D208

ラグランジュ的多重画像合成による開水路表面流場の可視化

藤田 一郎(神戸大学), 吉村 英人[○](神戸大学大学院), 大藪政志 (神戸大学大学院)

Visualization of Open-Channel Surface Flow by Lagrangian Superposition of Multiple Images

Ichiro FUJITA, Hideto YOSHIMURA and Masashi OZONO

ABSTRACT

Water surface velocity field is affected by the three dimensional flow structures under the water. Typically, some of the separation vortices generated near the bottom ascend up to the water surface which causes the diversion of surface floating particles. These vortices, usually called the boil vortices in the field of river engineering, can be commonly observed in natural streams with relatively large roughness. In order to make clear the characteristics of such boil vortices appeared on the water surface, horizontal flow fields at the water surface of flows with several strip roughness are visualized by tracer particles. The visualized images are processed by multiply superposing the images viewed from a frame moving with the surface velocity. It is shown that superposed images clearly emphasize the flow features showing artistic patterns generated by floating tracers.

Keywords: Surface flow visualization, Image superposition, Open-channel flow, PIV

1. 緒 論

開水路流れ場の水面は底面や側岸などの境界条件や水理条件によって様々に変化する。例えば、静止状態と流動中では水面の状態に明らかな違いが見られることは日常よく体験することである。すなわち、静止状態の水面は鏡面状態を保つのにに対し、流動場では鏡面状態とは明らかに異なる状態が出現する。これは基本的には流れ場に様々なスケールの渦が発生し、それらが水面の状態に影響を及ぼしているためと考えられる。もちろん、流れのフルード数やレイノルズ数が大きくなれば、水面の形状そのものも大きく変化するようになり、渦度場だけではなく圧力場の影響も強くなる。このような水面における流動状態については、主として気液界面のガス交換に関する研究¹⁾において精力的に研究が行われてきているが、水面の流動場と底面の状態について研究した例はあまり多くない。著者らは、これまで底面に設置した単一半球が水面の流れ場に及ぼす影響について検討を行い、底面で剥離した剥離渦が水面において正の発散値として認識できることを示した²⁾。本研究では、さらに基本的な素過程を調べるために、底面の粗度を模擬した栈粗度を設置した流れ場を対象として実験を行った。また、水面における流動場を従来の手法よりも明確に可視化するために、画像の多重合成を利用した画像処理手法について工夫し、流れ場の比較を行った。

Fig. 1 Experimental setups

Table 1 Hydraulic conditions

Discharge : $Q(\text{cm}^3/\text{s})$	616
Slope : I	1/500
Depth : $h_f(\text{cm})$	4.0
Strip height : $d(\text{cm})$	0.9
Relative spacing : L/d	6.0
Mean velocity : $U_m(\text{cm/s})$	7.7
Froude number : Fr	0.123
Reynolds number : Re	3067

2. 実験の概要

2.1 実験装置

実験水路には、Fig. 1に示すような水路長 4.0m、水路幅 0.2m のアクリル製の直線開水路を作成し、使用した。下流部には貯留水槽を設けポンプを用いて下流側水槽から上流側に水を送り込み循環させ、ポンプのホースに取り付けたバルブの開閉によって流量を制御調節した。水路の最下流部に全幅堰を設けることによって水深の調節を行った。槽粗度には正方断面 ($d=b=0.9\text{cm}$) のアルミ棒を用い、水路中流部に相対粗度間隔 $L/d=6.0$ で二つ設置した。流れの可視化には粒径 $1.0\mu\text{m}$ のトレーサーを用い、高速ビデオカメラ (110fps) で流れの鉛直断面および表面を撮影した。粗度後部の流れを撮影するために Fig. 2 に示すように下流方向に3つの範囲に分けて撮影した。鉛直断面の可視化にはアルゴンイオンレーザの光膜を用いた。

2.2 水理条件

本実験での水理条件を Table. 1 に示す。勾配 I は、 $I=1/500$ とし、流量は $Q=0.616\times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$ に設定して水深は 4cm とした。また、フルード数 Fr は 0.123、レイノルズ数 Re は 3067 とし、水面変動のほとんどない流れを対象とした。

