

直線開水路流れの2次流について

今本 博健・石垣 泰輔・塩野 耕二

SECONDARY FLOW IN A STRAIGHT OPEN CHANNEL

By *Hirotake* IMAMOTO, *Taisuke* ISHIGAKI and *Koji* SHIONO

Synopsis

It is well known that the secondary flow can be observed in a straight open channel, however, it is elusive to be detected because of its small magnitude and unstableness. The secondary flow is investigated experimentally or numerically by many researchers. In this paper vortex motions induced by the secondary flow are classified on the basis of its cause; velocity gap, flow boundary and bed-generated turbulence, and discussed by using the results of 3-D LDA measurements, flow visualization in a transverse cross section and an algebraic stress model (Naot-Rodi model). It is found that there are some difference between the time-mean secondary flow obtained by LDA and N-R model and the instantaneous secondary flow by the flow visualization.

1. は じ め に

直線開水路流れにおいても2次流が存在し、流れの構造に影響を与えていることは、実験的検討あるいは数値解析法を用いた検討で指摘されている。この種の2次流は、Prandtl¹⁾によって第二の2次流として分類され、非円形断面の隅角部で観察される乱れに起因するものとされている。Nikuradse²⁾が隅角部における詳細な速度計測の結果より2次流の存在を指摘して以来、2次流に関する実験的あるいは理論的な研究³⁾がなされるとともに数値解析法による計算^{4),5)}が行われている。

2次流の存在は、流れの抵抗および流砂現象に影響を及ぼすことが指摘されている。例えば流れの抵抗についてChow⁶⁾は、強い2次流は大きな損失をもたらし、流水抵抗の増加に結び付く、と述べている。一方、2次流と浮遊砂との関係を検討したVanoni⁷⁾は、浮遊砂が2次流を生起させると結論づけているが、これに対してNemenyi⁸⁾は、一般的に2次流は乱流状態の流れに存在しており、浮遊砂が2次流生起の主要因ではないと指摘している。また、Jackson⁹⁾やAllen¹⁰⁾によって2次流と河床形態との関係が検討されている。この関係について木下¹¹⁾は、Cameron 効果¹²⁾を利用した航空写真による洪水時の表面流速解析を行ない、流れ方向軸をもつ水深規模の縦渦の存在を指摘し、河床形態との関係を推定するとともに、実験水路においても同様の縦渦の存在を確認している。近年、Nezu & Rodi¹³⁾によって詳細な2次流の計測が行なわれ、楕円形の2次流セルの存在が指摘されている。

本研究では、2次流および渦構造を直接捉える方法として著者らが用いてきたLDAによる速度3成分同時計測法¹⁴⁾および横断面流況可視化法¹⁵⁾で得られた結果、および開水路流れの計算を対象に調整された代数応力モデルであるNaot-Rodi⁵⁾の乱流モデルによる計算結果を用い、直線開水路流れの2次流と渦構造について検討したものである。

2. 渦構造の要因別分類

渦構造の存在により、流速分布・壁面せん断力分布・流れの構造などに影響が表われることが知られている。しかしながら、渦構造を捉えるのは困難であり、その理由として平均化による隠蔽効果が考えられる。これは形成される渦の特性から説明される。すなわち、特性を、強さ・安定性・構造の観点から見ると、強さの弱いもの、生起する位置が不安定なもの、構造が2次元的なものは平均化により隠蔽される可能性が高い。それに対して、隅角凹部近傍で見られる縦渦のように境界の影響で発生位置が比較的安定しており、3次元的な構造を有するものは検出され易い。ただし、検出方法によって評価時間および点情報であるか場の情報であるかなどの違いにより、得られる結果が異なるとともに、平均化により隠蔽される程度も異なる。

以上のように、渦の特性は、強さ・安定性・構造から考察することができるが、いずれの要素も検出される場の流れに影響する支配的条件に左右される。換言すれば、渦の発生要因によってその特性が異なり、検出方法によって得られる結果も異なると考えられる。

