

染料注入法を用いた浅水流場の 水深平均流速計測の試み

AN APPLICATION OF DYE INJECTION METHOD FOR MEASUREMENT OF
DEPTH-AVERAGED VELOCITY DISTRIBUTION OF SHALLOW WATER

森山 陽一¹・藤田 一郎²・出口 恭³・有光 剛⁴・景山 学⁵

Yoichi MORIYAMA, Ichiro FUJITA, Takashi DEGUCHI, Tsuyoshi ARIMITSU, Manabu
KAGEYAMA

^{1,3}学生員 神戸大学工学部工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 神戸大学工学部工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

^{4,5}正会員 関西電力株式会社電力技術研究所 (〒661-0974 尼崎市若王子3-11-20)

Conventionally, two-dimensional velocity distribution of model experiment with relatively shallow water depth has been measured by surface tracers because intrusion of probe itself will disturb the flow field significantly especially, in the case of movable bed experiment. However, surface flow is not always a good representation of mean flow when secondary flow effects are not negligible. On the other hand, the dye-injection method has been used for understanding general flow features by visualizing the depthwise flow. In this paper, a novel idea of utilizing dye-injected flow images for the measurement of depth-averaged velocity distribution is proposed. Through the particle simulation and experiments using straight and curved channels, the validity of the new idea was verified.

Key Words : *velocity measurement, dye-injection method, PIV, depth-averaged velocity, particle simulation, flow at bend, flow visualization*

1. はじめに

従来、河川模型実験における流速計測は、ピトー管や電磁流速計などプローブタイプの計測装置を用いた点計測により行われてきている。この方法では、計測点における流速は高精度に得られるものの、例えば湾曲部のように流れが平面的に大きく変化する場合、流れ場全体を正確に把握するためには平面方向だけでなく水深方向にも数多くの計測点が必要となるために多大な労力を要することになる。簡便な方法としては、1点法に基づいて河床から6割水深の点の計測値で水深平均流速値を代表させたり、2点法により2割および8割水深における計測値の平均値で代表させたりする場合が多い¹⁾。

このようにして得られた平面的な流速分布は、浅水方程式を用いた平面二次元解析の結果と比較する際に重要となるが、流速分布が対数則的な分布からずれる場合や水深方向に流向が変化する場合には、精度良く計測することが困難となる。特に対象が移動床流れであれば、計測プローブの流れへの挿入そのものが流れ場を乱し、不必要な河床変化を引き起こしかねない。さらに簡便な方法として、表面に散布したトレーサの流速分布から水深平均場を推定す

ることもある程度可能であるが²⁾、水面波や側岸からの衝撃波あるいは跳水が発生している場合には、トレーサの内部流れへの追従性が著しく低下する。湾曲部のように強い二次流が生じている場合にも表面流と内部流に大きな差が生じる。以上のような計測の問題は、特に水深が数センチのオーダーとなる河川流模型実験の場合に生じる。

一方、流れ場の流況を全体的に把握するために通常行われるのが、染料注入法による流れの可視化である。注入された染料は水深方向に拡散するため、水面上方から観察することにより表面流ではなく水深平均的な流れを調べることができる³⁾。染料注入は容易に行えるため、前述のように様々な水面波が発生している場合でも移動床の場合でも問題なく流れの様子を観察できる点が重要である。本研究では、この点に着目し、染料注入した可視化画像の画像解析から、水深平均流速分布を求めるための様々な試みを行った。すなわち、直線水路における可視化実験、染料注入を模擬した三次元的な粒子画像のシミュレーションおよび比較的大きなフルード数における湾曲部の模型実験を通じて水深平均流速場を求めるための方法論について検討した。

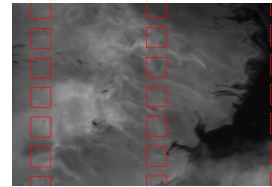
表-1 実験ケース

case	1	2	3	4	5	6
$h(\text{cm})$	3	6	3	6	3	6
$Q(\text{l/s})$	1.8	3.6	1.8	3.6	1.8	3.6
I	1/500					
Fr	0.37	0.26	0.37	0.26	0.37	0.26
tracer	染料A	染料A	染料B	染料B	表面	表面

