

開水路バックステップ流れのPIV計測における計測パラメータの検討

田中, 宏延
九州大学大学院生物資源環境科学府

平松, 和昭
九州大学大学院農学研究院

森, 牧人
九州大学大学院農学研究院

四ヶ所, 四男美
九州大学大学院農学研究院

<https://doi.org/10.15017/4335>

出版情報 : 九州大学大学院農学研究院学芸雑誌. 59 (2), pp.165-171, 2004-10-01. 九州大学大学院農学研究院
バージョン :
権利関係 :

開水路バックステップ流れの PIV 計測における 計測パラメータの検討

田中宏延¹・平松和昭*
森 牧 人・四ヶ所 四男美

九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門地域環境科学講座水環境学研究室
(2004年6月28日受付, 2004年7月13日受理)

Measurement Parameters of Particle Image Velocimetry (PIV) for an Open Channel Backward-Facing Step Flow

Hironobu TANAKA¹, Kazuaki HIRAMATSU*, Makito MORI
and Shiomi SHIKASHO

Laboratory of Drainage and Water Environment, Division of Regional Environment Science,
Department of Bioproduction Environmental Sciences, Faculty of Agriculture,
Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

緒 言

近年では流体の流速計測には様々な方法が用いられているが、その一つにレーザードップラー流速計 (Laser Doppler Anemometer, LDA) を用いた方法がある。この計測法は、非接触で計測できる上に高い精度を有する点を特長とするが、その一方で LDA では1回の計測で流体内の1点の流速しか計測することができず、計測対象全体の流速の計測には多大の計測時間を要することが多い。

これに対して近年、PIV (Particle Image Velocimetry) という新たな流速計測法が注目されている。PIV では流体内に微小な可視化剤を中立浮遊状態で混入させ、これにシート光源からの光を当て、ビデオカメラによって撮影された画像パターンの経時変化から流速を計測する。この方法は、流速の面的な分布を非接触で計測できる上、同時多点計測が可能であるため、従来の流速計測法と比べ計測時間を大幅に短縮することができる。さらに水の流れを可視化して計測を行うため、水の流れを目視によって確認しながら計測

できるという副次的な利点もある。このように PIV は極めて有力な流速計測法であるが、計測パラメータの設定に際して試行錯誤を伴うことが多く、良質なデータを得ることは必ずしも容易でないことも多い。

本研究では、現有の PIV 計測システムにおける計測パラメータの設定指針の確立を目的とし、開水路バックステップ流れを対象として、PIV の測定精度について検討した。開水路バックステップ流れを用いた理由は、短い実験区間で順流域、逆流域、渦領域、さらに低速域、高速域と多様な流速分布を実現することができ (Nakagawa and Nezu, 1987)、PIV の測定精度を検討するにあたって最適と思われたからである。検討には LDA 計測を併用し、LDA 計測によって得られた計測値を真値とし、これらと PIV 計測結果を比較し PIV の測定精度を検討した。

材料と方法

1. 実験水路および実験条件

実験には、開水路部全長 7 m、幅 30 cm の水平に設置した回流型直線水路を用いた。同水路の透明アクリ

¹九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻地域環境科学講座水環境学研究室

¹Laboratory of Drainage and Water Environment, Division of Regional Environment Science, Department of Bioproduction Environmental Sciences, Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University

*Corresponding author (E-mail: hiramatsu@bpes.kyushu-u.ac.jp)

