

開水路水面近傍の流速画像計測における画像拡張法の適用性

神戸大学大学院 学生員 下山 顕治  
 神戸大学工学部 正会員 宮本 仁志  
 神戸大学工学部 フェロー 神田 徹

1. まえがき

水面変動を伴う開水路流れを対象として、筆者らは瞬時の水面形状と内部流速を同時測定する画像計測法を提案してきた<sup>1)</sup>。その同時計測法において流速計測には PIV を用いているが、水面形状が時々刻々変化するため PIV のパターンマッチングに用いる参照フレームを水面直下に設定できず、水面近傍の流速ベクトルを測定するには困難があった。そこで、本研究では、水面近傍の画像を拡張する手法<sup>2)</sup>を適用することにより水面近傍での流速ベクトルの測定を試み、画像拡張手法の適用性について検討を行った。

2. 水面・流速の同時画像計測法の概要

図-1 に計測システムの概要を示す。流水中に微小トレーサー粒子を混入し、レーザーシート光により可視化断面を作成する。この可視化断面をハイスピードカメラにより撮影する。鏡像を用いることで気-液界面の画像を撮影し、同一画像フレーム内に流体内部・水面形状の可視化画像を取得する。得られた可視化画像から水面・流速の同時画像計測法<sup>1)</sup>を用いて水面分布、流速ベクトルの計測を行う。その際、自由水面近傍の流速値を算出するために、本報では以下に概説する画像拡張法<sup>2)</sup>を適用した。

3. 画像拡張による水面近傍の流速計測法

PIV を水面直下の領域に適用させるために、水面・流速の同時画像計測法<sup>1)</sup>で得られた水面分布と流速ベクトルの計測値を用いて、画像拡張を行った。図-2 に画像拡張の概要を示す。ここで水面は曲線直交座標(  $\eta$ ,  $\xi$  )の  $\eta$  軸により表される。この手法は図-2(d)に示すような流速分布を水面近傍において仮定することにより、水表面より上方の画像を作成するものである。このことは、次式を満たすことに相当する。

$$\mathbf{u}_{\text{ext}}(\eta) - \mathbf{u}_{\text{int}} = - [\mathbf{u}(-\eta) - \mathbf{u}_{\text{int}}] \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{u}_{\text{int}}$  : 水面(  $\eta=0$  )における流速、 $\mathbf{u}_{\text{ext}}(\eta)$  : 拡張領域(  $\eta > 0$  )の流速、 $\mathbf{u}(\eta)$  : Flow 領域(  $\eta < 0$  )の流速である。具体的には、画像拡張は図-2(a) ~ (c) に示す操作によってなされる。まず、時刻  $t$  において粒子が図-2(a)のように分布しているとき、その粒子は流速に乗って移動し、 $dt$  秒後には時刻  $t+dt$  のようなパターンを示す。各時刻の粒子パターンを互いの  $\xi$  軸に入れ替え、 $\eta$  について反転させることで時刻  $t$ 、 $t+dt$  それぞれの拡張領域の画像が生成される(図

