

底面粗度による剥離渦発生と水面変動の関係について

Relationship between Separation Vortices Generated by Bottom Roughness and Water Surface Fluctuation

藤田一郎*, 江見崇**

Ichiro FUJITA and Takashi EMI

*正会員 学術博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

**学生会員 工修 神戸大学大学院自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

Water surface fluctuations in river flows are caused by various factors such as wind effects, near-surface turbulence, or collision of boil vortices against water surface. When we view the river surface from a riverbank, such effects can be recognized as a surface image pattern moving with the flow, which can be utilized for non-contact surface flow measurement. Although plenty of research has been performed regarding open-channel turbulence, the effect of the bottom roughness on water surface fluctuations has not been investigated intensively so far. In this study, an open-channel flow with strip roughness is measured by PIV and the relationship between the flow near the bottom and water surface is investigated with the aid of the POD filtering technique.

Keywords: Water surface fluctuation, PIV, POD, Open-channel turbulence, strip roughness

1. 序論

河川の表面は、流れや河床の状態、河岸形状あるいは風などさまざまな要因の影響を映し出すひとつの鏡のようなものである。このような影響がまったくなければ、河川表面はまさに鏡面で空を映し出すような平坦な状態となり、その影響が強くなれば、波しぶきをあげるような状態を呈することにもなる。このような河川表面の変化は、一次元的には不等流などの解析で得られ、これによりマクロ的な河川の状況を把握することができる。これに対し、河川表面の二次元的な変化は、浅水流方程式や水面を考慮した三次元解析モデルなどで求めることができるようになり、常射流混在の流れ場の再現なども可能となってきた¹⁾。ただ、このような計算空間で得られる水面は、数値をそのままCGなどで可視化すると実際に我々が目にする河川表面の様子とは異なり、変化に乏しい無表情なものとなる。これは、前述の様々な要因によって河川表面に現れる微細な構造を上モデルでは再現できないからである。従来の工学的な観点からみれば、このような微細な平面構造の再現は実用上不必要なことであったのも確かなこ

とであるが、近年になり著者らはこのように水面に現われた平面構造（あるいは水面波紋）の移流特性を調べ、多くのケースでその移流速度が表面流速に匹敵することを明らかにしてきた²⁻³⁾。このことは、特に実河川の表面流速計測や流量観測への適用という点で重要であり、従来、あまり関心や注意を引かなかった水面の微細構造に注目したという点で意義がある。ちなみに、このような水表面の移流を利用した他の計測法に電波流量計や電磁流量計がある。

ところで、このような河川の水面波紋は、観測者から見て水面に多少なりとも凹凸があり、光の反射強度が各点で異なるために現れるものである。このような水面の凹凸には、小スケールのもから大スケールのものまであり、洪水時にはこれらが重畳・混在した状態で一気に流下する。しかしながら、このような多種多様な水面波紋の発生要因やその特性については不明な点が多い。水面変動に関しては、変動強度に関する実験室レベルのデータ⁴⁾は得られているものの、個々の変動の要因について検討した例はあまり見られない。そこで、本研究では、基本的な水面変動の素過程を調べるために、最も単純な流れ場として棧粗度を底面に配置した流れを対象と

表-1 実験条件

		h_1 (cm)	U_1 (cm/s)	Fr	Re	I
Fr35	$Ls10$	6	26.9	0.35	16100	1/600
Fr40	$Ls5$	6	30.8	0.40	18500	1/500
	$Ls10$					
Fr45	$Ls5$	6	34.7	0.45	20800	1/250
	$Ls10$					
Fr50	$Ls5$	6	38.4	0.50	23000	1/150
	$Ls10$					

して可視化画像解析を活用した実験を行い、河床面の粗度が水面変動に与える影響について詳細な検討を行った。

2. 実験の概要

2.1 実験装置

実験には水路長7.5m、水路幅0.3mの循環式可変勾配直線開水路を用いた(図-1)。水路の上・下流部にはそれぞれ貯留水槽があり、ポンプを用いて下流側水槽から上流側水槽へ水を循環させた。水路底面には、図-2に示すような栈粗度を水路全面に貼り付けた。栈粗度には、横断面($b_s \times h_s$)が1cm×1cmのアルミ棒を用い、粗度間隔 L_s は5cmと10cmの二通りとした。水理条件を表-1に示す。平均水深 h_1 が6cmで一定となるように流量や勾配 I を調整し、フルード数を0.35から0.50まで変化させた実験を行った。 U_1 は断面平均流速をさす。なお、フルード数(Fr)が0.5以上になると、水面変動が急激に増大することを確認している。なお、実験範囲でのレイノルズ数(Re)の違いの影響はないと考える。

2.2 可視化画像計測の方法

可視化の光源にはアルゴンイオンレーザー(最大出力7.3W)を用い、光ファイバーに取り付けたビームイクスパンダーを通して水路底面や側方からレーザー光膜を照射した。光膜の厚さは2~3mmとした。可視化には平均粒径が10 μ m程度のナイロン破碎粒子を使用した。可視化画像の撮影にはハイスピードビデオカメラ(PHOTRON製、FASTCAM-MAX 120K)を用いた。取得した画像のサイズは1024x512画素で、500fpsで連続8192枚の画像を得ることができる。1画素のサイズは1/47cmであった。画像計測には、著者らの開発した高次の時空間微分を考慮するPIV(Particle Image Velocimetry)を用いた⁵⁾。この方法では、3枚連続の画像を順次使い、画像計測の高精度化を図っている。ベクトルの算出間隔は7x7画素、テ

