

画像解析による水面変動・流速の同時計測法と 開水路凹部流れへの適用

IMAGE PROCESSING TECHNIQUE FOR SIMULTANEOUSLY MEASURING
WATER-SURFACE AND VELOCITY AND IT'S APPLICATION TO
OPEN-CHANNEL FLOW OVER CONCAVE BED

宮本仁志¹・神田 徹²・大江和正³

Hitoshi MIYAMOTO, Tohru KANDA and Kazumasa OOE

¹正会員 修士(工学) 神戸大学助手 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²フェロー会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (同上)

³学生会員 学士(工学) 神戸大学大学院 自然科学研究科博士課程前期課程 (同上)

We have proposed an image processing technique to measure simultaneously the water-surface and velocity vectors in open-channel flow. A boundary growing process is employed to extract the locations of water-surface using the gradient of luminance in the image and two threshold values of gradient. Simultaneously with the water-surface, the velocity field in the channel is measured using a particle image velocimetry.

This measuring technique is applied to the supercritical flow in the channel with a concave bed. Analysis of the instantaneously measured data of water depth and flow velocity has revealed that the fluctuation of water-surface and the velocity field interact each other. These results suggest that the present method is well applicable to rapid flows with the fluctuating water-surface.

Key Words : *measurement, flow velocity, water surface fluctuation, open-channel, concave bed, particle image velocimetry*

1. はじめに

自然生態系の保全, 流域住民の親水性など水辺の環境を考慮した河道空間の創造は, 近年の河川整備において重要な課題となっている。このような河道における流れの特徴は, 自然河川の瀬や淵で見られるように, 河道の局所的変化に伴って常流・射流の混在した多様な流況があらわれることである。特に断面急変部で射流が生じる場合は, 流速, 水表面ともに変動が激しく, また流水抵抗も大きいと考えられる。

著者らはこれまで, 水路床に凹部を有する開水路流れを対象として, 主にparticle image velocimetry (PIV)を用いた画像計測により流れ場の情報を取得し, 凹部内の平均流, 乱流諸量, 主流-凹部境界のせん断混合層における流れの組織運動の解析を行ってきた^{1)~4)}。それらの研究では, 射流を対象とした場合⁴⁾においても, 水表面の変動は計測しておらず, 流れ場と水面変動の相互関連は明らかになっていない。

本研究では, 水表面の変動を伴う流れを対象として, PIV計測に用いる可視化断面画像を処理することによって, 瞬間的な水面形状と流速分布とを同時計測する手法を提示する。水面高さの計測法は, 画像の輝度勾配を利用するものであり, 最も確からしい水面位置を画像の1画素の幅で取得できる。また, 本計測手法を開水路凹部の射流に適用し, 瞬時の水面形状と流速ベクトルを同時計測することによって, 凹部内の流れと水面変動の相互関係を調べた。

段落部, 急拡部など断面急変部で射流から常流へ遷移する流れについては, 水面形状やFroude数との関係が調べられているが, 水面変動を伴う流況特性は十分に把握されていないのが現状である⁵⁾。また, PIVを利用した水面変動の計測に関しては, 水-空気の境界面における水面波を対象とした画像計測法⁶⁾が提示されているが, 流速との同時計測はなされていない。

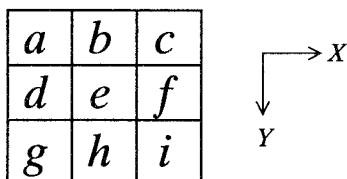


図-5 画素輝度の定義

表-1 境界候補点の決定条件

条件 1	画像輝度勾配の大きさ G に関する条件 中心画素 P_e の大きさ G_{Pe} がそれを含む9つの画素における中央値 G_m ($m=Pa \sim Pi$) より大きいこと.
条件 2	画素輝度方向 D に関する条件 中心画素 P_e の方向 D_{Pe} と同様の方向 (約 30° 以内) を示す画素を抽出し, その中で輝度勾配の大きさ G_{Pe} が上位3位以内に入ること.

表-2 境界線の決定条件

条件 1	境界候補点である.
条件 2	Seed map上で既存の境界候補点に隣接する.
条件 3	輝度勾配の大きさ $G > L_{TV}$
条件 4	隣接画素と同様の方向 D をもつ (約 30° 以内).

