

二次元噴流の乱れの形成領域における縦渦構造の可視化

Visualization of the Streamwise Vortex Structure
in the Flow Development Region of Plane Jet

赤司 信義・石川 誠・斎藤 隆

By Nobuyoshi AKASHI, Makoto ISHIKAWA and Takashi SAITOU

Coherent structures in the flow development region of a plane jet are investigated using the technique of flow visualization. For the flow visualization of the cross-sectional view and the three-dimensional view, the methods using fluorescent dye illuminated by a laser light sheet and by a halogen light sheet are adopted. It is shown that the motion of the streamwise vortex structure and the spanwise vortex structure in the flow development region have a resemblance to those of the plane mixing layer which was investigated by Bernal and Roshko(1986). Further, it is deduced that the streamwise vortex structure is caused by the spanwise difference of velocity profile.

Keywords: streamwise vortex, coherent structure, plane jet, flow visualization

1. はじめに

噴流やブルーム、混合層等の自由せん断流において、組織渦は混合、希釈や連行現象に重要な役割を担っている。噴流やブルームの組織構造に関する研究は、これまでも数多くなされている^{1)~15)}。噴流の放出口近傍の流れの可視化によって、スパン方向に軸を持つ渦（これを本文では横渦と呼ぶことにする）が形成され⁸⁾、横渦は流下するにつれて大規模化して合体を経て崩壊していくことや横渦の形成には放出条件によって対称モードと非対称モードになる場合のあること等^{9)~12)}が、明らかにされている。Roshkoら¹⁶⁾は、二次元混合層を対象にして、流れ方向に切断した縦断面とそれに直交する横断面と水平断面の形象を撮影し、縦渦構造に関する興味深い結果を得ている。また、著者らは¹⁷⁾突入流れの水面付近の渦構造の可視化観察によって、スパン方向にほぼ等間隔に流れ方向に軸を持つ渦構造（縦渦と呼ぶ）が発生することを見いだした。しかし、二次元噴流の組織構造、特に、縦渦構造を、主流に垂直な断面の可視化を行って、考察した研究は見あたらない。

本研究は、二次元噴流の乱れの形成領域を対象にして、主流に垂直な断面の可視化、主流に平行な方向の縦断面の可視化、及び、斜め前方からの立体的な可視化を蛍光染料注入法によって行い、二次元噴流の組織構造を三次元的に考察したものである。

* 正会員 工博 西日本工業大学教授 工学部土木工学科 (〒800-03 福岡県京都郡苅田町新津 1633)

** 正会員 西日本工業大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台)

2. 実験装置と実験方法

実験装置は、図1に示すように、長さ3 m、高さ0.7 m、水槽内寸幅0.2 mの両面ガラス張りの鋼枠製水槽で、水槽中央にアクリルガラスで作製された幅1 cmのノズルが設置されている。ノズル室内には4 mmセル、高さ3 cmのハニカムを設置した。実験は、ノズル室より空気を追い出した後、ノズル口での噴出流速 u_0 を7～60 cm/secの範囲内で設定して行われた。蛍光染料には比重1.002のフルオレセインナトリウム水溶液を用いた。この蛍光染料はノズル室上部の管路部より20～30 sec(総量で300 cc程度)注入し、ノズルより染料が放出される前に注入を停止した。従って、撮影を行っているときの比重は1.002よりさらに小さくなっている。撮影は、その方法を図2に概略的に描いているように、流下方向に垂直な水平断面(横断面と呼ぶ)とそれに直交する水路中央の断面(縦断面と呼ぶ)、及び、水路斜め前方から噴出の全体像について行われた。横断面可視化は、ノズルから1、2、3、4 cmの断面で行われた。それぞれの方向からの可視化を横断面視、縦断面視、立体視と呼ぶことにする。