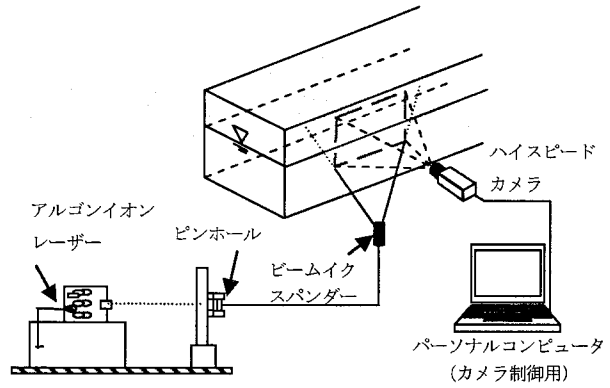


図-1 可視化実験装置

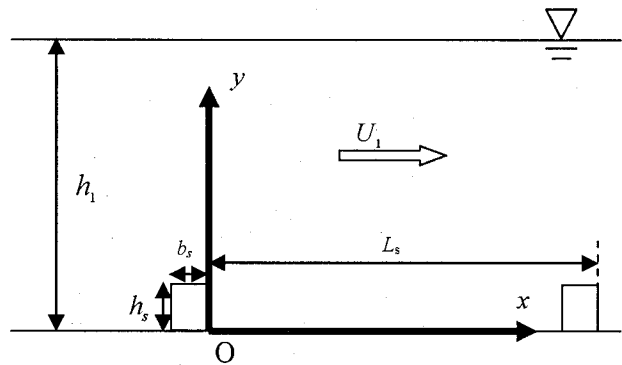


図-2 栈粗度の配置

ンプレートサイズは31x31画素とした。

3. POD解析の概要

POD(Proper Orthogonal Decomposition:固有直交関数展開)は、多変量解析における主成分分析と同様の概念を用いて変動場の特徴的な特性を引き出せる手法で、PIVの解析方法の一つとして用いられるようになってきた⁶⁾。この方法によれば、ランダムな現象の中に含まれている組織的な構造の抽出が可能とされる。PODを乱流場に適用する際の目的は、ランダムに変動する流速場において、その集合の全ての要素と最も良く相関する固有関数 $\Phi(x,y)$ を見つけることにあり、その手順は、ランダムに変動する流速の変動成分 $u(x,y,t)$ が与えられたとき、固有関数 $\Phi(x,y)$ に対する $u(x,y,t)$ の投影が最大となるものを見出すことに帰着する。すなわち

$$\iint u(x,y,t)\Phi(x,y)dx dy \Rightarrow \max \quad (1)$$

あるいは、正規化した

$$\frac{\iint u(x,y,t)\Phi(x,y)dx dy}{\sqrt{\iint \Phi^2(x,y)dx dy}} \Rightarrow \max \quad (2)$$

を満たす $\Phi(x, y)$ を見出せばよい。これは、次式の固有値問題

$$\iint R_u(x, y, x', y') \Phi(x', y') dx' dy' = \lambda \Phi(x, y) \quad (3)$$

に帰着する。対象が離散値ならば、次式のマトリクスで表現される。

$$[R_u] \{\Phi_m\} = \lambda_m \{\Phi_m\} \quad (4)$$

ここに、 $[R_u]$ は、各点の速度変動成分の空間相関マトリクス(分散・共分散マトリクス)、 λ_m は $[R_u]$ の固有値、 $\{\Phi_m\}$ は λ_m の固有ベクトルである。オリジナルの流速変動は固有ベクトルの直交性を利用して

$$u(x, y, t) = \sum_{m=1}^M a_m(t) \Phi_m(x, y) \quad (5)$$

と再合成できる。ここに、

$$a_m(t) = \frac{\iint u(x, y, t) \Phi_m(x, y) dx dy}{\iint \Phi_m^2(x, y) dx dy} \quad (6)$$

である。ここで、モード m の固有値 λ_m はそのモードに含まれる変動成分のエネルギーを表しており、次式の累積寄与率は全変動エネルギーに対する N 次モードまでの変動エネルギーの比率を示すものである。

$$C_N = \sum_{m=1}^N C_m = \sum_{m=1}^N \lambda_m / \sum_{m=1}^M \lambda_m \quad (7)$$

4. 画像解析結果と考察

4.1 鉛直断面の平均流および乱れ特性

鉛直縦断面の解析結果の例として、Fr45 のケースについて平均流速ベクトルを図-3、主流成分の乱れ強度分布を図-4、レイノルズ応力分布を図-5 に示す。図-3からは、Ls10 のケースでは再付着点が粗度間に生じているのに対し、Ls5 では循環流的な流れとなっていることがわかる。この特徴は他のフルード数のケースでも同様で、ケースによる差はあまり見られなかった。乱れ強度分布は粗度の部分で発生した剥離渦の影響が底面付近のせん断層を中心として強く現われている。図には示していないが、この傾向はフルード数の増大につれて顕著になった。レイノルズ応力の分布も底面付近のせん断層でピーク値を取る特徴が現われている。

4.2 上昇流および渦コアの発生頻度

水面の変動は、底面から発生した剥離渦の上昇による影響も考えられるため、上昇流の発生頻度についても調

べた。上昇流の発生頻度 R_{up} は、次式で定義した。

$$R_{up} = N_{v>0} / N \quad (8)$$

ここに、 N は流速データ総数(=4096)、 $N_{v>0}$ は、そのうち鉛直流速成分が正(鉛直上向き)となるデータ数である。図-6 に Fr45 のケースの結果を示した。Ls10 では底面の粗度の前後に局所的な上昇流の発生箇所が見られるのに加えて、上昇流の発生頻度の相対的に高い領域が左の粗度から斜め上方に向かって分布している点が特徴的である。粗度の間には上昇流があまり発生しない領域が粗度高さの2倍程度の高さまで広がっている。これに対し、Ls5 のケースは、個々の粗度によって発生する剥離渦の影響は少なく、上昇流の発生領域は水面近くまでは到達していない。これらの傾向は他のケースでも同様であった。

図-7 には、藤田・熊城⁷⁾が提案した渦コアの発生頻度、図-8 には渦度分布を示した。渦コアは局所的に流線が閉じるための条件に対応している。これをみると、渦度の発生あるいは渦度の大きな領域は、どちらのケースも底面の粗度近くに限定されているようであり、図-6の分布とは異なる結果となった。これは、上昇流の発生が剥離渦の発生とその浮上とは異なるメカニズムによって生じていることを示唆している。すなわち、上昇流発生メカニズムは剥離渦発生といった小スケールの事象ではなく、マクロ的な流れ場の特性が関与しているものと思われる。これに関する検討は後述する。

4.3 水面近傍の水平断面内流れの特性

水面近傍の流れ場は底面からの湧昇流などにより攪乱を受ける。例えば、水面にトレーサーを散布した場合、トレーサーは集中・発散する。水面近くでトレーサーが発散する場所は底面からの上昇流が水面に衝突する場所に一致する。そこで、水面近傍にレーザー光膜を照射し、発散値の分布を求めて比較した。解析においては水路中央で流れ方向に平行に検査線を想定し、その検査線上の発散値の時間発展の特性を調べた。図-9 に Fr45 のケースの時空間プロットの一部(2 秒間)を示す。発散値の正負の領域が流れ方向に移流している様子が縞模様として得られている。正負のパターンはペアになって移流しているケースが多く、湧昇流(発散値が正の部分)と並んで下降流(発散値が負の部分)が同時に発生していることが推定される。

