

自由水面付近の渦対による乱流構造

Turbulent structure of a pair of vortex in the vicinity of the free surface

東北大学大学院 石井 義裕 Yoshihiro ISHII

東北大学工学部 板井 雅之 Masayuki ITAI

東北大学工学部 沢本 正樹 Masaki SAWAMOTO

A series of simplified experiment were carried out in order to study a dynamic effect of a free surface. The behaviors of vortex pair near the free surface was compared with that of near the fixed boundary. The velocity fields were measured by Laser Doppler Anemometer, from which the vorticity distributions were calculated. A visualization technique was also utilized to observe the vortex moving. The following was confirmed; the presence of the free surface not only restricts the movement of vortex like a fixed wall, but also results an energy conversion from turbulence to waves.

Keyword : turbulence, vortex, free surface

## 1. はじめに

開水路流れの特徴は自由水面が存在することである。その流速分布、乱流構造を議論する場合、開水路流れをその水深の2倍の流路を持つ管路として扱うことも便宜的には行なわれている。さらに、水面近くでの乱れの減衰を考慮した乱流モデルの提案もなされている<sup>1)</sup>。自由水面は、単純にシェアフリーの境界であるばかりではなく、大規模な乱流構造を制約する、波動としてのエネルギー伝搬性を持つ、などの力学的特性を持っている。開水路の流れの乱流構造を考える場合、主に2つの乱れによって決定されている。一つは風波にみられるような水表面に渦があると考えられることのできる乱れであり<sup>2)</sup>、もう一つは、バースティング現象で代表されるような底面からの渦により影響を受ける乱れである。

本研究は、後者に代表されるような底面からの影響を受ける流れを対象として自由水面の力学的条件について考察する。ここでは簡単な場合として、バースティングで生じた乱れの代わりに底面から渦対を発生させる。この渦対を底面からの乱れのモデルと考える。自由水面や固定壁に衝突する渦対を一つの乱れと考えた場合の境界での乱流構造を調べる。また、可視化手法を用いることにより渦対による乱れの自由水面への影響を調べ、自由水面の力学的特性が乱流構造に与える影響を調べた。

## 2. 実験装置および方法

### 2.1 実験装置および実験方法

実験には、図1に示すような幅20cm・高さ80cm・長さ100cmの長方形断面を持つ透明なアクリル製の水槽を用いた。水槽の内部にはピストンを設けてある。このピストンを押すことにより、水槽の底面に設けた幅1cmの2次元スリットから渦対を発生させることができる。渦対を衝突させる境界としては、自由水面と固定壁の2ケースとした。固定壁は水槽の上方から水面を押え込む方法とした。実験は2ケースともほぼ同じ条件で行なわれるよう留意した。実験条件は、水深100mm、渦対の進行速度17cm/sである。

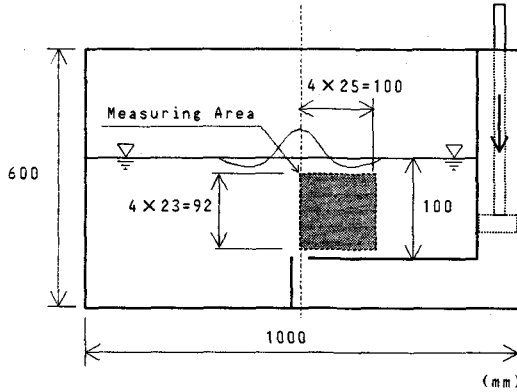


図-1 実験装置

## 2.2 可視化

可視化には蛍光染料注入法を用いた。トレーサには蛍光性のあるメチレンブルー水溶液を用いた。トレーサは、渦対の発生前に2次元スリットの中に一定量を注入しておく。水槽前面および上部には2000Wの撮影用ライトを、水槽側面にはVTRカメラを設置した。流速測定の場合と時間が同じになるように、撮影される画面内にタイマーを撮した。2次元スリットから渦対を発生させ、渦対が自由水面および固定壁に衝突する様子をシャッター速度1/250secでVTRに収録した。VTRに収録された可視化画像データは、0.1sec毎に画像処理装置に取り込み、VTR画像のままでは曖昧であった渦対の移動状況が明確になるように処理した。