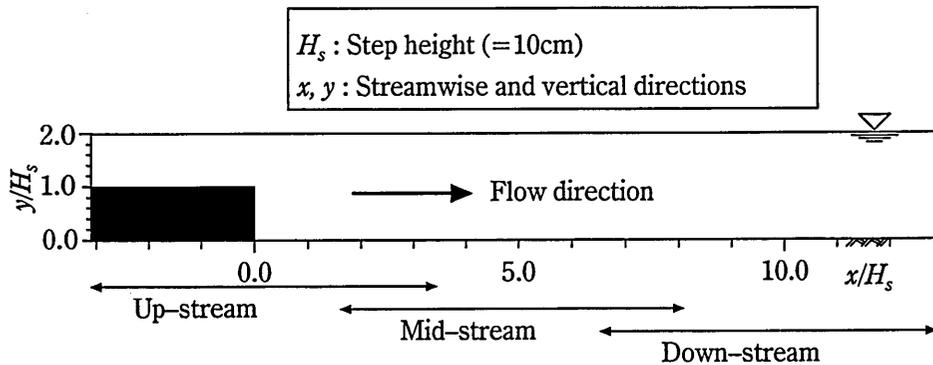


図1 実験区間と計測領域.

ル製の開水路部に高さ $H_s=10\text{cm}$ の段落部（バックステップ）を設置した。図1のように、バックステップ下流端の水路床位置を原点とし、流下方向および鉛直上向きにそれぞれ x , y 軸を定義した。水路床にはアクリル板を敷き、レーザ光が反射しないように実験区間はスプレーで黒く着色した。実験は、LDA 計測時の水温 16.5°C 、PIV 計測時の水温 20°C 、実験区間最下流部の水深 $h=20.0\text{cm}$ 、平均流速 $v_{\text{Ave}}=12.0\text{cm/s}$ 、レイノルズ数 $Re \equiv h v_{\text{Ave}}/\nu \approx 24000$ 、フルード数 $Fr \equiv v_{\text{Ave}}/(gh)^{1/2} \approx 0.086$ の条件下で実施した。なお、 Re の計算には、 20°C における動粘性係数 $\nu=1.01 \times 10^{-2}\text{cm}^2/\text{s}$ を用いている。

2. LDA 計測

(1) 計測の原理

LDA は、一般にレーザ装置、光学系および信号を電子回路で処理して流速値を得る信号処理器から構成される。光学系には種々の方式があるが、現在最も広く用いられているのが差動型と呼ばれる方式で（武井，1985）、本研究で使用した LDA でもこの方式が用いられている。差動型光学系ではレーザ装置で発生させたレーザ光を半透鏡と反射鏡で等しい強度を持つ平行光線に分け、この2光線を流体中で交差させる。この交差部分が計測ボリュームとなる。2本のレーザ光線は交差した部分で干渉し、そこにフリンジ（干渉縞）ができる。各フリンジの間隔は一定で、光を散乱させる微細粒子がこのフリンジの中を通過すると、フリンジの明暗に従って散乱光が時間的に変化を繰り返す。それを光電子倍增管で電気信号に変換するとドップラバースト信号が得られ、これを処理して流速に換算するのが信号処理器である。以上のように、LDA は流

体の流速を直接検出するものではなく、流れに乗って移動する微細粒子の移動速度をドップラバースト信号として捉えるものであり、フリンジを微細粒子が通過したときにドップラバースト信号が得られるため、連続した信号を得るためには、微細粒子をトレーサ粒子として人工的に加え、シーディングを行う必要がある。シーディングには、計測対象流体とほぼ同じ比重で中立浮遊となる微細粒子が使用され、またその混入量も微量であるため、シーディングの水量への影響はほとんど無視することができる。

LDA の特長は、流体内にプローブを挿入することなしに流速を非接触で高精度で計測できることにある。しかし、その一方で、1回の計測で流体内の1点の流速しか計測することができないため、計測対象全体の流速の計測には多大の計測時間を要することが多い。

(2) 実験方法

本研究では、TSI 社製 2次元 LDA システムを使用した。流れ場に、平均粒径 $4.1\mu\text{m}$ 、比重 1.02 のナイロン粒子を混入させシーディングを行った。計測点は後述する PIV の計測点を考慮して、流下方向に $x/H_s=0.0$ から 11.0 まで 0.5 刻みの 23 点、鉛直方向に $y/H_s=0.1$ から 1.9 まで 0.1 刻みの 19 点（ただし、 $x/H_s=0.0$ では $y/H_s=1.1$ から 1.9 まで 0.1 刻みの 9 点）、以上の計 427 点とした。いずれも横断方向の計測位置は水路中央とした。以上の各計測点で、サンプリング周波数 1kHz で 30 秒間、LDA で計測を行い、得られたデータから流下方向および鉛直方向の平均流速 u , v 、乱れ強度 u_{RMS} , v_{RMS} を求めた。以上の LDA 計測によって得られた計測値を真値とし、これらと PIV 計測結果を比較し、PIV の測定精度を検討した。

