

開水路側壁近傍の 2 次流と 3 次元渦構造について

Secondary Flow and Vortex Motions near the side-wall of Rectangular Open Channel

石垣泰輔*・武藤裕則**

Taisuke ISHIGAKI and Yasunori MUTO

* 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖)

** 正会員 Ph.D 京都大学助手 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖)

In this paper secondary flow and vortex motions near the side-wall have been discussed on the basis of experimental results obtained by velocity measurements and flow visualizations. Vortex motions and cross flows have been observed and the results show that they make an important role to determine the structure of flow. Type(a) secondary flow defined by Bradshaw(1987) as "cross flow" is also identified within "stress-induced" secondary flow. Secondary flow can affect the structure of near wall turbulence.

Key Word : open channel, secondary flow, cross flow, vortex

1. はじめに

開水路流れで見られる 2 次流は、長方形断面や台形断面流れで見られる隅角凹部へ向かう流れ、複断面流れで見られる隅角凸部から離れる流れ(斜昇流)や横断方向の流れ、および弯曲流で見られる断面を横断する流れなどである。これらの流れは、Prandtl¹⁾ が分類した主流の曲がりに起因する第 1 種の 2 次流と、乱れの非一様性に起因する第 2 種の 2 次流、さらには横断方向の速度差に起因する渦構造(せん断不安定により発生する渦)に起因する流れが含まれる。Bradshaw²⁾ は、流下方向の渦度輸送方程式である(1)式の右边第 2 項および第 3 項で説明されるメカニズム(skew-induced secondary flow)で生起する第 1 種の 2 次流では、以下に示す 2 つのタイプの 2 次流、すなわち、

Type(a) : "cross flow". 流れ方向の渦度 $\Omega_x = \partial w / \partial y - \partial v / \partial z$ がほぼ第 1 項の $\partial w / \partial y$ のみで表される、

Type(b) : 流れ方向軸を持つ渦として認識され、 $\partial w / \partial y$ と $\partial v / \partial z$ がほぼ等しい、

$$U \frac{\partial \Omega_x}{\partial x} + V \frac{\partial \Omega_x}{\partial y} + W \frac{\partial \Omega_x}{\partial z} = \Omega_x \frac{\partial U}{\partial x} + \Omega_y \frac{\partial U}{\partial y} + \Omega_z \frac{\partial U}{\partial z} + \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) (-vw) + \frac{\partial}{\partial y \partial z} (\overline{v^2} - \overline{w^2}) + \nu \nabla^2 \Omega_x \quad (1)$$

が生起すること、右边第 4 項以下に含まれるレイノルズ応力の非一様性が発生メカニズム(stress-induced secondary flow)である第 2 種の 2 次流では、渦が形成された時のみ 2 次流として認識されることを指摘した。なお、(1)式では、 x は流下方向、 y は鉛直方向、 z は横断方向である。

本研究の対象とする長方形断面開水路流れでは、第 2 種の 2 次流が存在し、平均速度場の結果に基づいて Type(b) の 2 次流セルの存在が多く研究者により確認されている³⁾。しかしながら、このような 3 次元構造に関する知見は、平均速度場から得られるものと瞬間速度場から得られるものには差異があり、Type(a) の cross flow が平均化により検知されなくなる可能性がある。本研究では、瞬間速度場での検討が重要であるという考え方にに基づき、第 2 種の 2 次流にも Type(a) の cross flow が存在することを流れの可視化結果に基づいて検証することを目的とした。なお、本研究では、平均速度場および瞬間速度場で捉えられる横断面内の流れの両者を 2 次流と呼び、2 次流により形成される渦を 2 次流セル⁴⁾ と呼ぶ。また、2 次流セルの形成が認められるものを Type(b)、水深スケール程度以上の横断方向流れを Type(a) の cross flow とした。

以下では、長方形断面開水路流れを対象とし、平均速度場で見られる 2 次流の検討には速度および壁面せん断力分布の計測結果を、瞬間速度場で見られる 2 次流については、縦横断面可視化法⁵⁾