ここに, G_x は X 方向の輝度勾配, G_y は Y 方向の輝度勾配を表す.

この $\{G_x, G_y\}$ を用いて, 境界抽出条件の指標となる輝度勾配の大きさ G と方向 D を各画素ごとに計算する.

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (5)$$

$$D = \tan^{-1}(G_y / G_x) \quad (6)$$

算出された勾配の大きさ G と方向 D を用いて, 濃淡の境界線を抽出する. 3×3 の 9つの画素を対象に, その中心の画素 P_e (図-5に倣って, 下添字 e で表す) が境界 (エッジ) の候補 (境界候補点) となるかどうかを表-1に示す条件を用いて判定する. これら2つの条件を満たす画素を境界候補点として残す.

この候補点群を大小2つのしきい値 (H_{TV} , L_{TV}) を用いて処理する. まず, 十分大きいしきい値 H_{TV} で境界候補点を二値化し, H_{TV} より大きな輝度勾配 G をもつ画素のみを選ぶ. ここで選ばれた候補点で構成された画像を Seed map と呼ぶ. 次に, 小さいしきい値 L_{TV} を用いて, 表-2に示す条件より境界候補点を Seed map に付け足す. これらの条件を満たす画素を繰返し計算により Seed map に追加していき, 追加される画素がなくなったとき, 画像上に存在する画素を濃淡境界線とする (図-4(c)). この2つのしきい値 H_{TV} , L_{TV} を用いることによって, 相対的に輝度勾配が小さい部分の濃淡境界も抽出可能となる.

c) 水面高さの決定

得られた画像において, 水面高さを表す濃淡境界線は

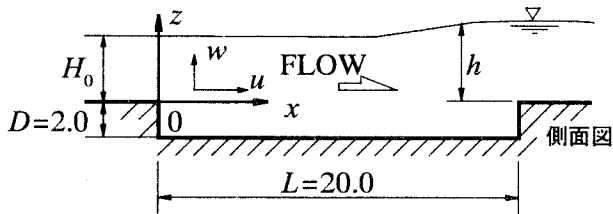


図-6 開水路凹部の模式図

表-3 実験条件

流 量 Q (cm^3/s)	3500
流入水深 H_0 (cm)	2.2
流入部での断面平均流速 U_0 (cm/s)	80.0
水路幅 B (cm)	20.0
凹部長さ L (cm)	20.0
凹部深さ D (cm)	2.0
Reynolds数 Re	17500
Froude数 Fr	1.7

ここに, $Re = U_0 H_0 / \nu$, $Fr = U_0 / (g H_0)^{1/2}$

ほぼ連続した画素の連なりとして得られており, それ以外の画素を消去する. 数ピクセルの小さなギャップを埋める処理を行い, 画像上において水面形状を1画素の幅をもつ一本の線として得る (図-4(d)).

以上より, ある瞬間の水面高さ (水面形) が得られる.

(3) PIVによる流速計測

水面変動を伴う開水路凹部の射流に対してPIVで流速計測を行う場合, 連続する2フレーム間の粒子の移動量やせん断変形量が相対的に大きくなるため, 得られる流速値に異常ベクトルが含まれる確率が高くなる. ここでは, Hart の提案による PIV の相関誤差修正法 CEC (Correlation Error Correction)⁸⁾ を適用することにより異常ベクトルの発生を抑制した⁹⁾.

3. 開水路凹部流れにおける同時計測

(1) 実験および画像処理の条件

本研究で用いた実験水路の模式図を図-6に示す. 実験水路は, 全長600cm, 幅 B 20cmの亚克力製水路であり, 上流水槽より365cmの位置に凹部を設けている. 計測断面は凹部の鉛直中央である.

実験条件を表-3に示す. 対象とする流れは, 水面変動を伴う射流 ($Fr=1.70$) である. 凹部形状比は $L/D=10.0$ であり, 常流の場合には凹部上流端で剥離した主流が凹部底面に再付着する流れ²⁾ となる. 画像計測において, サンプリング周波数240Hz, 720×480 画素の画像を用いており, 画像中の1画素の実長は約0.3mmである. 1回の計測時間は約4.5秒 (1089枚) であり, 後述の平均量算出の際には5回 (約23秒) の計測値を用いる.