3. PIV 計測

(1) 計測の原理

PIV は、可視化された流れ場を微小時間間隔 Δt で撮影し、得られた画像間の輝度値（画像濃度値）の 2 次元分布パターンの移動距離を画像計測で求め、その移動距離を Δt で除して流速を間接計測するものである（可視化情報学会，2002）。画像計測から Δt 時間間隔の移動量ベクトル（ ΔX , ΔY ）が得られると、画像面と可視化された物理平面の変換係数を α として、次式で流速ベクトル（ u , v ）が求められる。

$$(u, v) = \alpha \left(\frac{\Delta X}{\Delta t}, \frac{\Delta Y}{\Delta t} \right) \quad (1)$$

すなわち、PIV は流体の流速を直接計測するものではなく、流れ場にトレーサ粒子を適当な密度で混入させ可視化し、その画像を記録・処理して速度場を計算する間接的な計測方法である。従って、PIV では、流れの可視化の良し悪しが計測精度に大きな影響を及ぼす。

流れ場にトレーサ粒子を混入させるシーディングは、計測対象の流体の特性に影響を与えない程度に行われる。通常、PIV 計測では体積比にして $10^{-5} \sim 10^{-6}$ のオーダのシーディングであり、物性への影響は無視することができる。粒子のシーディングは、速度場の計測不能領域を少なくするためできるだけ均一にする必要がある。また、可視化画像を用いて計測が行われるため、可視化には強力な光源が必要で、一般にレーザーシート光源が用いられる。トレーサ粒子からの散乱光は、CCD 素子などの撮影装置を介して記録媒体に瞬間的な輝度値の 2 次元分布画像として記録され、さらに連続的に画像を記録しこれを解析することで、計測対象領域全体の流速ベクトルの時間変化を計測することもできる。

輝度値の 2 次元分布パターンの移動距離の画像計測には、一般に画像相関法が用いられる。この方法では、得られた画像を基準枠と呼ばれる小領域に分割し、その分割された領域内の輝度値パターンを用いて、次の画像のパターンの類似している領域を追跡する。この追跡する領域が追跡枠と呼ばれる。画像相関法では、画像上の輝度値パターンの変化を用いて解析することになるため、個々の粒子像が画像上で判別できる必要はない。また、画像上の輝度値の 2 次元パターンを基準に測定するため、一般に 2 次元速度分布の計測に用いられることになる。

画像相関法には多くの処理アルゴリズムがあるが、

最も一般に用いられているのが輝度差累積の逐次棄却法である。この方法による輝度値パターンの類似度の計算では、第 1 画像と第 2 画像の全ての対応する画素位置における輝度差の絶対値の総和をとり、その総和が最小となる位置を移動距離とする。輝度差の絶対値の総和計算のみであるため、他のアルゴリズムと比べ計算が極めて簡潔であり、また第 1 画像と第 2 画像が類似度の低い輝度値パターンの組み合わせのとき、輝度差累積の計算を途中で中止できるため、他のアルゴリズムに比べ 2～3 倍の処理速度が得られ、計算時間を大幅に短縮することができるという特長を有する。加賀ら（1994）は気流の流速分布の画像計測におけるパターン追跡のアルゴリズムを各種検討し、輝度差の絶対値の累積過程で逐次棄却を行う同アルゴリズムが最も有効であることを示している。

PIV 計測で計測精度を著しく悪化させる原因の一つに誤ベクトルの発生がある。誤ベクトルとは、輝度値の 2 次元分布パターンの移動距離の画像計測の際に、実際とは異なる誤ったパターンの対応付けが行われてしまった結果生じる非常に大きな誤差を含む流速ベクトルのことである。画像相関法では、誤ベクトルの発生を抑えるため、基準枠と追跡枠のサイズの設定が非常に重要となってくる。

