

Particle-Image Velocimetry(PIV) による
複断面開水路流れの流速計測法
Velocity Measurements in Compound Open-Channel Flows
by making use of Particle-Image Velocimetry

中川博次*・橋津家久**・佐伯賢一***・阿部崇****

By Hiroji NAKAGAWA, Iehisa NEZU, Ken-ichi SAEKI and Takashi ABE

Many turbulence measurements have been ever conducted by point measurement techniques such as hot-film anemometers(CTA) and laser Doppler anemometers(LDA). Compared with these techniques, coherent vortex phenomena are easily recognized by flow visualization techniques.

In this study, images of very small $100\mu\text{m}$ diameter particles uniformly scattered in compound open-channel flows were taken using a CCD camera and 2W Argon-ion laser slit illumination. These images were stored through frame memory board from an optic disc controlled by a personal computer. Instantaneous velocities at many points in the laser slit plane were measured from these continuous four images of one particle. This new method is called the "Particle-Image Velocimetry(PIV)", and seems to be very powerful to investigate coherent vortices in space and time because simultaneous velocities at every point can be obtained.

Keywords; Flow Visualization, Image Processing, Particle Tracking, Compound Open-Channel Flow, Coherent Vortex

1 はじめに

複断面開水路流れにおいて高水数先端部付近から低水路側の水面に向かって上昇する2次流れが存在することが確認されている¹⁾。流速の大きい低水路内と流速の小さい高水数上との間のせん断層は不安定な領域であり、この上昇流は間欠的に発生する組織渦によるもので斜昇流と呼ばれており、高水数先端部付近の乱れの非等方性が原因で発生すると考えられている²⁾。実際、Naotら(1993)³⁾はこの乱れの非等方性をうまくモデル化して複断面開水路流れの数値計算を行い、斜昇流やその2次流を良好に再現している。時間的に一定な流れではなく発生・発達・消滅を繰り返す組織渦によって低運動量をもつ流体塊が低水路側の水面付近に輸送される。また、この組織渦により浮遊砂が高水数上に運び上げられ、掃流力の減少によりその多くが堆積する⁴⁾といった高水数管理上好ましくない現象が生じる。このような洪水時の複断面開水路流れの挙動とそれに伴う諸現象を解明するための研究が最近多く行われている⁵⁾。

* 正会員 工博 京都大学工学部教授 環境地球工学教室 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 京都大学工学部助教授 環境地球工学教室

*** 学生員 京都大学大学院工学研究科修士課程 環境地球工学専攻

**** 学生員 京都大学大学院工学研究科修士課程 環境地球工学専攻

従来、模型水路による流れ場の計測といえばホットフィルム流速計やレーザー流速計による点計測法が一般的であり、特に後者の流速計は高精度に流速成分を計測できる。一方、可視化手法は流れ場全体の流動やそれに伴う諸現象の物理的理解を容易にできるという特徴をもっているが、従来定性的観測の域を出なかった。しかし、写真撮影やビデオ撮影することで再生・保存が容易となり定量評価への開発も行われており、応用できる分野は土木に限らず多種多様である⁷⁾。水工学の分野でいえば、航空写真や実験水路を用いての画像解析の技術開発に関しては、宇民・上野の一連の研究が有名である⁸⁾。

さらに近年、シート状のレーザー光線と CCD カメラを使って水流に追従する微細粒子を画像解析して広領域の流速場を瞬時に解析しようとする画像解析技術が開発されてきた⁹⁾。本研究では、これを Particle-Image Velocimetry(PIV)と呼ぶ。PIVは統計的な取扱いによる乱れ強度・レイノルズ応力・せん断応力などといった乱流諸量に加えて、種々の組織渦をも解析できる技術開発が望まれている流体計測法であろう。レーザー流速計(LDA)ではせいぜい2台のLDAを駆使してその時空間相関を求めるのがやっとである¹⁰⁾。可視化法の利点をもつPIVは、撮影空間内を同時に記録することができ、2次元(平面内)の各点の同時刻の情報を得ることができる。PIVの原理は簡単だが、これまで流速場を高精度に解析することは困難であった。高精度なPIVが開発できれば、この“可視化的流速計”は平面内の流速ベクトル群が時系列として得られ、バースト現象等をはじめとする組織渦を解析できる有力な計測法となる。本研究は、最近津田ら(1991)⁹⁾によって開発されたPIVを、複断面開水路に適用して低水路と高水数内に発生する組織渦のメカニズムを解明することの緒とするものである。