湧昇流の発生頻度(発散値が正となるデータの割合)について、粗度間隔とフルード数の影響を調べたのが図-10 である。Ls10 のケースではフルード数の増大とともに、分布形が平坦となり相対的に大きな発散値が生じている。これに対し、フルード数が比較的小さな Fr35 あるいは Fr40 では相対的に大きな発散値は生じていない。一方、Ls5 のケースではフルード数による差はほとんど見

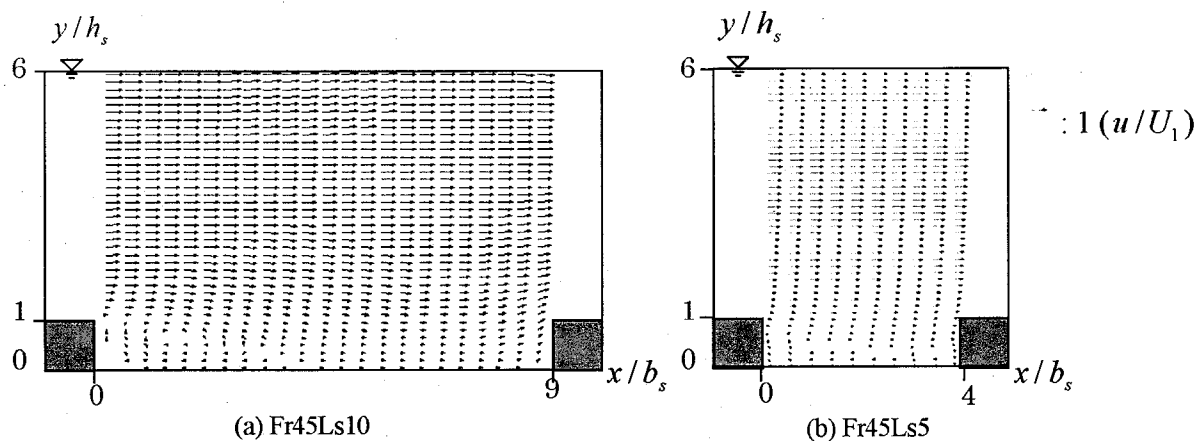


図-3 平均流速ベクトル

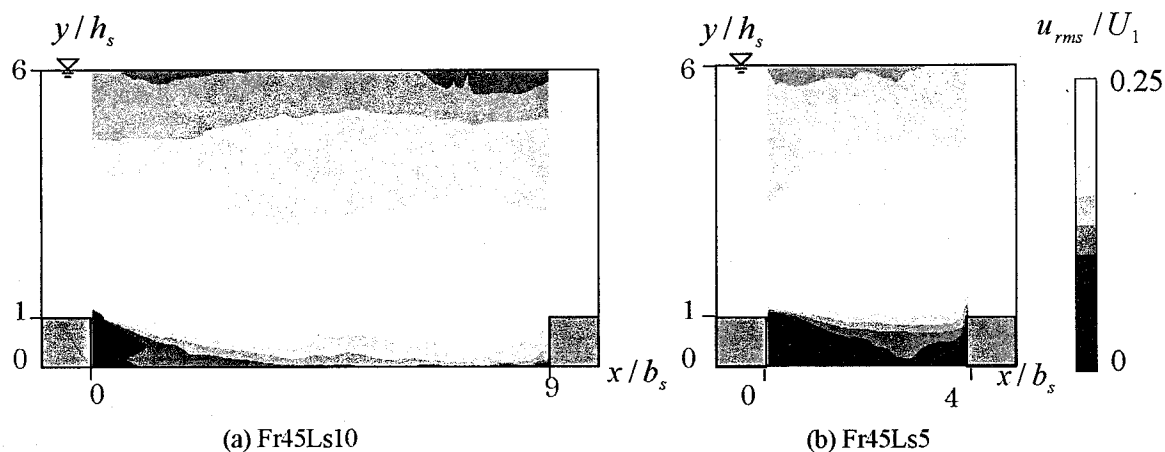


図-4 流れ方向乱れ強度分布

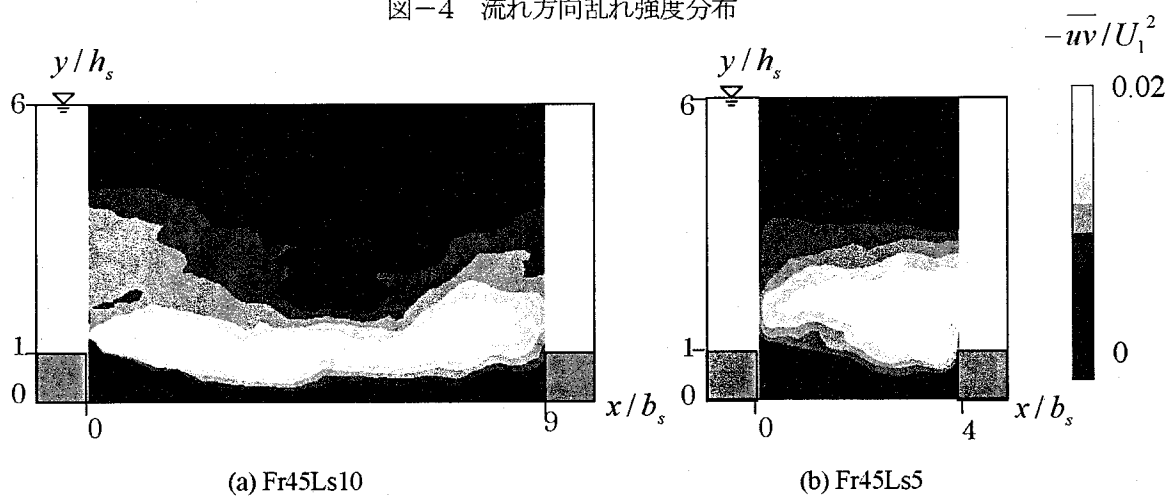


図-5 レイノルズ応力分布

られず、Ls10とは異なった傾向を示している。水面の発散値の発生頻度に対するフルード数の影響が、粗度間隔が小さいLs5ではあまり見られないのに対し、粗度間隔が大きいLs10で現われたということは、粗度間隔の増大とともに流れ場がフルード数の影響を受けやすくなり、それに伴って水面付近の発散場も変化したと考えることができる。図-7などでは検出できなかった剥離渦の影響が水面にまで及んだ可能性もあるが確認はできてい

