混合の促進効果が期待される。

4. 結 論

十字形噴流中の渦構造を可視化法により検討し、以下に示す結果を得た。

(1) オリフィス出口直後に形成される十字形渦構造は自己誘導速度により変形し、外向き角部は平坦部に、内向き角部は外向き突出部になる。この構造は、噴流をせん断層の自由振動数 f_n で励起することにより著しく増幅される。

(2) 噴流を $f_e = f_n/4, f_n/8$ で励起すると強い十字形合体渦構造が形成され、合体渦は自己誘導速度により変形し、凹凸部が入れ替わる。

(3) $f_e = f_n/8$ で形成された渦構造は、凹凸部が入れ替わった後に、凹凸部の先端から小規模渦が分離し、新たに形成された十字形渦構造は凹凸部が再度入れ替わるように変形する。

(4) 十字形噴流では渦構造の変形・干渉・崩壊が激しいので、円形噴流と比べて著しい混合の増大が期待される。とくに、自己誘導速度と平均流の影響によ

る渦構造の伸長、小規模渦への分岐は混合を促進する。

本研究では可視化法により十字形噴流中の渦構造を検討したが、可視化結果の解釈には細心の注意を払った。とくに、静止画像による渦構造の誤解を避けるために、可視化画像の動的変化に注目して上記の検討を行った。可視化結果の解釈には限界があることは知られているが、本研究のような複雑な渦構造の本質を探り、さらに詳細な情報を得るための定量測定法を計画するためには、可視化法は極めて有効な手段と思われる。

本研究は著者の一人(豊田)がヒューストン大学滞在中に行ったもので、終始実験に協力した Dr. Hyder Husain, 大学院生 James Bridges に謝辞を表す。また、本研究遂行に対し激励をいただいた北海道工業大学、小橋安次郎教授、白浜芳朗講師に心から感謝する。

文 献

- (1) Crow, S. C. and Champagne, F. H., *J. Fluid Mech.*, **48** (1971), 547.
- (2) Yule, A. J., *J. Fluid Mech.*, **89** (1978), 413.
- (3) Hussain, A. K. M. F. and Zaman, K. B. M. Q., *J. Fluid Mech.*, **101** (1980), 493.
- (4) Hussain, A. K. M. F. and Zaman, K. B. M. Q., *J. Fluid Mech.*, **110** (1981), 39.
- (5) Hussain, A. K. M. F., *Proc. IUTAM Symp. on Turbulence Management and Relaminarization*, (1987), 107.
- (6) Gutmark, E., ほか4名, *AIAA paper*, 85-0543 (1985).
- (7) Tsuchiya, Y., ほか2名, *Proc. Turbulence Symp.*, (1984), 15, 1, Univ. of Missouri-Rolla.
- (8) Husain, H. and Hussain, A. K. M. F., *Phys. Fluids*, **26** (1983), 2763.
- (9) 豊田, Hussain, F., 乱流シンポジウム講演論文集, (1988-7), 171.
- (10) 藤田・ほか2名, 機論, **50**-458, B (1984), 2586.
- (11) 藤田・ほか2名, 機論, **51**-467, B (1985), 2281.
- (12) Arms, R. J. and Hama, F. R., *Phys. Fluids*, **8** (1965), 553.
- (13) 豊田・ほか2名, 機論, No. 882-2 (1988-9), 39.
- (14) Oshima, Y. and Asaka, S., *J. Phys. Soc. Jpn.*, **42** (1977), 708.
- (15) Takaki, R. and Hussain, A. K. M. F., *Turbulence Shear Flows*, **5** (1985), 3, 19.
- (16) Hussain, A. K. M. F., *J. Fluid Mech.*, **173** (1986), 303.