ここでは、直線開水路流れに見られる渦構造を、その発生要因により以下の3種に分類して検討する。すなわち、

- A 速度差に起因する渦構造、
- B 断面形状に起因する渦構造、
- C 壁面近傍の乱れに起因する渦構造、

である。3種の渦構造を区別して検出するのは困難であるが、Aは複断面流れあるいは植生などで横断方向に粗度が増加する流れで、Bは隅角部近傍の流れで、Cは広幅水路の中央部の流れで見られる。Aが2次元であるのに対し、BおよびCは3次元的な挙動を示す。

3. 2次流および渦構造の直接検出法

2次流および渦構造を捉えるためには横断方向速度成分と鉛直方向速度成分を同時に検出するとともに、前述した特性を考慮すると、いくつかの方法を用いた検討が必要である。著者らはこれらを検討するために、速度ベクトル計測法¹⁴⁾、代数応力モデルによる計算法^{16),17)}および横断面流況可視化法¹⁵⁾を用いて来た。以下に、それぞれの方法の概略について述べる。

3.1 LDAによる速度ベクトル計測法

2台のレーザ流速計(LDA)を用いて速度の3成分を同時計測する方法である。水路側方に設置した2成分レーザ流速計で流れ方向速度成分 u と鉛直方向成分 v を、水路下方に設置した1成分レーザ流速計で横断方向成分 w を計測することによって2次流ベクトルが得られる。本計測法の妥当性については、滑面および粗面上の2次元流れにおいて確認されている¹⁷⁾とともに、計測結果は代数応力モデルによる結果との

Table 1. Hydraulic conditions

Case No.	Slope I	Discharge Q(1/sec)	Channel width B(cm)	Water depth H(cm)	Flood plain width height b(cm) h(cm)		Reynolds number Re	Froude number Fr
R1	1/1400	2.06	20.0	4.0	—	—	7700	0.48
R2	1/1100	1.20	12.0	4.0	—	—	5800	0.52
R3	1/1200	0.33	4.0	4.0	—	—	2900	0.57
R4	1/800	1.56	39.0	4.1	—	—	2900	0.17
C1	1/800	3.65	40.0	4.0	20.0	2.1	8010	0.57

良好な一致を示している¹⁷⁾。本研究で用いた計測結果は、長さ 8 m の直線水路の下流端より 2.5 m の計測断面におけるものであり、水力条件は Table. 1 に示すとおりである。この方法は、速度の3成分の計測が定量的に可能であり、時系列データが得られるという長所があるものの、点情報のみであり空間的な挙動を捉えるのは難しい。また、ここで用いた方法では横断方向の速度成分計測用のレーザ光を水路床を通し、ドップラー信号を水面を通して受信する方法を用いており、水面の擾乱が大きくなるとサンプリング率が低下して計測精度が悪くなるため、水力条件が制約されるという欠点がある。

3.2 代数応力モデルによる2次流ベクトル計算法

開水路流れの2次流を計算するためには3次元モデルが必要であり、Naot & Rodi⁵⁾ によって通常の $k-\epsilon$ モデルではなく代数応力モデル (algebraic stress model: ASM) を用いた2次流の計算が初めて行なわれた。代数応力モデルは Launder & Ying¹⁸⁾ によってダクト流が精度良く計算されるように開発されたモデル (L-Y model) であり、Naot & Rodi のモデル (N-R model) は、それを発展させて開水路流れの2次流の計算に成功したものである。ここでは、Fig. 1 に示すように、これらの2つのモデルおよび、Yoshizawa¹⁹⁾ の非線形レイノルズ応力表示法を取り入れた Spezial²⁰⁾ の非線形モデル (S-Y model) と LDA による計測結果を比較した結果、L-Y model および N-R model で得られる2次流のパターンが計測結果と良く一致している。ここでは開水路流れを対象に調整された N-R model を用いることとした。

代数応力モデルによる2次流計算法は、速度3成分が定量的に得られるとともに場の情報としても有用であるが、平均化されることにより流れの構造が隠蔽される可能性がある。また、計算結果の妥当性を確認するために高精度の計測結果が必要であるが、種々の水力条件に対する結果が容易に得られるという長所がある。