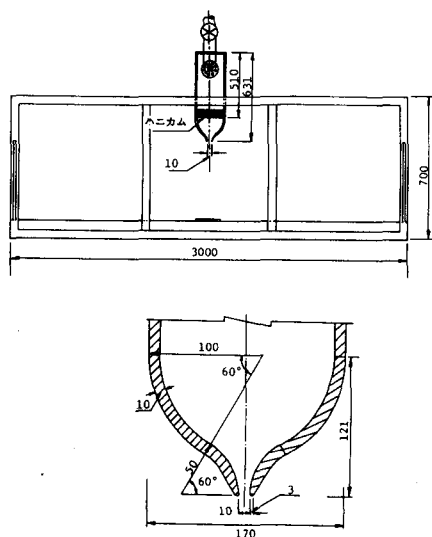


図1 実験装置の概略

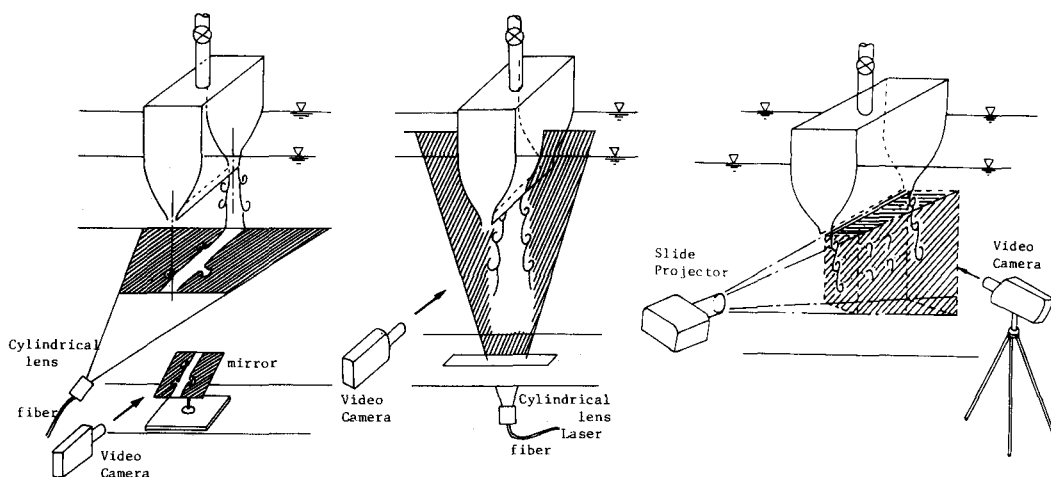


図2 横断面視、縦断面視、立体視の撮影方法

横断面視と縦断面視の場合、染料が水槽内で拡散され、ほぼ均一に混合され、ノズルより染料が放出されなくなってから撮影を行った。また、横断面視と縦断面視の場合、可視化には、2 Wのアルゴンイオンレーザを光ファイバーを通じてシリンドリカルレンズへと導いて得られるレーザーライトシートを使用した。立体視の場合は、染料が放出されている状態を撮影し、出力300 W、スリット幅10 mmのスライドプロジェクターを使用し、噴流の片側だけを、噴流の界面が明瞭に浮かび上がるような方向を選んで、照射した。撮影には、横断面視、縦断面視、立体視共、接写レンズを装着したビデオカメラを使用した。

3. 実験結果とその考察

実験条件を、噴出速度 u_0 が 7 の場合を U7、30 の場合を U30 のように呼ぶ。

写真1は、U7、U15、U30 の場合の立体視を示したものである。スパン方向は全幅 20 cm が撮影されている。いずれもノズル付近は、非常に滑らかな噴出状態になっていて、スパン方向に軸を持つ渦（横渦と呼ぶ）が、ほとんど横一線に発生し、流下するにつれてその渦が大きくなることが明瞭に認められる。また、噴出速度

