

水面・流速の同時画像計測法の開発と 水面変動を伴う開水路凹部流れの解析

宮本仁志¹・神田 徹²・大江和正³・下山顕治⁴

¹正会員 博士(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 神戸大学名誉教授 工学部建設学科 (同 上)

³正会員 修士(工学) 八千代エンジニアリング(株) (〒153-8639 東京都目黒区中目黒1-10-21)

⁴学生員 学士(工学) 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)

開水路流れにおける瞬時の水面形状と内部流速を同時測定するための画像計測手法の開発を行った。本計測法では、同一画像フレーム内に撮影された水面・流れ場の可視化画像を用いて、PIVによって内部流速を測定し、また水面での輝度勾配から水面高さを算出し、水面変動を伴う流れ場の瞬時的・面的な計測を可能にした。次に、開水路凹部での射流を対象として、同手法により計測した水面形・流速の解析を行った。平均水面高さ、平均流速、乱流諸量などの空間分布を求め、また水面の時空間分布にウェーブレット変換を施して伝播速度、時間・空間スケールなど変動特性を明らかにするとともに、水面・流速の変動成分に対する主成分分析により凹部混合層での組織運動と水面変動の相互関連を調べた。

Key Words : flow measurement, image processing, water surface fluctuation, turbulent structure, wavelet and principal component analyses

1. 序 論

近年の河川整備は、従来の治水・利水機能と生態系・親水性・景観など水辺環境とのバランスを考慮して行うことが重要となっている。この水環境創造という観点から注目される流れの特徴のひとつは、河道の局所的変化に伴って常流・射流が混在した多様な流況が現れることである。平常時の自然河川における瀬や淵、わんど等での流れはその典型と考えられ、種々の流況が多様な生態環境を創出していると考えられる。一方、治水の観点からは、これら断面急変部においては、流水抵抗が大きくなると考えられ、また、出水時には断面の急変により激しい水面変動を伴う流況を呈する可能性がある。したがって、これら河道断面変化部や多様な河道形状において、水面変動を考慮に入れた流れの時間的・空間的特性を把握し、流況を的確に予測することが、河川環境面のみならず洪水制御の面からも必要となる。

本研究は、このような河道断面変化部における流れの挙動を解明することを最終的な目標としているが、その流況特性は未だ解明されていない部分が多い。そこで、筆者らはこれまで、水路床に単純な断面変化部(凹部)をもつ開水路流れ(開水路凹部流れ)を対象として、凹部内の流速の PIV (particle image velocimetry) 計測と流れの構造

解析を行い、また併せて、ウェーブレット解析、主成分分析など現象解明のための解析手法の検討を行ってきた^{1)~3)}。この開水路凹部流れに関しては、筆者らの他、福津・山本⁴⁾が、レーザー流速計、PIV、LES (large eddy simulation) を用いた乱流構造の研究を行っている。以上の研究では、Froude 数が小さく水面変動の影響が無視できる比較的穏やかな流れを対象として、平均流速、乱流諸量、主流-凹部境界のせん断混合層での組織運動など内部流速の時空間的な変動特性が調べられており、凹部流れの乱流構造が明らかになりつつある。

しかしながら、水面変動を伴う凹部流れに対しては、後述のように瞬時的・空間的な内部流速と対応する水面形状を同時に計測する手法がほとんどないため、水面変動を考慮に入れた流れの時空間的な変動特性は十分に把握されていない。このことは、凹部のみならず、段落ち部や急転部など流水断面急変部での水面変動を伴う流れについても同様のものである⁵⁾。

画像情報を用い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、そこでは内部流速の計測はなされていない。また、最近になって発表された論文では、Dabiri と Gharb⁷⁾は PIV を用いて流速計測を行い、カラーパレットを用いた光学的手法によって水面勾配の変化を