2 可視化装置

可視化手法において重要な点は明瞭な画像を撮影することであり、画像の鮮明度は後の画像解析の精度とその労力を大きく左右する。まず、微細粒子による可視化で留意すべき点を挙げると次のようになる。

- ①トレーサ粒子は十分微細で中立浮遊であり流れ(乱れ)に十分追従すること。
- ②撮影空間の画像からトレーサ粒子だけを分離・認識できること。
- ③画像内に写ったトレーサ粒子の濃度が適切であること。

以上のことを考慮して本研究のトレーサ粒子は直径 $100\mu\text{m}$ のナイロン12粒子(比重1.02)をエタノールに浸した後、循環式実験水路に一樣に注入した。なお、この程度の微細粒子を用いると①の条件を満足し、PIVにより解析した流速がレーザー流速計(LDA)の値とほぼ一致することが報告されている⁹⁾。この意味でPIVの粒子はLDAの散乱粒子と同じ役目を果たし、後者よりも大きい同オーダー程度の径である。 $100\mu\text{m}$ 程度の微細粒子を鮮明に撮影するためには高強度のレーザー光線が不可欠である。図-1に示すように本研究では2Wのアルゴンイオンレーザーを用い、これを光ファイバーケーブルで水路側面に透光させ、シリンドリカルレンズで厚さ2mmのレーザーライトシート(LLS)を照射した。このLLSを用いた可視化法は最近の研究動向であり⁹⁾、鮮明な画像を得るには不可欠な機材である。なお、LLSを最初に用いてバースト現象を可視化撮影したHeadら(1981)の研究は有名である¹¹⁾。微細粒子がLLS面内にあるときレーザー光を散乱して鮮明に高輝度で確認できる。さらに撮影空間を黒布で覆い、レーザー光の反射光等が画像内に取り込まれることを防止するために水路床や側壁を艶消しの黒色塗料で着色した。図-1に示すように、撮影はLLSより70cm上方に設置されたCCDカメラを通じて行われ、画像は光ディスクに記録された。この際CCDカメラを光ディスク機と同期させ、微細粒子像が高輝度の点となるように(詳細は次節で述べる)シャッタースピード $1/125\text{sec}$ で撮影された。なお、高速流の

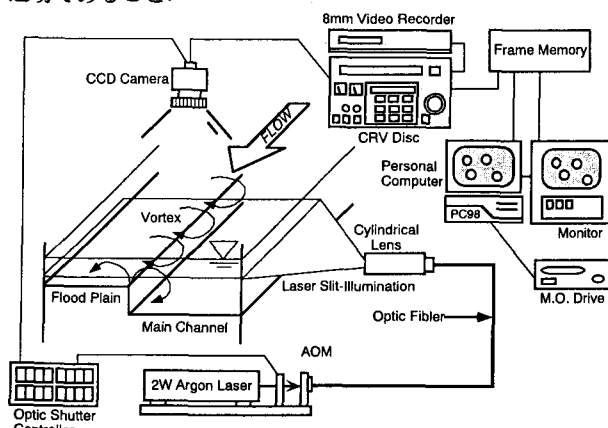


図-1 可視化および画像解析装置

図-1に示すように、撮影はLLSより70cm上方に設置されたCCDカメラを通じて行われ、画像は光ディスクに記録された。この際CCDカメラを光ディスク機と同期させ、微細粒子像が高輝度の点となるように(詳細は次節で述べる)シャッタースピード $1/125\text{sec}$ で撮影された。なお、高速流の

場合は、レーザー光を音響光学セル (AOM) を用いてパルスレーザー光として撮影できるシステムになっている (図-1 参照)。

3 画像解析システム

光ディスク (CRV) の映像信号は $1/60\text{sec}$ の間に全体の走査線の半分の走査線 1 本おきに走査する。この像をフィールド画像と呼ぶ。この操作を $1/30\text{sec}$ の間に奇数番目 (Odd)・偶数番目 (Even) の走査線でそれぞれ 1 サイクルずつ行った結果がフレーム画像と呼ばれ、再生画像はこのフレーム画像である。流速が大きく微細粒子の移動速度が大きいと、フィールド画像上の粒子像が帯状となり、位置の読み取り誤差が大きくなる。この場合は AOM を使ったり、電子シャッターを調節する必要がある。本研究では流速が 50cm/s 以下であったのでシャッター速度を $1/125\text{sec}$ に調節し、AOM は全開にした。図-2 に示すように

