

## 開水路乱流隅角部の二次流れの形成機構

Formative Mechanism of Secondary Flow in Turbulent Open Channel Flow in Corners

徳山 高専 佐賀 孝徳 Takanori SAGA  
徳山 高専 大成 博文 Hirofumi OHNARI  
徳山 高専 渡辺 勝利 Katutoshi WATANABE  
山口大学工学部 斎藤 隆 Takashi SAITOU

Formative mechanism of secondary flow in turbulent open channel flow in corners with a 90-degree angle and a 45-degree angle are investigated using the flow visualization technique. The flow visualization were done in the streamwise view using fluorescent dye illuminated by a laser light sheet.

It is found that the instantaneous secondary flows are formed when the counterrotating streamwise vortices on the bed wall and on the side wall oscillate alternately to the corner direction. Further in corners with a 90-degree angle, counterrotating streamwise vortices on the bed wall play important role of forming the instantaneous secondary flow.

Keywords: secondary flow, formative mechanism, flow visualization, streamwise vortices

### 1. はじめに

従来より、開水路乱流隅角部には、乱流二次流れとしての縦渦<sup>1)</sup>の存在が知られている。この渦の特徴は強さが弱いにもかかわらず流れ場を三次元化し、しかも減衰がわずかで流れ方向に長く持続することにあるが、いまだにその形成機構については不明のままとされている。この形成機構を解明するためには、従来の長時間平均を必須とする点計測法では不十分であり、瞬時に流れ場の空間的な情報を収集し、それを時間的に追跡していくことが重要と考えられる。

本研究では、開水路乱流隅角部の二次流れの形成機構を明らかにするために、その横断面可視化が行われた。その結果、隅角部の二次流れの形成に、底壁および側壁の壁縦渦構造<sup>2)</sup>が重要な役割を果たすことが明らかとなった。また、隅角部の形状については、底壁と側壁のなす角度が90度と45度の2つが採用され、両者における二次流れの形成機構の相違点についても考察がなされた。

### 2. 実験装置および実験方法

実験には、長さ10m、幅60cm、高さ15cmの可変勾配型の総アクリル製開水路が用いられた。上流端には整流用のハニカム、下流端には水位調節用堰が設置され、水路床勾配は1/1000に設定された。また、45度隅角の実験には、長さ8mのアクリル製の板が側壁に取り付けられた。流れの可視化には、レーザースリットによる横断面視法<sup>2)</sup>が用いられた。トレーサーには、比重1.005のフルオレセインナトリウム水溶液が用いられ、それが水路上流端より注入された。スリット面に形成される可視化の画像は、それより約50cm下流の位置に置かれた鏡を通して、水路上方のビデオカメラによって連続的に撮影された。その際、鏡は下流側壁より水路中央に向かってやや離れた地点に置かれ、鏡の設置によって隅角流れが遮断されたり、著しく乱されたりす

ることがないような注意がなされた。本実験条件は、水路中央部において最大流速 $U_{max}=7.14\text{cm/s}$ 、水深 $H=8.8\text{cm/s}$ 、レイノルズ数 $Re=4020$ 、摩擦速度 $u_\tau=0.38\text{cm/s}$ である。

### 3. 隅角部における二次流れの形成機構

#### 3. 1 90度隅角部

Fig.1には、90度隅角部に形成された壁縦渦の横断面可視化による連続写真の一例が示されている。各写真の下部に示された数字は、最小単位1/100秒の時刻を示している。すでに著者らは、開水路乱流中央部の平滑壁面上において、この壁縦渦構造<sup>2)</sup>（内層に形成されるヘヤピン渦型の渦対）の特徴を詳しく検討し、さらにそれと流れ方向および横方向の流速変動の相互関係を明らかにしている<sup>3), 4)</sup>。そこで、以下の考察はこれらの壁縦渦の知見を踏まえて行う。