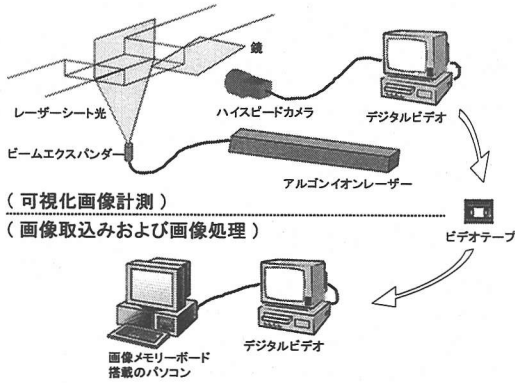


図-1 画像計測システムの概要

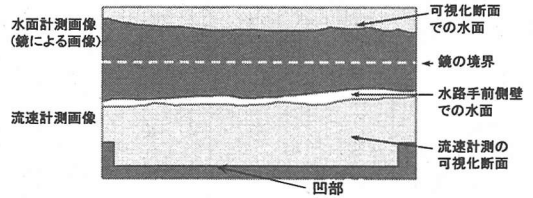
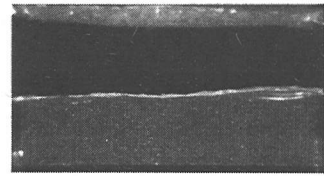


図-3 可視化画像の例(上図)とその説明(下図)

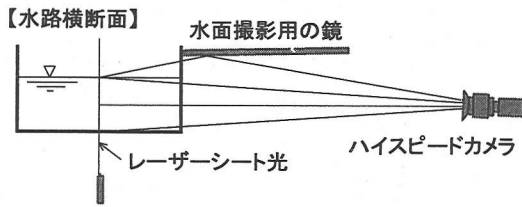


図-2 可視化断面の撮影方法

計測している。しかしながら、彼らの計測は緩やかな水面勾配と水面ごく近傍の水平面内の流速分布に限られている。したがって、彼らの計測手法を本研究で対象とするような断面変化部において大きな水面変動を伴う開水路流れに適用することは困難であり、新しい計測手法の開発が待たれているところである。

そこで、本論文では、(1)開水路流れにおける瞬時の水面形状と内部流速を同時測定する画像計測手法の開発、(2)水面変動を伴う開水路凹部流れに本計測法を適用して流れの解析を行うこと、を目的とする。(1)に関しては、前報⁹⁾で提案した同時画像計測法の撮影方法を改良するとともに、得られた水面高さの計測精度を検討する。(2)に関しては、本計測法を用いて水面形、流速分布、乱流諸量などを求め、さらに、水面変動のウェーブレット解析および水面変動・流速変動の主成分分析を行うことによって、凹部流れの時空間的な変動特性の解析を行う。

2. 水面・流速の同時画像計測法

(1) 画像計測システムの概要

図-1 に可視化画像を取得するための画像計測システムの模式図を、図-2 に可視化断面の撮影方法の概要を示

す。流水中に比重約 1.02、粒径 0.075~0.150 mm の高分子ポリマー粒子を混入し、アルゴンイオンレーザー(4W)のシート光を計測対象断面に照射することにより可視化断面を作成する。その可視化断面を、ハイスピードカメラによりサンプリング周波数 240Hz で撮影し、画像メモリーボード搭載のパーソナルコンピュータに 720×480 画素、256 階調のバイナリーデータとして保存する。ハイスピードカメラを用いる場合、サンプリング周波数の増加にしたがって 1 画素に入る光量が少なくなるため高出力の光源が必要とされるが、本文でのサンプリング周波数 240Hz の場合、4W のアルゴンイオンレーザーで画像解析に十分な光量が得られている。水面の画像については、水路手前側壁での水面が画像計測の障害とならないように、鏡による斜め上方からの鏡像を用いて撮影を行う。これにより、鏡を使用していなかった前報⁹⁾において撮影できなかった水面境界付近の可視化断面画像(流速計測のための画像)が撮影可能となる。図-3 に可視化画像の例を示す。