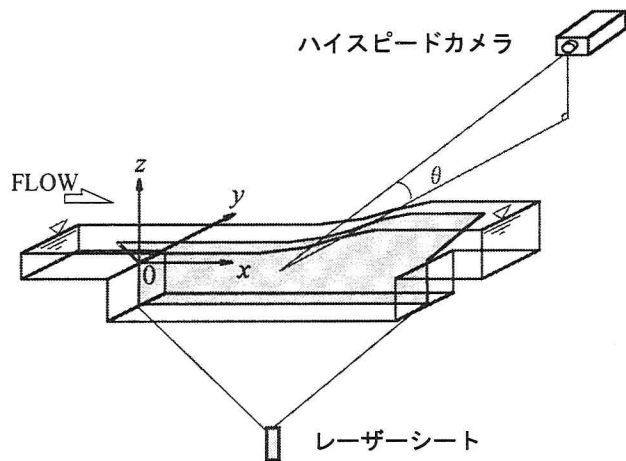


図-1 撮影方法の概略図

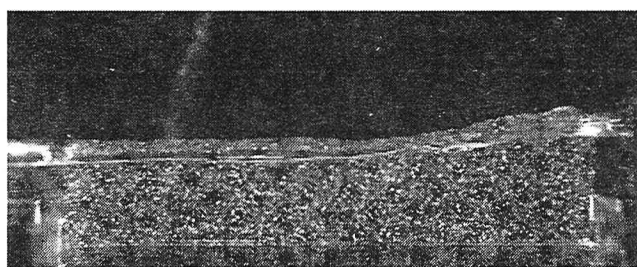


図-2 可視化画像の例

2. 水面変動と流速の同時計測手法

(1) 計測システムの概要

可視化画像を取得するための撮影方法の概要を図-1に示す。ハイスピードカメラを用いて、側方より俯角 θ で可視化断面を撮影する。真横($\theta = 0$)からの撮影では、手前のアクリル製側壁における水面のため、可視化断面での正確な水面高さが得られない。図-2に可視化画像の例を示す。水面を示す濃淡の境界が明確に認識できる。俯角 θ は、画像上で手前側壁と可視化断面での水面が重ならないように設定した。斜め上方からの撮影による画像の歪みは、座標参照画像（座標目盛を入れた画像）を用いて補正した。

(2) 水面高さの計測アルゴリズム

可視化画像を用いて水面高さを測定する手法を、以下に説明する。計測アルゴリズムのフローチャートを図-3に示す。

a) 前処理（画像強調）

図-4(a)に可視化画像（原画像）を示す。この原画像に 3×3 画素の移動平均を施し、画像のノイズを除去する。次に、画像上での濃淡境界線を強調するために、次式のラプラシアン R_e を用いた処理を 3×3 画素の画像輝度分布に対して行う（図-4(b)）。