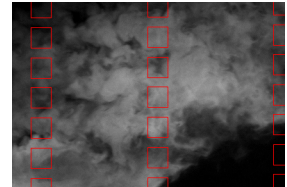
*染料Aは上からの散布，染料Bは水中からの注入を示す

表-2 解析パラメータ

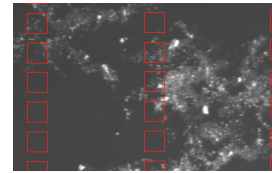
テンプレートサイズ	30x30 (pixel)
フレームレート	110 (fps)
ピクセルあたり物理長さ	0.0775 (cm/pixel)



(a) 染料A (上から散布)



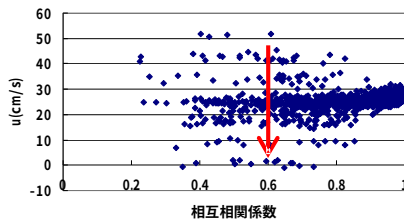
(b) 染料B (水中から注入)



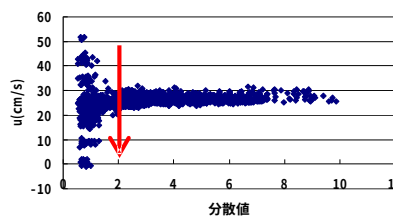
(c) 表面トレーサ

図-1 水路中央の
各可視化法の違い

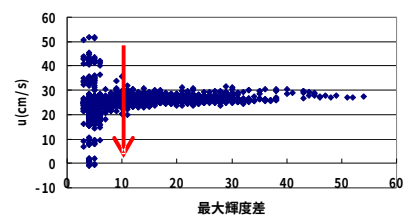
(24x18cmのエリア
赤い四角はテンプレート
と計測点を示す)



(a) 相互相関係数



(b) 分散値



(c) 最大輝度差

矢印はしきい値を示す

図-2 パラメータの値に対する瞬間流速成分の分布 (case1)

2. 直線水路実験

(1) 概要

実験に用いた水路は水路長6.0m，水路幅0.3mの循環型直線水路である．表面流の計測には平均粒径が約 $5\mu\text{m}$ のナイロン破砕粒子(白色パウダー状)，水深平均流の計測には水溶性の白色染料を用いた．表面流は計測断面の上流側からフルイに入れたトレーサを，フルイを手動で振動させることで供給し，白色染料は大型のスポイトを用いて水路幅全範囲に行き渡るように間欠的に注入した．白色染料を注入する際には水面上から滴状に垂らすケースとスポイトの先端部を水中に挿入して散布するケースを試みた．撮影には高速度ビデオカメラUNIQ製UP-685CL (658×491pixel)を用い，水路の真上方向から撮影を行った．フレームレートは110fpsとした．撮影は全ケースとも約20秒間行い，得られた約2400枚の静止画を用いて解析を行った．実験ケースを表-1に示す．水深は3cmと6cmの2通りとした．得られた静止画の一例を図-1に示す．染料注入の場合とナイロン破砕粒子では，可視化された流れのパターンが異なることがわかる．また，染料の注入方法によっても得られる画像には違いが見られた．

(2) 画像解析

画像解析にはPIV(Particle Image Velocimetry)を用いた．解析に用いたパラメータを表-2に示す．テンプレートは図-1に赤い枠で示すように水路幅全体に

表-3 フィルタリングパラメータ(各しきい値)

case	1	2	3	4	5	6
相互相関係数	0.6					
分散値	2	2	2	1	1	1
最大輝度差	10	7	7	9	6	8

設置し，その平均を画像解析値とした．なお，表面トレーサは水路壁に付着するため染料を用いた場合と大きく値が異なることが確認された．そこで平均流速を求める際には壁近傍のデータを除いて算出を行った．テンプレートサイズはテンプレート内の輝度パターンにある程度の特徴が現れるようにサイズを変化させて解析を行った結果，20～70(pixel)の範囲で同程度の流速値を得たため，代表値として30(pixel)を採用した．

(3) 異常ベクトル除去

通常はPIV解析で発生する異常ベクトルを除去するために相互相関係数にしきい値を設定することが行われるが，染料をトレーサとして用いた場合には表面トレーサに比べテンプレート内の輝度パターンの変化が乏しくなるため，より厳密なフィルタリングが必要となる．そこで，相互相関係数の他にテンプレート内の輝度値の分散値，最大輝度差といったパラメータにしきい値を設けることとした⁴⁾．図-2に，case1のある計測点における流速値とそれに対