ない。すなわち、図-9で発散の大きな局所領域としてLs10のケースで見られたものが、底面起因のものなのかどうかについては今後の検討が必要である。すなわち、剥離渦の放出とは別のメカニズムでフルード数の影響が現われた可能性もある。ただ、少なくとも、粗度間隔の違いが水面近傍の発散場に差異を生じさせていることは明らかである。

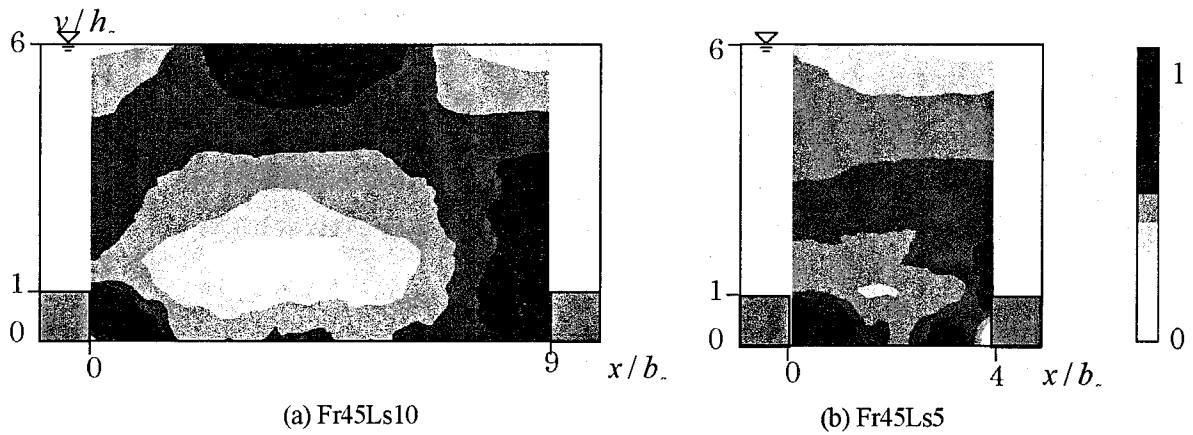


図-6 上昇流発生頻度分布

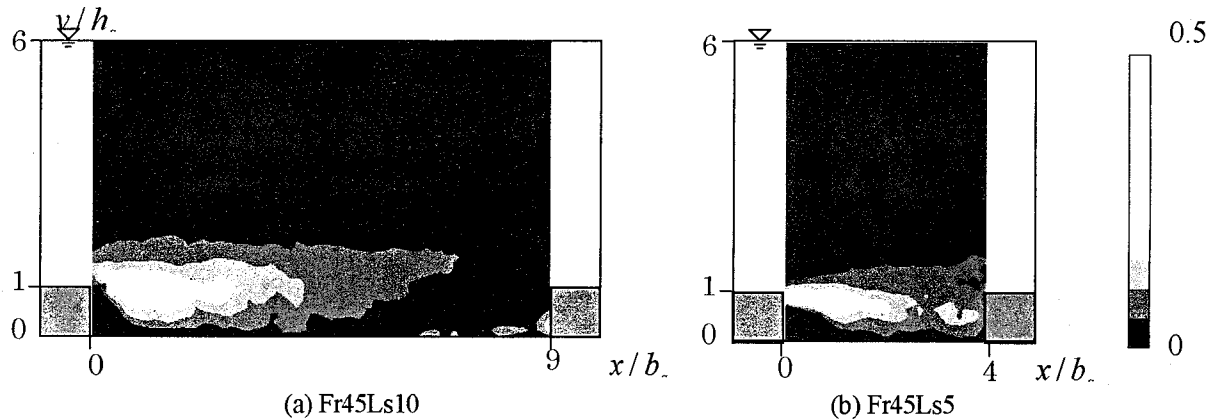


図-7 渦コア発生頻度分布

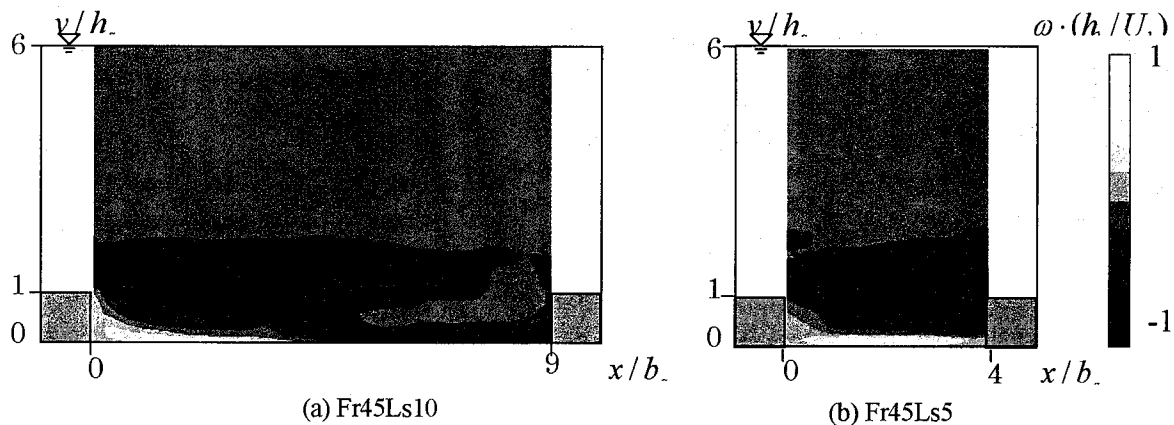


図-8 渦度分布

4.4 多重合成画像による検討

底面付近の流れ場と水面変動の関係を直接的に調べるために、ここでは多重合成画像を用いた検討結果を示す。画像の多重合成は、連続N枚の可視化画像を用い、各画素の輝度値として最も輝度の高い値のみを用いて画像の再構成を行うものである。この処理により、各トレーサーの流跡線が可視化され流れの構造の理解が容易になる。ここでは、 $N=30$ として多重合成を行ったが、本実験では500fpsで画像取得を