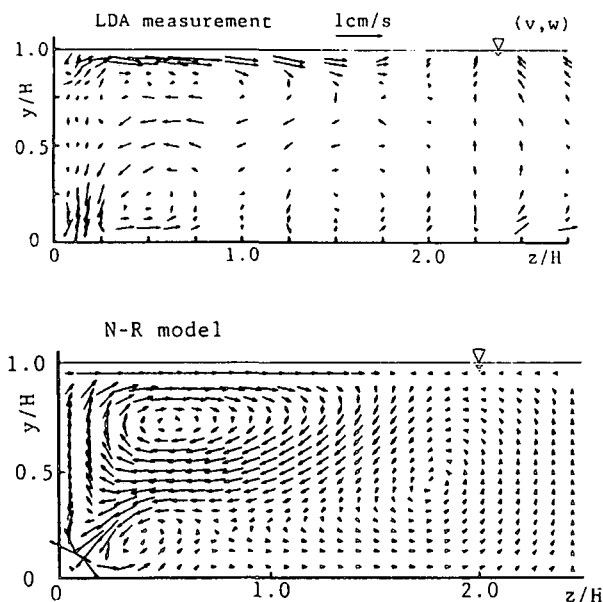


図-1 2次流速度ベクトルの計測結果（上）
および計算結果（下）

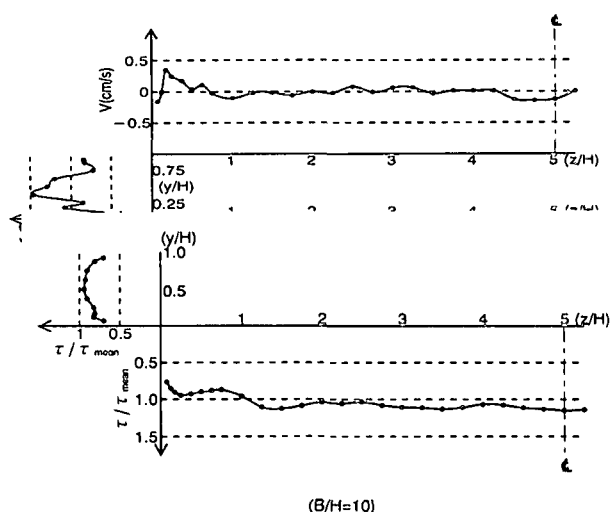


図-2 側壁近傍の鉛直方向速度分布（上）
および壁面せん断力分布（下）

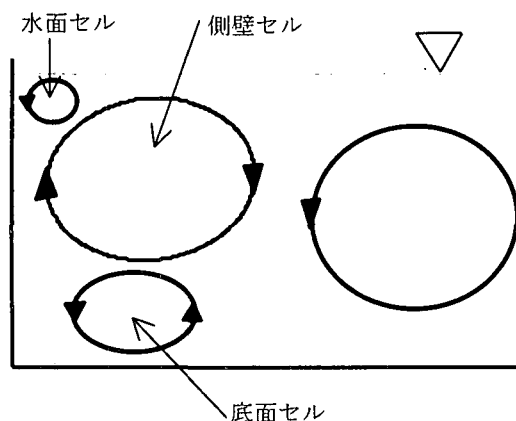


図-3 側壁近傍の2次流セル

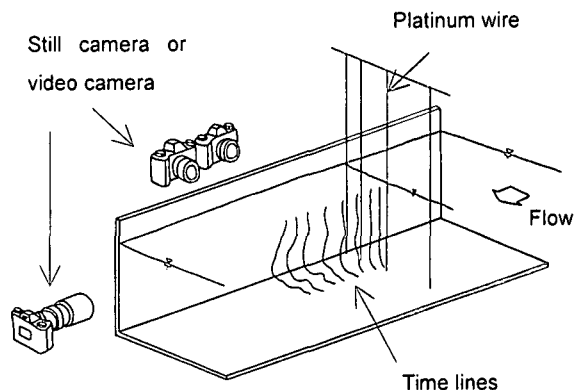


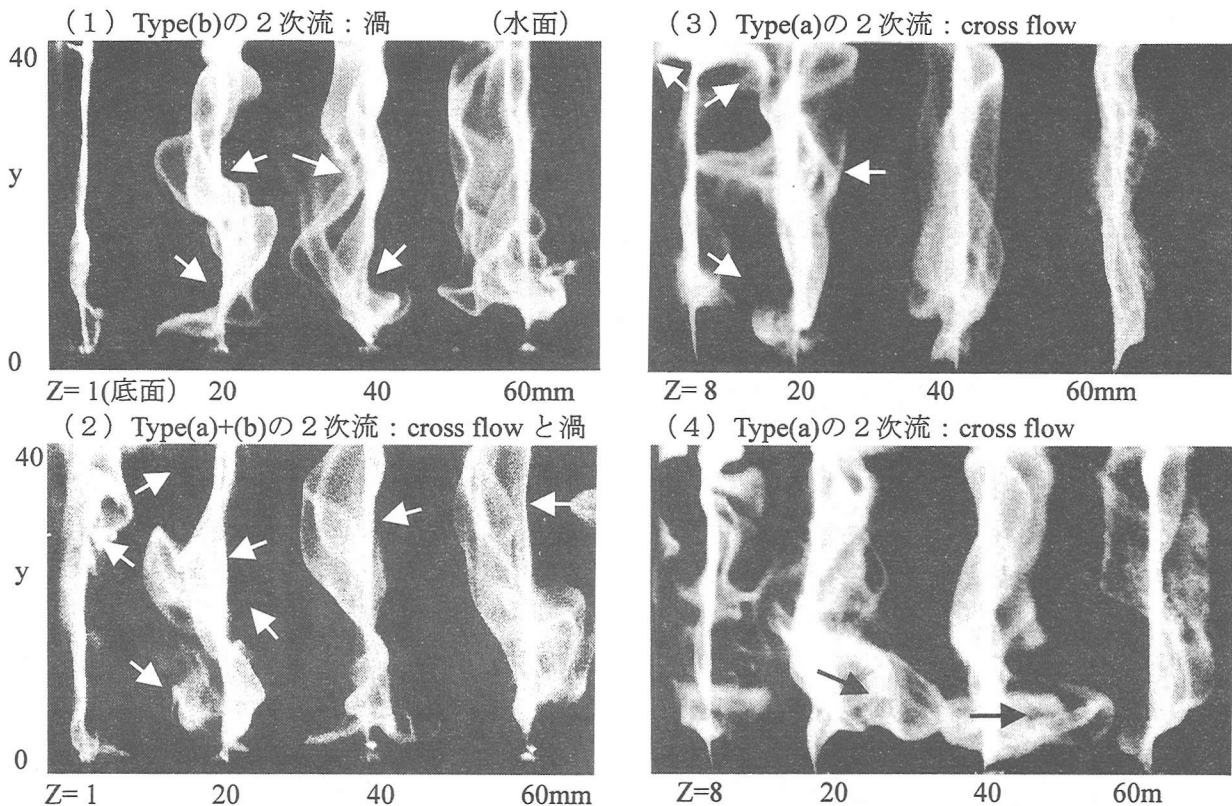
図-4 縦横断面可視化実験装置

による結果を用い、2タイプの2次流の挙動とそれらが引き起こす3次元渦構造について検討する。

2. 平均速度場で見られる2次流

Nikuradse が計測した横断面内の等速度線図の歪みから2次流の存在を Prandtl が指摘して以来、隅角凹部の2次流は平均速度場のデータに基づいて検討されてきた。図-1は、2成分 LDA と1成分 LDA を用いた速度3成分同時計測結果および Naot-Rodi のモデルを用いた計算結果⁶⁾を示したものであり、いずれの結果においても、従来指摘されて来た隅角凹部へ向かう流れとそれにより誘起される2次流セルが存在している。また、図-

