

## LDV による開水路流れの速度ベクトル計測について (4)

今本 博健・石垣 泰輔

### VELOCITY VECTOR MEASUREMENT BY LASER DOPPLER VELOCIMETER IN AN OPEN CHANNEL FLOW (4)

By *Hirotake* IMAMOTO and *Taisuke* ISHIGAKI

#### Synopsis

A fully turbulent flow in an open channel has a three dimensional structure, and a depth-scale eddy motion can be observed by using a flow visualization technique. Secondary flows and bursting phenomena are important in these eddy motions. To investigate the phenomena, the velocity vector measurement with 2 sets of LDV and the neutral tracer method by using LLS were used in our previous works.

In this paper, it is a purpose to explain the origin and developing-process of these depth-scale eddy motions. The explanation has been achieved by taking account of a vortex sheet model near the channel bed. New technique of a flow visualization by using 2 colour LLS was used.

#### 1. はじめに

本研究は、開水路流れに見られる水深規模の3次元渦運動を検討することを目的としている。現象を支配する素過程として検討すべきものは、二次流とそれにより誘起される縦渦、および壁面近傍の bursting 現象が考えられる。本研究では前者に着目し、壁面近傍を除く主流部に見られる水深規模の渦運動について実験的検討を行って来た。<sup>1)~6)</sup> 実験は、レーザ・ドップラ流速計 (LDV) を用いた速度3成分同時計測 (速度ベクトル計測法) およびレーザ・ライト・シート (LLS) を用いた中立粒子トレーサ法による流れの可視化を行い、滑面および粗面開水路における2次元流れおよび低アスペクト比を有する水路の側壁近傍の3次元流れについて検討して来た。その結果、Fig. 1 に示す水深規模の渦運動が基本的な挙動であるという結論に達した。本報は、図に示した大規模な渦運動の発生・発達過程を説明するモデルを示すものである。

#### 2. 開水路流れにおける二次流の役割

開水路流れに見られる二次流は、Prandtl の分類に従えば主流の曲りにより引き起される第一種の二次流と乱れの非一様性に起因する第二種の二次流に分けられる。本研究が対象としている直線開水路の充分に発達した乱流では第二種の二次流が存在し、その役割についてまとめると Fig. 2 のようになる。

すなわち、流れの構造を決定する一次的要因 (図中 A の部分) と、現象として捉えられるとともに、それ自体が流れの構造を決定する二次的要因となる図中 C の部分との仲介役を果すものが二次流とそれ

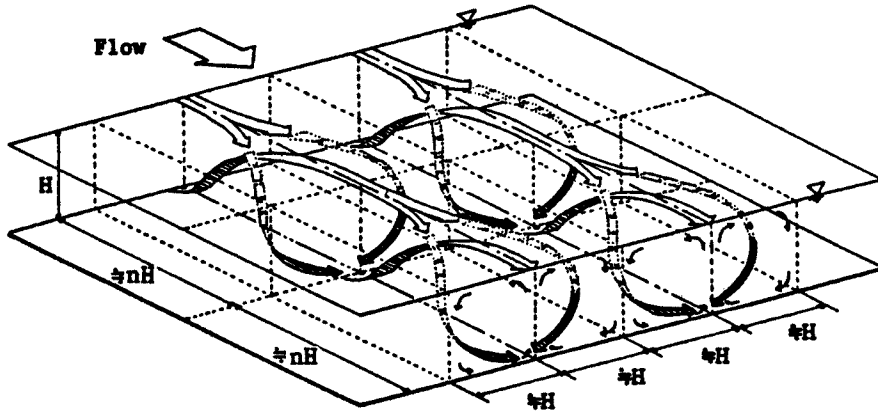


Fig. 1. Depth-scale longitudinal eddy-motion in an open channel flow.  
(Three dimensional spiral model)