行っているため、0.06秒のシャッターで露光した画像と同等の可視化画像が得られることになる。図-11にFr45-Ls10の場合の可視化画像を示す。主流部や栈粗度間の逆流域内の剥離渦の様子が明確に得られている。また、水面形は完全に連続はしていないものの、水面に浮遊したトレーサーが白筋となってその位置が明確になっている。これらの可視化画像を詳細に調べると、栈粗度間の剥離領域の規模はダイナミックに変動しており、その変動と連動して水面

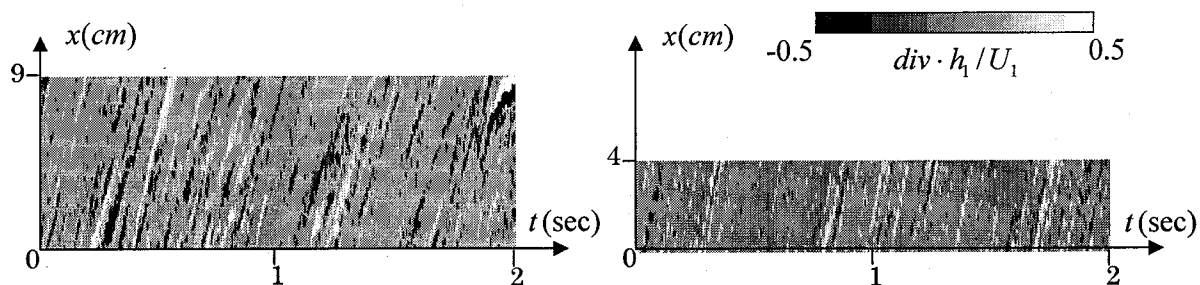


図-9 検査線上の発散値の時空間プロット (Fr45)

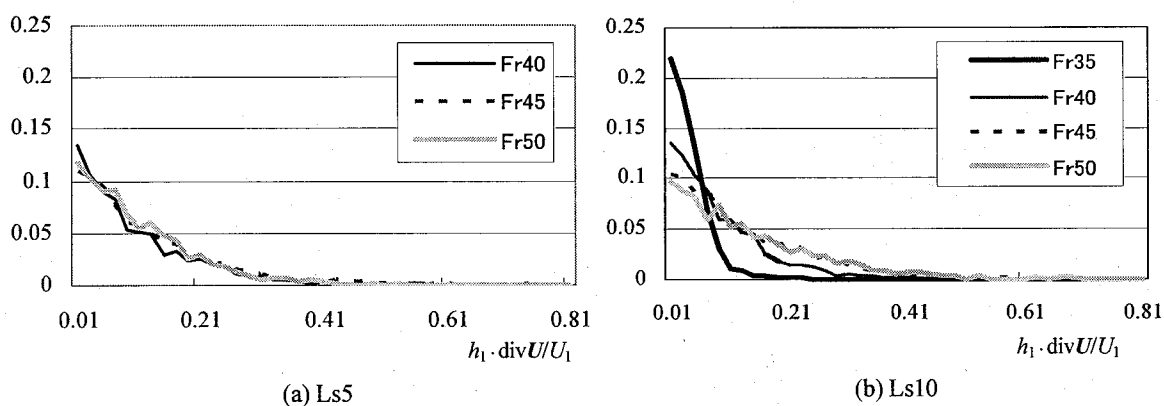


図-10 水面近傍における発散値の発生頻度

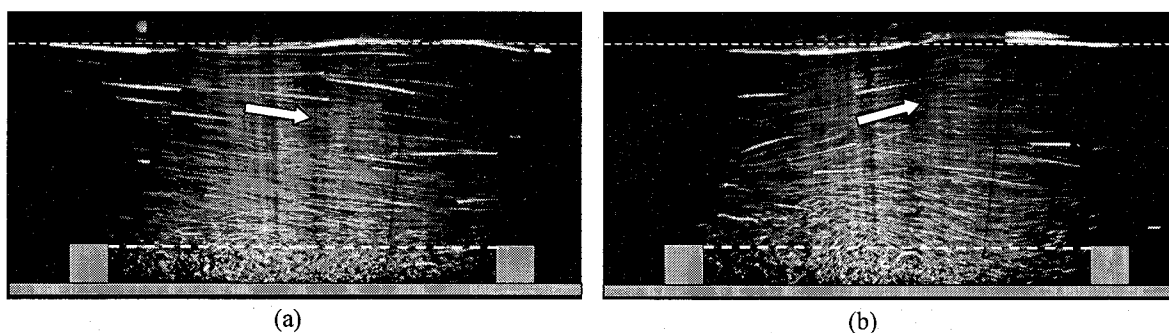


図-11 多重合成画像による底面剥離領域と水面形の比較 (Fr45Ls10: 上の破線は平均水位)

形が変化していることがわかる。例えば、図-11(a)は棧粗度間に再付着点がある瞬間、図-11(b)は棧粗度間に渦度が集中し剥離領域が粗度高さよりも上にまで及んでいる瞬間に対応している。なお、水面付近の破線は平均水位を示している。図-11(a)では、主流部の平均流が下降しているのに対し、図-11(b)では上昇に転じ、底面付近の低速流体塊（流跡線が短い部分に対応）が棧粗度を連ねる線よりも上側に持ち上げられている。主流部では水面の変動にあわせて流向が上下に変動するため、図-6のような上昇流発生頻度分布が得られたものと考えられる。水

面付近の状況について注目すべき点は、前者のケースでは全体的に水位は低いのに対し、後者のケースでは棧粗度間の下流側で局所的に水位が上昇している点である。すなわち、水面の変動は底面剥離領域全体の規模の時間変動にほぼ対応して発生していることが推察される。この点を明らかにするために、以降、POD解析を利用した相関解析を行った。