表-4 解析結果

case	1	2	3	4	5	6
画像解析値 (cm/s)	26.8	25.7	26.0	24.2	27.9	26.3
表面流速に 対する比 α	0.960	0.978	0.932	0.921	1.00	1.00

表-5 画像生成パラメータ

画像サイズ	300x300 (pixel)
最上層の粒子速度 (U_s)	4 (pixel/frame)
最下層の粒子速度	2 (pixel/frame)
水深平均流速 (U_m)	3 (pixel/frame)
最上層の粒子粒径	4 (pixel)
最上層の粒子輝度値	255

応する上述のパラメータの分布をプロットした。図-2(b),(c)からパラメータの値が大きくなるにつれて流速成分は一定の値に近付く傾向を示すことがわかる。ここでは、流速成分にバラツキが見られなくなるときのパラメータの値をしきい値として設定する。一方、図-2(a)から相互相関係数のみでは異常値を完全に除去できずフィルタリングとして不十分であることがわかる。そこで、ここでは設定した三つのしきい値をすべて満たした瞬間流速成分のみを用いて平均流速を算出した。各パラメータのしきい値は表-3のとおりで実験ケースごとに設定した。

ここで示した手法は方法論としては簡便だが、染料を用いて水深平均流速分布を直接計測する新たなPIV計測手法として位置付けられることから、以降ではこの手法をDIPIV(Dye-Injected PIV)と称することとする。

(4) 画像解析結果

画像解析結果を表-4に示す。ここで表面流速に対する比 α とは、染料による平均流速(U_d)を表面トレーサによる平均流速(U_s)で除した値 U_d/U_s をさす。これより染料の全体的な移流速度は表面流速よりも若干小さな値を示すことがわかる。これは表面トレーサが表面流を可視化するのに対して、染料は水深平均的な流速を表しているためである。通常、表面流速から水深平均流速 U_m を算出する際には流速の更正係数として0.85を用いる場合が多い。染料の平均移流速度が水深平均流速に一致しておれば α の値は0.85となるはずであるが、上の実験によれば上から散布した場合には0.97程度、水中から注入した場合には0.93程度の値を示している。これは、染料の移流速度 U_d が必ずしも水深平均流速 U_m に一致しないことを示唆する。その原因としては、流れ場の撮影を真上から行っているために、底面付近の染料が水面付近の染料の背後に隠れることが多く、そのためにDIPIVの結果が相対的に流速の大きい水面近傍の染料の影響を強く受けたことが考えられる。これは、染料を水面付近のみに注入した場合(case1とcase2)には、より表面流速に近付いていることから予想できる。