に関連する現象（図中Bの部分）であるという図式を抽くことが出来る。Aの部分、流れの構造が水理条件（開水路流れではレイノルズ数  $Re$ 、フルード数  $Fr$  および粗度高  $k_s$ ）と幾可学的条件（断面形状など）で決定されることを示している。これらの条件が、Reynolds 応力および圧力の局所的勾配を生ずる原因となりBの部分との関連が説明される。すなわち、定常状態のレイノルズ数が大きな一様開水路流れの平均流に対する Reynolds 方程式は、

$$\bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z} \dots\dots\dots (1)$$

$$\bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}'^2}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}'w'}{\partial z} \dots\dots\dots (2)$$

$$\bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - \frac{\partial \bar{v}'w'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{w}'^2}{\partial z} \dots\dots\dots (3)$$

と表わされ、これより、圧力項および Reynolds 応力項の差が二次流を誘起することが分かる。このように考えると、二次流の発生原因は幾可学的条件などが引き起す乱れの非一様性および局所的圧力勾配であり、二次流の構造が上流側の流れの履歴に依存するという推測が可能となる。この点については今後詳細な検討が必要である。

一方、上記した方程式より二次流の存在は Reynolds 応力の分布に影響を与え、平均速度分布、壁面せん断力分布および乱れエネルギーの分布を変形させるという結論が導かれる。これらがCの部分、すなわち、現象として捉えられる項目との関係を説明するものである。さらに、河床形態の形成および流砂現象は、壁面せん断力分布および乱れエネルギーの分布に影響を及ぼすことにより二次流の形態を変え、それにより流れの構造を変化させることになる。したがって、ここに示した図の各項目は相互に関連を持つものであり、二次流がこれらの現象を仲介する重要な現象であることが示される。

### 3. 水深規模の渦運動の発生・発達過程

#### 3.1 渦運動の鉛直構造

Fig. 1 に示した流れの3次元構造は、水平および縦断面における可視化結果および二次流ベクトルの計測結果にもとづいて推定したものである。ここでは、2色のレーザ・ライト・シートを用いた中立粒子

トレーサ法により鉛直高さの異なる2層での同時流況可視化を行なって鉛直方向の構造について検討し、Fig. 1に示したモデルの妥当性を確かめる。

(1) 実験装置および方法

レーザー光はコヒーレントでしかも均一の波長を有する光が得られるため、近年、多くの分野で利用されている。流れの可視化の分野でも均質でシート状の照明光が比較的容易に得られることより利用者が増えて来ている。ここに用いたレーザー光はアルゴンガスレーザーであり、発振される数種の波長の中で、 $0.5145\ \mu\text{m}$ の緑色光と $0.4880\ \mu\text{m}$ の青色光を分光器で分離して用いている。Fig. 3は流れの可視化装置を示したものであって、光源より出力された光を分光器で青と緑の2色に分け、複数の表面反射鏡を用いて任意の可視化断面高さに設定した後、シリンダカル・レンズを通して水路床に平行な厚さ3mm程度のシート光を作り出している。このシート光により、流れに注入した平均粒径0.45mm、比重1.05のポリスチレン粒子を照明し、水路上を断面平均流速と同速度で移動する35mmスチルカメラで流況を撮影した。なお、撮影にはカラーリバーサルフィルムを用いるとともに、レーザー光をマイコンにより制御した回転遮蔽ドラムにより遮断し、粒子の移動方向を可視化する工夫を用いている。

(2) 流れの可視化結果

Fig. 4 (a)は、水面付近( $y/H=0.9$ )および半水深( $y/H=0.5$ )における水平断面流況の同時可視化結果であり、 $y/H=0.9$ の水平断面におけるトレーサのパスライン(Blue)を実線で、 $y/H=0.5$ の水平断面におけるパスライン(Green)を破線で示している。なお、水理条件は、水路幅20cm、水深3.97cm、水路勾配1/500、 $Re$ 数7100、 $Fr$ 数0.47である。図より、この2層におけるトレーサはほぼ同様の動きをしており、2層間の相関が高く、鉛直方向に連続した構造の存在が示唆され、乱れが局所的な過程