2に示す水面、側壁、底面から3mm ($y+ \text{ or } z+=41$) における平均鉛直速度 v の分布および温度センサーを用いた壁面せん断力計測法⁷⁾により得られた壁面せん断力分布にも2次流の影響が顕著に見られ、これらの結果と従来の結果^{8), 9)}を考慮すると、図-3に示すような2次流セルの存在が推定される。図に示すように、側壁近傍の3つの2次流セルを、水面より、水面セル、側壁セル、底面セルと呼び、それぞれの特徴を述べると次のようである。水面セルのスケールは他の渦に比べて小さく、水深の4分の1程度以下であり、比較的安定した位置で観測される。側壁セルは、半水深～水深程度のスケールであり、その発生位置は側壁近傍から水深の2倍程度の範囲で横断方向に大きく揺らぐ。底面セルは、半水深程度のスケールであり比較的安定した位置で観察される。以上の



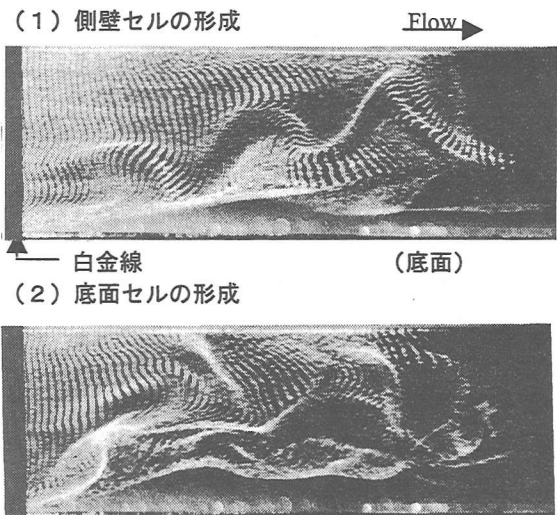
図－5 横断面流況の可視化結果

ように、平均速度場の結果では、主として Type(b) の 2 次流が認識される。なお、図－2 に示した結果は、 $Q=4.011/s$ 、レイノルズ数 $Re=UR/\nu=10,430$ 、フルード数 $Fr=U/(gR)^{1/2}=0.40$ の流れを対象としたものである。ここに R は径深、 ν は動粘性係数、 g は重力加速度である。