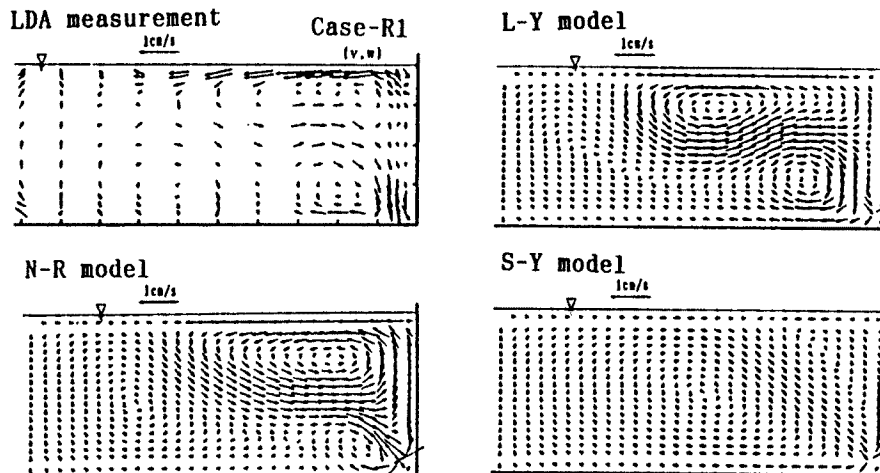


Fig. 1. Secondary flow vectors obtained by LDA measurement and algebraic stress models in rectangular open channels.

3.3 横断面流況可視化法

長さ 13 m, 幅 39 cm の直線水路の下流端に観測用窓を設置し、下流より 2.35~2.85 m の範囲の流況を 300 mm の望遠レンズを用いた 35 mm スチルカメラおよびビデオカメラで撮影する方法である。ここで用いた写真は、トレーサとして、平均粒径 0.45 mm, 比重 1.05 のポリスチレンビーズ、あるいは水素気泡を用い、照明装置を移動させて粒子の挙動を捉える移動撮影、および鉛直あるいは水平に設置した白金線から水素気泡を発生させてタイムラインの時間変化を捉える固定撮影を行なった結果である。

流れの可視化法では、速度の1成分あるいは2成分が可視化され、3成分を得ることは困難であるが、現象を直接観察することが可能であって場の情報として空間的な情報を得ることができるため、空間的な構造を有する流れの構造を検討するには非常に有効な方法である。しかしながら、定量的なデータを得るためには多大な労力が必要であり、対象とする現象を捉えるためには用いるトレーサ・撮影方法・照明方法などに工夫が必要である。

4. 直線開水路流れにおける2次流および渦構造

4.1 広幅開水路中央部における2次流と縦渦

水平方向に設置した白金線（直径0.05 mm）より水素気泡を発生させ、0.2秒毎に形成されるタイムラインの横断面内の挙動を撮影すると、**Photo. 1**のような写真が得られる。タイムラインは上下・左右方向に

Case-R4 (B/H=10)

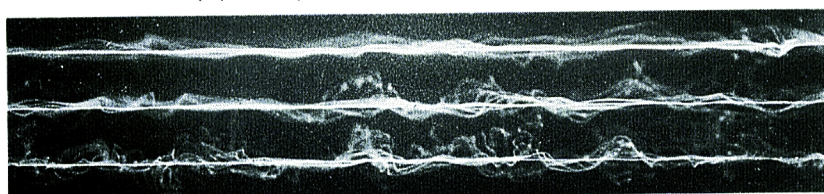


Photo. 1. 3-D structure in a transverse cross section of flow visualized by the hydrogen bubble method in a rectangular channel of B/H=10.