以上のように本計測法では、水面と流れ場の可視化画像を同一画像フレーム内で撮影し、PIV によって内部流速を求め、下記の画像処理アルゴリズムにより水面高さを算出する。これによって、水面変動を伴う流れ場の瞬時的・面的な計測が可能となる。

(2) 水面高さの計測アルゴリズム

得られた可視化画像から水面高さを算出するフローチャートと各処理段階での画像をそれぞれ図-4、5 に示す。

a) 前処理 (ノイズ処理と濃淡強調)

図-5(a)に示す可視化画像(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、画像輝度の濃淡を強調するために、3×3 画素の局所的な画像輝度分布に対して次式のラプラシアン L_c を用いた処理を行い、

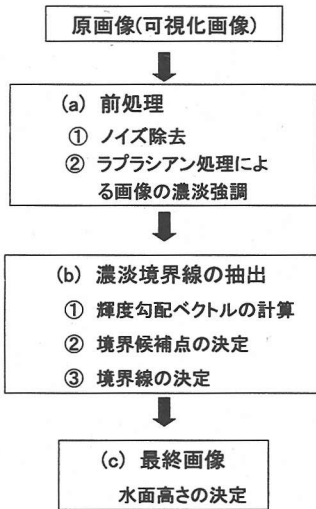


図-4 水面高さの画像計測アルゴリズムのフローチャート

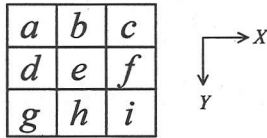


図-6 3×3画素における輝度値の定義

濃淡強調画像を得る(図-5(b)).

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

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

ここに、 e, b, d, f, h は図-6に示す各画素での処理前の輝度値であり、 E は処理後の輝度値(処理前の e に対応)である。

b)濃淡境界線の抽出

濃淡境界に対する画像処理アルゴリズム⁹⁾を用いて、濃淡強調画像から境界線の抽出を行う。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。

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

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

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、 $a \sim i$ は前項a)の処理後の輝度値である。

$\{G_x, G_y\}$ を用いて、境界抽出条件の指標となる輝度勾配の大きさ M^G と方向 D^G を、各画素で計算する。

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

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

次に、勾配の大きさ M^G と方向 D^G を用いて、3×3の9つの画素を対象に、その中心の画素 Pe (図-6に倣って、下添字 e で表す)が境界の候補(境界候補点)となるかどうか

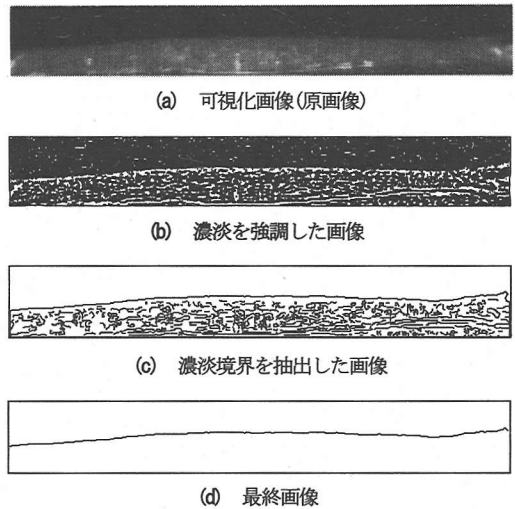


図-5 各処理段階での画像

表-1 境界候補点の決定条件

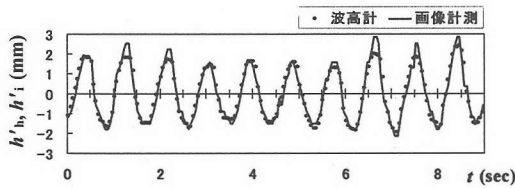
条件1	画像輝度勾配の大きさ M^G に関する条件： 中心画素 Pe の大きさ M_{Pe}^G がそれを含む9つの画素における中央値 $M_m^G(m=Pe \sim P)$ より大きいこと。
条件2	画素輝度の方向 D^G に関する条件： 中心画素 Pe の方向 D_{Pe}^G と同様の方向(約 30° 以内)を示す画素を抽出し、その中で輝度勾配の大きさ M_{Pe}^G が上位3位以内に入ること。