$$E = e - R_e \quad (1)$$

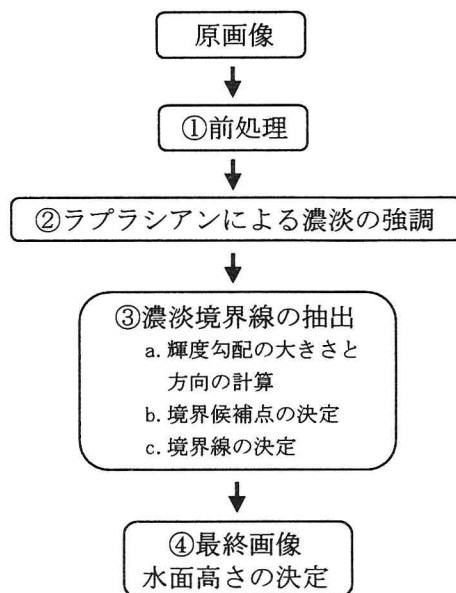


図-3 水面高さの計測アルゴリズムのフローチャート

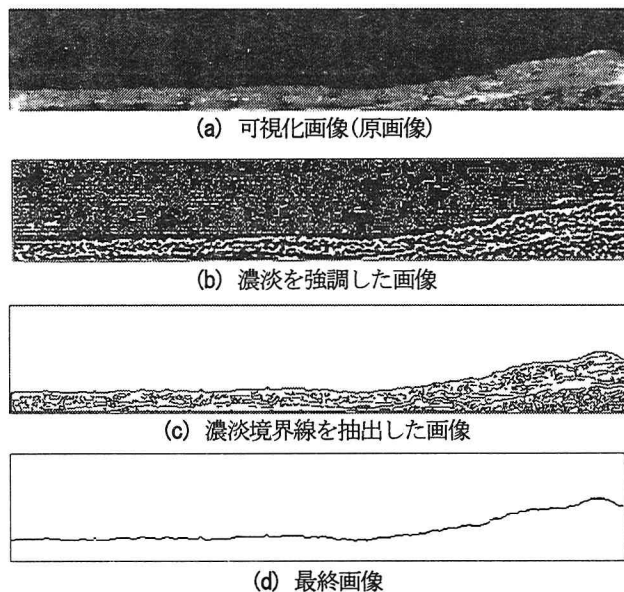


図-4 各処理段階の画像

$$R_e = b + d + f + h - 4e \quad (2)$$

ここに、 E は処理後の輝度値（処理前の e に対応）であり、 e, b, d, f, h は図-5に示す各画素での処理前の輝度値である。

b) 濃淡境界線の抽出 (a growing edge algorithm)

LeuとLuが提示した画像処理アルゴリズム⁷⁾を用いて、強調画像から濃淡の境界線を抽出する。まず、各画素の輝度勾配ベクトル $\{G_x, G_y\}$ を、式(3)、(4)を用いて算出する。