3. 瞬間速度場で見られる 2 次流

3. 1 実験装置

瞬間速度場における 2 次流の挙動を検討するため図－4 に示す装置を用いた。水路の横断面内に、1 本あるいは複数本の白金線（直径 0.05mm）を鉛直に設置し、それより発生する水素気泡が形成するタイムラインの挙動を、水路下流端に設置した観測窓を通して撮影する横断面可視化法⁵⁾ および水路側壁を通して撮影する縦断面可視化法を用いた。なお、対象とした流れの水力条件は、断面平均流速 $U=8\text{ cm/s}$ 、 $H=4\text{ cm}$ 、 $Ie=1/10,000$ 、 $Re=UR/\nu=2,660$ 、 $Fr=U/(gR)^{1/2}=0.14$ であり、可視化した断面は、長さ 13m、幅 39cm の直線水路の下流端より 3 m の位置である。



図－6 縦断面可視化結果（20mm 位置）

3. 2 2 種の 2 次流

図－5 は、水素気泡をシート状に発生させた場合の横断面流況（下流側より撮影）であり、特徴的な結果を 4 例示している。図の左側が側壁、上が水面、下が底面である。底面側に示した数字は白金線を設置した側壁からの距離を示している。図より、側壁近傍における 2 次流の存在が明確に認められ、その形態が、渦として認識される

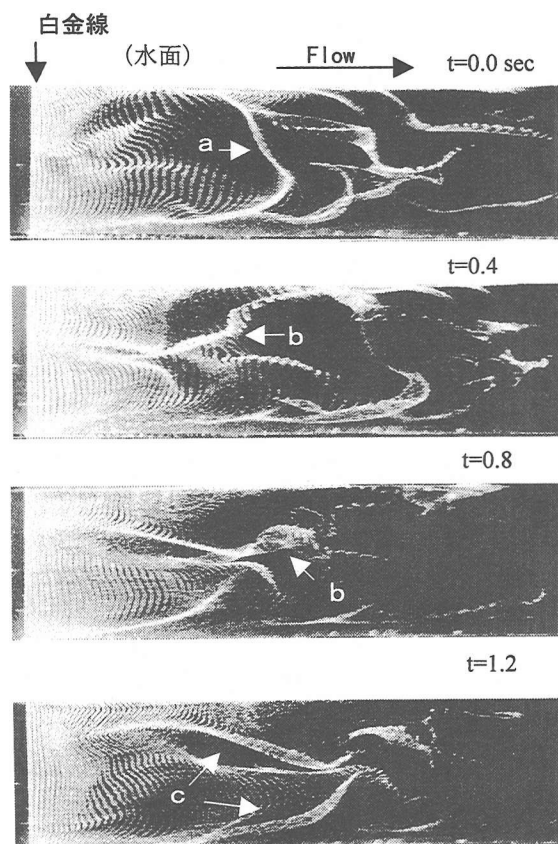


図-7 縦断面可視化結果 (8mm 位置)

Type(b)のみでなく、断面内を横断する流れ、すなわち、Type(a)の cross flow として認識されることを示している。これらの可視化結果は、次のような流況を示している。(1)では、20mm および 40mm 位置のタイムラインの相対する左右へのずれから1対の渦構造が形成されていることが分かる。(2)では40mmと60mm位置の水面側の側壁方向へのずれから側壁に向かう cross flow が認識され、それにより20mm位置から側壁にかけての水面側で側壁セルが、また、底面側で底面セルが形成される様子を示している。(3)では、半水深付近で側壁に衝突した cross flow が底面セルと側壁セルを形成している。それにより8mm位置のタイムラインが示すように水面近傍の水面セルを誘起している様子が捉えられている。(4)は、側壁より底面付近を水路中央に向かう cross flow を捉えたものである。このように、cross flow は、2次流セルを側壁に移動させたり、直接側壁に衝突した後に反射して側壁近傍の構造を3次元化することが分かる。また、その際に形成される渦構造が図-3に示すような2次流セルとして平均速度場において認識されるものと考えられる。

