1 二次元噴流の放出口近傍の組織的な渦構造

西日本工業大学 赤司 信義^{*}、石川 誠
山口大学工学部 斎藤 隆

Coherent Structure in the flow development region of Plane Jet

Nobuyoshi AKASHI^{*}, Makoto ISHIKAWA^{*} and Takashi SAITOU^{**}

Coherent Structures in the flow development region of a plane jet were 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 a halogen light sheet were adopted. It was shown that the streamwise vortex, which has a counter-rotating vortex structure named rib-structure, is formed in the process of the development of the two-dimensional roll-up of the instability wave in the flow development region.

1. はじめに

著者らは、これまでに開水路落ち落下水による突入流れの水面付近の渦構造を可視化し、スパン方向にほぼ等間隔に流れ方向に軸を持つ渦構造（これを本文では縦渦と呼ぶ）が発生することを見いだした¹⁾。また、そこでは、従来の内外の研究で示されているスパン方向に軸を持つ渦構造（これを本文では横渦と呼ぶ）も可視化され、横渦は流下するにつれて大規模化して合体を経て、崩壊していくこと等が観察された。一方、可視化手法を用いた二次元噴流の組織構造に関する研究もこれまで数多くなされている^{2), 3)}。しかし、主流に垂直な断面の可視化を行って、縦渦構造を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、横渦と縦渦の形成過程を、可視化を行って観察し、どのような過程で縦渦構造が出現するのかを三次元的に考察したものである。

2. 実験装置と実験方法

実験装置は、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。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。撮影は、その方法を図 2 に概略的に描いているように、流れ方向に垂直な水平断面（横断面）とそれに直交する水路中央の断面（縦断面）、及び、水路斜め前方からの全体像について行われた。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。横断面視は、ノズル直下に 7 cm x 5 cm の鏡を水槽手前に 45° 傾けて設置し、この鏡に写る像を撮影した。横断面視と縦断面

^{*} Faculty of Engineering, Nishinippon Institute of Technology, Kanda-machi, Miyakogun, Fukuoka, 800-03, Japan

^{**} Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Tokiwadai, Ube, Yamaguchi, 755, Japan

視の場合、可視化には、2 W のアルゴンレーザーライトシートを使用した。そして、横断面視と縦断面視の場合、染料が水槽内で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。立体視の場合は、出力 300W のスライドプロジェクターを使用し、スリット幅を 10 mm にして、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、染料が放出されている状態を撮影した。撮影には、接写レンズを装着したビデオカメラを使用した。なお、本文中の写真はビデオモニターの画像を 35mm カメラで撮影したものである。

図1 実験装置の概略

3. 実験結果とその考察

噴出速度が 7cm/sec の場合を U7、30 cm/sec の場合を U30 のように呼ぶ。写真 1、2、3 は、それぞれ U7、U15、U30 の場合の立体視を示したものである。スパン方向の全幅 20cm が撮影されている。いずれもノズル付近では、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横渦が、ほとんど横一線に

発生し、流下するにつれて (1) 横断面視 (2) 縦断面視 (3) 立体視 その渦が大きくなるのが明瞭に認められる。また、噴出速度が大きくなるにつれて、横渦の流れ方向のスケールが短くなる事に関連して、横渦の発達が不明瞭になり、ノズル近くで崩壊するようになる事も観察される。この写真から、さら

図2 撮影方法の概略

写真1 U7 の立体視

写真2 U15 の立体視

写真3 U30 の立体視

写真4 U15 の縦断面視

に、特徴的な現象を読み取ることができる。それは、横渦に直交する縦筋模様である。この縦筋をリブと呼ぶ事にする。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、U15、U30 と流速が大きくなるにつれて、リブの流れ方向のスケールは小さく、間隔が密になっていき、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。

写真4は、U15の場合の縦断面視を1/10秒毎に示したものである。

これらの写真中には、各写真の渦の対応を見やす

写真5 U15 の横断面視

くするために、同じ渦には同じ記号をつけている。さて、これらの写真から読み取られる特徴が二つ挙げられる。一つは、渦の合体パターンがあるということである。ノズル近くで合体する場合には、 $t = 0.0, 0.1$ sec の写真のAの渦のように、横渦がそれほど大きく成長していないため、合体しても横渦の丸みを帯びた形状の変化はあまりなく、渦同士が互いの後を追うように回転しながら合体している。成長した横渦が合体する場合、 $t = 0.2$ sec の写真のAのように、もとの横渦をいったん外側に押し出すようになるため、もとの横渦は一部取り残されたような形で、偏平な楕円渦が互いに回転しながら合体してい

る。もう一つの特徴は、これらの写真から一目瞭然であるが、ノズルから 7 cm 程度までは、はっきりと横渦を認識できるのであるが、それより先では、一気に横渦構造が崩壊していることである。このあたりまでが、一般に言われている噴流のポテンシャルコア領域と考える。横渦構造の崩壊は、横渦とリブが成長し、互いに合体して捻れて絡み合うことによるものと考えられ、このようにして乱れの完全発達領域が形成されるものと考ええる。

写真5は、横渦とリブ構造との関連を見るため、U15 の場合の横断面視（ノズルからの距離 $X = 4$ cm の断面）を 1/20 sec 毎に示したものである。ただし、最後の2枚は時間をとばしている。 $Z = 0$ は水槽幅 20 cm の中央である。 $t = 0.0$ sec の写真では、白い直線的な帯が4本見える。これは横渦によって巻き込まれる周囲水を示している。黒い色の部分がノズルから放出されている水である。 $t = 0.15$ sec の写真のように、中心軸より片側に1本しか見えない場合は、成長した横渦の合体時に生じる渦の一部と見られる。なお、左右の界面で挟まれる混合部分（噴流を乱流部と非乱流部に分ければ乱流部に相当する）の幅を界面幅と呼ぶことにする。スパン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はこれらの写真から明らかである。立体視で見たように、リブのスパン方向の発生位置は時間的にあまり変化しないため、 $t = 0.15$ sec の写真の次に来る横渦も同じ位置に山と谷を持つ波状界面を有していて、この横渦の通過によって、取り残された山は再度振動させられる。波状界面の山と谷は、低速部と高速部になっていて、高速部から低速部に向かうらせん流的な流動形態を示し、低速部が両側の高速部に押し出されるようにして、 $t = 0.50$ sec の写真に見られるような縦渦構造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の可視化によって、横渦、縦渦の三次元構造が明瞭に観察された。噴出速度を大きくすると、界面幅の変動がスパン方向に、流下方向に大きくなると共に、縦渦構造が噴流の中央内部にまで侵入した状態で混合されていることが分かった。また、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、縦渦構造が形成されることが推察された。

参考文献

- 1) 赤司 信義、石川 誠：段落ち落下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、Vol.22, pp.27-34, 1992.
- 2) Rockwell, D.O. and Niccolls, W.O.: Natural breakdown of planar jets, Trans. ASME, J. Basic Eng., Vol.94, pp.720-730, 1972.
- 3) 中川博次・苅津家久、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.
- 4) 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.
- 5) 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.