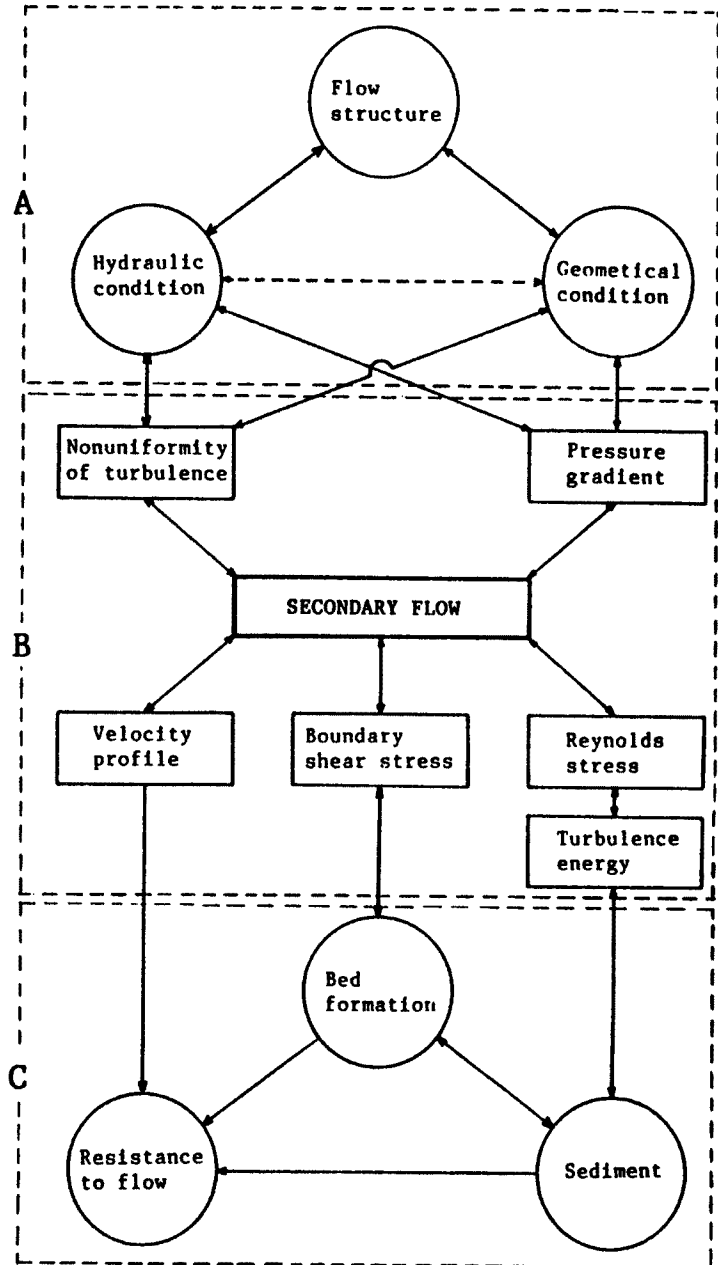


Fig. 2. Role of secondary flows in an open channel.