3. ラグランジュ的多重画像合成

3.1 固定点観測による流跡線の可視化

流れ場を観測する方法として、定点観測であるオイラー的な方法と追随型のラグランジュ的な方法があるのはよく知られたことだが、開水路流を PIV 計測する場合には通常ビデオカメラは固定して観測することが多い。本研究においてもビデオカメラ固定の条件で実験を行っているが、水面における流れのパターンを明瞭に可視化するには、平均流速で動く移動座標系から観測することも有用と考えられる。例えば、可視化実験において水面に現われるトレーサーの集中や発散あるいは回転などを観察する場合、人間の眼は流れ場の速度に合わせて自然にトレーサー群を追従している。それは移動座標系で流れ場を観測する方がトレーサーの全体的な動きを把握しやすいからである。確かに、PIV による解析を行えば流れ場の特徴を正確に把握することは可能だが、画像解析の対象となる可視化画像は粒子画像であり、流れのパターンをそこから把握することは容易ではない。トレーサー画像の多重露光を模擬した画像の多重合成^{3,5)}を行えば、流跡線を明瞭に可視化できるため、PIV では十分把握できない微細パターンまでも捉える事が可能となる。ただ、平均流とともにトレーサー群が移流する場合に単純な多重合成を行えば、平均流速のみが強調された流跡線が得られ、流れの微細構造は把握できない。

3.1 ラグランジュ的多重合成

平均流で移流するトレーサー群を可視化するには、移

Fig. 2 observing areas

Fig. 3 Lagrangian multiple image superposition

動座標系から観測をすればよいが、レーザ光膜や高速ビデオカメラなどを1セットとして移動させるのは容易ではない。そこで、本研究では、固定ビデオカメラで撮影した可視化画像の撮影範囲の中で、移動座標系からの撮影、すなわちラグランジュ的な撮影を模擬した画像処理を行うこととした。すなわち、Fig. 3 に示すように、全撮影領域の中に参照枠(reference frame)を想定し、予め PIV 解析等で求めておいた平均流速でその小領域を移動させ、各々の時刻から切り出した参照枠の画像に対して多重合成処理を施した。PIV の結果を忠実に反映させるために、小領域の切り出しはピクセル単位ではなく、サブピクセルレベルで行った。線形内挿とバイリニアの内挿を比較したが、得られた多重合成画像には差は見られなかった。使用するトレーサーは白色なので、この多重合成では参照枠内の各画素において最も輝度値の小さな値のみを抽出するようにした。トレーサー群の移動距離は撮影範囲内に限られるが、このようなラグランジュ的多重合成により、局所的な流跡線を明瞭に可視化する

Fig. 4 Mean velocity distribution (u/U_m)

Fig. 5 Instantaneous velocity distribution (u/U_m)

Fig. 6 Distribution of vertical turbulent intensity (v'/U_m)

ことができるようになった。

4. 解析結果

4.1 鉛直断面内の特性

鉛直断面内の平均流速分布のうち、Fig. 2 の Areal に対する結果を Fig. 4 に示す。上流側の栈粗度によって剥離した流れが下流側の栈粗度に至るまでに底面に再付着し、平均場で見ると循環している様子が得られている。主流部の流れは底面あるいは水面に平行で、平均流場では底面の剥離渦発生が水面へ到達する様子はわからない。ただ、可視化映像では底面から上昇する剥離渦が頻繁に観察されており、これらが水面に衝突して水面における流れ場を乱すことが推察された。Fig. 5 は下流側栈粗度のさらに下流の計測断面での瞬間流速ベクトルを示す。栈粗度地点の下流側で水面に向かう上昇流が発生している様子が捉えられている。Fig. 6 には、乱れ強度の鉛直成分の分布を示した。剥離領域内および下流側の栈粗度を乗り上げる部分で値の増大が見られるが、水面付近にまで到達はしていない。すなわち、今回の実験条件で水面の流れ場に影響を及ぼすのは間欠的に発生する上昇流であることがわかる。