表-2 境界線の決定条件

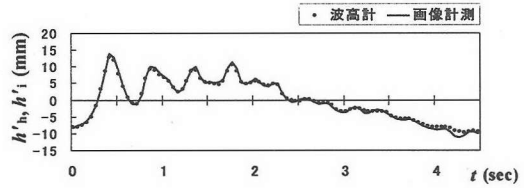
条件1	境界候補点である。
条件2	seed map上で既存の境界候補点に隣接する。
条件3	輝度勾配の大きさ $M^G > L_{TV}$
条件4	隣接画素と同様の方向 D^G をもつ(約 30° 以内)。

かを表-1に示す条件により判定する。ここでは境界を線として得ることを最終目標としているため、輝度勾配の大きさ M^G (条件1)のみならず、その方向 D^G が同様となる画素群において輝度勾配が大きいこと(条件2)、すなわち方向 D^G の連続性を要求している。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 M^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に示す条件により境界候補点を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-5(c))。これ



(a) 実験 A (周期的な水面変動)



(b) 実験 B (非周期的な波形をもつ水面変動)

図-8 画像計測と波高計による水面高さの時系列

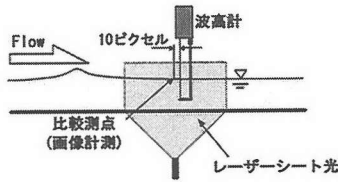


図-7 精度検討の実験

ら 2 つのしきい値 H_{TP} , L_{TP} 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(図-5(c))において、水面高さを表す濃淡境界線は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補正する処理を行い、画像上において水面形状を図-5(d)に示す 1 画素の幅をもつ一本の線として得る。

この最終画像に対して、座標参照画像(座標目盛を入れて撮影した画像)を用いた座標変換(画像座標系(ピクセル単位)→実座標系)を行うことにより、瞬間の水面高さ(水面形状)が得られる。ここで、座標参照画像は、座標目盛の入ったアクリル板をレーザーシートの光膜に沿って挿入し、光源を切った後に通水した状態で撮影した。また、カメラレンズによる画像の歪は、解析対象となる画像の端で 110~130 ピクセルあたり 1 ピクセル程度であり、ここでは、この歪による誤差は微小であると考え、解析画像の全域で線形補間を用いることによって座標変換を行った。

(3) PIV(CEC)による流速の画像計測

本研究(後半部)で対象とする水面変動を伴う開水路凹部の射流に対して、PIVによる流速の画像計測を行う場合、連続する 2 フレーム間での粒子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を含む確率が高くなる。ここでは、PIVの相関誤差修正法 CEC (correlation error correction)¹⁰⁾ を適用することにより異常ベクトルの発生を抑制した。この CEC は流速値を算出するための相関係数マトリックスを複数個掛けあ

わせることにより誤相関を低減させるものであり、アルゴリズムを開発した Hart によってその精度が検討されている。筆者らは、用いる相関平面の数、重ね合わせの割合、参照フレームサイズ、粒子密度など、流れの特性が関係する計測パラメータについて検討を行い、CEC の開水路凹部流れに対する有効性を確認している¹¹⁾。