得られた横断面流況の可視化結果より、20mm位置付近に渦構造が形成される様子が多く観察されたため、この位置での縦断面流況を、2台のカ

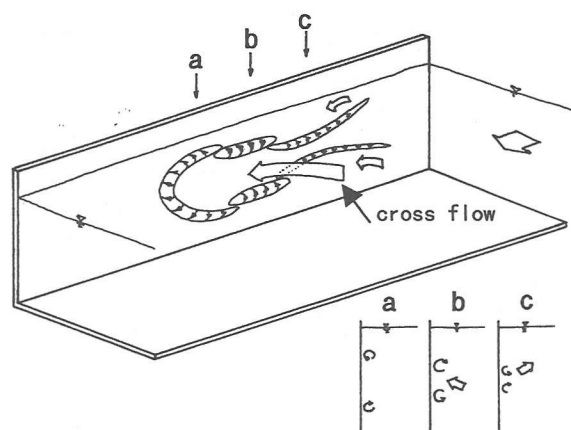


図-8 Cross flowにより引き起こされる3次元渦構造の概念図

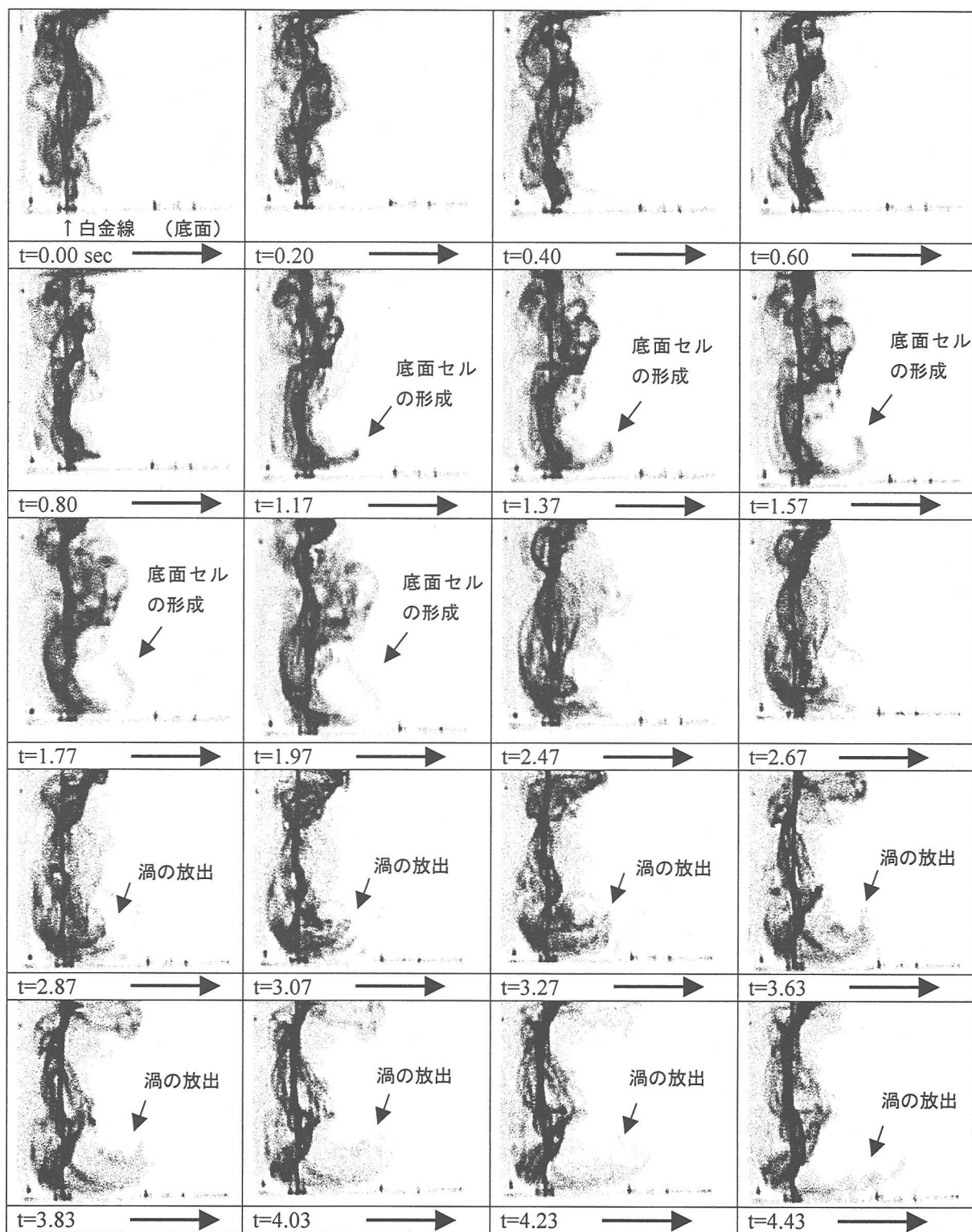
メラを用いてステレオ撮影し、実体視することによりその3次元構造を観察した。この方法を用いることにより、縦断面可視化結果より2次流セルの構造を検討することが可能となった。

タイムライン間隔を20msとした可視化結果を示すと図-6のようである。なお、図中、上端が水面、下端が底面、流れは左より右である。この位置では、側壁セルの形成を示す図-6(1)と底面セルの形成を示す図-6(2)が特徴的な構造として捉えられた。この側壁セルは、底面より水面に向う軸を有し、水面に近づくにつれてスケールが大きくなる。一方、底面セルは、図-6(2)の底面側の捲れ上がるにより形成されており、水面側は大きく乱れている。

3.3 2次流と側壁近傍の3次元渦構造

図-5(2)に示されたように、側壁近傍の2次流は、側壁近傍(側壁より1mm、 $z^+=6$)の粘性底層内まで影響を及ぼしている。三宅¹⁰⁾によると、十分に発達した乱流の壁面近傍には、粘性底層内に形成される vortex sheet と、粘性底層の上方で低速縮近傍に形成される縦渦群が存在し、縦渦が vortex sheet を巻き込んで乱れエネルギーを得ながら発生・消滅を繰り返して乱れが維持される構造が存在するという説明がなされている。これを、いま対象としている流れに適用してみると、壁面極近傍および8mm位置付近の乱れの生成が活発な領域の構造が、三宅の指摘した構造に対応し、2次流の運動は、それらの外側に存在する構造と考えられる。以上の結果と、側壁近傍で計測したバースティング周期が底面で観測される結果の2倍程度である⁸⁾ことから、2次流が乱れの生成機構に関与することが推定される。