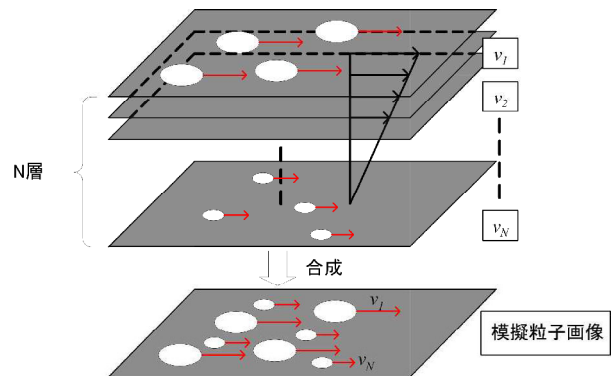


図-3 合成画像の生成法

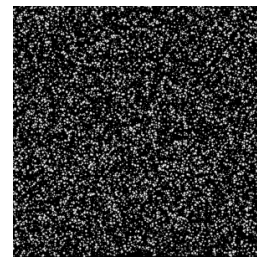


図-4 生成画像の例

3. 粒子画像シミュレーション

(1) 概要

通常、PIVでは相互相関係数を用いたテンプレートパターンマッチングにおいて、対応する各テンプレート内のパターンが連続的に微小変形すると仮定している。しかし、DIPIVでは同じテンプレート内に低速(底面側)や高速(水面側)で移動するパターンが混在しているため、従来のテンプレートパターンマッチングで平均的な流速値が得られるのかどうか不明である。そこで、水中に注入した染料が水深全体に万遍なく分布した状況すなわち高速・低速粒子が混在した状況を想定した粒子画像シミュレーションを行い、流速の違いがPIV結果に及ぼす影響について基本的な検討を行った。また、実験で得られた α の値0.93を再現するのはどのような状況なのかを調べた。ここでは問題を単純化して考えるために、図-3に示すような方法で模擬粒子画像を生成した。すなわち、水深方向を何層かのレイヤーに分割し、各層の粒子が同一の流速・粒径・輝度値を持つと仮定した上で、すべてのレイヤーを重ねて真上から見た画像を生成した。PIV解析は各層の速度に合わせて、粒子群を移動させて合成した連続画像に対して行った。実際の撮影時には焦点深度なども影響することが考えられるが、ここではすべての粒子が明瞭に見えている状況を想定した。粒子の中心座標は乱数で与えた。また、各粒子の貼り付けは下層から順次上層に向けて行い、見かけ上、上層の粒子が上の方になるようにした。得られた模擬粒子画像の例を図-4に示す。シミュレーションに用いた模擬画像は染料の拡散の様子を忠実に再現することは目的とし

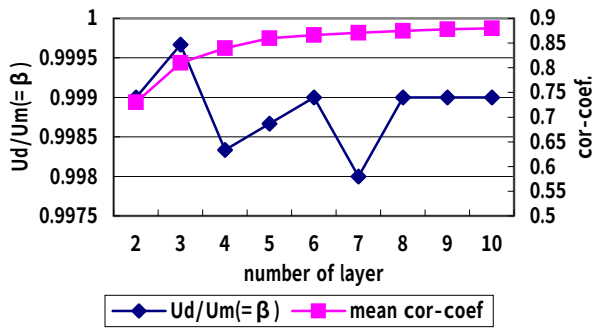


図-5 層の分割数による比率 β の変化

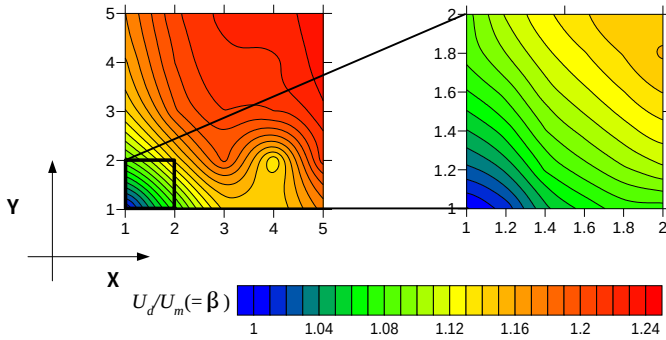


図-6 粒径および輝度による比率 β の変化

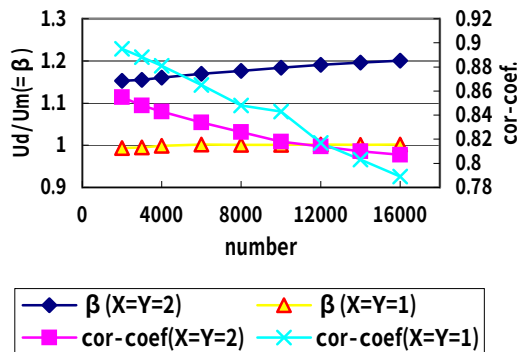


図-7 粒子数による比率 β の変化

ておらず、画像中の各粒子が各々が含まれる層の速度で別々に移動している様子を再現している点に注意されたい。

(2) 線形流速分布の場合

ここではまず、最も単純な流れ場として、線形流速分布を対象として画像生成パラメータの影響に関する検討を行った。画像生成の際に設定した共通のパラメータを表-5に示す。また、実験結果から得られた α の値の検証を行うために表-5に示したパラメータ以外に層の分割数・最下層の粒子の粒径および輝度値・粒子数といったパラメータを変化させた画像を生成し、解析値に与える影響を調べた。