3. 水面高さの画像計測法の精度検討

上述の水面形状(水面高さ)・流速の同時画像計測法において、水面計測の精度を以下に検討する。

(1) 精度検討の実験概要

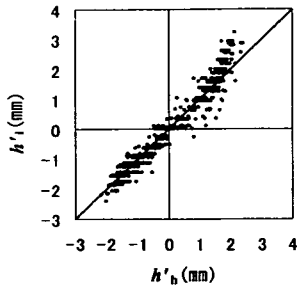
水面高さの画像計測の精度を調べるために、図-7 のように近接した測点で容量式波高計による計測を行い、両者の水位を比較する。ここでは、変動幅が約 0.4cm 程度の周期的な水面変動(実験 A)と、変動幅 0.15~3.75cm の種々の波形からなる水面変動(実験 B)について検討した。なお、波高計のサンプリング周波数は 20Hz である。また、両計測値の偏差 ε を次式により定義する。

$$\varepsilon = h'_b - h'_i \quad (7)$$

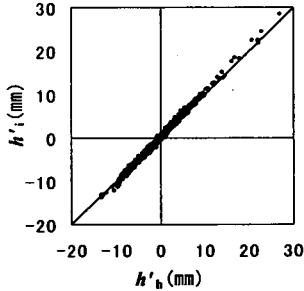
ここに、 h'_b : 波高計による水面高さ、 h'_i : 画像計測による水面高さであり、いずれも時間平均水面を基準としている。

(2) 波高計と画像計測の水面高さの比較

図-8 に両計測法による水面高さの時系列を示す。水面高さ h'_b , h'_i はほぼ同一の値をとっていることがわかる。ただし、実験 A において、水面変動の山の部分で画像計測による水面高さ h'_i が波高計による水面高さ h'_b より大きくなる場合がある。図-9 は全実験ケースでの水面高さ h'_b と h'_i を比較したものである。偏差 ε は両実験においてほぼ 1mm 以内であるが、周期的な水面変動の極大値において、上述のように偏差が 1mm を超える傾向がある(図-9(a))。これは、水の表面張力などのために、水面変動の極大部分で波高計の計測値が実際の水面変動に追随していないためと推察される。



(a) 実験 A



(b) 実験 B

図-9 水面高さの比較

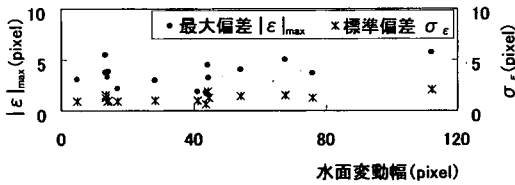


図-10 水面変動幅と偏差の関係

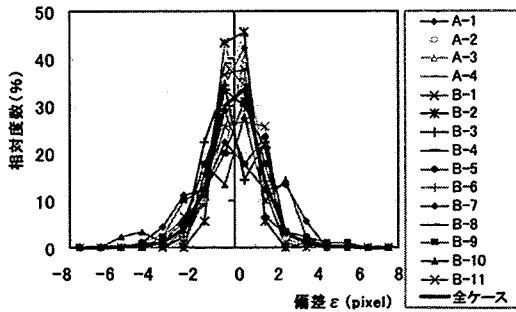


図-11 偏差 ϵ の相対度数分布

図-10に水面変動幅と最大偏差 $|\epsilon|_{\max}$ 、標準偏差 σ_{ϵ} (単位: ピクセル) の関係を示す。水面変動幅が変化しても最大偏差、標準偏差の値には系統的な差異はないことが

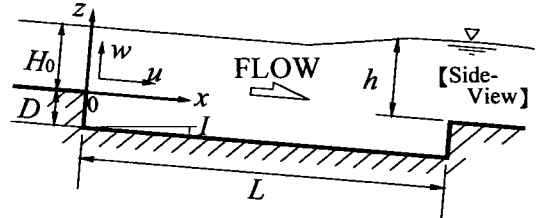


図-12 開水路凹部の模式図

表-3 実験条件(開水路凹部)