4.2 多重合成画像への参照枠速度の影響

Fig. 7 に参照枠の移動速度を 3.0~4.0 pixel/frame の範囲で変化させて合成した画像を示した。これらは約 1 秒間、100 枚の連続画像を用いて多重合成したものである。Fig. 7 からは、表面に浮遊させたナイロン破碎粒子

(a) frame speed = 3.0 pixel/frame

(b) frame speed = 3.5 pixel/frame

(c) frame speed = 4.0 pixel/frame

Fig. 7 Effect of relative frame speed :
Area 2 (15.0x9.6cm)

によって可視化した画像であるにもかかわらず、得られた合成画像は多彩な濃淡や太さの流蹟線から成る独特の画像となっていることがわかる。線の太さが異なるのは、

(a) Area1

(b) Area2

(c) Area3

Fig. 8 comparison of surface pathlines
(15.0x9.6cm)

表面浮遊のトレーサーの場合、流水中のように均一にトレーサーを分布させることが困難であり、部分的に凝集した状態のまま流下するからである。流跡線輝度の濃淡変化は、浮遊中のトレーサー群に対する反射強度のムラに起因する。

Fig. 7 の多重合成画像からは、参照枠の移動速度を変えることによって全く異なった流跡線が得られ、参照枠速度に応じた微細な流れ場の構造が可視化されていることがわかる。ちなみに、Fig. 7 は栈粗度下流側の領域を可視化したものだが、流跡線が放射状に伸びている部分では底面からの湧出し、円状の軌跡を描いている部分では平面渦がそれぞれ生じていることをさす。この領域ではこのような湧き出しや平面渦が混在した状態で発生していることがよくわかる。

4.3 水面における流れのパターンの比較

Fig. 8 に様々な底面の状況に対する多重合成画像を示す。Fig. 8(a) のように粗度の影響が直ちに水面に影響を及ぼさない領域では、流れ場の回転の影響はあるものの

Fig. 9 Velocity field relative to the mean field
obtained by PIV (Area 3) (15.0x9.6cm)

流跡線は比較的一方向性を保っている。これに対し、栈粗度下流域の Fig. 8(b) (c) では、大小のスケールの渦構造が見られ、明らかに粗度による水面への影響が現われている。

Fig. 9 には、Fig. 8(c) の多重合成に用いた連続画像(100 枚、約 1 秒間)を用いて PIV 解析を行った結果を示す。平均流場から見た相対的な速度ベクトルの分布が良好に得られている。すなわち、ラグランジュ的に追跡した連続画像を用いることで、PIV 計測におけるダイナミックレンジが増大し、その結果、Fig. 8(c) の流跡線だけでは不明確だった局所的な湧き出しや平面渦場の様子を明確に捉えることが可能となった。

5. 結 論

本研究では、ラグランジュ的に切出した可視化画像を多重合成する手法を考案した。得られた合成画像は、表面流場の特性を理解するのに有用であっただけでなく、画像そのものと客観的に相対すると、予期した以上にアーティスティックで水墨画的な色彩を帯びたものとなった。すなわち、得られた画像は個々のすべてのトレーサーが筆となり、流れが水面上に描いた自然画とも見なせる。ここで示した手法は PIV の計測精度の向上にも寄与できると考えられるため、今後は本手法の有用性を様々な開水路乱流場を対象として検証していく予定である。

参 考 文 献

- 1) Jahne, B. and Haubecker, H : Air Water Gas Exchange, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol.30(1998), pp.443-468.
- 2) 藤田一郎・江見崇・松原隆幸：河床面粗度が開水路水面流場に与える影響、可視化情報、Vol. 25, Suppl. No. 2(2005), pp. 35-38.
- 3) 藤田一郎・原基樹・森本貴生：多重合成法による現地河川流の可視化画像解析、応用力学論文集, Vol.1(1998), pp. 729-736.
- 4) 藤田一郎・中島丈晴：LSPIV による実河川大規模循環流の可視化画像解析、可視化情報, Vol.19 Suppl. No. 1(1999), pp. 335-338.
- 5) 可視化情報学会編：PIV ハンドブック(2002), p. 302-303.