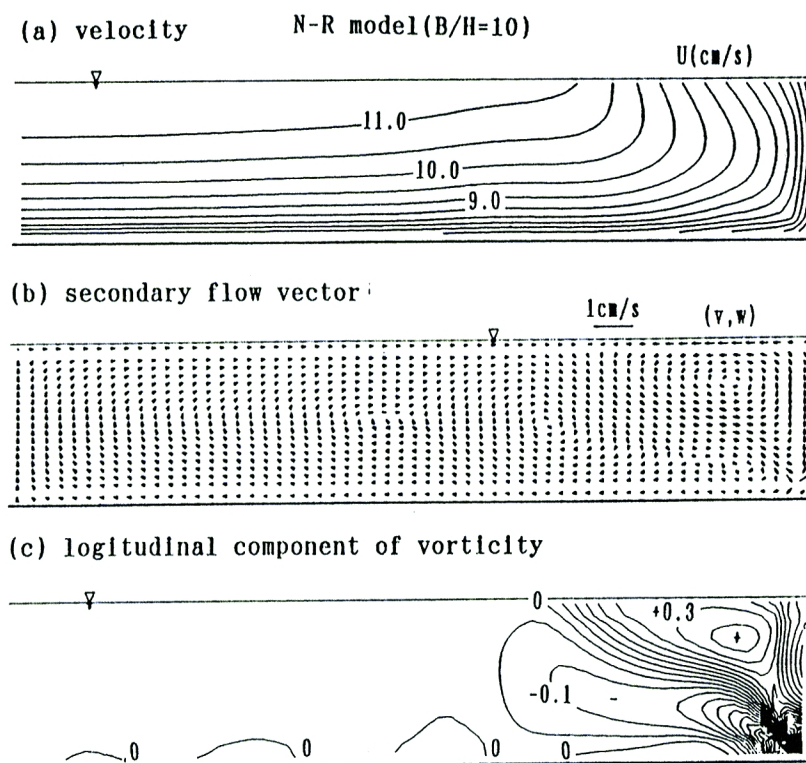


Fig. 2. Distributions of the streamwise mean velocity, U , the secondary flow vectors, (v, w) , and the longitudinal component of vorticity, ξ , calculated by Naot-Rodi model for the same hydraulic condition of Photo. 1.

歪んでおり、縦渦の存在が確認される。また、上下方向の歪が横断方向に並んで観察されることより並列した縦渦の生起も確認される。このようなタイムラインの偏位は水路全体で見られ、縦渦は側壁近傍のみに存在するのではないことを示している。また、偏位量から推定される速度ベクトルの大きさを見ると、横断方向位置による差異は少なく、瞬間的には強い流れが発生していることが知れる。

Fig. 2 は、Photo. 1 と同じ水理条件で N-R モデルを用いて計算した速度分布および2次流ベクトルと、計算結果より得られると流れ方向の渦度分布を示したものである。Photo. 1 では側壁より離れた水路中央部においても強い縦渦の存在が見出されており、Fig. 2 の計算結果より推定される側壁の影響範囲（水深の約 2.5 倍）を考慮すると、この縦渦は壁面近傍の乱れに起因するものと考えられる。このタイプの縦渦は、乱流状態の流れに存在するが、他の要因で生起する縦渦と分離して検出することが困難であることと発生位置が不安定で発生が間欠的であるため、流れの可視化法のように評価時間が現象の時間スケール程度であり場の情報が得られる場合にのみ検出可能であり、評価時間が長い場合には平均化されて非常に捉えにくいものとなっている。

4.2 隅角凹部近傍における2次流と縦渦

古くより、その存在が知られている2次流であり、Fig. 3 に示すように隅角凹部に向かう2次流が速度計測結果でも乱流モデルによる計算結果でも見られる。Fig. 4 に示すように、水路幅・水深比によって得られる2次流パターンは異なるものの、隅角部に向かう2次流の上下に2次流セルの存在が確認される。一方、Fig. 5 の中立粒子トレーサ法による横断面可視化結果が示すように、横断面内に生起する縦渦は円形であり（図中の A～C）、Fig. 4 で見られるような楕円形の2次流セルの存在は、ここに挙げた例あるいは一連の実験結果でも見出せなかった。図に示されるような縦渦の外縁をトレースすることは可能であり、その発生位置およびスケールなどが知れる。Fig. 6 は 69 枚の写真の中で 35 枚に確認された縦渦をすべて示したものであり、実線が時計回り、破線が反時計回りの縦渦の位置および大きさを示している²¹⁾。図に示すように隅角部における縦渦は比較的安定した位置で発生しているが、それは横断方向に揺らいでおり、Fig. 3 のような時間平均場で見ると、回転方向が同じセルが形成するクラスターの外縁のみが2次流セルとして検出されることを示している。

