

立命館大学大学院
立命館大学理工学部
立命館大学理工学部
立命館大学理工学部

学生員 ○ 鶴飼宣行
正会員 J.C.Wells
正会員 江頭進治
正会員 中川博次

1.はじめに 開水路流れ、すなわち河川の流れにおいては様々な組織渦が存在し、各種の物質輸送がこの組織渦によって引き起こされる。外部領域でのボイルは、実河川の3次元流況や土砂輸送の非一様性を引き起こす成因として当初より重要視されてきたが、それら自体の発生原因や物理機構は現在も明らかにされていない。近年高精度で流れを可視化できるPIV手法や直接数値シミュレーションを用いた乱流構造解析手法¹⁾により自由表面近傍に出現する間欠的な組織構造が輸送現象を支配することが徐々に明らかにされてきた。本研究では、物質輸送の構造を詳しく検討するための一環として、水面近傍での渦構造の特徴を調べるとともに、これらの渦と、底面近傍での渦、ボイルとの関連性を実験的に検討する。

2.実験方法と実験条件 本研究は流れに垂直な断面においてPIV(Particle Image Velocimetry)を用い、速度場計測を行った。図1は実験装置の概略図である。実験は長さ8m、幅50cm、高さ40cmの可変勾配型循環式直線水路を用い、水深 h は5cmとした。測定は上流端から5.5mの断面で行った。水温は10℃であり、流量は1.55l/sとした。Blasius則を用いて摩擦速度 U_* を見積もり、 U_* と h に基づくレイノルズ数は $Re^*=150$ となった。測定面には厚さ約4mmのシート状のレーザー光を照射した。測定面から50cm下流側の位置に45度の傾きを持って設置された鏡を通して、水路上部に設置されたカメラにより測定面の撮影を行った。また、水面の揺れの影響を無くするために、カメラと鏡の間の水面にはガラス板を水平に取り付けた。トレーサー粒子は、平均径 $10\mu\text{m}$ の中空ガラスビーズ(Potters Industries)を使用し、水路上流端にあるタンクで攪拌して注入した。2枚1組の画像は以下の手順で撮影されPCに取り込まれる。まずシンクロナイザー(Kanomax PIV-driver)の信号により、ダブルパルスNd:YAGレーザー(Quantel, Twins, 100mJ/pulse)から Δt 秒間隔の2本のパルスビームを出力し同じくシンクロナイザーで同期されたCCDデジタルカメラ(Kodak, ES1.0, 1008×1016pix, with Nikkor105mm microlens)をトリガー二重露光モードで操作した。デジタルカメラはフレームグラバー(Imaging Technology, IC2-XHF)を通してPCのメモリーに直接保存される。この一連の操作により、 Δt 秒間隔の2枚1組の連続画像を1秒間に15組撮影できる。今回の実験では $\Delta t=5\text{ms}$ とした。一回の実験では約23秒間の撮影を行い、350組の画像データを保存した。速度場は相互相関法によって計算し、相関値のピーク近傍の3点でガウス分布を仮定することによりサブピクセル精度で求めた。速度計算は縦横16ピクセルごとに行い、 60×57 個の速度ベクトルを得た。

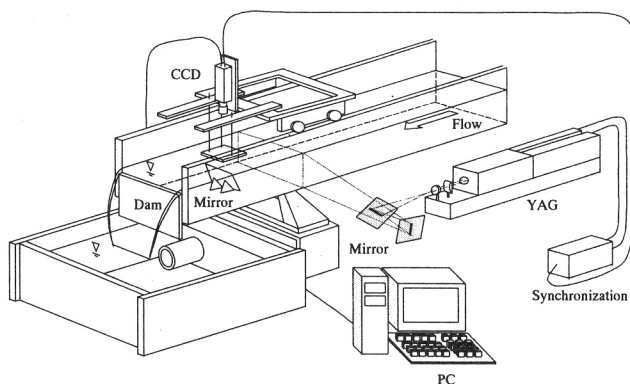


図1 PIV実験装置

3.特徴的な速度場および渦度場 図2, 3は実験により得られた速度場から渦度を計算し、渦度場と速度場を重ねたものである。渦度場は $\pm 0.25u_*^2/\nu$ の範囲で表されており、また流れの向きは画像の奥から手前である。