PIV の特長は、流速を非接触かつ同時多点で計測できることにある。しかし、その一方で、流れ場の可視化に熟練を要すること、上述の基準枠や追跡枠といった計測パラメータの設定が難しいこと、など良質の計測結果を得ることは必ずしも容易でないことも多い。

(2) 実験方法

まず、流れ場を平均流径 $4.1 \mu\text{m}$ 、比重 1.02 のナイロン粒子と出力 4W の水冷アルゴンレーザー（日本カノマックス社製 GLG3482）を光源とする幅約 1 cm のシート光で可視化し、解像度 $1,018$ ピクセル \times $1,008$ ピクセル、フレームレート毎秒 30 コマの高解像度デジタル入力システム（ライブラリー社製ひまわり D1K）を用いて 30 秒間撮影した。レーザーシート光の照射位置は水路横断方向の中央とし、水面上約 1.2 m から鉛直下向きに照射した。また、流下方向約 1.65 m の実験区間を 1 シーンで撮影すると、撮影した画像の空間解像度が低下する上、レーザーシート光の照射面積の増大によって光量が低下し、撮影画像の輝度値の濃淡が不十分となるため、図 1 のように実験区間全体を Up-stream, Mid-stream, Down-stream の 3 つに分けて計測を行った。1 分割区間の長さは約 0.65 m である。その際、3 計測区間には図 1 のようにそれぞれ約 0.15

m のオーバーラップ部を設けた。

得られた300枚の連続画像をPIV解析ソフトウェア(ライブラリー社製 Flow-vec)で解析し、計測された流速ベクトルに含まれる誤ベクトルの除去および欠落ベクトルの内挿処理を行い、流下方向および鉛直方向の平均流速 u , v , 乱れ強度 u_{RMS} , v_{RMS} を求めた。使用した PIV 解析ソフトウェアでは、画像処理アルゴリズムとして、前述の画像相関法(輝度差累積の逐次棄却法)が用いられている。

結果と考察

PIV 計測における計測点は、できる限り密に配置するため、図 1 の x , y 方向にそれぞれ 1 cm 間隔を目安として、最終的に図 2 のように x , y 方向にそれぞれ 15 ピクセル間隔とした。この間隔は実スケールで 0.99 cm に相当し、1 ピクセル当たりの空間分解能は 0.066 cm となる。この間隔の計測点網を、 $x/H_s=0.0$, $y/H_s=1.0$ を基準点として、計測領域全体に展開した。

この計測点間隔をもとに基準枠と追跡枠のサイズを検討した。特に開水路バックステップ流れでは、短い実験区間で順流域、逆流域、渦領域、さらに低速域、高速域と多様な流速分布が存在するため、PIV で流速分布を高精度で測定するためには、基準枠と追跡枠のサイズの設定が重要となる。一般に、高速域と低速域の速度差が大きい場合、基準枠と追跡枠のサイズを変化させて複数回に分けて画像計測し、それらを接合

することで流れ場全体の計測結果を得る方法も可能である。しかし、本研究では、PIV 計測の計測限界を検討することも目的の一つとして、1 組の基準枠と追跡枠のサイズによる計測を基本方針とした。

前述の PIV の計測原理に基づく考察と、基準枠と追跡枠を変化させて実施した複数回の実験結果から、今回使用した PIV 計測システムにおける基準枠と追跡枠を最終的に以下のように決定した。

まず、基準枠は、輝度値の 2 次元分布パターンを比較する画素サイズと定義される。一般に、基準枠サイズが小さすぎると輝度値パターンが不明確となりパターン追跡ができなくなり、一方、大きすぎると、PIV 計測結果は計測点近傍の局所的な流速値ではなく、周辺部も含めた平均的な流速値となると考えられる。本研究では、計測点を中心に上下左右に対称な基準枠とするために基準枠サイズには奇数値を採用することにし、ビデオ画像の観察結果から最終的に図 2 のように 25 ピクセル×25 ピクセルに設定した。