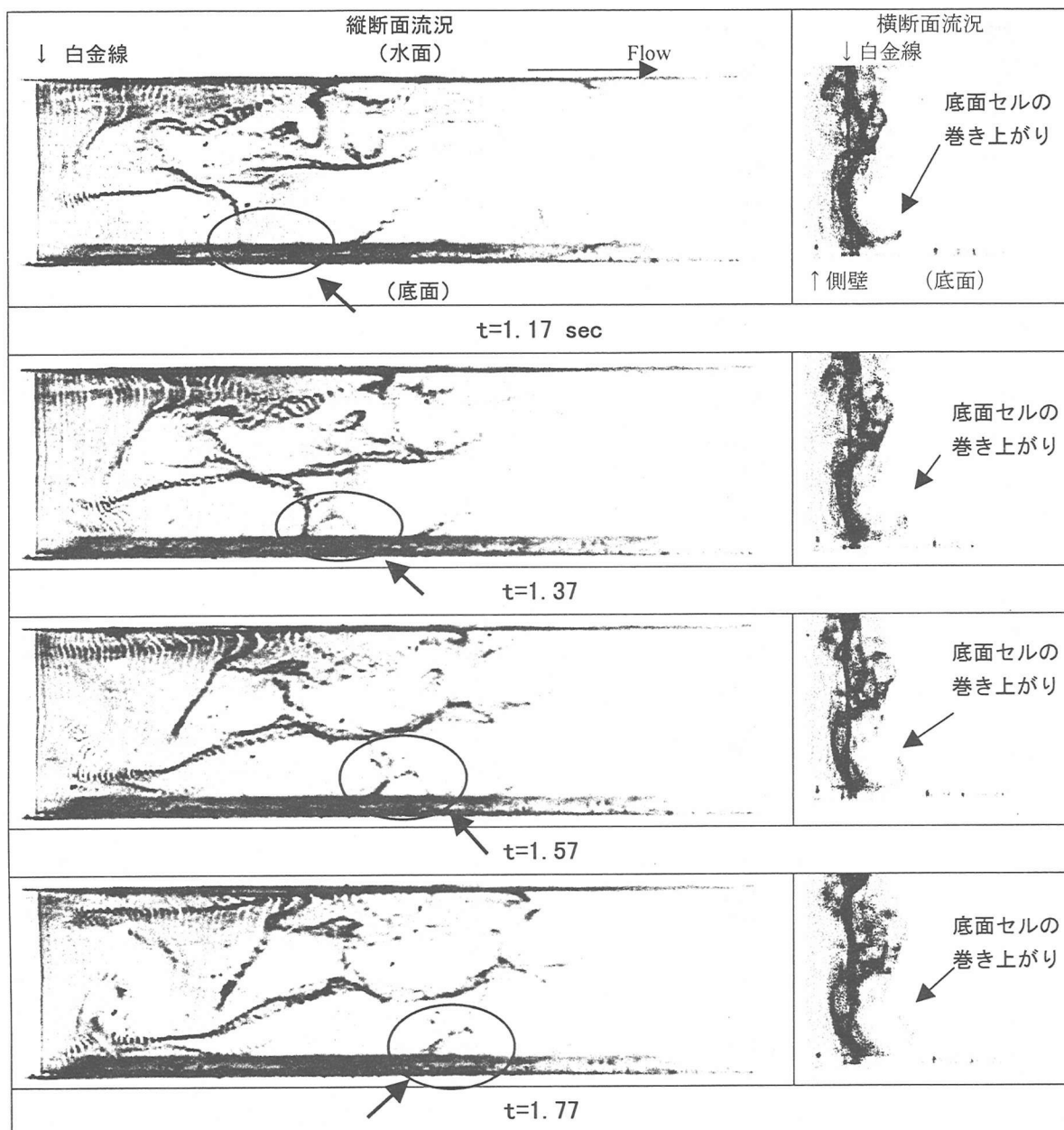
次に、2次流セルあるいは cross flow と側壁



図－9 横断面流況の経時変化（白黒反転表示）
（8mm 位置、縦横断同時可視化時）

面上の構造が干渉して複雑な流況を示す 8mm 位置の縦断面構造について検討する。この位置では非常に複雑な流況を示すが、その中に秩序だった構造が見られ、その一例が、図－7 に示す連続写真