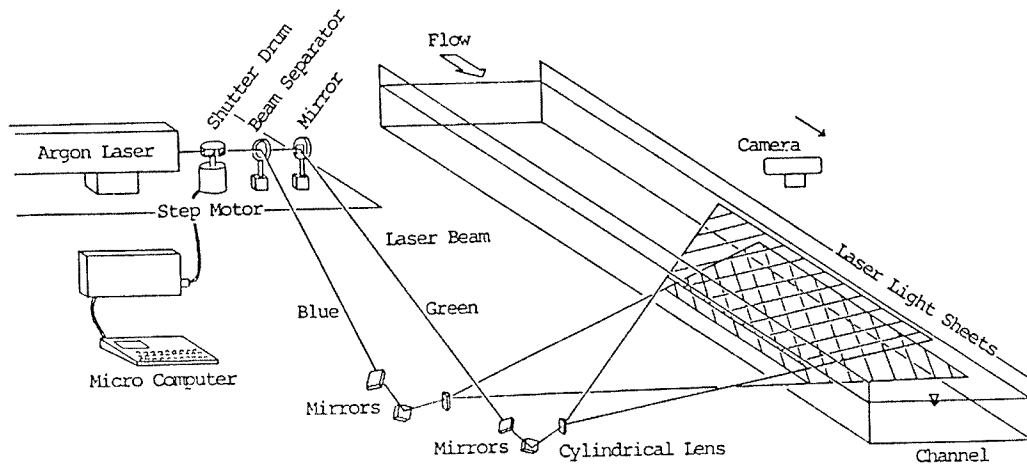
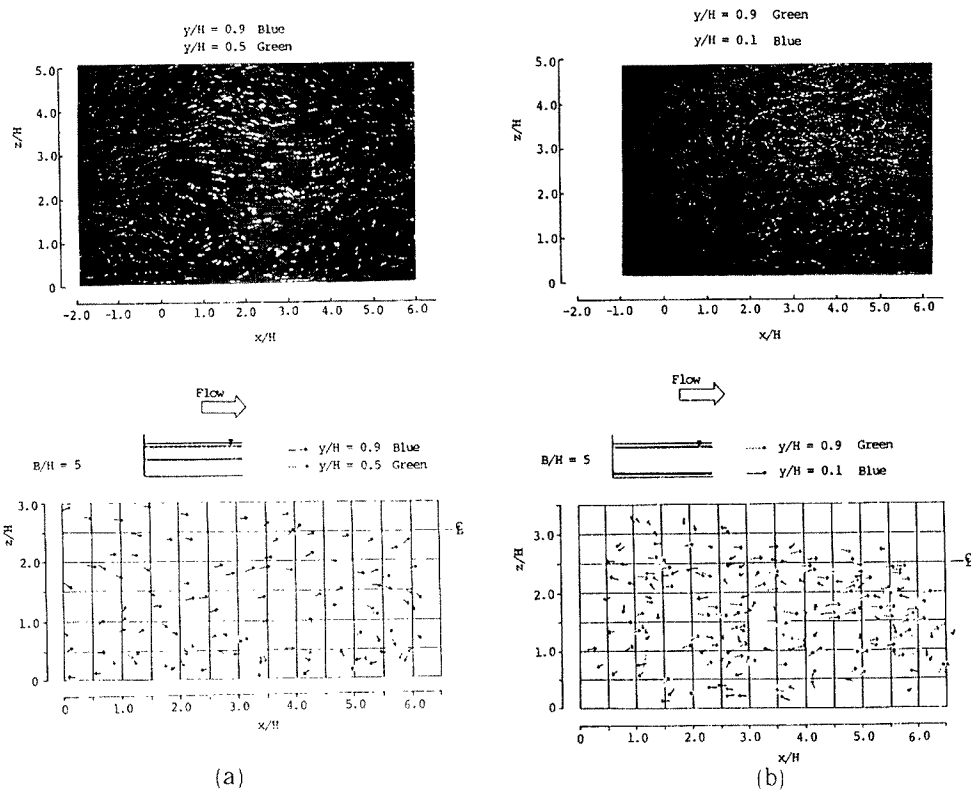


Fig. 3. Experimental set-up for a tracer method by using 2 colour LLS.



(a)

Fig. 4 (a). Pass lines of neutral tracers.

(rigid lines:  $y/H=0.9$ , dotted lines:  $y/H=0.5$ )

Fig. 4 (b). Pass lines of neutral tracers.

(rigid lines:  $y/H=0.1$ , dotted lines:  $y/H=0.9$ )

でないことを示している。

一方, Fig. 4 (b) は水面付近 ( $y/H=0.9$ , Green) と路床付近 ( $y/H=0.1$ , Blue) における水平断面流況の同時可視化結果を示したものである。2層の速度が異なるため, 破線で示した水面付近のトレーサは右向き, 実線で示した路床付近のトレーサは左向きになっている。横断方向の動きについては,  $z/H=2.5$  の水路中心線付近では水面付近のトレーサ (破線) が流れ方向に平行であるのに対し, 路床付近のトレーサ (実線) は中心線に集まる動きを見せている。また,  $z/H=1.5$  の位置で流下方向に見ると, 水