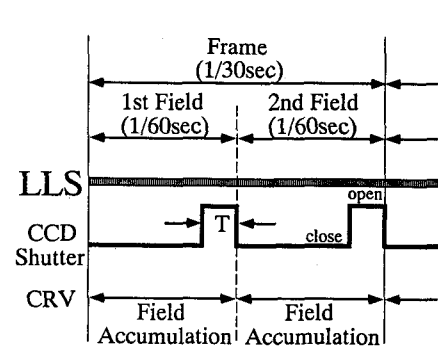


図-2 電子シャッターの同期

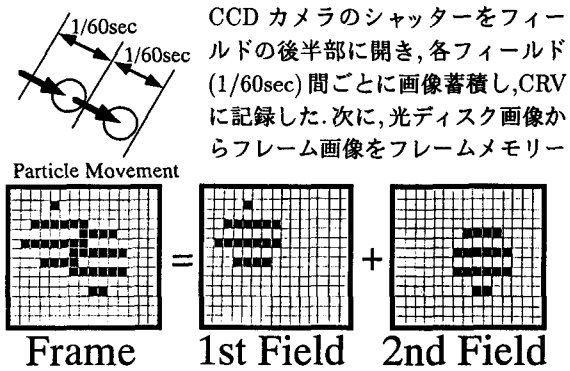


図-3 Field 画像への分離

ボードを介してコンピュータに読み込んで 2 つのフィールド画像に分離した (図-3)。こうして得られた像は 1 本おきの走査線上にしか存在しない。画像が存在しない走査線上のピクセルでは、上下の 2 つのピクセルの輝度の平均値で補間することにより全ての走査線上の情報が得られる。こうして $1/30\text{sec}$ のフレーム画像から $1/60\text{sec}$ のフィールド画像の情報がコンピュータで取り扱えるようになり、この操作を連続した複数のフレームで行うことにより 1 秒間当たり 60 コマの画像の情報が得られる。流速 ($\vec{u}, \vec{v}$) は、連続した 4 コマのフィールドの微細粒子を追跡することによって容易に得られる。すなわち、個々の粒子の $3/60\text{sec}$ 間の移動の始点と終点の座標から流速ベクトルが計算される。しかし、これはあくまでも計算原理であり、実際の画像解析に際しては画像の 2 値化・画像改善法など、また誤追跡の排除などかなり専門的な知識が必要である。本研究では、新日鐵から多くの技術指導を受けた⁹⁾。

4 解析例とその考察

4.1 実験の水力条件

全長 8m、幅 30cm のアクリル板製の複断面水路の高水敷面に粒径 2mm の均一粒径砂を敷き詰め、表-1 に示す 3 つの定常な水力条件で複断面開水路

表-1 水力条件 (単位 mm)

case	I_b	B	B_1	H	D	B_1/B	H/D	Q
R0	1/1000	300	100	55.00	50	0.3333	1.100	1.7921
R1	1/1000	300	100	60.00	50	0.3333	1.200	2.1591
R2	1/1000	300	100	70.00	50	0.3333	1.400	3.0151

表-2 LLS の照射位置の高さ

A 面	$y = D + 3/4h$	(水面近く)
B 面	$y = D + 1/4h$	(高水敷河床近く)
C 面	$y = D - 1/4h$	(低水路のみ)

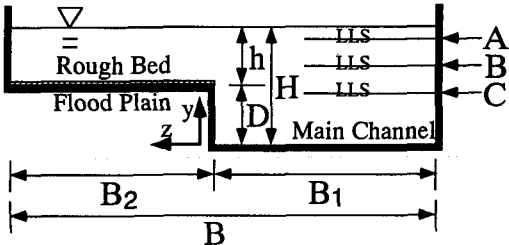


図-4 変数と座標系

流れの PIV 計測を行った。各水理条件は、表-2 に示すように 3 通りの高さ y の位置に水平に LLS を照射して x - z 平面の $20 \times 20 \text{ cm}$ の範囲を CCD カメラで撮影した。なお、各変数は図-4 の模式図に示してある。