## 2.3 流速測定

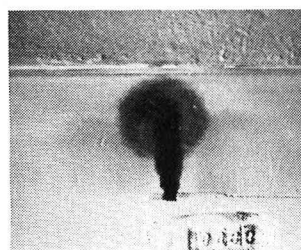
流速の測定には2成分のレーザー・ドップラー流速計を用いて前方散乱方式で行った。座標軸は図-1に示したように渦対を放出する2次元スリット中央を原点として、水平方向にX軸、鉛直上向きにY軸をとった。計測点はX、Y方向共に4mm間隔とし、Z方向には水槽中央部とした。測定は水槽の2次元性を確認した後、現象の対象性を考慮して図-1の斜線部に示すように、Xが正の領域のみ行なった。ピストン始動時が時間の原点( $t=0$  sec)となるようにトリガーを設定した。データはサンプリング間隔200Hz、計測時間10secとしA/D変換により処理したものをハードディスクに記録し、それを処理した。現象は非定常であるので本来アンサンブル平均による処理を行なう必要があるが、今回は一回のデータを時空間に対し最小自乗法でスムージングして用いることにより処理した。

## 3. 可視化

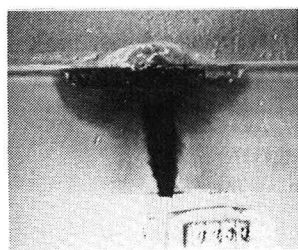
可視化データを画像処理した結果を時間間隔0.2secで示す。図-2に自由水面の場合を示す。(a):2次元スリットから放出された渦対が水面に衝突する直前。(b):渦対が水面に衝突し水面の水上昇が生じている。(c):水位が降下し、渦対はX方向に波動として移動する。(d):渦対がX方向に移動しながら下方に広がる。渦対は元の形状を維持している。(e):さらに渦対が拡大し $Y=0$ の高さまで届いている。

図-3に固定壁の場合を示す。(a):2次元スリットから放出された渦対が固定壁に衝突する直前。(b):渦対が固定壁に衝突し渦対がつぶれている。(c):渦対が固定壁に沿ってX方向に移動する。(d):渦対は固定壁に沿って移動しており自由水面の場合に比べて広がりが少ない。(e):渦対がY方向にも広がり始める。

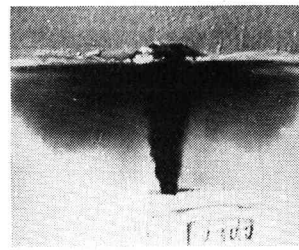
自由水面の場合、渦対は水面に衝突後も渦対の形状を維持しているが、固定壁の場合は渦対の形状が崩れてしまう。自由水面の場合は渦対が拡大して $Y=0$ に到達する時間が固定壁の場合の約1/2である。



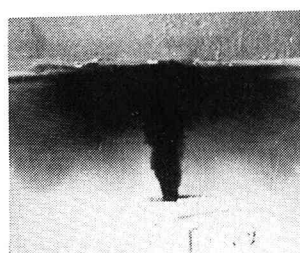
(a)  $t=0.3s$



(b)  $t=0.5s$



(c)  $t=0.7s$



(d)  $t=0.9s$



(e)  $t=1.1s$

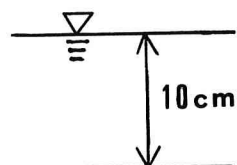
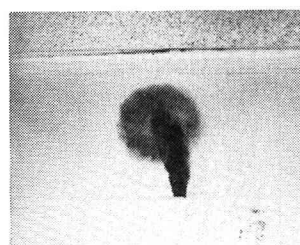
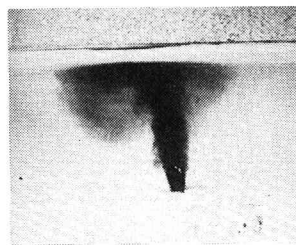