$$G_x = -a - 2d - g + c + 2f + i \quad (3)$$

$$G_y = a + 2b + c - g - 2h - i \quad (4)$$

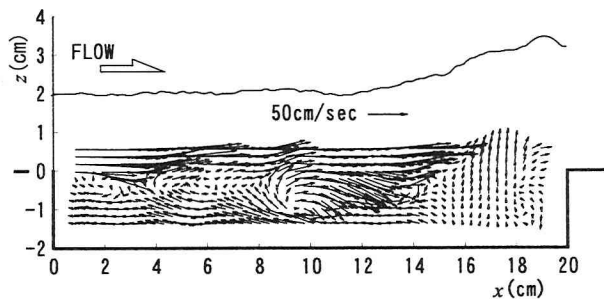


図-7 瞬時の流速ベクトルと水面高さ

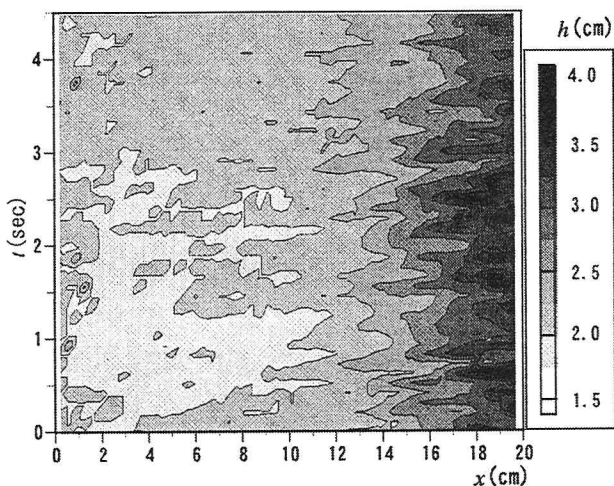


図-8 時間-空間平面での水面高さの分布

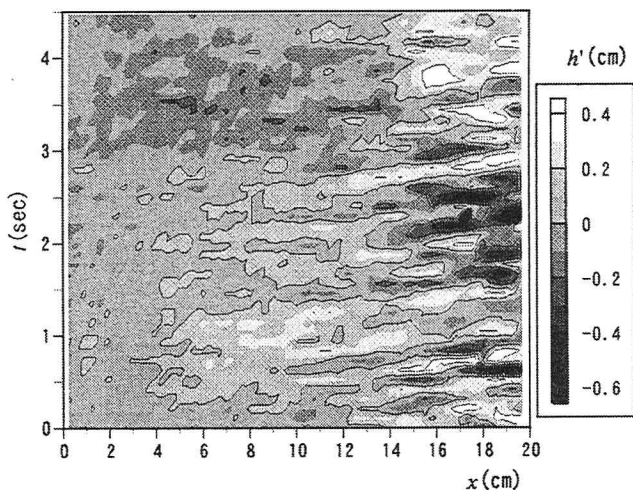


図-9 時間-空間平面での水面変動の分布

(2) 瞬時の流速ベクトルと水面高さ

瞬間流速ベクトル $\{u(x, z, t), w(x, z, t)\}$ と水面高さ $h(x, t)$ を図-7に示す。流速ベクトルは、主流-凹部境界の自由せん断層において激しく変動している。凹部下流の段上がり部では、流速は小さくなっている。一方、水面高さは、流入部から凹部中央付近までは 2cm 程度で一定であるが、それより下流側では流下方向に水面が高くなっている。このように、本計測手法は時々刻々変化する流速と水面高さを面的に得ることができ、水面変動を伴う凹

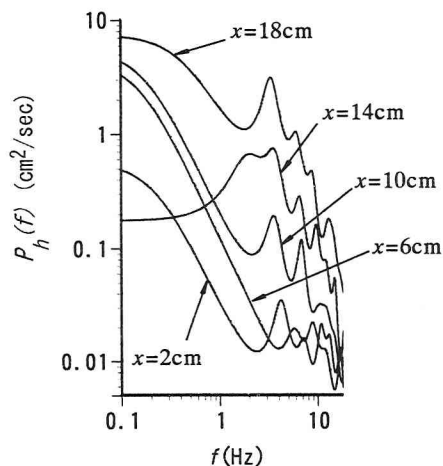


図-10 水面変動のパワースペクトル

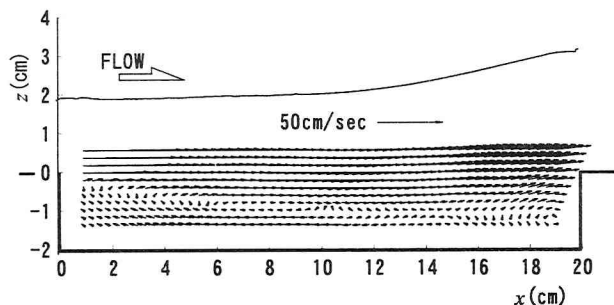


図-11 平均流速ベクトルと平均水面高さ

部での流れの特性を解明するために適切な計測法といえる。

図-8は、時間-空間平面における水面高さ $h(x, t)$ を示したものである。水面高さは、流入部から凹部中央付近まではほぼ一定で、それより下流側において上昇する。また、 $x = 12 \sim 14$ cm より下流側では、水面高さが周期的に変動している。図-9に、水面の時間平均値 $\bar{h}(x)$ を基準とした水面変動 $h'(x, t)$ の分布を示す。下流側において水面変動の位相が明確に現れており、流下方向にほぼ一定速度で伝播していくのがわかる。図-10は、 $x = 2, 6, 10, 14, 18$ cm の各点における $h'(x, t)$ の時系列のパワースペクトルである。下流側にいくほど卓越周波数は減少する傾向が認められ、また変動強度は増加している。

(3) 平均流速ベクトルと平均水面高さ

図-11は、平均流速ベクトル $\{U(x, z), W(x, z)\}$ と平均の水面高さ $\bar{h}(x)$ を示している。時間平均的な流れは、凹部底面に再付着せず凹部下流端の段上がり部で断面急縮により鉛直上向きの流速成分をもつようになる。また、凹部内部においては $x = 12 \sim 14$ cm を境に、2つの循環流が存在する。凹部形状が同一の常流では下流側の循環流は存在せず²⁾、射流と常流とでは凹部の平均的な流況が大きく異なることがわかる。