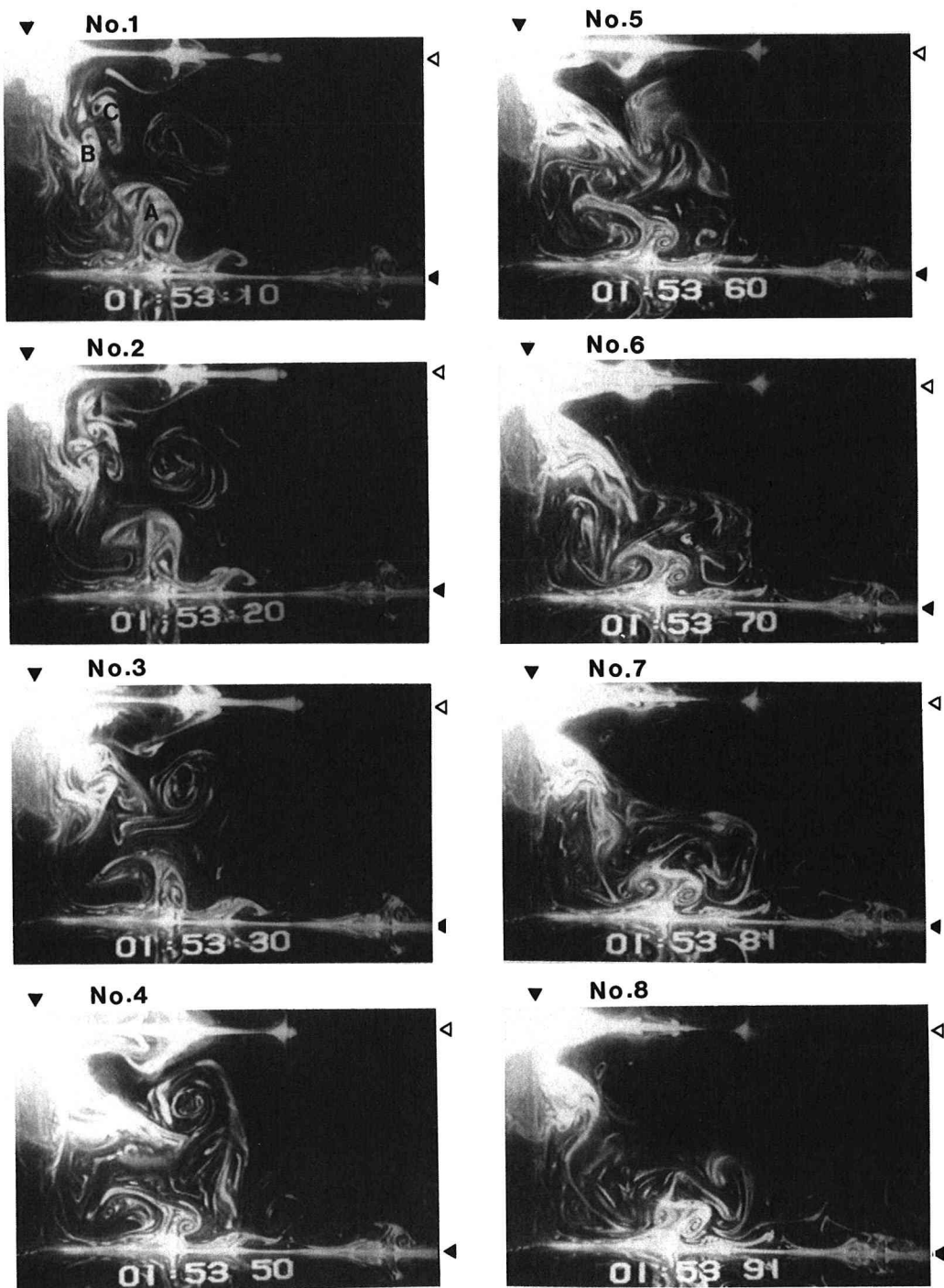
No.1には、底壁に形成された壁縦渦（A渦）、側壁上の壁縦渦（B渦）およびB渦のすぐ斜め上方に新たに形成されたC渦が認められる。No.2では、A渦が隅角方向に揺動しながら、隅角方向に向かう流れを形成しているようである。また、それと同時に、B渦の水表面方向へ移動する現象が観察された。No.3では、A渦は隅角側の渦径を拡大しながら、同時に壁縦渦の高さも時間的に徐々に低くしていく。側壁上のB渦は、さらに水表面方向に移動する。C渦は、B渦の挙動に伴い揺動しながら水路中央方向へ規模を拡大して発達する。No.4では、さらにNo.3の挙動が進み、とくにC渦の規模の拡大は顕著である。No.5では、C渦は変形しながら隅角方向へ大きく移動し、A渦に近づいていく。No.6では、C渦はA渦の隅角側の一部に相互作用を持ちながらさらに発達し、上部の流体塊を隅角方向に捕り込むように挙動している。それに伴い、A渦の隅角方向への揺動は見られなくなる。No.7では、側壁上のB渦は消え、A渦は、逆に水路中央方向へ揺動を始める。No.8では、A渦はさらに揺動しながら水路中央方向に移動する。C渦も水表面方向に移動する。またNo.8以後、隅角部近傍には、トレーサーをほとんど含まない領域が拡大してゆく。このことは、高速流体の入り込みの存在を示唆していると考えられる。