图-2 自由水面



(a)  $t=0.3s$



(b)  $t=0.5s$



(c)  $t=0.7s$



(d)  $t=0.9s$



(e)  $t=1.1s$

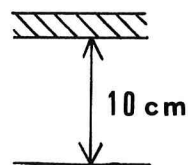


图-3 固定壁

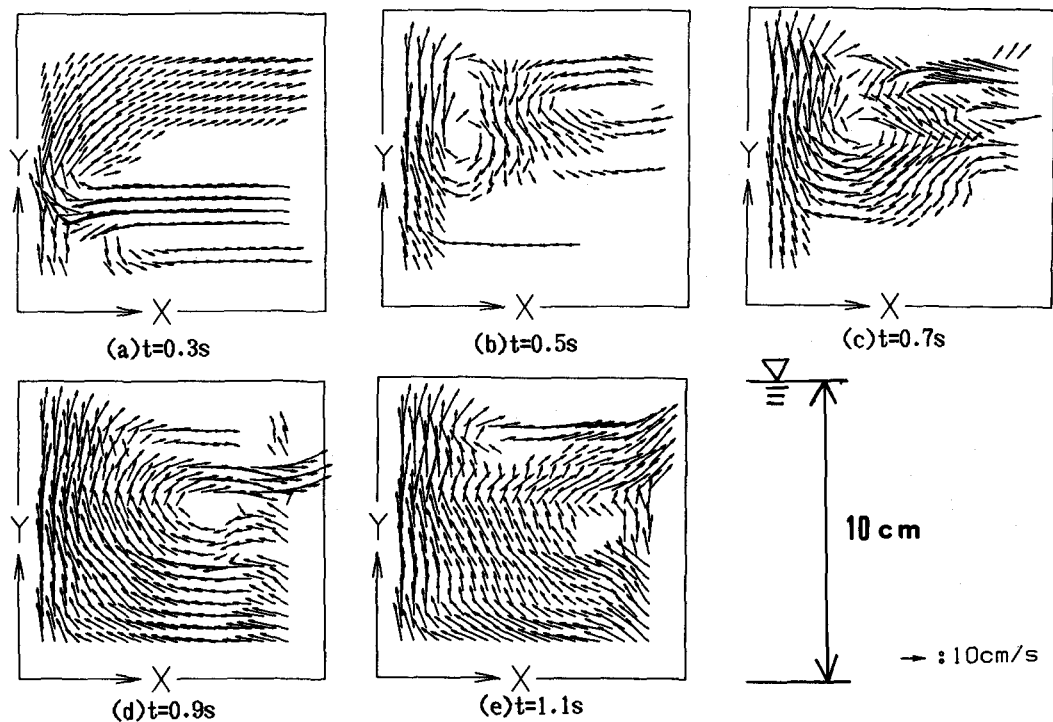


图-4 流速分布 (自由水面)

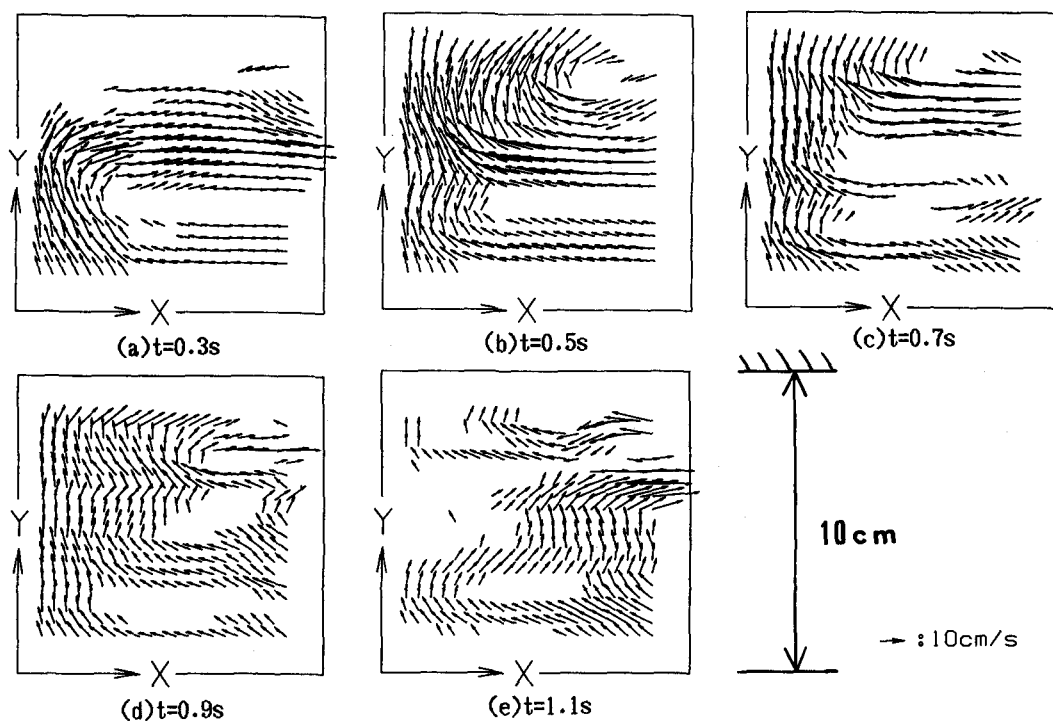


图-5 流速分布 (固定壁)