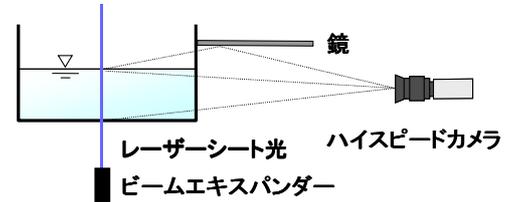


図-1 可視化画像の撮影手法

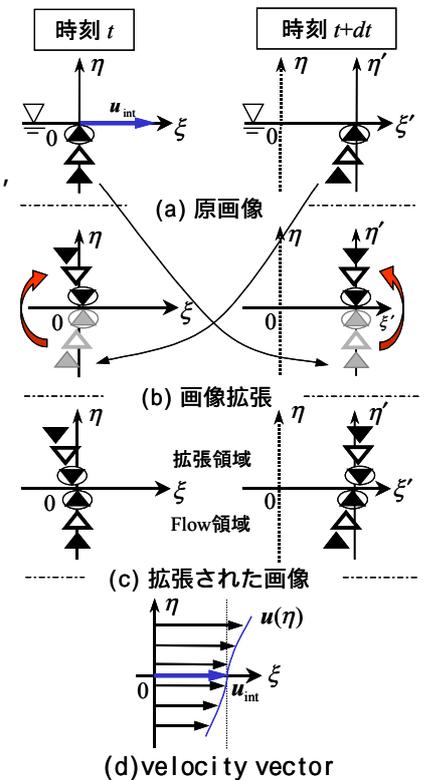


図-2 画像拡張の概要

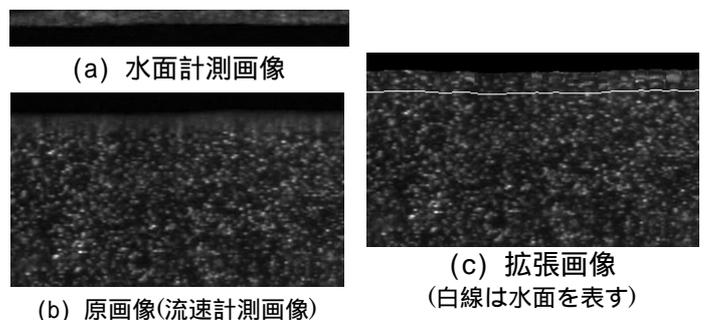


図-3 可視化画像の例

キーワード：計測法，画像拡張，PIV，開水路流れ，水表面

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 TEL 078-881-1212 FAX 078-803-6069

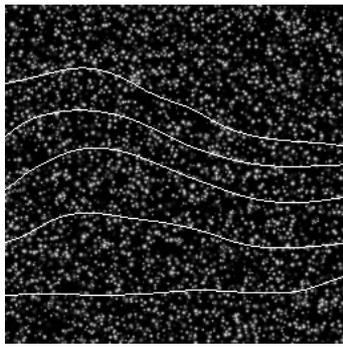


図-4 擬似水面(白線)の分布 (256 × 256 pixel)

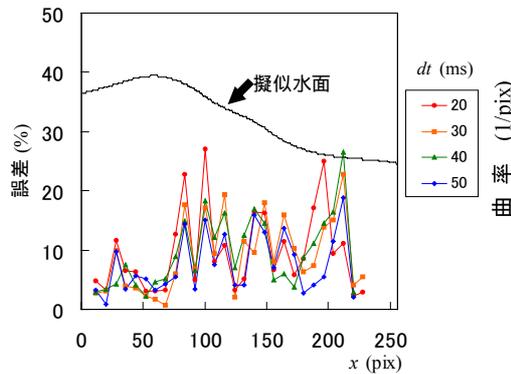


図-5 各時間間隔における誤差分布の一例

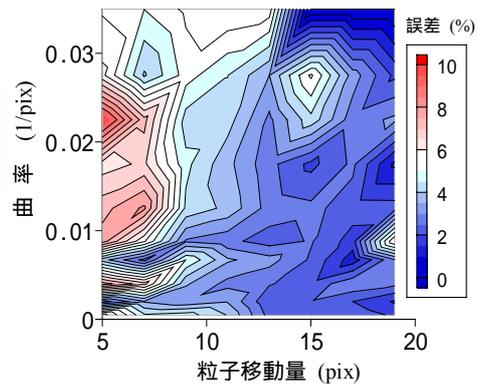


図-6 粒子移動量 曲率平面の誤差分布

-2(b)) . このようにして拡張された画像(図-2(c))から流速を求めることで図-2(d)の流速分布が得られる . 本研究においては水面における流速  $u_{int}$  は初期の段階においては未知であるため , 同時計測で得られる流速のうち水面に最も近い場所の値を第一近似として用い , 繰り返し計算により  $u_{int}$  を求めた . 図-3 に本計測手法で得られた水面 , 流速の可視化画像と拡張後の画像の一例を示す .