a) 分割層数の変化による画像解析値の影響

分割層を2~10種類まで変化させ、理論値、すなわち各層の移動速度の平均値 U_m との比較を行った。

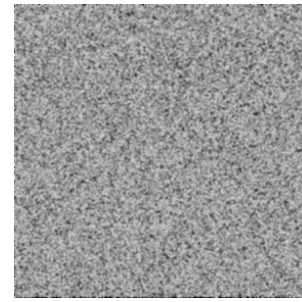


図-8 ポカシ処理後の画像

この段階では各層の粒子の輝度値と粒径は全層で一定、粒子総数は4000個とした。合成画像を用いた画像解析値 U_d の U_m に対する比 $\beta (=U_d/U_m)$ および相関係数の平均値の推移を図-5に示す。これより、テンプレート内の各粒子の移動速度にバラツキがあっても、PIVはその平均的な移動速度を計測できていることがわかる。相互相関係数の値は層数の増加とともに増大している。また、図-4に示すように個々の粒子が識別できるような場合には、PIVによる結果 U_d はほぼ水深平均流速 U_m そのものを与えており、実際の染料の場合とは異なることがわかる。これは、底面付近の粒子の上層の粒子による遮蔽効果がまだうまく再現できていないためである。

b) 輝度値および粒径の分布

上述の状況を改善するために粒子の輝度値および粒径を水深によって変化させて検討した。層数は10層とした。最上層の粒子のパラメータを一定とし、それ以下の粒子のパラメータを様々に変化させて調べた。すなわち、最下層の粒子の粒径を最上層の $1/X$ 、同様に輝度値を $1/Y$ とし、 X と Y の値をそれぞれ1~5まで変化させ、中間層のパラメータは線形的に変化させた。これは、上層ほど高輝度で粒子サイズを相対的に大きくすることにより下層の粒子の影響を抑えるためである。 X 、 Y に対する β のコンター図を図-6に示す。この図より輝度値および粒径の変化の程度が大きくなると、 U_d が U_m よりも大きくなっていくことが確認できる。これは、水面近くの粒子の影響がPIVの結果により強く反映されているからである。この場合、変化の様子はほぼ線形的であり、輝度値と粒径の影響は同程度であることがわかる。なお、粒子数は全て4000個とした。

c) 粒子個数の影響

粒子数を2000~16000個まで変化させ、その影響を調べた(図-7)。最下層の粒子の輝度値および粒径を $X=Y=2$ とした場合、粒子数の増加に伴って β は単調増加、相互相関係数の平均値は単調減少の傾向を示した。また、 $X=Y=1$ とした場合には相関係数は単調減少、 β はやはり1.0となった。これより、粒子個数を増大させた場合でも前述の結果と同様、粒子輝度や粒径の影響がPIVの解析結果に表れることがわかった。

表-6 粒径・輝度値および粒子数に対する
更正係数 α の変化

$X=Y$	number	$U_d/U_s(=\alpha)$
1.0	4000	0.901
	12000	0.903
	16000	0.904
1.2	4000	0.922
	12000	0.928
	16000	0.931
1.5	4000	0.952
	12000	0.958
	16000	0.960

表-7 フレーム間粒子移動量の影響

U_s (pixel/frame)	4	8	12	16
U_d (pixel/frame)	3.71	7.42	11.24	15.12
$U_d/U_s(=\alpha)$	0.928	0.928	0.937	0.945

(3) 1/7乗則の流速分布の場合

以上の基本的な検討で、同一画面内に異なる速度の粒子群が存在していても、平均的な流速が得られることを示した。ここでは、より実際の流れ場に近い粒子画像で、実験と同様の結果が得られるかどうか検討した。そのために、鉛直流速分布には1/7乗則を与え、画像にはガウシアンフィルタを用いたボカシ処理を施した(図-8)。粒径および輝度値と粒子数の変化に対する α の値は、表-6のようになった。この表から直線水路実験で得られた α の値0.93に対応するのは粒子個数によらず $X=Y=1.2$ の場合であることがわかる。染料は水面近くの方が輝度値が高いことは実験でも確認しているのでこの値は妥当なものと考えることができる。