面付近のトレーサ(破線)が集中するのに対し、路床付近のトレーサ(実線)は発散している。これらのトレーサの挙動は Fig. 1 に示した3次元モデルで説明される。すなわち、水路中心線付近では路床付近より水面まで上昇する流れの生じている位置であり、路床付近で集中した流れが上昇して水面に達する。また、 $z/H=1.5$  は水面より路床に向かって下降する流れが見られる位置であって、Fig. 1 に示すように水面で集中、路床で流れが発散する。

以上の結果より、Fig. 1 に示すように鉛直方向に連続した構造が存在することが確認され、このモデルの妥当性を示している。

### 3.2 渦運動の発生・発達過程

#### (1) 流れの多層構造性

多層モデルで表わされる乱流境界層の平均速度分布<sup>6)</sup>が開水路流れにも適用されることと、乱れの発生に関与する bursting 現象が壁面近傍に限定して見られることなどを考慮すると、開水路流れが鉛直方向に多層構造を有すると考えるのが妥当である。すなわち、bursting 現象が支配的な壁面近傍、大規模な渦運動が見られる主流部および自由水面近傍である。

#### (2) 乱れの発生モデル

乱れの発生を説明するモデルは非常に多くのものが提案されているが、大別すると以下の3種に分けられる。

- a. Vortex filament model
- b. Vortex sheet model
- c. Eddy model

Vortex filament model は、Theodorsen<sup>7)</sup> の Horseshoe vortex モデルに始まり、水素気泡法を用いた Kline ら<sup>8)</sup> の bursting に関する詳細な検討により得られたモデルに代表されるものである。また、これらを発展させたものとして、中川ら<sup>9)</sup>あるいは宇民ら<sup>10)</sup>のモデルが挙げられる。Vortex sheet model は、可視化結果に基づいた Head ら<sup>11)</sup>のモデルおよび turbulent spot の発達を数値解析した Leonard<sup>12)</sup>の結果が挙げられる。一方、Eddy model は数多くの研究者により提案されており、Townsend<sup>13)</sup>の二重ローラ渦と同タイプのモデル、Laufer<sup>14)</sup>、Falco<sup>15)</sup>、Brown ら<sup>16)</sup>の渦塊モデルおよび Blackwelder ら<sup>17)</sup>、大成ら<sup>18)</sup>の流下方向渦モデルの3種に大別される。

上記したモデルは、壁面近傍で生成された構造が主流域まで発達すると考えるものと、壁面近傍と主流域が異なった構造を持つという多層構造性を考えるものに分けられる。しかしながら、ある一点での擾乱は、非圧縮性のため圧力が伝播し、ただちに周囲流体の状態に影響を与えるという乱れが局所的な過程でないという事項を考慮すれば、鉛直方向に連がりを持つ構造の方が妥当性は高いと考えられる。多層構造性を持つという結論は、前節で示したように上流側の流れの履歴を考えると説明ができる。また、微小な擾乱を乱れの発生・発達過程の始点とするモデルが多く、擾乱の発生までモデル化して説明されてはいない。

本研究では、壁面領域における横断方向軸を持つ渦度の発生および可視化結果に見られる渦塊としての運動のように3次元的な拡がりを考慮し、渦線の集合として渦面が形成されるとする Vortex sheet model を妥当と考えて議論を進める。

#### (2) 水深規模の渦運動の発生・発達過程

以下に前項で示した従来のモデルと本研究で得られた成果をもとに、乱れの発生と大規模な渦運動の発生・発達過程を合成した複合モデル [Hybrid model] を示す。