一方、追跡枠は、当該計測点の輝度値パターンの移動を探す範囲として定義される。前述のパターン追跡アルゴリズムからも明らかのように、追跡枠サイズが小さすぎると、このサイズを超える流速域ではパターン追跡ができなくなる。また、大きすぎると不必要な周辺領域まで追跡計算を行うことになるため、多くの計算時間が必要となる上、誤計測による誤ベクトル発生の可能性が増大する。従って、対象となる流れ場の

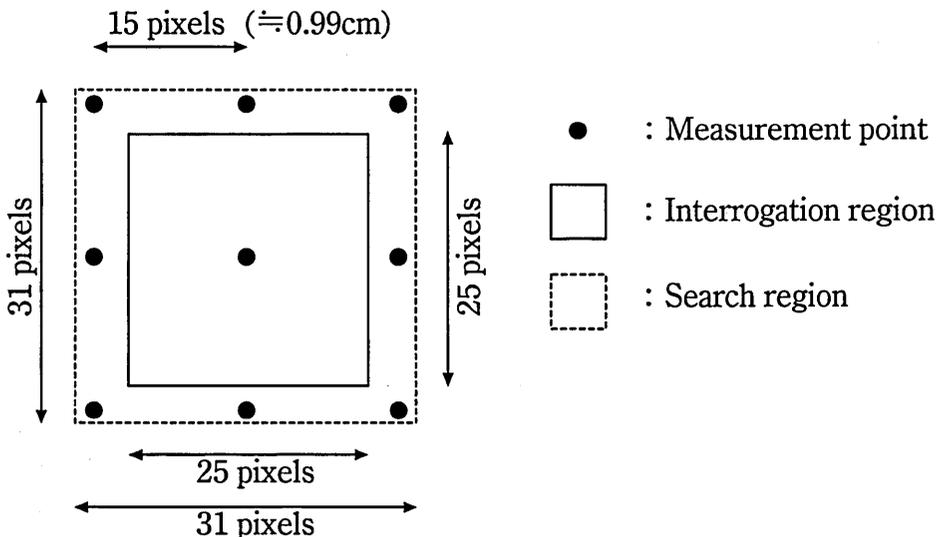


図 2 基準枠と追跡枠の定義。

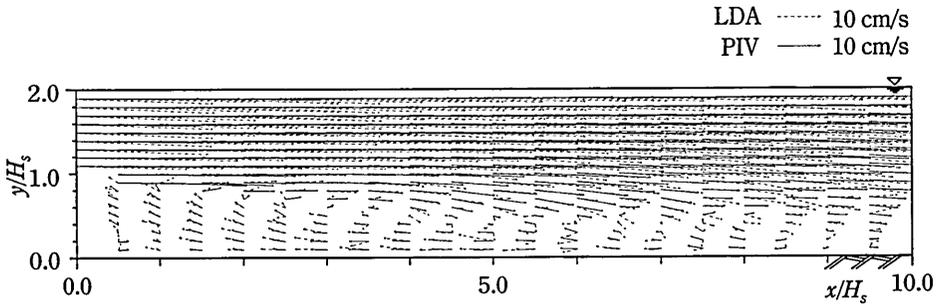


図3 LDAとPIV計測による流速ベクトルの比較.

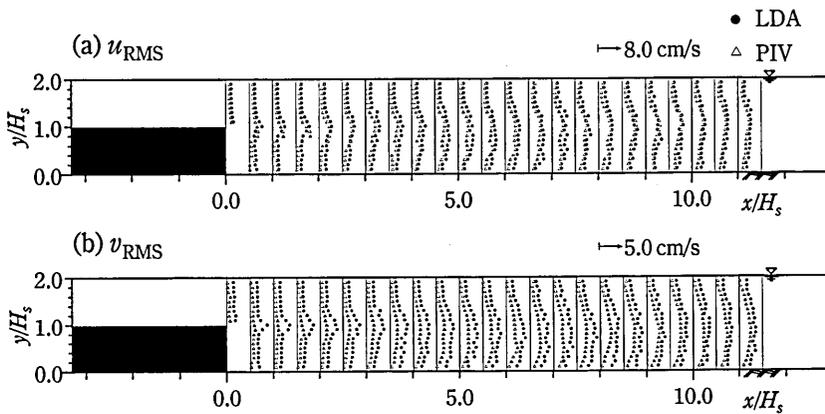


図4 LDAとPIV計測による乱れ強度の比較.