4.4 PODによるモード分解

ここでは、PIVで得られた速度変動場を前章で説明したPODを用いてモード分解した結果を用いて考察

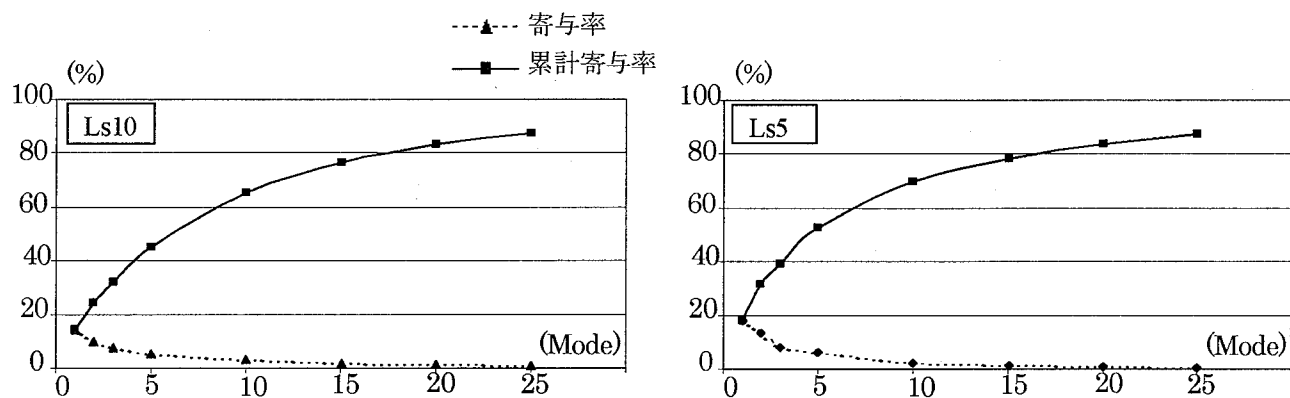


図-12 鉛直速度分布のPOD解析によるモード寄与率の比較 (Fr45)

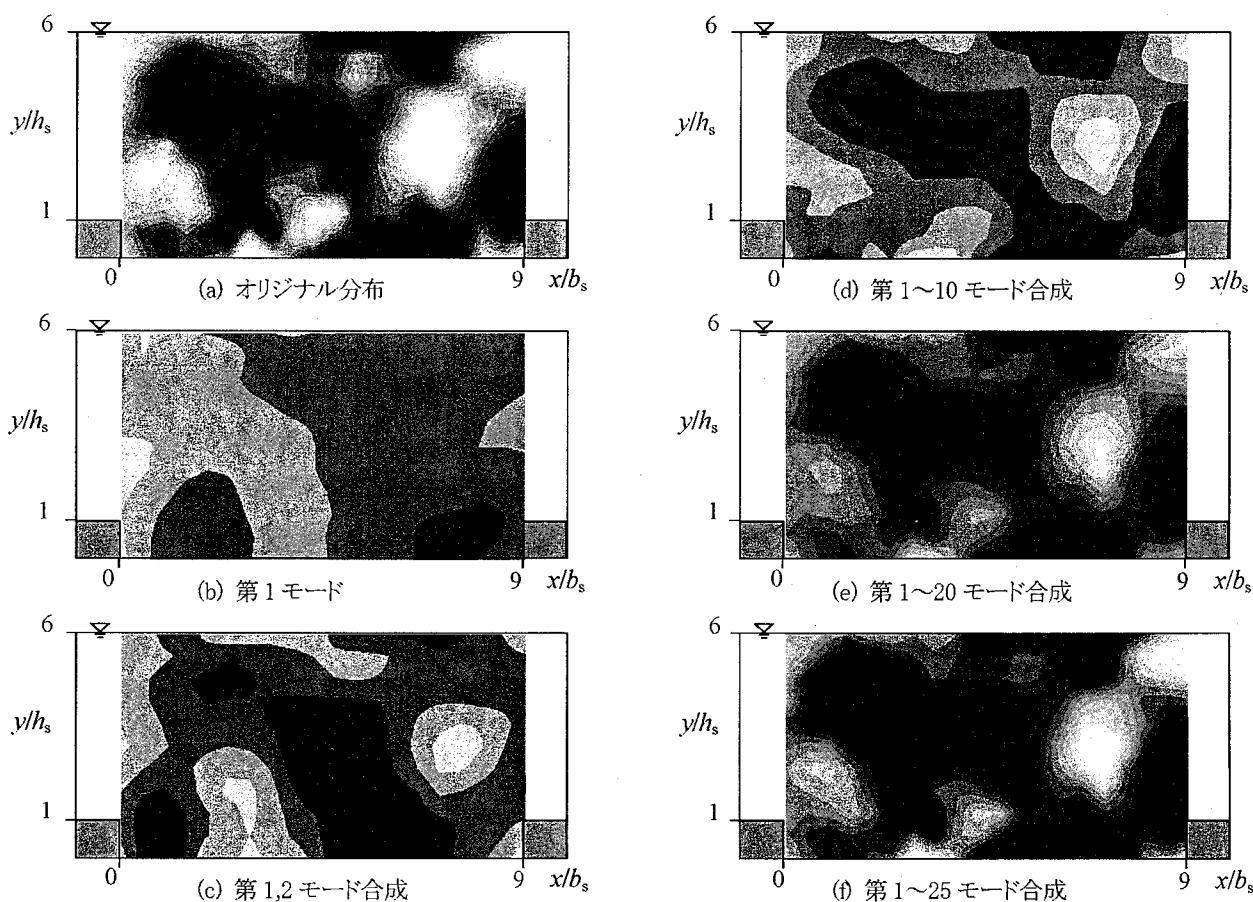


図-13 鉛直流速変動成分のモード分解と合成結果

を加える．POD解析の例として，Fr45-Ls5およびFr45-Ls10のケースに対して，式(7)で示した累積寄与率と各モードの寄与率を求めた結果を図-12に示す．これより，どちらのケースでも第1モードの重みは20%以下であるが，25モードまでの累積値では80%以上の寄与率となっていることがわかる．また，25モードのみの寄与率は，第1モードの1%にも満たないことから，ここでは25モードまでのデータを用いてデータの再構成を行うこととした．その例とし

て，ある瞬間の鉛直上向きの乱れ速度成分と乱れ速度ベクトル場をモード分解した後，再構成した結果をオリジナルのデータとともに図-13および図-14に示す．これより，第1モードは寄与率が低いため，オリジナルの分布とは異なる分布を示すが，合成するモードを増やすと次第にオリジナルの分布に近くなり，25モードまで用いると元のデータの特徴が十分に再現できていることがわかる．したがって，以降では25モードまでのデータで再構成した速度変動