4.2 流速分布に関する解析

瞬間流速 $\tilde{u}, \tilde{w}$ の時系列を横断方向に並んだ各点で処理し、横断方向に関して主流速 $\tilde{u}$ の確率密度関数 (PDF) を図-5 に示した。低水路内の流速と高水敷上の流速の大小がはっきり現れており、両者の境界付近で流速が遷移していることがわかる。また接合部付近では PDF のグラフが低くなり裾が広がっているが、このことは乱れ強度が大きく、間欠性が強い現象であることが示唆される。図-6 および 7 はそれぞれ主流方向の平均流速 U と乱れ強度 u' を示したものであり、“—” は今回 PIV により

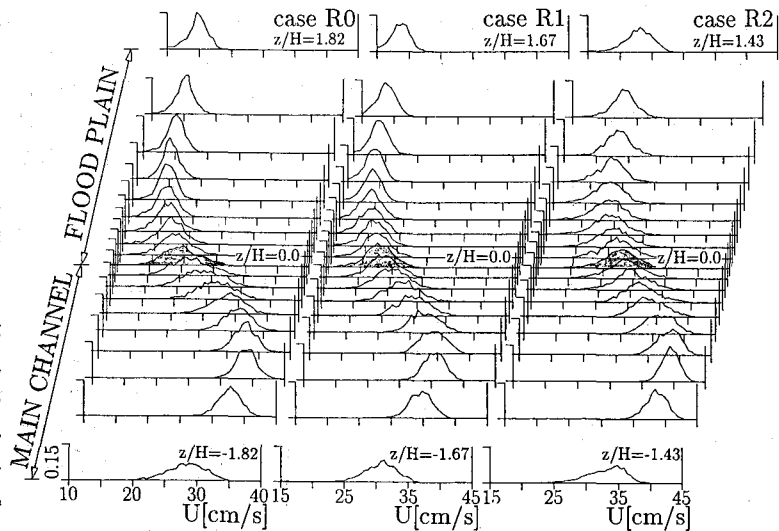


図-5 B 面内の主流方向 (x 方向) の流速 U 成分の確率密度関数

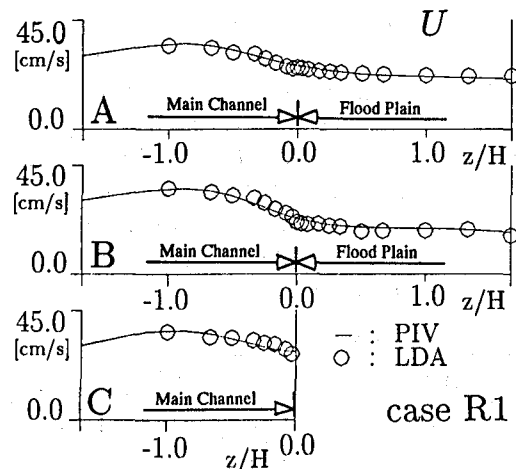


図-6 主流方向の平均流速分布 $U(x, z)$

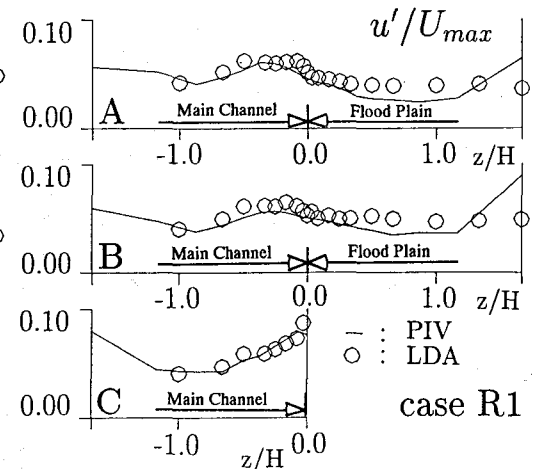


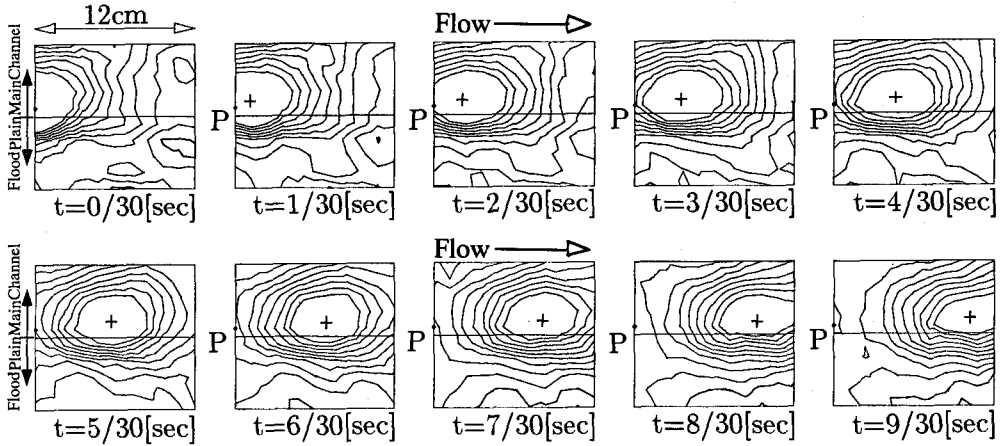
図-7 主流方向の乱れ強度 $u'(x, z)$