4. 標準画像を用いた精度の検討

水面近傍での流速の正解値が不明なため , PIV標準画像(可視化情報学会HP: <http://www.vsj.or.jp/>より取得)を用いて画像拡張法の精度検討を行った . 検討に際しては , 図-4に示すような既知流線を水面と仮定し , その擬似水面上方の粒子画像を消去することで作成した画像に対して本手法を適用し , 擬似水面直下における流速ベクトルの誤差を求めた . 図-5に各画像時間間隔  $dt$  での流速ベクトルの誤差分布の一例を示す . 全ての  $dt$  において誤差が大きくなる位置は擬似水面が湾曲している付近にほぼ一致しており , 水面の曲率と計測精度には関連があると考えられる . 図-6は画像間の粒子移動量と水面の曲率からなる平面での誤差分布である . 全ての粒子移動量に対して誤差がほぼ5%以内になるのは曲率が約  $0.01(1/pixel)$  以下であり , 誤差が大きくなる範囲は曲率とともに増加していることがわかる .

5. 開水路流れへの適用

以上の結果を踏まえて , 本計測法を直線開水路の常流に適用した . 表-1に実験条件を示す . 図-7に瞬時の水面分布および流速ベクトルを示す . 画像拡張を導入することによって水面直下まで流速ベクトルが算出されている . 図-8は流下方向平均流速分布  $U^+$  である . 得られた計測値は対数則によく一致していることがわかる .

また , 図-9に示す流下方向乱れ強度  $u'/U_*$  の鉛直分布において , 計測値は禰津らによる半理論曲線<sup>3)</sup>によく一致している . 以上の結果より , この実験のように水面変動が顕著でない常流においては , 本画像拡張法は水面近傍の流速ベクトルを精度よく計測しているといえる .

<参考文献> 1) 宮本, 神田, 大江: 水工学論文集, 第45巻, pp.511-516, 2001. 2) Tsuei L., Savaş Ö.: *Experiments in Fluids*, Vol. 29, pp.203-214, 2000. 3) Nezu I. and Nakagawa H.: *Turbulence in open-channel flows*, A.BLKEMA, IAHR MONOGRAPH, pp.12-25, 1993.

表-1 実験条件

$Q$ ( $cm^3/sec$ )	$H$ ( $cm$ )	$U_0$ ( $cm/sec$ )	$U_*$ ( $cm/sec$ )	$Re$	$Fr$
905	2.69	16.9	1.085	4520	0.33

$Q$ :流量,  $H$ :平均水深,  $U_0$ :断面平均流速,  $U_*$ :底面摩擦速度,  $Re$ :レイノルズ数,  $Fr$ :フルード数

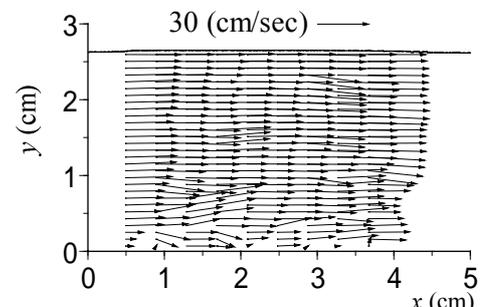


図-7 瞬時の水面および流速ベクトル

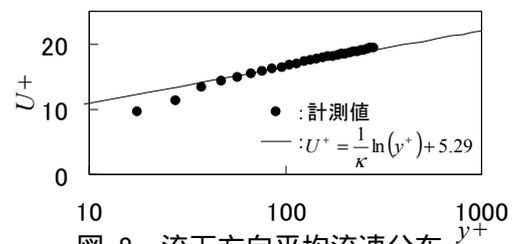


図-8 流下方向平均流速分布

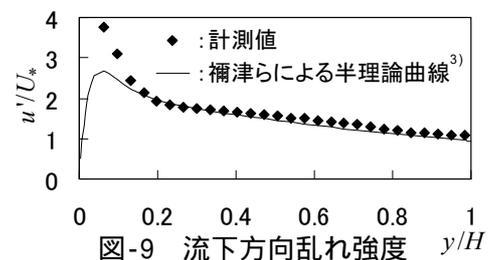


図-9 流下方向乱れ強度