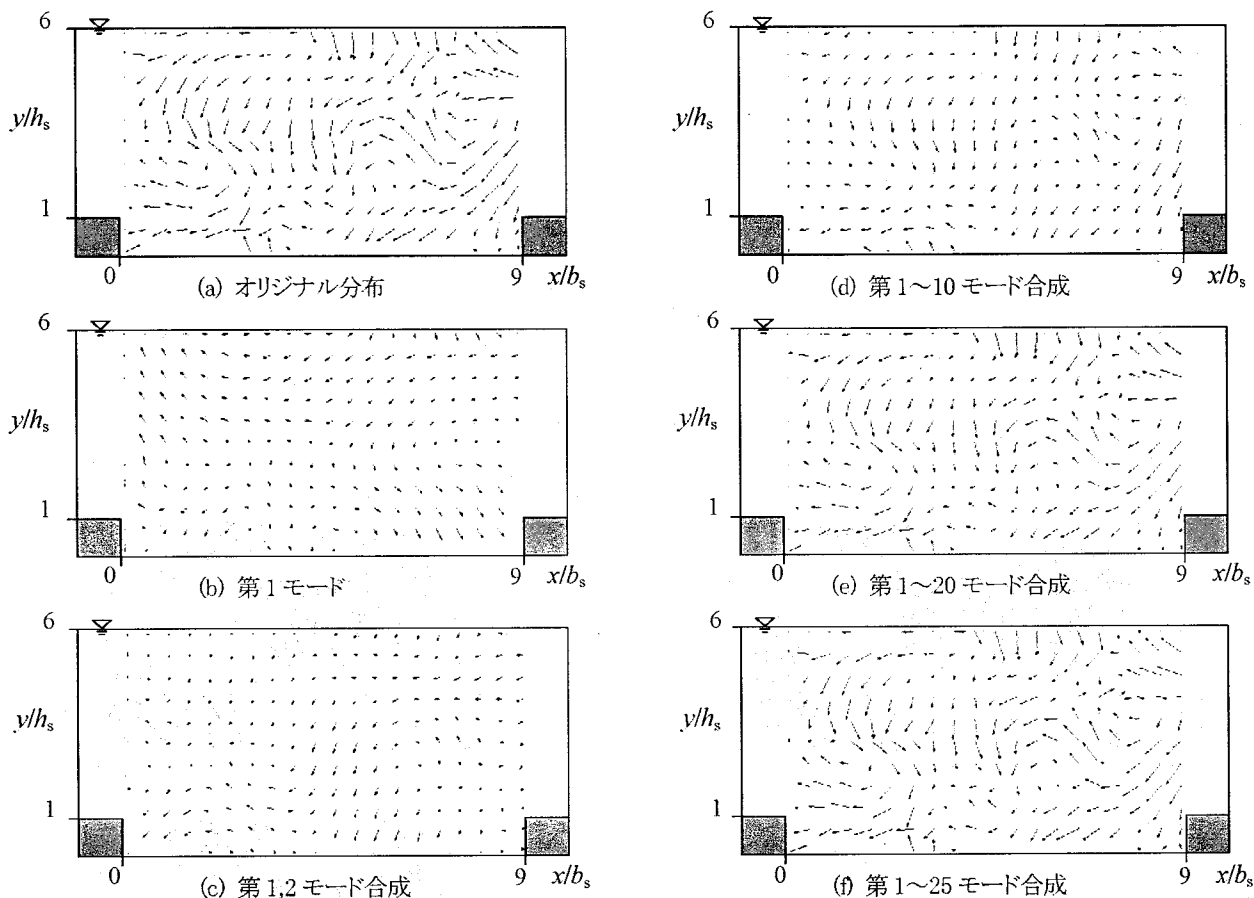


図-14 流速変動ベクトルのモード分解と合成結果

場を用いて解析を行う。これは、オリジナルデータに含まれる雑音を除去し、より本質的な流れ場の比較を行うためである。

4.5 水面近傍と底面の速度鉛直成分の相関

PIVで得られるのは非常に局所的なデータ（本研究の条件では6x6mm程度の領域）であるため、各点のデータをそのまま用いるとマクロ的な流れ場の特徴を把握しにくい。そこで、ここでは、図-15に示すように水面付近と底面付近の各領域をいくつかのブロックに分割し、各ブロック内の鉛直流速成分の空間平均値を用いることとした。今回の実験では水面の位置を正確にかつ連続的に同時計測することが困難であったため、水面変動と相関が高いと思われる水面付近の鉛直流速成分を採用した。本研究ではブロックサイズを1.0x1.0cmとした。図-16にFr45-Ls10の水面付近ブロックS6と底面付近ブロックB6の時系列データを比較した。二つのブロックは鉛直方向に離れているにもかかわらず、よく似た変動パターンを示している。これは、底面付近で強い上昇流が発生した際に、その影響が水面付近にまで及んでいることを示唆しており、前述の

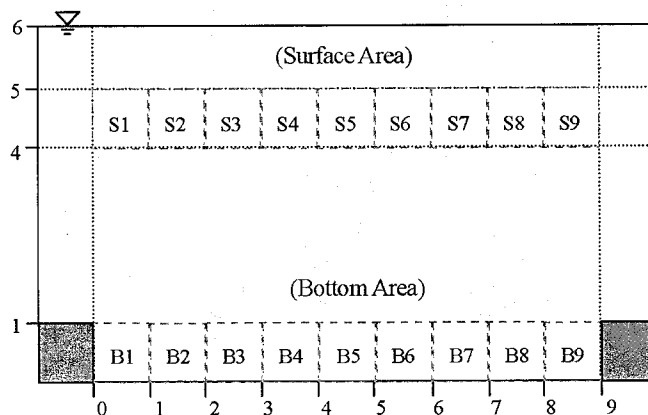


図-15 相関解析における空間の分割

多重合成画像において認められた傾向と一致する。図-17にはパワースペクトルをプロットしたが、周波数特性もよく一致している。

このように、上に比較した上下のブロック間には高い相関が認められたが、底面と水面のブロックのうちどのブロックの間の相関が高いのかを調べたのが図-18である。相関係数 R は次式で定義される。

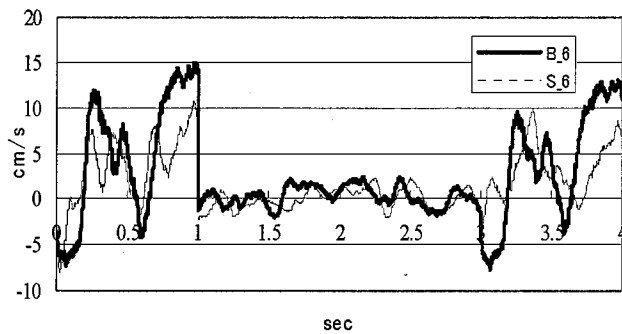


図-16 底面・水面近傍の鉛直流速成分
時系列データの比較 (Fr45Ls10)

$$R = \frac{\sqrt{\sum_N (\bar{V}_S - \bar{V}_S)(\bar{V}_B - \bar{V}_B)}}{\sqrt{\sum_N (\bar{V}_S - \bar{V}_S)^2} \sqrt{\sum_N (\bar{V}_B - \bar{V}_B)^2}} \quad (9)$$