図2では鉛直方向に対して、水面近傍とその斜め下方の渦が約45度の傾きで横断方向に並んでおり、水面に向けての強い流れ、また底面付近から強い吹き上げが見て取れる。図3には水面近傍で鉛直方向に対し渦がほぼ平行に並んだ構造がある。こちらも水面に向けての強い流れが見て取れるが図2のような底面から水面に至る大規模な構造はない。水面近傍での強い上向き流れのある構造として図2, 3に示した2つ構造が現れたが、底

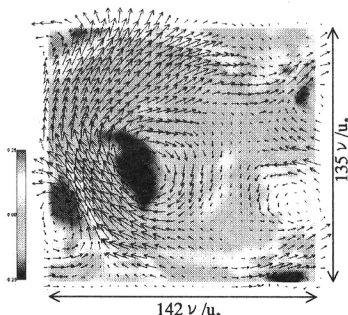


図2 特徴的な速度場

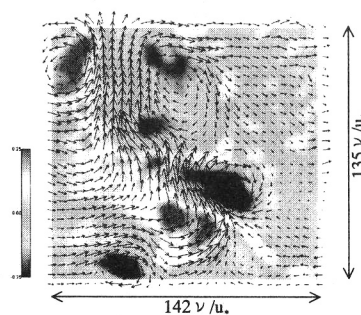


図3 特徴的な速度場

面からの強い吹き上げであるボイルと関連性があるのは、鉛直方向に対し渦が約 45 度の傾きで横断方向に並んだ構造であると推察できる。図 4 は、先に示した渦度をテイラーの凍結乱流の仮説により断面平均速度を用いて 3 次元的に並べたものである。渦度は $\pm 0.20u_*^2/\nu$ の等値面で表されており、灰色が正、黒色が負である。図 4 の結果より、底面付近からの渦が水面近傍にまで連なった構造になっているのがわかる。全てのデータを観察した結果、水面近傍の強い渦は、水面近傍に孤立して存在するのではなく、図のように底面付近の強い渦と連なって存在している場合がほとんどであった。また、底面付近から水面近傍まで達する渦は単体で存在することではなく、縦渦群のような渦運動の活発な領域で観察された。

4.時空間相関 次に、底面付近と水面近傍での渦の平均的な構造を調べるために相関による解析を行った。渦構造の解析には、速度勾配テンソルの第 2 不変量 Q がよく用いられる。本研究では 2 次元 2 成分計測であるため、 Q として渦度 $\omega (= \partial w / \partial y - \partial v / \partial z)$ の 2 乗からひずみ速度 $S (= \partial w / \partial y + \partial v / \partial z)$ の 2 乗を引いたものを考えた。 $y^+ = 130$ 付近の $Q > 0$ の場合に、上述の擬似 3 次元データに対し、下に示す相関係数を考えた。また、スパン方向の傾きを考慮するため、渦度の符号により Δz 座標の符号を入れ替えた。

$$C_f(\Delta t, \Delta y, \Delta z; y) = \iint f(t, y, z) f(t + \Delta t, y + \Delta y, z + i \Delta z) dt dz / f_{rms}^2(y + \Delta y)$$

$$i = \begin{cases} 1 & \omega \geq 0 \\ -1 & \omega < 0 \end{cases}$$

図 5 に結果を示す。灰色の部分は相関が正で渦を表し、黒い部分は相関が負でひずみを表す。図より水面近傍での渦は下流側に頭を持ち上げた構造になっていることがわかる。また前後に渦が存在しないことから間欠性があることがわかる。そして、水面近傍に渦が存在するときには、底面付近には渦が存在しないことがわかる。