壁面上で発生する横断方向軸を持つ渦度  $\omega_z$  は、

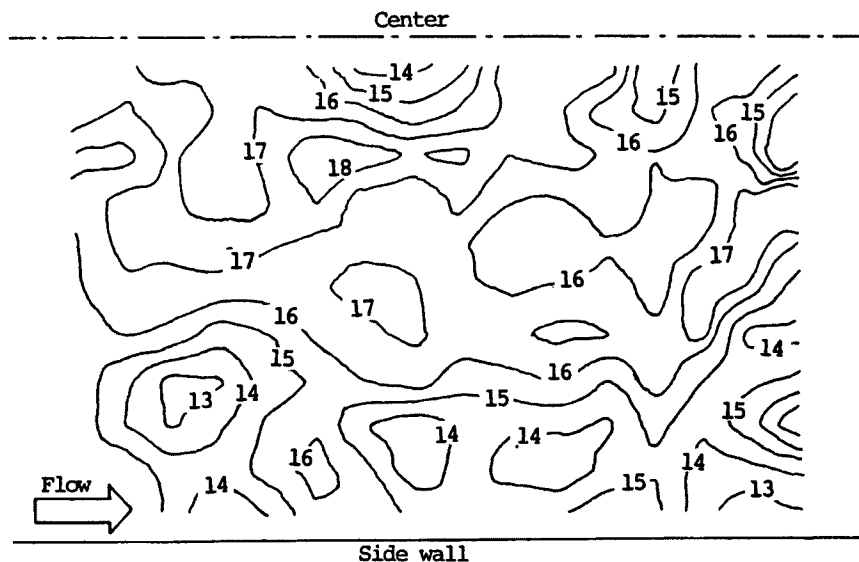


Fig. 5. Longitudinal velocity distribution near the channel bed.

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

であり、渦線の渦度の大きさは路床近傍の速度勾配で表わされる。右辺第2項が第1項に比して大きく、壁面での滑り無しの条件を考慮すると、路床近傍の流下方向速度の平面分布が渦度の大きさの分布を表わすことになる。Fig. 5は、中立粒子トレーサを開いたLLS可視化法により得た結果であり<sup>1)</sup>、路床近傍の水平断面内で撮影されたトレーサのパスラインの間隔より速度を算定したもので、瞬間速度の平面分布を示している。図より、路床近傍の速度分布は一様ではなく、渦度は非一様分布をすることが確認される。

渦度の大きさの異なる渦線が渦面を形成する場合、Fig. 6に示すような渦線の配列パターンが考えられる。ここでは便宜上、渦度の大きさを円の大きさを表わし、図中の矢印は誘導速度の大きさを表わしている。

1つの渦線は、ビオ＝サバールの法則に基づいて渦度の大きさに応じた誘導速度を隣り合う渦線に与える。渦度の大きさが一様（パターンA）あるいは大・小・大・小（パターンB）と配列された場合は、相互に打ち消し合う誘導速度を隣り合う渦線に与えるために渦線は上下運動をせず、渦面の位置は保たれる。これに対し、パターンCおよびDのように、一様な渦度を持つ渦線が配列された中に大きさの異なる渦度を持つ渦線が存在する場合、その渦線の前後のものが上下運動を始める。さらに、パターンEおよびFのような配列では複数の渦線が上下方向に移動し、渦面としての上下運動を生ずる。また、渦面が下降する部分も壁面の存在により反作用で上昇し、広範囲の渦面が上昇する。

上昇した渦面は、路床近傍の領域から抜け出して主流部に入ると引き伸ばされるため（vortex stretching）、鉛直および流下方向渦度が発生する。この渦面は、構成する渦線がビオ＝サバールの法則に従って巻き上り、主流に乗って大規模な渦運動へと発達する。この現象は、翼先端で発生するLanchesterの渦と類似するものと考えられる。以上を図化するとFig. 7のようである。

主流部ではレイノルズ数が大きく、粘性の効果が小さいため、Lagrangeの渦定理が示すように渦運動は持続し、ある寿命時間の後に消滅すると考えられる。このような渦運動のなかで水深規模のものが流下とともに発達してFig. 1に示したような3次元構造を形成する。また、水深規模の運動は前述した渦面