以上の壁縦渦の挙動を分かりやすく説明するために、Fig.2に示すような壁縦渦の時空間構造が描かれた。本図は、1/30秒間隔のビデオ映像を時間的に重ねたものであり、底壁と側壁上に形成されたそれぞれの壁縦渦の挙動を分かりやすくするために、それぞれが別々に描かれた。底壁上のA渦は隅角方向へ揺動し、それに伴って側壁上ではB渦が隅角方向から離れる方向へ移動する現象が明らかである（図中のS1領域）。それに続きS2領域では、側壁上のC渦が隅角方向へ発達しながら揺動し、それにより隅角方向へ揺動しつつあった底壁上のA渦が、隅角から離れる方向へ移動していることが明らかである。これらの一連の挙動を踏まえると、隅角近傍の両壁に形成された壁縦渦が交互に隅角方向へ揺動し、その相互作用によって隅角への瞬間的な二次流れが形成されているように思われる。

Fig.3には、Fig.2とは異なるタイプの、隅角近傍の底壁および側壁上に形成された壁縦渦の時空間構造が示されている。底壁上の壁縦渦は、時間の経過に従って隅角方向へ移動し、一方、側壁上の壁縦渦は、隅角から離れる方向へ移動している。これは、Fig.2で示された2つの壁縦渦の交互の揺動とは異なり、1つの壁縦渦の揺動により、隅角部への瞬間的な二次流れが形成される場合の一例である。

Fig.4には、これらの2つのタイプの壁縦渦の挙動が概念的に示されている。Sタイプは、Fig.3に示したような、1つの壁縦渦の揺動によって瞬間的な隅角へ向かう流れが形成される場合のパターンを示し（(1)の形式が側壁、底壁に発生する）、Dタイプは両壁の壁縦渦の交互の揺動が瞬間的な二次流れを形成する場合のパターンである（(1)+(2)の形式）。

次に、隅角へ向かう瞬間的な二次流れを形成する壁縦渦の揺動現象の発生周期について調べると、それはほぼ2.0秒であり、とくに側壁側に比べ、3倍の割合で底壁側の壁縦渦の発生頻度が高く、90度隅角の場合、二次流れの形成には底壁の壁縦渦が側壁の壁縦渦よりも重要な役割を果たしていることを示唆している。



0 100  $\frac{1}{u_*}$  0 10 cm ▷ ◁: water surface  
 ▶ ◀: wall surface

Fig.1 Continuous streamwise views of streamwise vortices in the corner with a 90-degree angle.