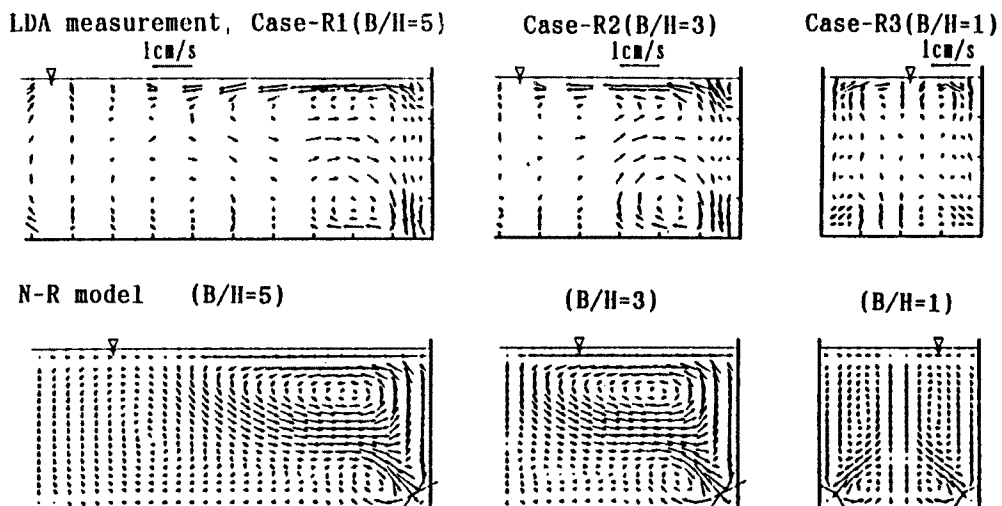


Fig. 3. Secondary flow vectors near the corner obtained by LDA measurements and N-R model.

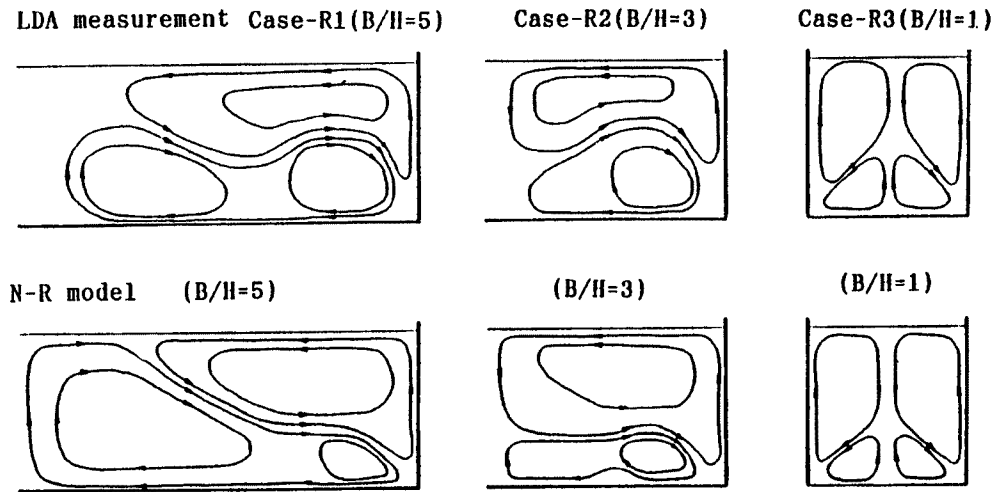


Fig. 4. Secondary flow patterns near the corner.

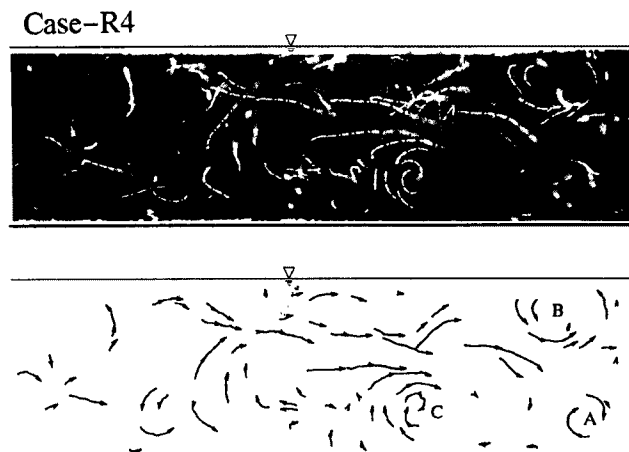


Fig. 5. Pass lines of neutral buoyant tracers in a transverse cross section.