計測された実験値を、一方、“○” はレーザー流速計 (LDA) により計測された結果を比較したものである。 U に関して PIV を用いてもレーザー流速計と同程度の精度で計測できることが再確認される⁹⁾。また、乱れ強度分布 u' を見ると乱れ強度が最大となる境界部付近で LDA の値と比べてピーク値が若干小さいが、これはランダムな位置に存在するトレーサの流速から定点の流速に補間する段階で補間対象とされる面積が大きくこの範囲内で平均化されたためと推測される。この改善策として、トレーサ粒子濃度を増やし、また可視化計測領域をズームアップすれば解析精度が向上すると考えられる。

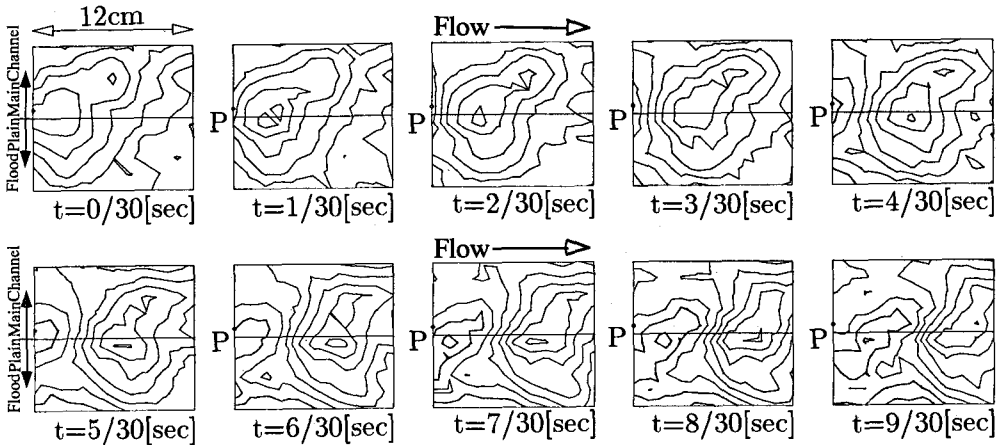
4.3 瞬間流速の時空間相関構造に関する解析

可視化画像上に格子点を設定し PIV で計測された流速 ($\hat{u}, \hat{w}$) の時系列が内挿法で算出された。図-8(a) および (b) は、可視化画像の代表点 1 点 (図中の点 P) と任意格子点 Q の流速の相互相関を計算したものである。流速成分 (u_i, u_j) の相関係数 C_{u_i, u_j} は次式で定義される⁷⁾。ここで、(x, z) は P 点の座標、 $\Delta x, \Delta z$ は Q 点との遅れ距離、 τ は遅れ時間である。

$$C_{u_i, u_j}(\Delta x, \Delta z, \tau) = \frac{u_i(x, z, t)u_j(x + \Delta x, z + \Delta z, t + \tau)}{u'_i u'_j} \quad (1)$$