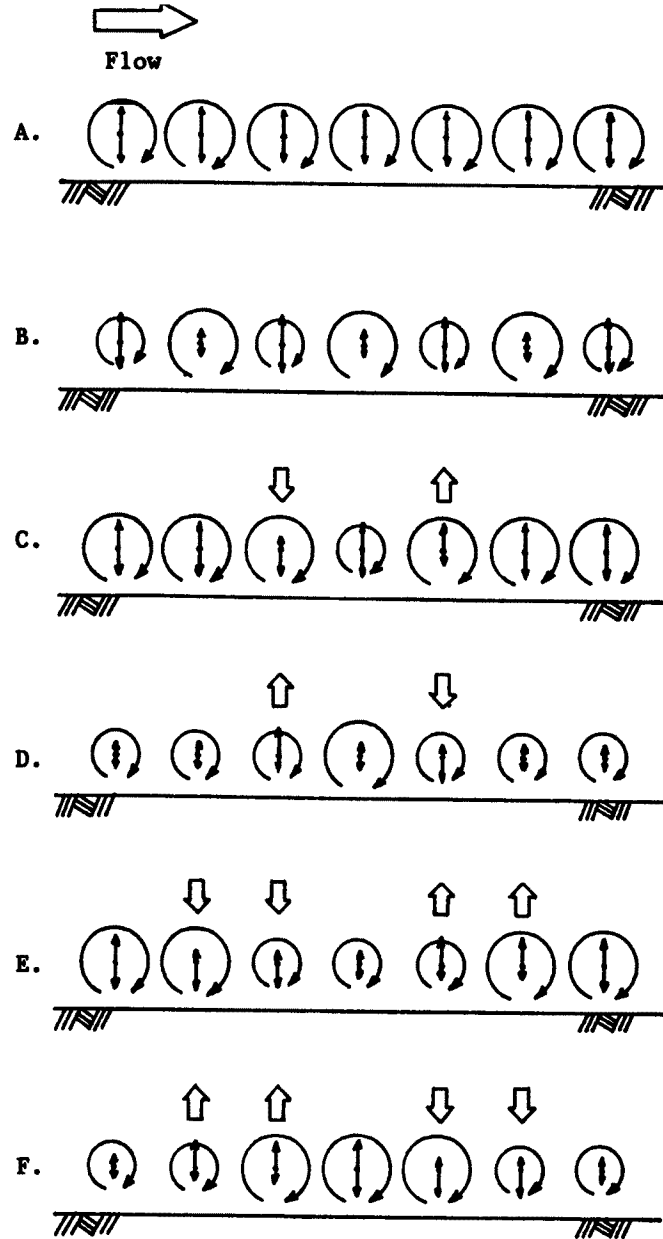


Fig. 6. Variations of vortex sheets.

の引き伸ばしに関与し、より安定したスケールの運動になると考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、開水路流れに見られる水深規模の渦運動の発生・発達過程を、従来提案された乱れの発生モデルと著者らの一連の研究成果に基づいて複合モデル [Hybrid Model] を提案した。

モデルを概説すると、路床近傍に形成された渦面は、渦度の非一様性のために上下運動を始める。渦度

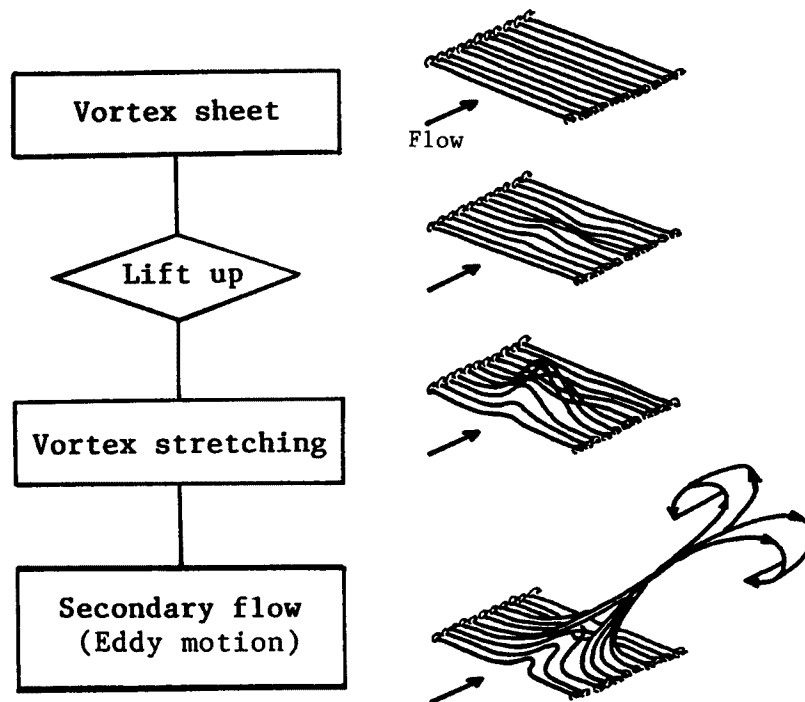


Fig. 7. Origin and development of a depth-scale eddy-motion.  
(Hybrid Model named by authors)