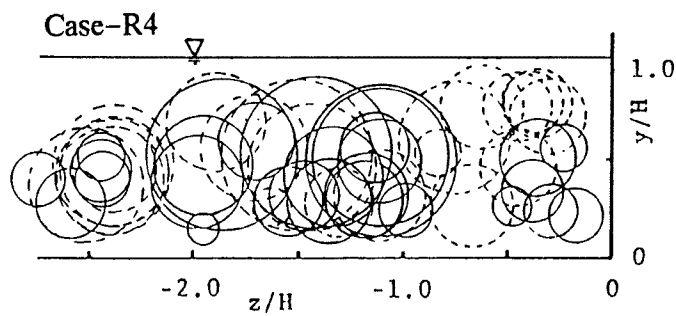


Fig. 6. Distribution of flow cells observed in 35 photographs as shown in Fig. 5.

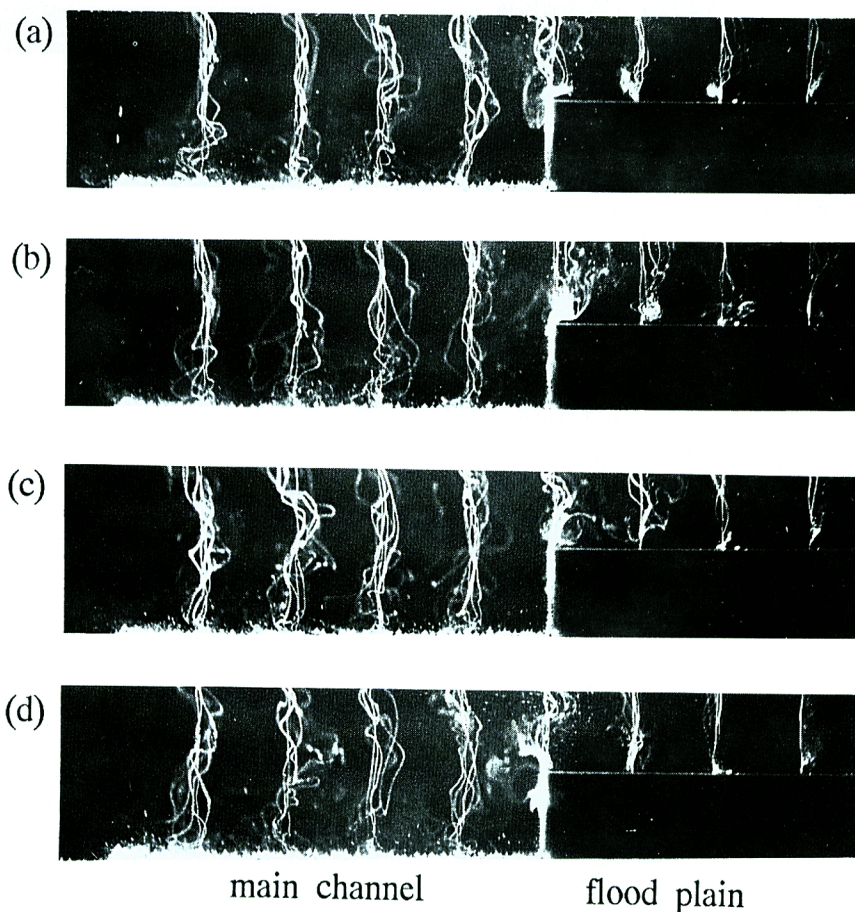


Photo. 2. 3-D structure in a transverse cross section of flow visualized by the hydrogen bubble method in a compound open channel.