最大流速および撮影時のフレームレート、1ピクセル当たりの空間分解能を考慮して、追跡枠サイズは決定されることになる。すなわち、最大流速時の1コマ当たりの移動ピクセル数が、追跡枠サイズの決定の基準になるものと考えられる。本研究で対象としたバックステップ流れの最大流速はLDA計測結果から約30 cm/sで、また撮影時のフレームレートは毎秒30コマとした。一方、1ピクセル当たりの空間分解能は0.066cmであった。従って、最大流速時の1コマ当たりの移動距離は約1cmで、これを画素数に換算すると約15ピクセルとなる。逆流域も存在するためこれを2倍し、さらに計測点を中心に上下左右に対称な追跡枠とするために奇数値を採用することにし、最終的に追跡枠サイズは図2のように31ピクセル×31ピクセルとした。

以上の基準枠サイズと追跡枠サイズを用いてPIVで計測した流速ベクトルと、LDAで得られた流速ベクトルの比較を図3に示す。全体的にはPIV計測で

は良好な精度が得られているが、低速域で両計測結果に若干の差が見られる。今回のPIV計測の設定では、1ピクセル当たりの空間分解能は0.066cmであった。一方、フレームレート毎秒30コマでの撮影なので、 $0.066\text{cm} \times 30 = 1.98\text{cm/s}$ が計測できる最低流速の目安となる。このことに加えて、 $y/H_s = 0.1 \sim 0.9$ の渦領域では水路横断方向に弱い循環流が存在していると考えられ、これらが図3の低速域でPIVの計測精度が充分でない理由と考えられる。なお、図3から再付着点は $x \approx 9H_s$ と判断できるが、これは既往の実験結果(Nakagawa and Nezu, 1987)とも概ね一致している。

図4にLDA計測とPIV計測によって得られた水平方向および垂直方向乱れ強度 u_{RMS} , v_{RMS} を比較した結果を示す。 u_{RMS} で若干、両者に差が見られるが全体的には良好な計測結果となっている。図5にPIV計測によって得られた全計測点の u_{RMS} , v_{RMS} のカラーマップを示す。バックステップ部で生じた剥離

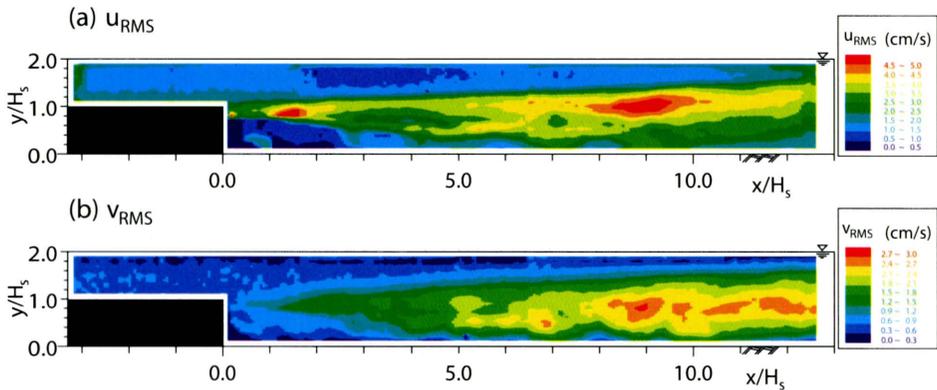


図5 PIV計測による乱れ強度分布図.