5.空間相関 次に上述の相関係数で $\Delta t = 0$ とし、測定面内における相関を調べた。

図 6, 7 に結果を示す。黒線は相関が 0.1 間隔の等値線であり、白線は相関が 0 を表す。図 6 より、相関が正の領域が斜め下方にのびていることから、この高さでの渦は、斜めに並んだ構造を形成していることがわかる。図 7 では、先の結果と同様斜め下に弱い渦の存在が見られる。以上より底面付近で生成された渦は、流下しながら上昇する際、斜め下方に弱い渦を伴っていることがわかる。

6.おわりに 開水路乱流において流れに

垂直な断面における PIV 計測を行い、特徴的な流れ、渦の構造、相関による平均的な構造を調べた結果、以下のような知見を得た。水面近傍の縦渦は、下流側に頭を持ち上げた構造になる傾向があり、底面付近での縦渦群の存在と関連性がある。またボイル発生原因の一つとして、縦渦群による底面付近で生じた渦が水面付近まで上昇し、鉛直方向に対し約 45 度の傾きで横断方向に並ぶことがあげられる。今後は水平面、縦断面での撮影を行い、流れに対して垂直に軸をもった渦の構造も調べていきたい。

本研究は、一部、文部省学術フロンティア、および文部省科学研究費基盤研究 C(代表者:J.C.Wells)の補助を受けて進めているものである。ここに記して感謝します。

参考文献 1)永翁龍一・齊藤隆之:十分に発達した自由表面乱流場に出現する組織構造と熱・物質輸送機構との関連性, 日本機学会論文集(B 編), 64 巻 620 号(1998-4), p 1025~1032

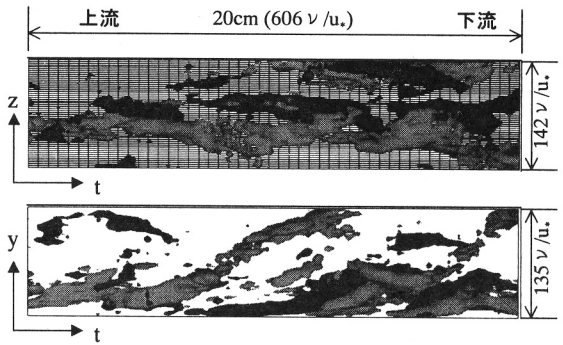


図 4 3 次元的に並べた渦度場

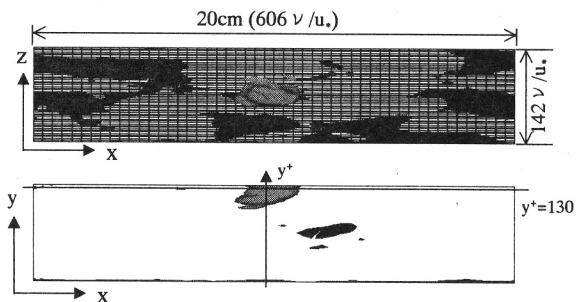


図 5 $y^+ = 130$ における時空間相関 ($Q(y, z) > 0$)

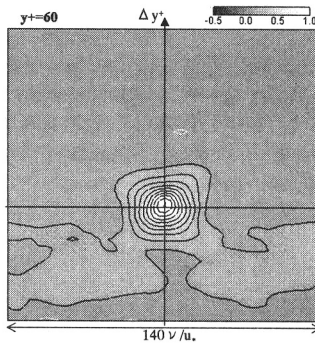


図 6 $y^+ = 60$ における空間相関

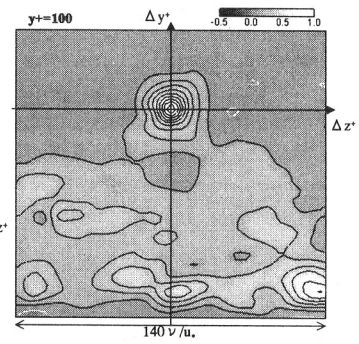


図 7 $y^+ = 100$ における空間相関