である。側壁セルあるいは cross flow が側壁近傍に近づいた時の流れを示している（撮影間隔は約 0.4 秒、白金線は側壁より 8mm、 $z = +46$ の位置であり、バッファ層上部に位置する）。これら



図－10 縦横断面流況同時可視化結果（底面セルの形成、8mm 位置）

の写真を実体視して観察した結果、その構造は図－8に示すような概念図で説明ができる。すなわち、主要な部分は渦構造からなり、それはa、b、cの3種の渦管部分に分かれており、互いに回転方向が異なるものの互いに連結している。aの部分は、側壁に向かう流れに押し出されて前方に回転しつつ、局所的な速度の差により馬蹄形状を呈する。bは、側壁に衝突した流れが上下に広がる際に形成する強い渦管であり、側壁より離れて発達し、水深規模の縦渦を形成する。cは、bにより上下に押しのけられた流体を補うように形成される渦管であり、水面と底面近傍に形成される低速部に連なって行く。

以上の構造をより詳細に見るため、縦断面およ

び横断面流況をデジタルビデオカメラを用いて同時に可視化し、キャプチャした後に市販の画像処理ソフトを用いてインターレース処理・レベル調整・反転表示した可視化結果を用いる。なお、結果には水素気泡の浮力の影響があるが、乱れが小さな状態（図－11）において、白金線より水深の1.5倍程度までタイムラインの上昇は小さく、浮力の影響は微小であると判断した。

図－9は、横断面流況を0.2秒毎（6フレーム毎）に並べたものである。なお、パソコンの処理能力の関係でコマ落ちしている箇所がある。タイムラインは左右に変動しており、横断方向の流れの存在が明らかである。半水深付近のタイムラインに着目すると、水路中央側に膨らんだのちに消滅し、