### 3. 2 45度隅角部

Fig. 5には、45度隅角部に形成された壁縦渦の横断面可視化による連続写真の一例が示されている。No. 1には、水表面付近に大規模に発達したと思われる壁縦渦（A渦）が観察される。これは、45度隅角部に顕著に形成される壁縦渦<sup>5)</sup>である。これに対して、B渦は、別の壁縦渦である。また、底壁にも壁縦渦が形成され、これらの渦の相互作用に注目することが重要と思われる。No. 2では、水表面まで到達したA渦が半時計回り方向に回転し、B渦の上まで下降し、それとともにB渦は隅角方向へ揺動する。No. 3では、A渦はさらに大規模にB渦上に現れ、それとともに隅角へ向かう大規模な流れを誘起しているようである。一方、B渦は、渦径を小さくし、より足元の部分に相当すると思われる渦の断面形象を呈している。No. 4では、A渦はその規模を縮小させつつ、側壁上のより小さくなったB渦上へ下降する。ところが、これらの側壁上の壁縦渦の挙動に対応して、底壁には半水深程度の高さを持つ壁縦渦（C渦）が新たに形成される。No. 5では、前写真で側壁中央に形成されていたA渦が、隅角方向へ揺動し、それに伴って、C渦は水路中央方向へ揺動する。ところが、0.3秒後のNo. 6では、C渦は逆に隅角方向へ揺動する。この時水表面付近の高速流体塊が隅角に向かって進入し、さらにA渦は側壁上をより上部に移動させられるようである。そして、B渦は断面内から消えている。No. 7では、高速流体塊によってA渦がさらに水表面方向へ移動し、C渦も水路中央方向へ揺動する。No. 8では、A渦は徐々に減衰し、この約0.8秒後には消失することがその後のビデオ画像より確認された。

以上の一連の壁縦渦の相互作用を踏まえると、45度隅角部へ向かう瞬間的な二次流れの形成には、壁縦渦が重要な役割

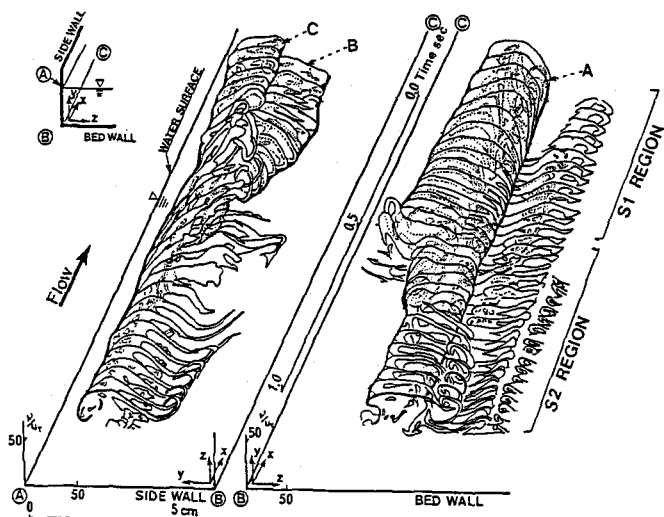


Fig. 2 Time-space structure of streamwise vortices (D-type).

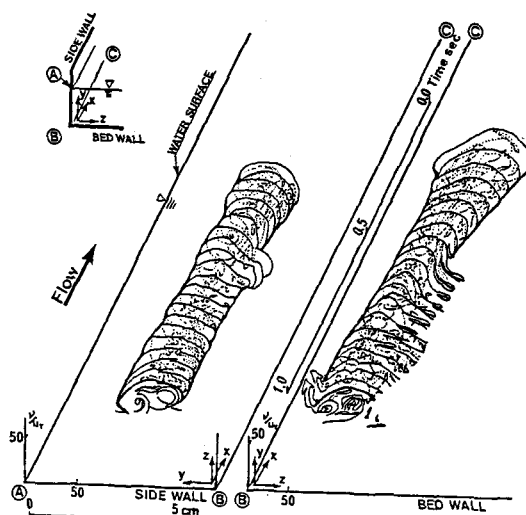


Fig. 3 Time-space structure of streamwise vortices (S-type).