一方、平均水面高さ $\bar{h}(x)$ は、凹部流入部から中央付近まではほぼ一定であり、それより下流側で水面勾配が大きくなる。

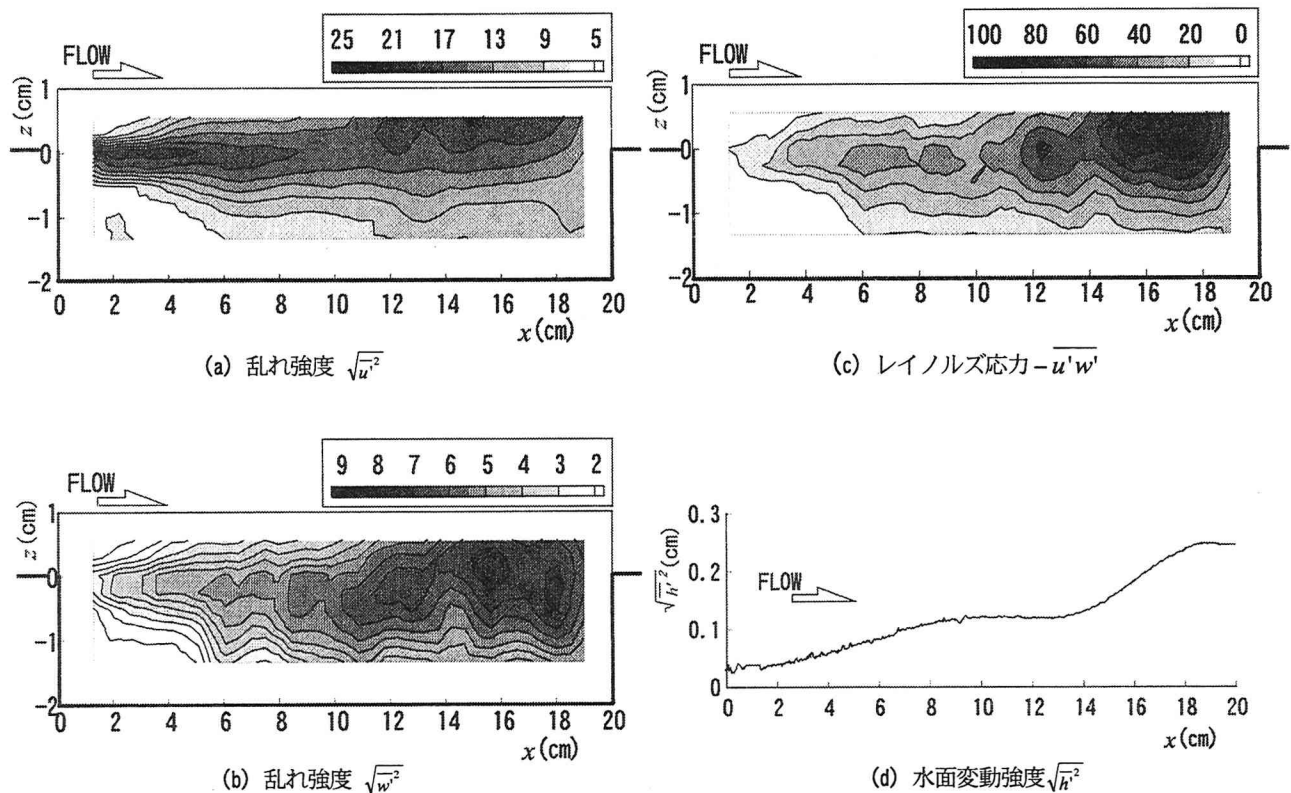


図-12 x, z 方向の乱れ強度、レイノルズ応力および水面変動強度の分布

(4) 乱れ強度、レイノルズ応力と水面変動強度

x 方向と z 方向の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}, \sqrt{w'^2}$ 、レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ と水面変動強度 $\sqrt{h'^2}$ の分布を図-12に示す。 $\sqrt{h'^2}$ は、流下方向に増加し、特に $x = 14\text{cm}$ 付近から増加の割合が大きくなっている。 $\sqrt{u'^2}$ は、段落ちの直下で大きな流速せん断が起こるため、大きな値をとる。一方、 $\sqrt{w'^2}$ と $-\overline{u'w'}$ は、 $x = 12 \sim 14\text{cm}$ より下流側で大きくなり、数ヶ所で極大値をとる。両者が大きな値をとる位置は、 $\sqrt{h'^2}$ が大きくなる位置とほぼ一致しており、水面変動と凹部内の乱れ特性が関連していると推察できる。