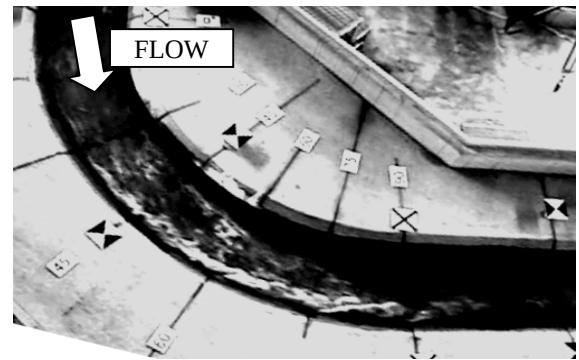
(4) 粒子移動量の影響

ここでは、 $X=Y=1.2$ として生成した画像(粒子個数12000)をベースとし、最大ピクセル移動量を変化させて調べた。結果を表-7に示す。これより、最大ピクセル移動量が12程度までは、ピクセル移動量に関わらず $U_d/U_s(=\alpha)$ は実験で得られた0.93にほぼ近い値を示すことが確認された。PIVにおいては、最大ピクセル移動量が10程度となるように画像のサンプリングを行うことが通常であるから、ここで得られた値は汎用性の高い値と思われる。

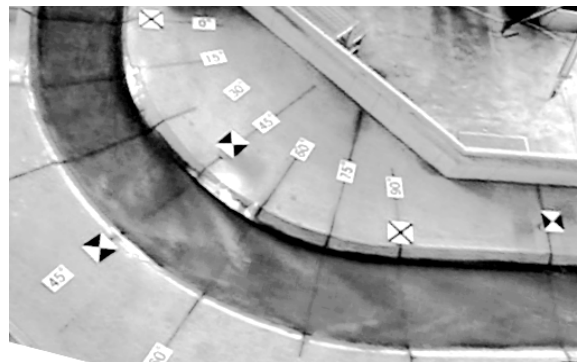
3. 湾曲模型実験

(1) 概要

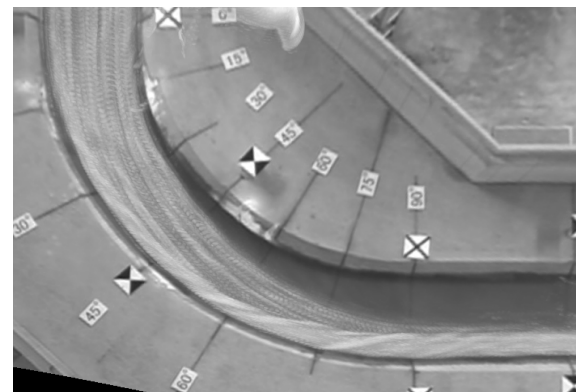
以上の検討で得られた結果を実際の模型水路で検討するために、水路幅50cm、延長約14m、勾配1/80、曲率半径2mで直角に湾曲する水路を対象とした実験を行った。流量は $0.017\text{m}^3/\text{s}$ 、平均的な水深は4cm程度である。流れの可視化はナイロン粉末と白色染料およびメチレンブルーを用いて行ったが、メチレ



(a) 表面トレーサ



(b) 染料



(c) 表面トレーサの多重合成画像

図-9 表面トレーサと染料による可視化画像の比較

ンブルーはモノクロ画像上では背景との識別が困難であったため、検討からは除外した。染料はある程度移流した状態では拡散のため解析が困難となることから計測断面の上流側で染料等の投入が流れ場に影響を及ぼさないと判断できる位置から数箇所に分割して投入した。流況は、水路斜め上方に設置したハイビジョンビデオカメラによって撮影した。画像サイズは 1440×1080 (pixel)である。解析においては斜め画像を水路近辺に設置した標定パネルの座標を用いて幾何補正した画像を用いた^{5,6)}。