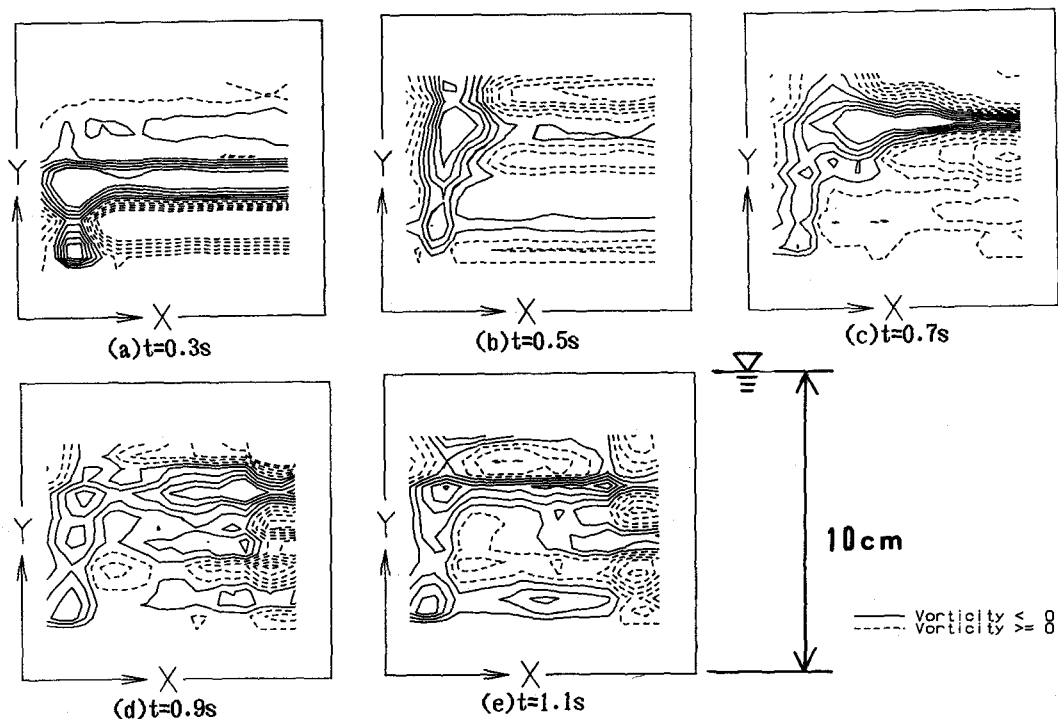


图-6 渦度分布 (自由水面)