R2 図-8(a) A 面における流速の時空間相関 $C_{uu}(\Delta x, \Delta z, \tau)$ のコンター



R1 図-8(b) A 面における流速の時空間相関 $C_{wu}(\Delta x, \Delta z, \tau)$ のコンター

図-8(a) は時空間相関 C_{uu} 、図-8(b) は時空間相関 C_{wu} を示した一例である。これらを見ると渦による変動が下流側に移流されることが確認される。すなわち水深規模程度の渦の存在が PIV により初めて計測されたと考えられる。一方、 C_{wu} のコンターはかなり複雑であるが、高水数と低水路間の相互作用を解明する基礎データを与えている。詳細については講演時に発表したい。

5 おわりに

本研究では、Particle-Image Velocimetry(PIV) という最新の「可視化流速計」を用いて、複断面開水路流れにシート状レーザー光 (LLS) を水平に照射させ、水平面内の乱流構造や組織渦を解明する計測法を開発したものである。本研究で得られた知見を列挙すると次のとおりである。

- 1) PIV の解析には鮮明な画像が必要であり、高強度のレーザー光 (LLS) の使用が望ましい。
- 2) PIV 計測には、 $100\mu\text{m}$ 程度の微細粒子が必要であり、適度な濃度に散布する必要がある。すなわち、誤追跡が発生しない範囲で最大限粒子濃度を増やした方がよい。
- 3) 乱れの時空間相関構造が従来の流速計 2 台を用いた場合よりはるかに容易に求められ、組織渦の解明に強力な計測法と考えられる。
- 4) PIV は原理的に断層平面内 (LLS) の渦の挙動、いわば渦の断面移流を計測しており、3 次元ステレオ計測は現在不可能である。したがって、3 次元性の強い現象には不向きかも知れないが、本研究のように低水路と高水数との水平面内の相互作用を解明する目的には最適である。

今後、条件付サンプリング手法を PIV に導入して組織渦の発生・発達・崩壊過程などの動特性を解明していきたい。最後に、本研究の画像解析を行うにあたり、新日本製鐵 (株) 技術開発本部、伊佐隆善氏・津田宜久氏より貴重な御指導を、また旭硝子財団から研究助成を受けたことを記し、これらに厚く感謝する。

参考文献

- 1) 今本博健・石垣泰輔・木下聖司: 複断面開水路流れの水理特性について (2), 京都大学防災研究所年報, No.27, B-2, pp.1129-1138, 1986.
- 2) Tominaga, A. and Nezu, I.: Turbulent Structure in Compound Open-Channel Flows, Jour. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol.117, No.1, pp.187-218, 1991.
- 3) Naot, D., Nezu, I. and Nakagawa, H.: Hydrodynamic Behavior of Compound Rectangular Open Channels, Jour. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol.119, No.3, pp.390-408, 1993.
- 4) 芦田和男・藤田正治・劉炳義: 複断面直線河道における浮遊砂の流送過程, 水理講演会論文集, Vol.32, pp.461-466, 1988.
- 5) 土木学会 (編): 「河道の水理と河川環境」シンポジウム論文集, pp.1-246, 1993.
- 6) 流れの可視化学会 (編): 「流れの可視化ハンドブック」, 朝倉書店, 1986.
- 7) Nezu, I. and Nakagawa, H.: Turbulence in Open Channel Flow, IAHR Monograph, Balkema, 1993.
- 8) 宇民正・上野鉄男: 開水路乱流の組織的構造に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報, No.29, B-2, pp.595-625, 1986.
- 9) 津田宜久・小林敏雄・佐賀徹雄: 汎用 PIV システム (Current) の開発, 第 6 回流れの計測大阪シンポジウム論文集, pp.47-52, 1991.
- 10) Nezu, I. and Nakagawa, H.: Turbulent Structure of Backward-facing Step Flow and Coherent Vortex Shedding from Reattachment in Open Channel Flows, Turbulent Shear Flows 6, Springer-Verlag, pp.313-337, 1989.
- 11) Head, M.R. and Bandyopadhyay, P.: New-Aspects of Turbulent-Boundary Structure, Jour. of Fluid Mech., Vol.107, pp.297-338, 1981.