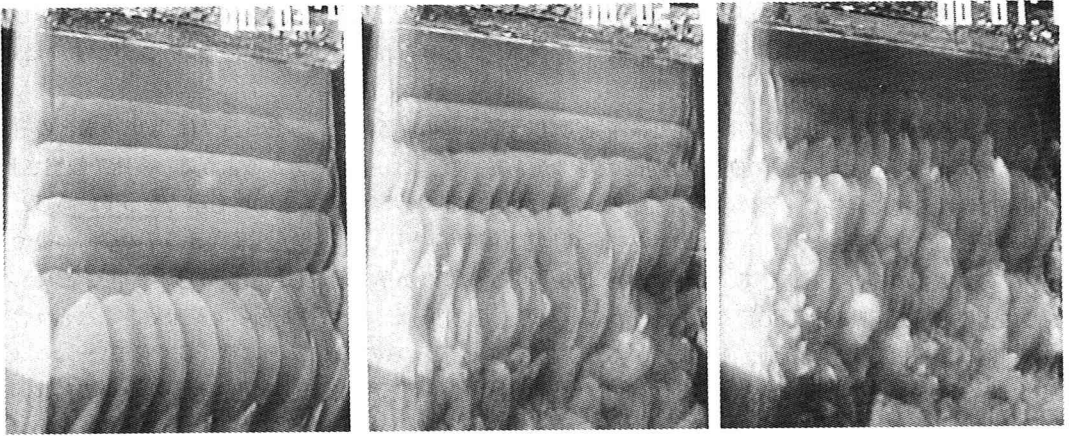


写真1 斜め前方からの立体視（左から U7、U15、U30 の条件）

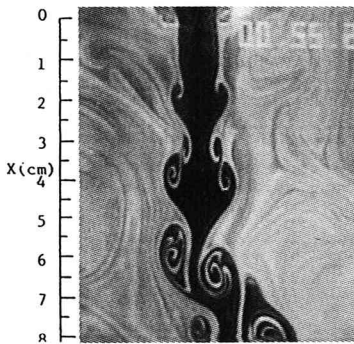


写真2 U7 の縦断面視

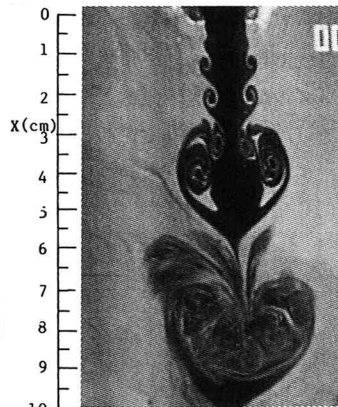


写真4 U15 の縦断面視

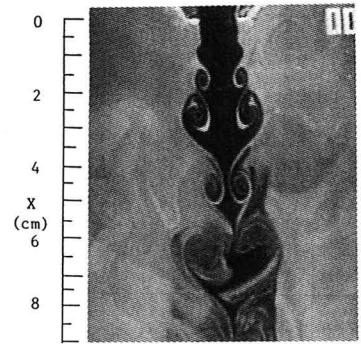


写真6 U30 の縦断面視

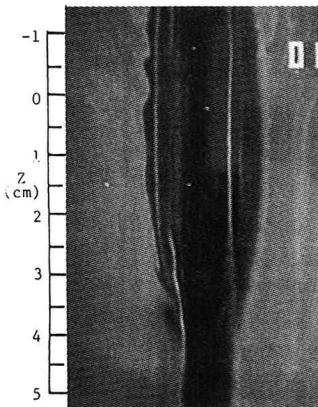


写真3 U7 の横断面視

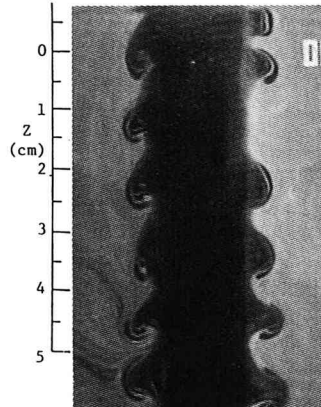


写真5 U15 の横断面視

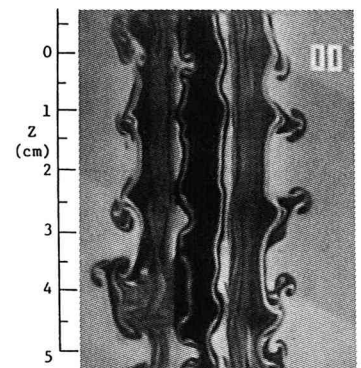


写真7 U30 の横断面視

が大きくなると、横渦の発達是不明瞭になり、ノズル近くで崩壊するようになる。一方、横渦に直交する縦筋模様（縦筋をリブと呼ぶ）も明瞭に認められ、流速が小さいほどリブが横渦におおいかぶさる様な構造になっていることが分かる。リブは、U7 の場合、魚の背びれのようにくつきりと認められ、U15、U30 と流速が大きくなるにつれて、リブのスケールは小さく、ノズルから遠ざかるにつれて、乱雑化する様子が認められる。U60 の場合は、U30 よりもさらに小規模化、乱雑化していた。