(5) 水面変動と流速変動の相互相関

図-13に、 $x = 16\text{cm}$ の水面変動成分 $h'(16, t)$ と各点の流速変動成分 $u'(x, z, t)$ 、 $w'(x, z, t)$ との相互相関係数 $R_{w,h}(\tau)$ 、 $R_{u,h}(\tau)$ の分布を示す。ここで、 τ は h' と u' 、 w' とのタイムラグである。

図-13(a)において、下流側のせん断混合層より上部の領域では、遅れ時間に関わらず h' と u' の相関が負の値を示している。このことより、凹部段上り部における主流の流速変動と、下流部での水面変動とが互いに影響していることが推察できる。図-13(b-1)では、凹部内の h' と w' の相関が数ヶ所で正の極値を示し、遅れ時間のある図-13(b-2~4)においても、ほぼ同じ部分に高い相関値が現れている。これは h' と u' の相関特性とは異なり、凹部の広い領域の z 方向流速変動と下流側の水面変動とが互いに影響していることを示唆する。

4. 結 論

画像解析を用いることにより、水面変動と流速を同時に計測する手法を提示した。本計測手法を適用することにより、開水路凹部における流速と水面変動について調べた。得られた結果を以下に要約する。

(1) 水面形と流速の同時計測手法

可視化画像の輝度勾配を利用して、水面形状を抽出する計測アルゴリズムを提示した。本手法により、画像における水面形は1画素の幅の曲線として表現でき、詳細な水面変動の計測が可能となる。また、流速に対する画像計測手法を併せて用いることにより、流速と水面変動の同時計測が可能となった。

(2) 開水路凹部流れ(射流)への本計測手法の適用

本手法により、開水路凹部流れにおける瞬時の水面高さと流速分布を計測した。平均流速ベクトルと平均水面高さの関係、乱流諸量と水面変動強度の凹部内の分布、水面変動と流速変動の相関関係から、凹部内の流速変動と水面変動とは相互に影響を及ぼしていることが定性的ではあるが把握できた。

本手法が水面変動と流速の同時計測に有効であることが確認できた。ただし、可視化画像を斜めから撮影しているため、水面近傍の流速ベクトルが欠落しており、今後、水面近傍での流速計測法を改良し、凹部流れの構造と水面の関係をより詳細に解析していきたい。