域が、流下するに従って鉛直方向に発達する様子が詳細に捉えられている。

なお、本研究のPIV計測では、レーザシート光を上方から鉛直下向きに照射し、流れを可視化した。この方法では、流速が増大し水面に波浪が生じると可視化面にその影が投影され、画像計測を著しく阻害する。これに対処するためには、透明の水路底板から鉛直上向きにレーザシート光を照射する必要がある。本研究で使用した開水路バックステップ流れの水力条件は、水面にこのような顕著な波浪が発生しない上限の流速として設定したことを最後に付記する。

要 約

PIV計測では、流速を非接触で計測できる上、同時多点計測が可能であるため、従来の流速計測法と比べ計測時間を大幅に短縮することができる。さらに水の流れを可視化して計測を行うため、流れを目視によって確認しながら計測できるという副次的な利点もある。このようにPIVは極めて有力な流体計測法であるが、計測パラメータの設定に際して試行錯誤を伴うことが多く、良質なデータを得ることは必ずしも容易でないことも多い。

本研究では、現有のPIV計測システムにおける計測パラメータ、すなわち基準枠サイズと追跡枠サイズの設定指針の確立を目的とし、多様な流速分布が実現できる開水路バックステップ流れを対象として、PIVの測定精度について検討した。検討にはLDA計測を

併用し、LDA計測によって得られた計測値を真値とみなし、これらとPIV計測結果を比較することによりPIVの測定精度を検討した。

その結果、基準枠は輝度値の2次元分布パターンを比較する画素サイズであり、明確な分布パターンが得られる枠サイズとしなければならないため、原則として得られたビデオ画像の観察結果から決めざるを得ないことが示された。一方、追跡枠は、当該計測点の輝度値パターンの移動先を探す範囲であり、対象となる流れ場の最大流速および撮影時のフレームレート、1ピクセル当たりの空間分解能を考慮することで、適切なサイズを決定することができることが明らかになった。また、1ピクセル当たりの空間分解能とフレームレートによって、計測できる最低流速が決まってくることも併せて示された。

文 献

- 加賀昭和・井上義雄・山口克人 1994 気流分布の画像計測のためのパターン追跡アルゴリズム. 可視化情報, 14(53): 38-45
- 可視化情報学会 2002 PIVハンドブック. 森北出版, 東京
- Nakagawa, H. and I. Nezu 1987 Experimental investigation on turbulent structure of backward-facing step flow in an open channel. *Journal of Hydraulic Research*, 25(1): 67-88
- 武井幸雄 1985 5.2 レーザ流速計. 回流水槽懇談会編: 回流水槽セミナー—回流水槽の実験技術と利用—, 回流水槽懇談会, 73-82頁

Summary

Particle Image Velocimetry (PIV) is a method for measuring velocity distribution of fluctuating water flow or air flow through the digital image processing of multi-couples of images obtained by flow visualization. Using the PIV, velocities at many points in a series of digital images could be easily measured without inserting a measuring probe into flow, which results in a drastic reduction in measuring hours. The PIV also has a secondary advantage in that an experimenter can visually confirm flow patterns in measuring velocity distribution. Despite these advantages, it is not easy to obtain the velocity measurements with high precision because of the difficulty in determining the measurement parameters in the PIV system.

In this paper, two measurement parameters used in the density correlation method and the gray level difference accumulation method of the PIV system, an interrogation region and a search region, were experimentally investigated by comparing the velocity distributions measured by a Laser Doppler Anemometer (LDA) and the PIV. An open channel backward-facing step flow was used for the investigation because this flow has a great variety of velocity distributions in a relatively short experimental section.

The interrogation region is a square frame of pixels, and a two-dimensional distribution pattern of gray level in this region is compared with that in its neighbors in the density correlation method. The search region is a square frame of pixels in which the similar pattern to that in the interrogation region is searched in the density correlation method. The results indicated that the interrogation region should have an adequate size of pixels in which a definite distribution pattern of gray level was secured. The search region should be determined by considering the maximum velocity, the frame rate of CCD and the spatial resolution of images.