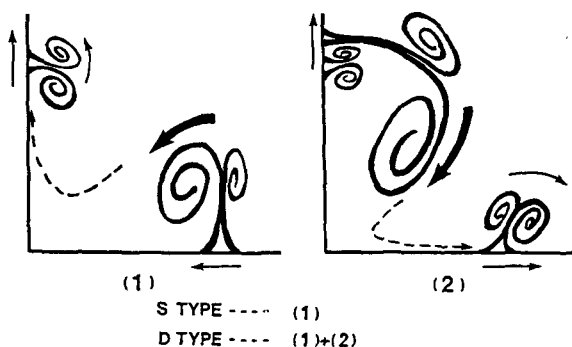


Fig. 4 Conceptual model of formative mechanism of secondary flow.

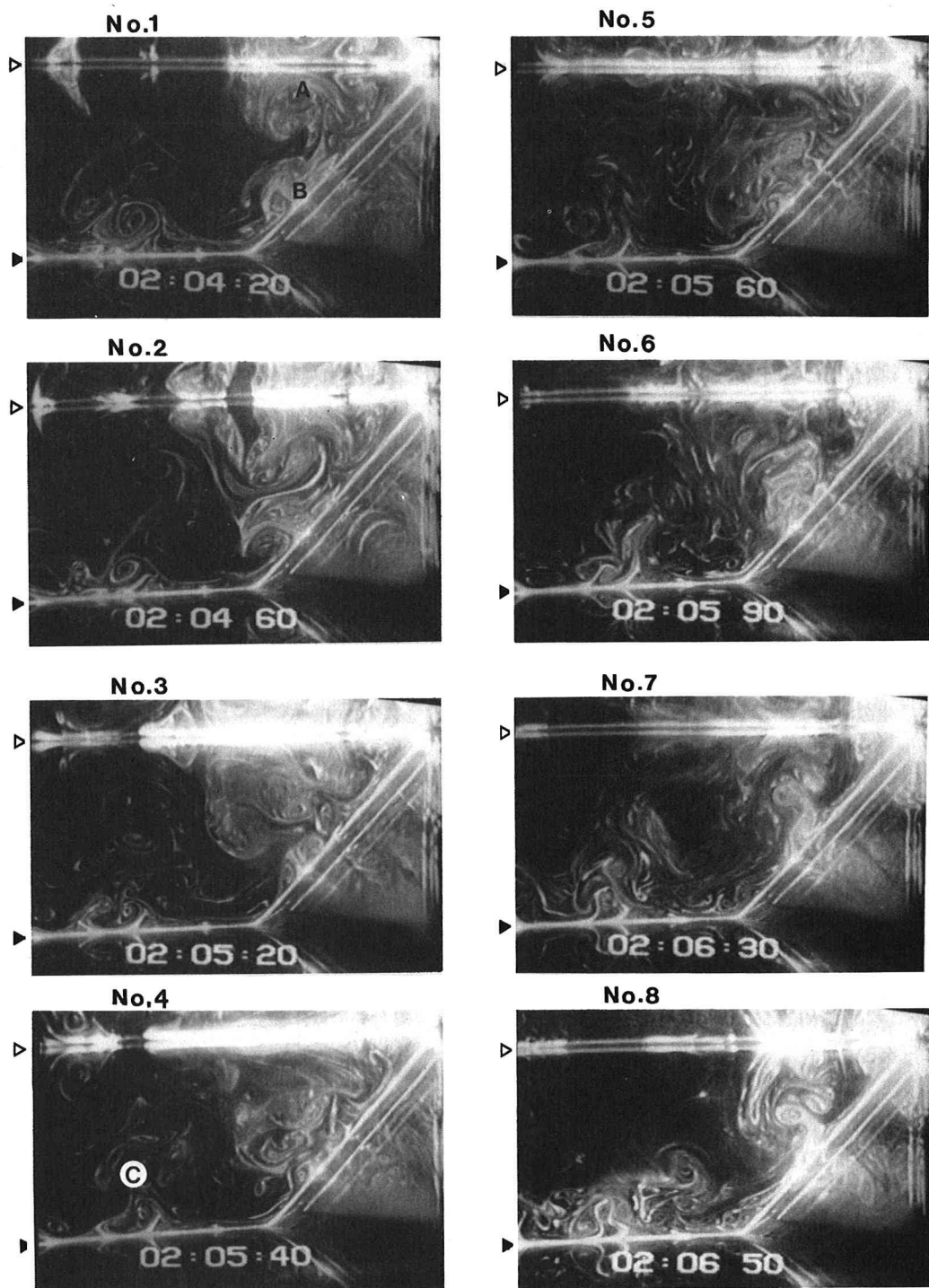


Fig.5 Continuous streamwise views of streamwise vortices in the corner with a 45-degree angle.

を果し、基本的には90度隅角部で示されたDタイプと同一の機構が存在していると思われる。ところが、隅角へ向かう二次流れのパターンは、これのみではなく、90度隅角におけるAタイプも観察された。さて、90度隅角と45度隅角の比較を行うと、壁縦渦の揺動回数においては、45度隅角の場合が底壁上で0.22回/秒、側壁上で0.29回/秒とほぼ同じであるのに対し、90度隅角では、底壁上で0.38回/秒、側壁上で0.13回/秒であった。また、45度隅角の壁縦渦が水深規模で揺動する回数が、全体の約3割を占めた。以上の相違を考慮すると、隅角の幾何学条件によって、底壁および側壁上に形成された壁縦渦の揺動と相互作用の自由度が決められているように思われる。

#### 4. おわりに

開水路乱流隅角部の横断面視によって、隅角部近傍に形成された壁縦渦の時空間構造が明らかにされ、90度および45度の隅角部における二次流れの形成機構が考察された。本論の主要な結論は以下の通りである。