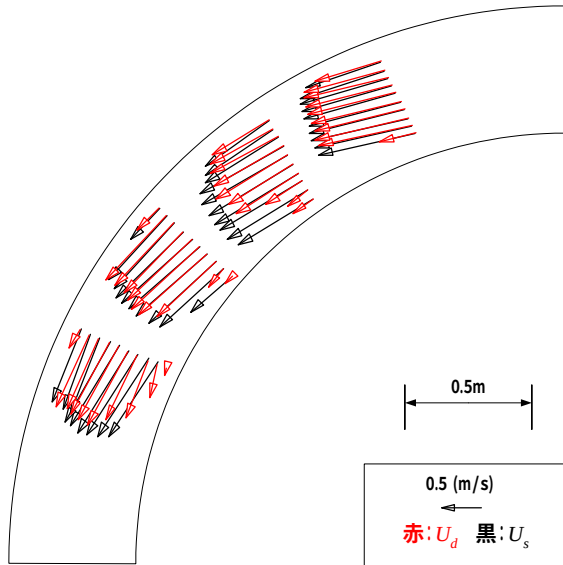


図-10 流速分布の比較

(2) 直線水路部での更正係数

まず、二次流の影響などを排除した状態での比較を行うために、湾曲水路の直線部分での比較を行った。その結果、 α の値はほぼ0.93となりここまでの結果を裏付けることができた。また、表面流速から水深平均流速への換算係数は1/7乗則を用いた場合には0.88程度の値となることから、 $U_m = (0.88/0.93)U_d = 0.94U_d$ から水深平均流速を求めることができる。すなわち、1/7乗則を仮定した場合、染料の流速 U_d から水深平均流速 U_m を求めるための更正係数 γ は0.94となる。この値を用いて直線水路部分での流量を算出したところ、ほぼ良好な結果を得た。

(3) 湾曲部での流況

湾曲部における流況は直線部とは異なって表面トレーサの運動が代表する表面流と、染料の運動が代表する内部流では大きな差が生じた。マクロ的な流況を比較するために、ほぼ同一の地点（湾曲部手前の断面）から散布した表面トレーサと染料による可視化画像のある瞬間の画像、および表面トレーサについてはトレーサの軌跡を多重合成した画像をそれぞれ図-9に示す。各々、見やすくするために適宜画像の強調処理を施している。

瞬間画像の比較より、表面トレーサは右岸側に集中する傾向があるのに対し、染料の場合は乱流拡散の影響は受けているものの湾曲部へ流入後も水路幅全幅にわたって染料が分布していることがわかる。目視観察ではこれらの違いをさらに明確に識別することができ、特に染料の場合は水路幅に沿って注入した部分が湾曲部の内側にまわり込みながら流下する様子を観察できる。一方、表面トレーサの場合は図-9(c)に示した多重合成画像からも明らかなように、湾曲部の内側にまわり込むことなく対岸側へ集

中しながら流下する様子を観察できる。これらの違いが湾曲部で生成される強い二次流に起因することは明らかであるが、少なくとも表面流のみの観察では流れ場の平均的な流況を知ることは困難であることがわかる。

(4) 画像解析結果

図-10に湾曲部分の画像解析(DIPIV)による結果を比較した。全体的に表面トレーサの流速(U_s)が速く、湾曲部下流になるにつれて流向にも差が生じる様子をうまく捉えており、上述の流況に対応する速度場の情報を得ることができた。ただ、今回の解析では、各点における計測時間が短く、(10秒程度)トレーサの横断方向への散布も数回行った程度であったため、計測精度を向上するためには計測断面の上流付近からのトレーサの投入を繰り返すなどの工夫が必要と思われる。

4. おわりに

本研究では、比較的浅い水深の流れ場を対象として水深平均的な流速分布を求めるための一手法としてDIPIVを提案し、粒子画像シミュレーションや水路実験によりその有用性について検討した。その結果、水深全体に渡って注入した染料は水深平均的な流れ場に追従して流下し、水路上方から撮影した画像を解析することにより、水深平均流場を把握できることを更正係数とともに示すことができた。ここで示した方法は、乱流場等についての詳細な情報は得られないが実用的なレベルで水深平均流場を計測できるため、今後、移動床実験に適用していく予定である。

参考文献

- 1) 道奥康治ら：透過性水制の周辺・内部の流れに関する実験と解析，水工学論文集，第48巻，pp.799-804,2004.
- 2) 和田一範・岡安徹也・浜口憲一郎・市山誠：卓上水理模型による河床形状の再現性に関する研究，水工学論文集，第48巻，pp.739-744,2004.
- 3) 出口恭・藤田一郎・椿涼太・大藺政志：勾配の異なる急勾配河川合流部における固定床および移動床の解析，水工学論文集，第48巻，pp.823-828,2007.
- 4) 森山陽一・藤田一郎・出口恭：水深平均流速を対象とした可視化画像計測法の開発，平成19年度土木学会関西支部年次学術講演会 第II部門，II-63，2007.
- 5) 藤田一郎：実河川を対象とした画像計測技術，2003年度水工学に関する夏期研修会講義集，水工学シリーズ 03-A-2,2003.
- 6) Fujita, I., Muste, M. and Kruger, A.: Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.36 No.3, pp.397-414, 1998.

(2007.9.30受付)