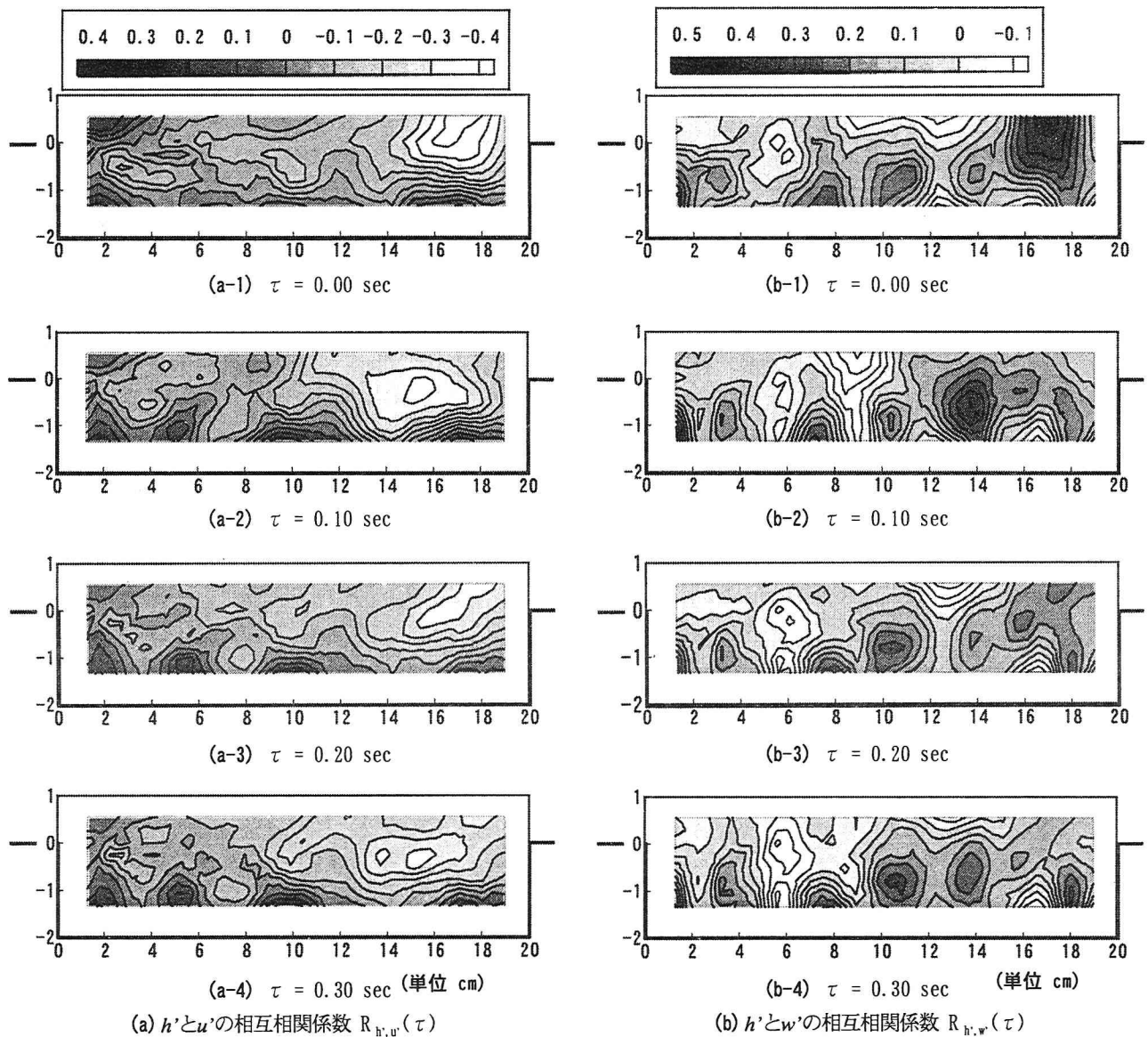


図-13 水面変動と流速変動の相互相関係数の分布

参考文献

- 1) 神田 徹, 宮本仁志, 榎野 渉: 開水路凹部のせん断混合層における乱流構造のウェーブレット解析, 土木学会論文集, No. 656/II-52, pp.121-133, 2000.
- 2) 宮本仁志, 神田 徹, 藤田一郎, 池上 迅: PIVによる開水路凹部流れの計測および数値解析, 水工学論文集, 第41巻, pp.1049-1054, 1997.
- 3) 藤田一郎, 神田 徹, 門脇正夫, 森田卓光: 開水路凹部流れのPIVおよびLESによる乱流解析, 土木学会論文集, No. 539/II-35, pp.79-88, 1996.
- 4) 神田 徹, 宮本仁志, 藤田一郎, 岩本孝介: 開水路凹部における流れ場のPIV計測, 土木学会第53回年次学術講演会, 1998.
- 5) 安田陽一: 各種水路における射流から常流へ変遷する流れの特性, 水理講演会10年の歩みとこれからの基礎水理学の展開, 土木学会水理委員会基礎水理部会, pp.7-12, 1999.
- 6) Peirson W.L.: Measurement of surface velocities and shears at a wavy air-water interface using particle image velocimetry, *Experiments in Fluids*, Vol.23, pp.427-437, 1997.
- 7) Leu J.G. and Lu W.: A growing process to extract image edges, Hybrid Image and Signal Processing IV, *Proc. of SPIE*, Vol.2238, pp.218-228, 1994.
- 8) Hart D.P.: PIV error correction, 粒子画像流速測定法研究会(VI)報告書, pp.30-36, 1998.
- 9) 大江和正, 神田 徹, 宮本仁志, 島崎昌彦, 藤田一郎: PIV計測における異常ベクトル除去法(CEC)の開水路凹部流れへの適用性, 土木学会第55回年次学術講演会, 2000. (2000.10.2受付)