写真2、3は、U7 の場合の縦断面視と横断面視（ $X = 4 \text{ cm}$ の位置）を示したものである。この写真から分かるように、U7 の場合 $X = 4 \text{ cm}$ の横断面には縦渦の形成は見られないが、横渦の振幅がスパン方向に変化していることが分かる。

写真4、5は、U15 の場合の縦断面視と横断面視（ $X = 4 \text{ cm}$ の位置）を、写真6、7は U30 の場合の縦断面視と横断面視（ $X = 4 \text{ cm}$ の位置）を示したものである。写真4、6から分かるように、縦断で観察される横渦はほぼ対称に発生し、合体の後に崩壊し、流速が 15、30 と大きくなると崩壊も早くなっていることが認められる。写真5、7は、ともに $X = 4 \text{ cm}$ の位置の横断面を示しているが、写真5、7の縦断面視や写真1の立体視の場合と対応して、U15 よりも U30 の方が、横渦が早く崩壊し、縦渦の形成も早くなり、ノズルに近い位置で、乱雑化して行くことが分かる。なお、写真3、5、7の横断面視の結果は、二次元混合層の組織構造を横断面、縦断面、平面について可視化した Roshko らの画像¹⁶⁾と非常に良く似ている。この類似は、ノズル近傍でのポテンシャルコア領域では左右独立に発生した渦同士の相互干渉が少ない事に起因しているものと考えられる。

図3～6は、撮影された画像から読み取って図示したものである。

図3は、U7 の場合と U15 の場合について縦断面視を基に、横渦の走時曲線を示したものである。U15 の場合の方が横渦の合体がノズルに近い位置で起こり、横渦の発生周波数や合体の周波数の高いことが分かる。

図4は、U7 の場合と U15 の場合のノズルからの流下距離 $X = 4 \text{ cm}$ の位置（ $Z = 0$ ）での横断面視を基にノズルから噴出された水が周囲水を $1/60 \text{ sec}$ 刻みで判別して 4 秒間について求められた間欠性係数を示したものである。