分布の非一様性が強いほど渦面は速く高くもり上る。主流領域まで達した渦面は主流により引き伸ばされつつ上昇し、ピオ＝サバルの法則に従って巻き上り大規模な渦運動へと発達する。これらの渦運動は、ある寿命時間存続して水深規模の渦運動に発達し、Fig. 1 に示すような3次元の挙動を示すようになる。今後は、渦運動と乱れの基本的特性との関連について研究を進める予定である。

#### 参考文献

- 1) 今本博健・石垣泰輔: LDV による開水路流れの速度ベクトル計測について (1), 京大防災研年報, 第28号B-2, 1985, pp.471-486.
- 2) 今本博健・石垣泰輔: 開水路流れにおける縦渦の3次元構造について, 第30回水理講演会論文集, 1986, pp.565-570.
- 3) Imamoto, H. and T. Ishigaki: The three dimensional structure of turbulent shear flow in an open channel, Proc. 5th Congress APD-IAHR, Seoul, Korea, Vol. I, 1986, pp.139-155.
- 4) 今本博健・石垣泰輔・梶間厚邦: LDV による開水路流れの速度ベクトル計測について (2), 京大防災研年報, 第29号B-2, 1986, pp.627-645.
- 5) 今本博健・石垣泰輔・梶間厚邦: LDV による開水路流れの速度ベクトル計測について (3), 京大防災研年報, 第30号B-2, 1987, pp.643-654.
- 6) Bradshaw, P., ed.: Turbulence, Springer-Verlag, 1976.



- 7) Theodorsen, Th.: The structure of turbulence, 50 Jahre Grenzschichtforschung, (ed. H. Görtler and W. Tollmien) , Frieder. Vieweg & Sohn, 1955, pp.55-62.
- 8) Kline, S.J., W.C. Reynolds, F.A. Schraub and P.W. Runstadler: The structure of turbulent boundary layers, J. F. M., 30, 1967, pp. 741-773.
- 9) Nakagawa, H. and I. Nezu: On a new eddy model in turbulent shear flow, Proc. JSCE, No. 231, 1974, pp.61-70.
- 10) 宇民正・上野鉄男: 可視化法による大スケール乱れに関する研究, 京大防災研年報, 第 19 号 B, 1976, pp.267-288.
- 11) Head, M.R. and P. Bandyopadhyay: Combined flow visualization and wire measurements in turbulent boundary layers, Lehigh Workshop on Coherent Structure in Turbulent Boundary Layers, ed. C.R. Smith, D.E. Abbott, 1978, pp98-129.
- 12) Leonard, A.: Vortex simulation of three-dimensional spotlike disturbances in a laminar boundary layer, Turbulent shear flows II, ed. L.J.S. Bradbury, Berlin, 1979, pp.67-77.
- 13) Townsend, A. A.: The Structure of Turbulent Shear Flow, Cambridge Univ. Press. 2nd ed.
- 14) Laufer, J.: New trends in experimental turbulence research, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 7, 1976, pp.307-326.
- 15) Falco, R. E.: Coherent motions in the outer region of turbulent boundary layers, Phys. Fluids, Vol. 20, No. 10, 1977, pp. S 124-S 132.
- 16) Brown, G.L. and A.S.W. Thomas: Large structure in a turbulent boundary layer, Phys. Fluids, Vol. 20, No. 10, 1977, pp. S 243-S 252.
- 17) Blackwelder, R. F. and H. Eckelmann: Streamwise vortices associated with the bursting phenomenon, J. F. M., Vol. 94, 1979, pp.577-594.
- 18) 大成博文・佐賀孝徳・斎藤隆: 開水路乱流内層の縦渦構造, 土木学会論文集 No. 363, II-4, 1985, pp.135-144.