(1) 隅角部の瞬間的な二次流れの形成には、底壁、側壁に形成された壁縦渦の揺動と壁縦渦同士の相互作用が重要な役割を果たしている。この揺動には、2つのタイプ(Sタイプ、Dタイプ)が存在し、Sタイプは、1つの壁縦渦の揺動により隅角方向の瞬間的な二次流れが形成される場合であり、Dタイプは両壁の壁縦渦の交互の揺動による場合である。

(2) 90度隅角および45度隅角には、2つのタイプの壁縦渦の揺動がどちらも形成されるが、その揺動の発生頻度には異なる特徴を持つ。90度隅角部では底壁の方が側壁側より約3倍程度高く、45度隅角部についてはほぼどちらも同じである。このことは、90度隅角では底壁側の壁縦渦が側壁側より隅角部方向への二次流れの形成に対して重要な役割を果たすのに対し、45度隅角では前者に比して側壁側の壁縦渦がより重要な役割を演じていることを示す。

本実験の遂行にあたり、実験およびデータ整理に協力していただいた本校卒業生の中野睦、秋貞勝彦、本校在学生の池辺俊之、上田清次郎、児玉隆裕の諸氏に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 谷一郎：せん断流れにおける縦渦の形成，ながれ，1983。
- 2) 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，1985。
- 3) 佐賀孝徳・大成博文・渡辺勝利・斎藤 隆：開水路乱流内層の渦構造と流速波形の相互関係，土木学会論文集，1988。
- 4) 大成博文・佐賀孝徳・渡辺勝利・斎藤 隆：壁乱流内層の秩序構造のラグランジュ的追跡，第19回乱流シンポジウム，1987。
- 5) 佐賀孝徳・大成博文・渡辺勝利・斎藤 隆：開水路乱流隅角部の秩序構造，中国四国支部学術講演集，1988。