ここに、 $\bar{V}_S$ および $\bar{V}_B$ はそれぞれ水面および底面ブロック内の鉛直流速成分の空間平均値、バーはそれらの時間平均値、 N はデータ個数を示す。各曲線は、横軸に並べた水面ブロックに対し、ある底面ブロックとの相関がどの程度の値をとっているのかを示す。例えば、Fr45の場合、前掲のB6とS6の相関は図で矢印を示した点に対応するが、高い相関係数が得られていることがわかる。全体的には、下流側のブロック同士の相関が高くなっていることがわかる。Fr50では、粗度の中間部分での相関が高く、この傾向はLs5のケースに共通に見られる。Ls5のケースでは、粗度間に渦度が集中した後、一気に渦放出が見られる事象が頻繁に出現し、それが水面にまで影響を及ぼしたと思われる。

5. 結論

河床面の状態が水面変動に及ぼす影響に関する基礎的な実験的研究として、栈粗度によって生じる流れ場と水面変動あるいは水面近傍の鉛直流速変動について検討を行った。高速ビデオカメラを用いた可視化撮影と高精度 PIV および POD により解析を行った結果、特に粗度の間隔が大きな場合(Ls10)、水面の変動に影響を及ぼしているのは、栈粗度によって生成された個々の剥離渦の水面への衝突ではなく、粗度間で生じる剥離渦領域全体の大規模変動であることを示した。POD 解析はデータに含まれるノイズ除去の目的で利用したが、生データを用いる場合よりは明確に流速変動場の特徴を捉えることができ、この手法の有用性を確認した。ただ、今回の実験では不明な点も多かったため、今後は、さらに広範囲な水理条件でかつ一般的な河床状態を対象として実

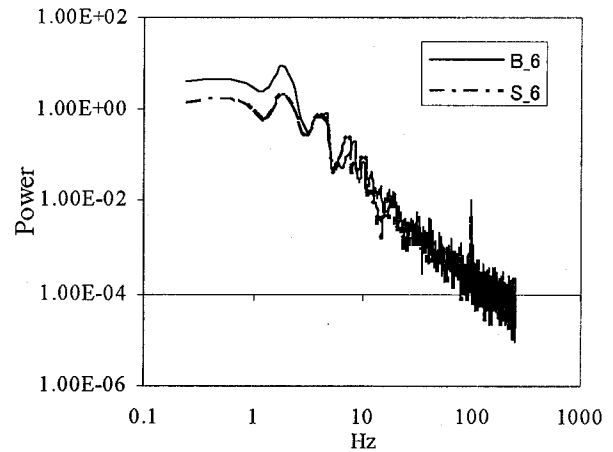
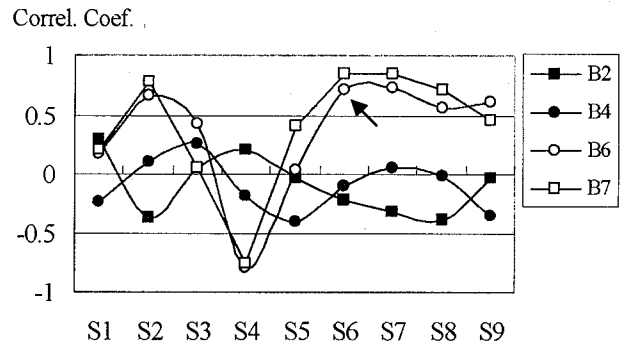
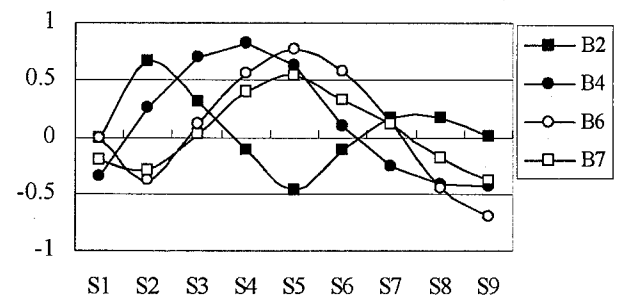


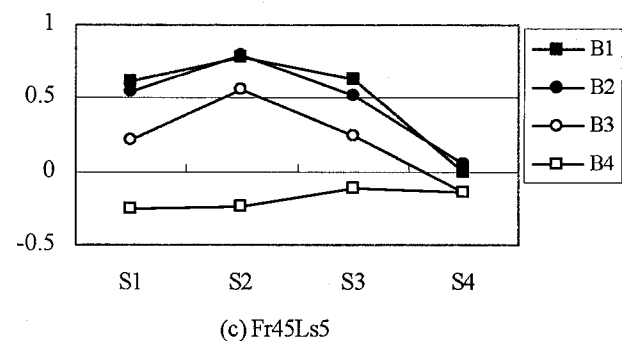
図-17 水面・底面近傍の鉛直流速成分のパワースペクトルの比較 (Fr45Ls10)



(a) Fr45Ls10



(b) Fr50Ls10



(c) Fr45Ls5

図-18 底面・水面近傍鉛直流速変動の相関

験を進めるとともに、水面変動を取り入れた LES による乱流シミュレーションモデルの開発を行い、詳細な検討を行う予定である。

参考文献

- 1) Toro, E. F. : Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows, John Wiley & Sons, 2001.
- 2) 藤田一郎・椿涼太：時空間濃度勾配法による主流方向表面流速分布の現地計測, 水工学論文集, 第46巻, pp.821 - 826, 2002.
- 3) 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.
- 4) 棚津家久, 中山忠暢：自由水面近傍における組織渦の時空間相関構造に関する研究, 土木学会論文集, Vol.586/II-42, pp.51-60, 1998.
- 5) 藤田一郎：時空間微分に基づく高精度 P I V の開発, 水工学論文集, 48 巻, pp.721-726, 2004.
- 6) 宮本仁志, 神田 徹：多重解像度-固有直交関数」の複合展開を用いた開水路凹部流れの階層構造解析, 土木学会論文集, 712/II-60, pp.11-23, 2002.
- 7) 藤田一郎, 熊城秀輔：斜め段落ち部を有する開水路流れの構造, 応用力学論文集, Vol.8, pp.765-772, 2005.

(2006 年 4 月 13 日 受付)