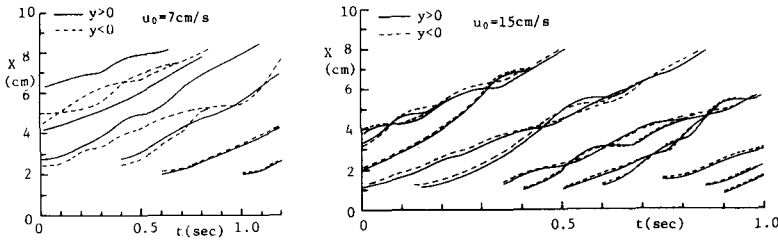


図3 横渦の走時曲線（左が U7、右が U15）

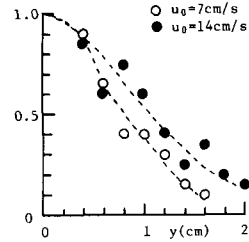


図4 間欠性係数

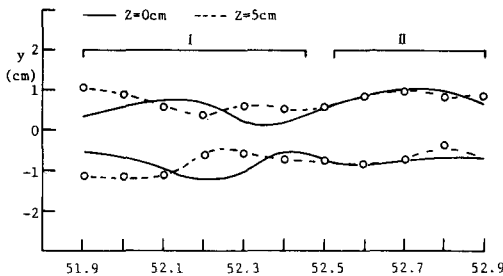


図5 U7 の場合の界面幅のスパン方向変化

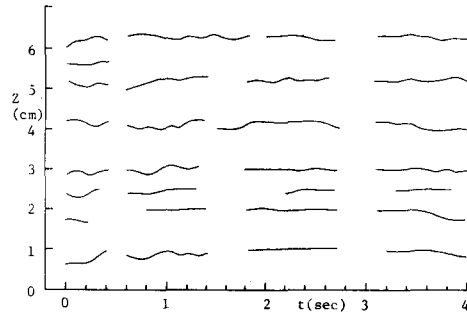


図6 縦渦の位置の時間的変化

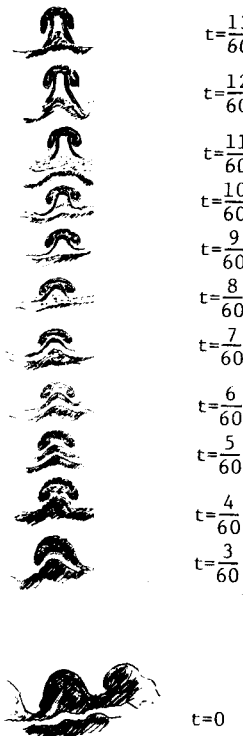


図7 縦渦の形成過程

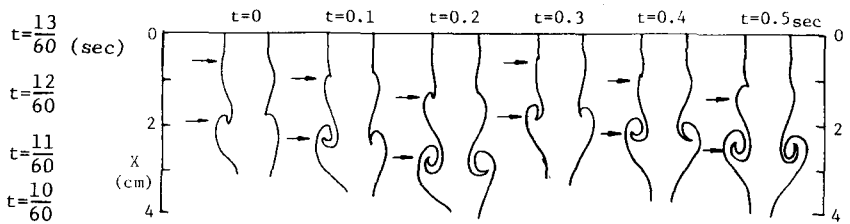


図8 横渦の形成過程

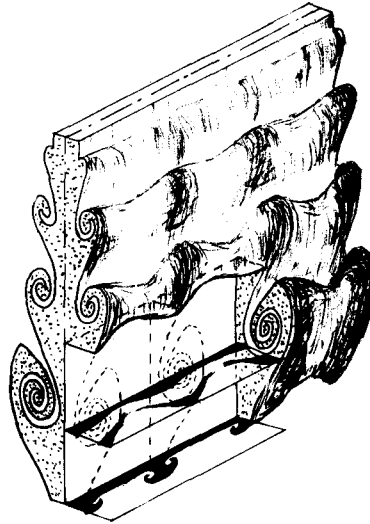


図9 渦構造の立体的モデル

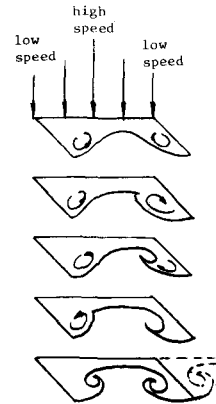


図10 縦渦対の形成

これまでに言われるように、分布曲線はガウス分布曲線を示していることが分かる。図5は、U7 の場合の横断面視を基にして、水路中央 ($Z = 0 \text{ cm}$) と水路の 1/4 幅の位置 ($Z = 5 \text{ cm}$) の噴流の界面幅の時間的変化を 1 秒間について示したものである。写真3で見たように、横断方向の界面幅は一定ではなく、スパン方向に振動していることが分かる。平板に沿う境界層の層流から乱流への遷移の場合、遷移の最初の段階で二次元的なトルミン波が下流に向かって振幅を増し、振幅がある程度まで増加すると、波動の振幅が横断方向にほぼ周期的に変化し、この振幅の変化によって、流れ方向に軸を持ち、交互に回転の向きが変わる縦渦の配列が発生する事¹⁸⁾が知られている。写真3で見たような振幅の変動とこれに続いて下流に発生する縦渦の形成構造は、この平板境界層の遷移の現象に類似しているのは、興味深い。

図6は、U15 の場合の横断面視を基に縦渦のスパン方向の位置を時間的に追いかけたものである。写真1からも推察できるが、縦渦のスパン方向の変動は非常に少ないことが分かる。

図7は、U15 の場合について横断面視を基に、縦渦の形状を 1/60 秒毎にトレースして示したものである。 $t = 0$ の場合、縦渦と言うよりは、単に界面が湾曲しているだけとみても差し支えない。しかし、時間が経過するにつれて、流れ方向に軸を持ち、互いに回転の向きの異なる渦対になっていくことがよく分かる。