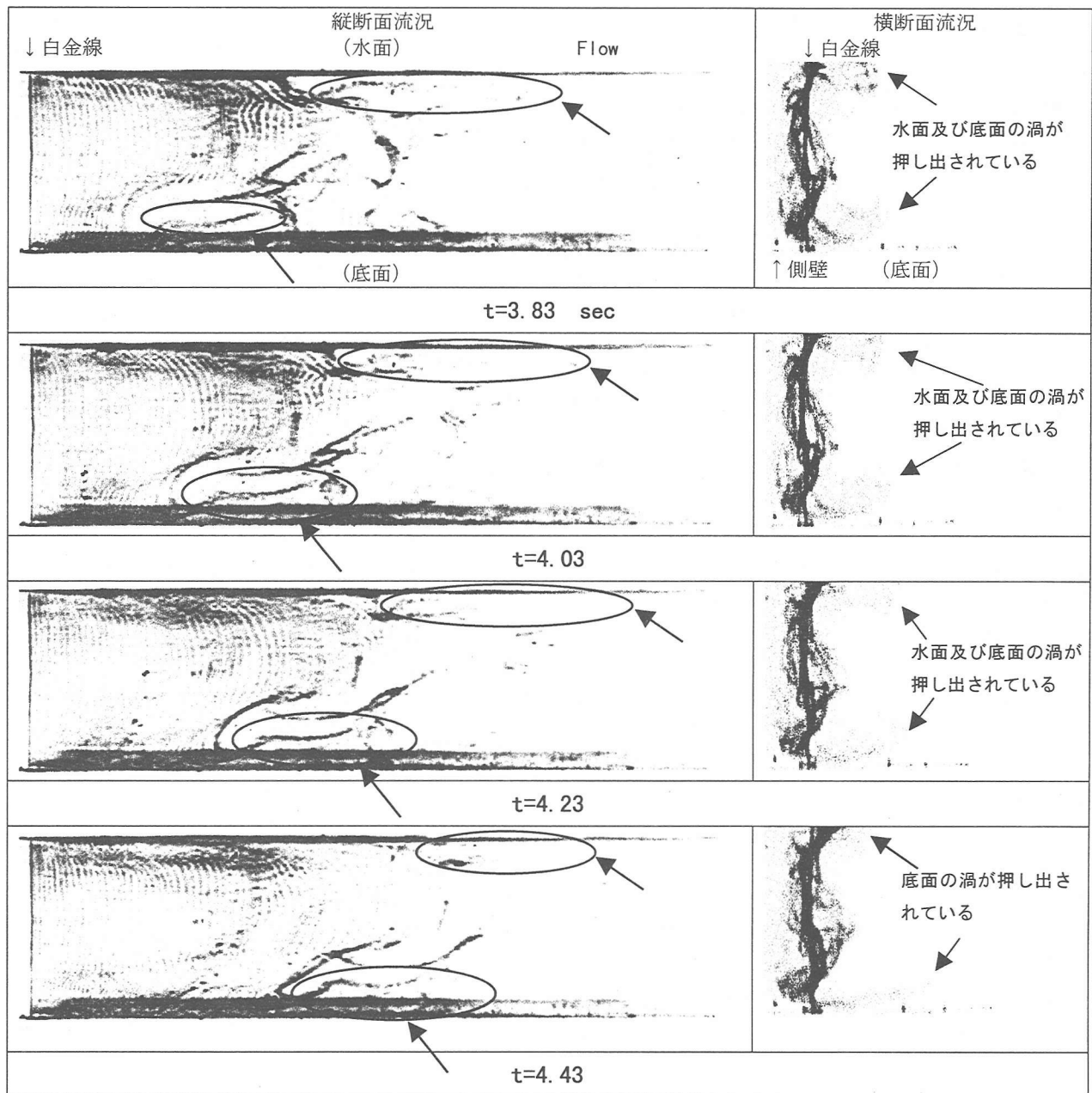


図-11 縦横断面流況同時可視化結果（水面と底面の渦の押し出し、8mm 位置）

その後、側壁側に押し戻される現象が周期的に繰り返されている。これは、図-8に示した構造が周期的に通過していることを示している。また、図には、2種の渦構造が捉えられている。それは、 $t=1.17 \sim 1.97$ の底面セルの形成と、 $t=2.87 \sim 4.43$ の渦の放出である。

これらについて、同時刻の縦断面と横断面流況を示したものが図-10 および図-11 である。図-10を見ると、図-6(2)と同様に、下流側では、底面付近の流体が上流側の流れに押し出されるように捲れ上がり底面セル（図中の矢印部分）を形成しており、上流側の半水深付近から底面と水面

に向かう軸を持つ2つの渦構造が発達している。これは、図-8の概念図を用いると、bの渦管が側壁から離脱した後、cの渦管が発達している様子が捉えられたものと説明できる。一方、図-11では、上流側の流れの乱れは小さく、全体の構造を一掃し、下流側にあった底面と水面の渦を水路中央側に放出させている様子（図中の矢印部分）が捉えられている。これは、cross flow が直接側壁に達したものであり、図-5(3)に相当している。また、図-8の構造に基づいて考えると、aの渦管が形成される前方で、起こっている現象として説明される。

4. おわりに

本研究では、長方形断面開水路流れの側壁近傍で見られる2次流と3次元渦構造について実験結果に基づく検討を行った。得られた主な結果は、以下のようである。

- 1) 第2種の2次流でも Bradshaw の言う Type(a) の cross flow が観察され、その大きさを可視化結果から推定すると1～2 cm/s程度であり、断面平均流速の10%以上となる、
- 2) 渦を形成したときのみ認識される Type(b) の2次流は、平均速度場と可視化結果の両方で確認できる、
- 3) 側壁近傍の2次流は乱れの生成機構および渦構造の形成に深く関与する、

第2種の2次流が卓越する場において cross flow が瞬間速度場のみで確認される理由は、平均速度場の結果では平均化により検出出来なくなるためと考えられる。また、cross flow の成因は、主流の揺らぎや局所的な圧力の不均衡が考えられるが、詳細については今後の検討が必要である。

参考文献

- 1) Prandtl, L.: Essentials of Fluid Dynamics, Blackie, London, 1952.
- 2) Bradshaw, P.: Turbulent Secondary Flows, Ann. Rev. Fluid Mech., 19, pp.53-74, 1987.
- 3) 例えば、Nezu, I. and Nakagawa, H.: Turbulence in Open-Channel Flows, IARH MONOGRAPH, BALKEMA, Chap.5 and 9, 1993.
- 4) Mueller, A.: Secondary Flow vortices, A Structure in Turbulent Open Channel Flow, in Structure of Turbulence in Heat and Mass Transfer, Ed. Z.P.Zarcic, Hemisphere, Washington D.C., 1982.
- 5) Imamoto, H. and Ishigaki, T.: Flow Visualization of Secondary Flow in a Transverse Cross Section of an Open Channel Flow, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.5, No.3, pp.268-273, 1992.
- 6) Imamoto, H., Ishigaki, T. and Shiono, K.: Secondary Flow in a Straight Open Channel, Proc. of 25th Congress of IAHR, Vol.1, pp.73-80, 1993.
- 7) 石垣泰輔, 武藤裕則: 複断面蛇行開水路流れの構造と底面せん断力分布について, 土木学会水工学論文集, 第42巻, pp.901-906, 1998.
- 8) Ishigaki, T., Imamoto, H. and Shiono, K.: Coherent Structure near the Side-wall in Open Channel Flow, Proc. of 26th Congress of IAHR, Vol.1, pp.182-187, 1995.
- 9) 石垣泰輔, 今本博健, 武藤裕則, 竹尾然生: 開水路側岸近傍の2次流と組織構造について, 第1回環境流体シンポジウム講演論文集, 日本流体力学会, pp.329-330, 1996.
- 10) 三宅裕: 壁近傍の縦渦の数値シミュレーション, ながれ14, pp.418-426, 1995.

(1998年4月24日 受付)