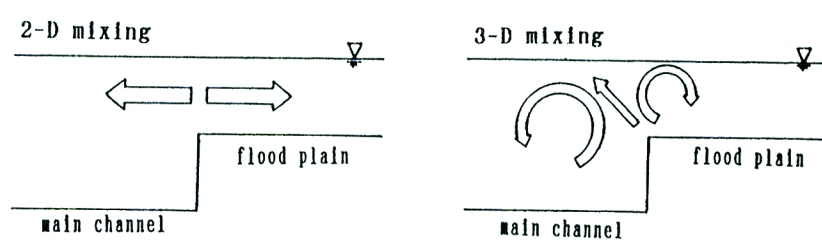


Fig. 7. 2-D and 3-D fluid mixing in a compound open channel.

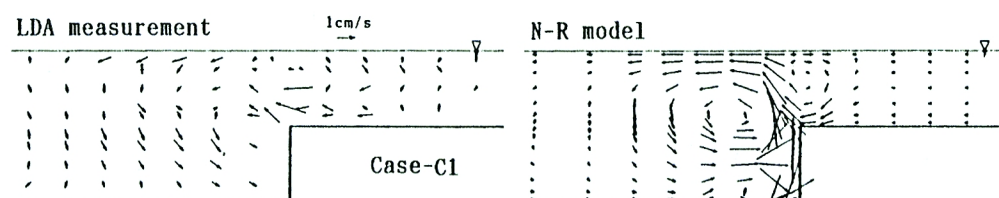


Fig. 8. Secondary flow caused by flow boundary in a compound open channel obtained by LDA measurement and N-R model.

4.3 複断面開水路流れにおける2次流と縦渦

Photo. 2 は、複断面開水路流れにおける低水路流れと高水敷上流れの混合機構を検討するために、鉛直方向に張った白金線より水素気泡を発生させ、形成されるタイムラインの挙動を横断面内で撮影した結果を示したものである。低水路と高水敷の境界におけるタイムラインを分類すると、ここに示した4種類に分類される。この結果より、低水路流れと高水敷上流れの境界部には、Fig. 7 に示すような2種類の混合機構が存在することを指摘した²²⁾。すなわち、水平方向の2次元的な混合と、斜昇流に伴って形成される縦渦による3次元的な混合であり、これら2種の混合形態が交互に発生する。また、高水敷に粗度をつけると2次元的な混合が卓越するようになるのに対し、後者の3次元的な混合は減少する²³⁾ことより、2次元的な混合は速度差に起因することが知れる。これらの結果より、複断面流れでは、A の速度差に起因する水平方向スケールの大きな渦と、B の断面形状に起因する縦渦が存在するが、Fig. 8 に示すように、LDA による速度計測結果および N-R モデルによる計算結果では B の渦構造の存在のみが検出される。河原・玉井²⁴⁾が L-Y model を改良した方法で複断面流れの解析を行なっているが、その結果でも断面形状に起因する渦構造のみが計算されている。これは、Fig. 8 が速度の時間平均値を示したものであり、平均化によって A の渦構造が隠されることを意味している。また、B の縦渦は発生位置が安定しており検出され易いことが知れる。

5. お わ り に

本研究は、速度ベクトル計測法および代数応力モデルによる計算法で得られる時間平均した2次流と横断面可視化法で得られる縦渦に関する結果を示し、直線開水路における2次流と渦構造の関係が、発生要因によって3種に分類した渦構造で説明されることを示したものである。3種とは、速度差に起因するもの、断面形状に起因するものおよび壁面近傍の乱れに起因するものである。

本研究で示した広幅開水路流れ中央部、隅角部（側壁近傍）、複断面開水路流れの低水路と高水敷の境界部の3種の流れにおける2次流と縦渦の検討結果より、2次流として検出される縦渦の特性は、強さ・安定性・構造の3要素で考察することが可能であり、検出方法の違いによって2次流と縦渦構造が異なった結果として得られる場合のあることが指摘された。

発生要因と検出方法による差異を発生要因で3種に分類してまとめると、速度差に起因する縦渦は2次元的な挙動をするために平均化で隠蔽され易い、断面形状に起因する縦渦は発生位置が安定しているために捉え易いが形成される縦渦が横断方向に揺らぐため、時間平均した2次流の結果からは平均化された構造のみが検出される。壁面近傍の乱れに起因する縦渦は、発生位置が不安定なために流速計測法や乱流モデルによる計算法では捉えにくく、可視化法でのみ捉えられる、などの特徴が指摘される。