図8は、U7 の場合の縦断面視を基に横渦の形成過程を時間的に追いかけたもので、ポテンシャルコア部に周期的にくさびを打ち込む様にして、横渦が発生する事が認められる。図9は、渦構造の立体的モデルを示したものである。スパン方向の噴出速度のわずかな違いによって、横渦の進行速度は異なり、高速流体は低速側へと押し広がるように流下して、リップ構造を形成するものと考えられる。スパン方向に、高速部と低速部が配置されれば、主流方向に軸を持つ螺旋渦を形成するはずである。そして、この螺旋渦は、図10に示すような横断面の変形をもたらし、結果として、きのこ状の縦渦対を形成するものと考えられる。

4. おわりに

二次元噴流の乱れの形成領域における組織構造を横断面視、縦断面視、並びに立体視によって、可視化し、横渦、縦渦の構造が明瞭に観測された。そして、横断面視、縦断面視の結果を基に、縦渦構造の形成過程を考察し、スパン方向の速度差に起因して、縦渦構造が観察されるものと推察された。今後、さらに可視化を行い、二次元噴流の乱れの形成領域における組織構造の定量的評価へと進めて行きたい。なお、本研究は、文部省科学研究費総合研究(A)の補助を受けて、進められたもので、記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Sato, H.: The stability and transition of a two-dimensional jet, J. Fluid Mech., Vol.7, pp.53-80, 1960.
- 2) Cervantes, G.J.G. and Goldshmidt, V.W.: The apparent flapping motion of a turbulent plane jet - Further experimental results, Trans. ASME I, J. Fluids Eng., Vol.103, pp.119-126, 1981.
- 3) Mumford, J.C.: The structure of the large eddies in fully developed turbulent shear flows, Part 1, The plane jet, J. Fluid Mech., Vol.118, pp.241-268, 1982.
- 4) Antonia, R.A., Browne, L.W.B., Rajagopalan, S. and Chambers, A.J.: On the organized motion of a turbulent plane jet, J. Fluid Mech., Vol.134, pp.49-66, 1983.
- 5) Perry, A.E. and Chong, M.S.: A description of eddying motions and flow patterns using critical-point concepts, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol.19, pp.125-155, 1987.
- 6) Cantwell, B.J.: Organized motion in turbulent flow, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol.13, pp.457-515, 1981.
- 7) 玉井信行・祢津家久・小松利光・大成博文・大橋正和・浅枝 隆: 乱流における組織構造の役割、土木学会論文集、No.423/II-14, pp.25-41, 1990.
- 8) Rockwell, D.O. and Niccolis, W.O.: Natural breakdown of planar jets, Trans. ASME, J. Basic Eng., Vol.94, pp.720-730, 1972.
- 9) 福岡捷二・佐藤郁太郎: 二次元噴流中のオーガナイズド・モーションの構造とその水理学的役割、土木学会論文報告集、Vol.277, pp.71-83, 1978.
- 10) 中川博次・祢津家久、ほか: 水素気泡法による 2 次元噴流の組織だった渦運動の可視化、第 8 回流れの可視化シンポジウム、pp.103-108, 1980.
- 11) 小松利光・浦 勝・後藤俊一: 2 次元密度 plume における組織渦の構造と連行現象、第 28 回水理講演会論文集、pp.311-319, 1984.
- 12) Clerk, J.A. and Kit, L.: Shear layer transition and the sharp-edged orifice, Trans. ASME, J. Fluids Eng., Vol.102, pp.219-225, 1980.
- 13) 室田 明・中辻啓二・玉井昌宏: 二次元フォーストブルームの大規模渦運動、第 30 回水理講演会論文集、pp.649-654, 1986.
- 14) 室田 明・中辻啓二・浅田浩章: 二次元フォーストブルームの完全発達領域における組織的構造と連行機構に関する研究、土木学会論文集、Vol.405/II-11, pp.165-174, 1989.
- 15) 室田 明・中辻啓二: ジェットとブルーム、土木学会論文集、No.429/II-15, pp.1-15, 1991.
- 16) Bernal, L.P. and Roshko, A.: Streamwise vortex structure in plane mixing layers, J. Fluid Mech., Vol.170, pp.499-525, 1986.
- 17) 赤司信義、石川 誠: 段落ち落水水によって形成される噴流の水面付近の渦構造に関する実験的考察、西日本工業大学紀要理工学編、Vol.22, pp.27-34, 1992.
- 18) 谷 一郎 編: 流体力学の進歩 乱流、丸善(株)、p.13, 1980.