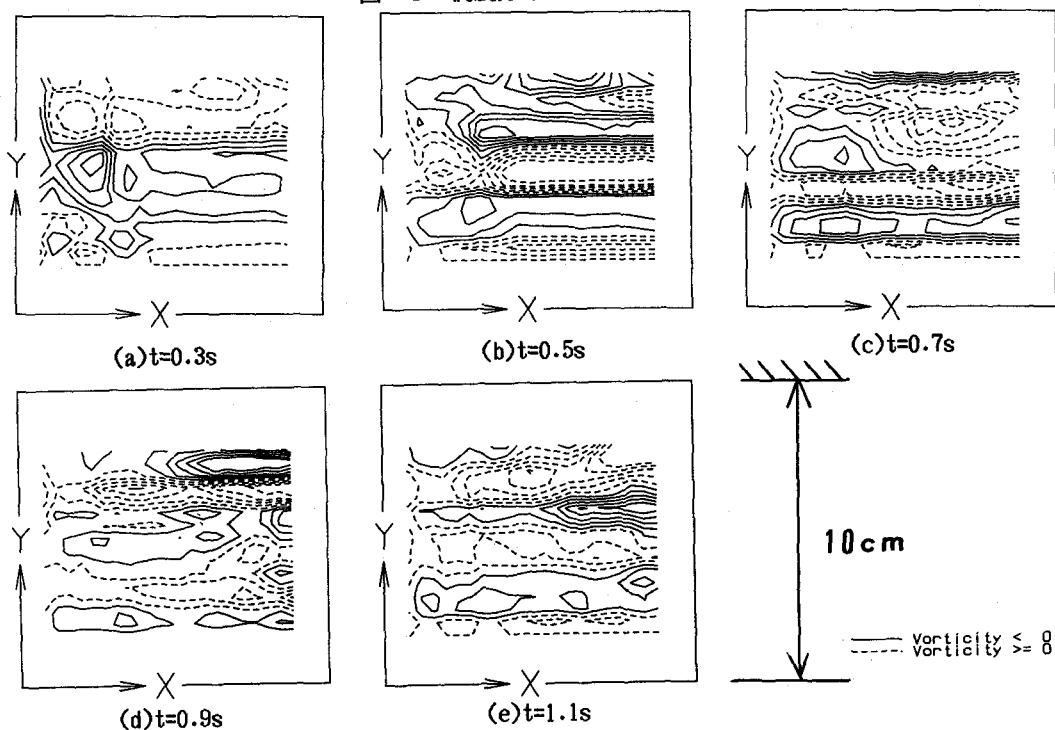


图-7 渦度分布 (固定壁)

#### 4. 流速測定

##### 4.1 平均流速分布

図-4に自由水面の場合の平均流速分布を示す。図中の矢印は  $5\text{cm/s}$ 以上の流速ベクトルのみを表示している。図の枠は計測範囲である。(a):渦対がスリットから放出されている。(b):縦に細長い渦が形成されている。この渦が水面に衝突して水面の上昇が起こっている。(c):水面の降下にともない渦対が下方に移動している。(d)(e):渦対はX方向に移動している。

図-5に固定壁の場合の平均流速分布を示す。(a):渦対が固定壁に向かっている。(b):渦対が固定壁に衝突した。(c):渦対は固定壁に沿ってX方向に移動している。(d)(e):固定壁に沿って移動していく。

##### 4.2 渦度分布

図-6に自由水面の場合の渦度分布を示す。図中の等高線は渦度が  $\pm 20\text{s}^{-1}$ 以内のものを示してある。また渦度が負の場合が実線、正の場合が点線である。図の枠は計測範囲である。(a):渦対が放出されスリット上に渦度が分布している。(b):渦度は縦に細長い分布をしている。渦対は水面に衝突している。(c):渦度は横に長い分布になり強い渦度が集中している。水面に衝突した渦対が水面の降下にともなって下方に押し戻された。(d)(e):渦度はX方向に移動しているが、全体の渦度が均一化し始めている。渦対の拡大が始まっている。

図-7に固定壁の場合の渦度分布を示す。(a):渦対が放出されている。(b):渦度が固定壁付近に分布し渦対は固定壁に衝突している。(c):渦度は固定壁付近で強い分布を示している。(d):固定壁付近で強い分布を示していた渦度がX方向に移動している。(e):固定壁付近の渦度はX方向に移動したが、渦対の拡大のためY方向中央部に渦度の集中がみられる。

#### 5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

自由水面が境界の場合、渦対が衝突することにより水面が上昇している。水位上昇はその後、渦の移動にともなう水面変動と波動としての変動とに分かれる。渦度は、水面に衝突した渦が水面より下方でX方向に移動しながら拡大している。渦の拡大の早さは固定壁の場合よりも早い。固定壁が境界の場合、渦対が衝突すると渦は固定壁付近でつぶれてしまう。その後、渦は固定壁に沿って広がりながら移動する。

本研究をおこなうにあたり、東北大学技官 佐藤栄司氏の助力を得た。ここに謝意を表します。

#### <参考文献>

- 1) 柁津家久・中川博次:自由水面を考慮した開水路乱流の数値計算法—修正  $k-\epsilon$  乱流モデルによる解法—, 京都大学防災研究所年報, 第29号B-2, pp.647-673, 1976.
- 2) 瀧岡和夫・増田幹夫・鈴木徹:境界要素法と離散渦法を応用した「波」と「渦」の相互干渉過程の解析, 第36回海岸工学論文集, pp.41-45, 1989.