参 考 文 献

- 1) Prandtl, L.: Essentials of fluid dynamics, Blackie, London, 1952.
- 2) Nikuradse, J.: Untersuchungen über die Geschwindigkeitsverteilung in turbulenten Strömungen, Diss. Göttingen, 1926, after Schlichting, H. Boundary-layer theory, McGRAW-HILL, 1968.
- 3) Einstein, H.A. and H. Li: Secondary currents in straight channels, Trans. American Geophysical Union, Vol. 39, No. 6, 1958, pp. 1085-1088.
- 4) Chiu, C.L. and D.E. Hsiung: Secondary flow, shear stress and sediment transport, Jour. of Hydraulics Division, Proc. ASCE, Vol. HY7, 1981, pp. 879-898.
- 5) Naot, D. and W. Rodi: Calculation of secondary currents in channel flow, Journal of ASCE, HD, Vol. 108, No. HY8, 1982, pp. 948-968.
- 6) Chow, V.T.: Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill, New York, 1959.

- 7) Vanoni, V.A.: Transportation of Suspended Sediment, Trans. ASCE, June, 1944, pp. 67-133.
- 8) Nemenyi, P.F., Discussion with Vanoni in 7).
- 9) Jackson, R.G.: Sedimentological and Fluid-Dynamic Implications of the Turbulent Bursting Phenomenon in Geophysical Flows, J. Fluid Mech., 1976, pp. 531-560.
- 10) Allen, J.R.L.: Sedimentary Structures, Vol. II, Elsevier, New York, 1982.
- 11) 木下良作：航空写真による洪水流の解析，その乱流構造と表面の流れかたの特性について，日本写真測量学会誌，Vol. 6, No. 1, 1967, pp. 1-17.
- 12) Cameron, H.L.: Measurement of water current velocities by Parallax Method, Photogrammetric Engineering 18, 1952.
- 13) Nezu, I. and W. Rodi: Experimental Study on Secondary Currents in Open Channel Flow, Proc. of 21th IAHR Congress, Melbourne, Australia, Vol. 2, 1985, pp. 19-23.
- 14) 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(1)，京大防災研年報，第28号，B-2, 1985, pp. 471-486.
- 15) 今本博健・石垣泰輔・西田 雅：台形断面開水路流れの水理特性について，京大防災研年報，第32号，B-2, 1989, pp. 935-949.
- 16) Shiono, K. and B. Lin: Three dimensional numerical models for two stage open channel flows, HYDRO-COMP '92, 1992, pp. 123-130.
- 17) 今本博健・石垣泰輔・塩野耕二：複断面開水路流れの水理特性について(6)，京大防災研年報，第35号，B-2, 1992, pp. 349-364.
- 18) Launder, B.E. and W.M.Ying: Prediction of flow and heat transfer in ducts of square cross-section, Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. 187, 1973, pp. 455-461.
- 19) Yoshizawa, A.: Statistical analysis of the deviation of Reynolds stress from its eddy viscosity representation, Phys. Fluids, 27, 1984, 1377.
- 20) Speziale, C.G.: On nonlinear $k-l$ and $k-\epsilon$ models of turbulence, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 178, 1987, pp. 459-475.
- 21) Imamoto, H. and T. Ishigaki: Flow visualization in a Transverse cross section of an open channel flow, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 5, No. 3, 1992, pp. 268-273.
- 22) 今本博健・石垣泰輔・武藤裕則：複断面開水路流れにおける低水路流れと高水敷上流れの混合機構に関する研究，水工論文集，第36巻，1990, pp. 139-144.
- 23) Imamoto, H. and T. Ishigaki: Velocity distribution in a compound open channel, Proc. of 8th Congress of APD-IAHR, Vol. 2, 1992, pp. B-331-342.
- 24) Kawahara, Y. and N. Tamai: Numerical calculation of turbulent flows in compound channel with an algebraic stress turbulent model, Proc. 3rd Int. Symp. on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements, Tokyo, Japan, 1988, pp. 9-16.