凹部長さ: $L(\text{cm})$	20
凹部深さ: $D(\text{cm})$	2.0
水路勾配: I	1/90
流量: $Q(\text{cm}^3/\text{sec})$	3510
流入部での断面平均流速: $U_0(\text{cm}/\text{sec})$	79.0
流入部での水深: $H_0(\text{cm})$	2.2
凹部形状比: L/D	10.0
レイノルズ数: $Re = U_0 H_0 / \nu$	17500
流入部でのフルード数: $Fr_0 = U_0 / (g H_0)^{1/2}$	1.69

ら、水面変動の規模は画像計測の精度に影響しないことがわかる。

偏差 ϵ (単位: ピクセル) の相対度数分布を図-11に示す。全てのケースにおいて偏差 ϵ はほぼ3ピクセル以内である。また、この度数分布には標準偏差 $\sigma = 1.24$ の正規分布があてはまることから、画像計測の精度は ± 2.5 ピクセル以内(信頼水準95%)となる(1ピクセルは、実験Aで0.31mm、実験Bで0.33~0.41mm)。以上の検討から、本画像計測法は高精度で水面高さを計測し得ることがわかった。

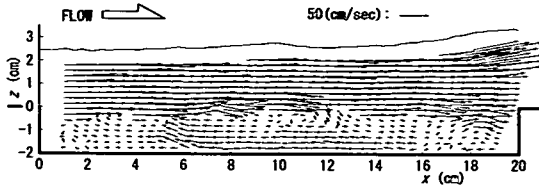
4. 開水路凹部射流の計測結果および考察

開水路凹部における射流を対象として、上述の同時画像計測法を用いて流れ場の計測を行った。

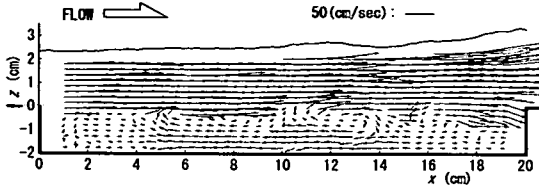
(1) 実験水路および実験条件

図-12に本研究で対象とする開水路凹部の概要を示す。実験水路は全長600cm、幅20cmの亚克力製循環型開水路であり、上流水槽より365cmの位置に凹部を設けている。計測断面は凹部奥行き方向中央の流下方向鉛直断面($x-z$ 断面)である。

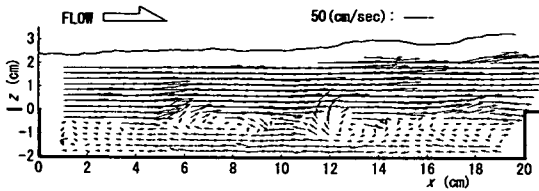
表-3に実験条件を示す。対象とする流れは水面変動を伴う射流であり、等流水深が保たれている凹部上流 $x = -120\text{cm}$ でのフルード数 Fr_{120} は1.66(凹部の影響で、 Fr_{120} と Fr_0 には若干の差が生じている)、凹部形状比は $L/D =$



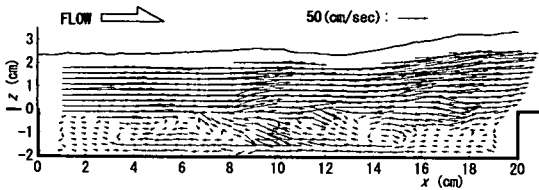
(a) $t = 3.754$ (sec)



(b) $t = 3.796$ (sec)



(c) $t = 3.838$ (sec)



(d) $t = 3.879$ (sec)

図-13 瞬時の流速ベクトルと水面高さ
(時間間隔: 0.0417(sec))

10.0である。また、画像計測において、サンプリング周波数 240Hz、画像中の 1 画素の実長は約 0.33mm である。1 回の計測時間は約 4.5 秒(1087 枚)であり、平均量算出の際には 5 回(約 22.5 秒)の計測値を用いている。

(2) 瞬時の流速ベクトルおよび水面高さ

図-13に、瞬時の流速ベクトルと対応する水面形状(水面高さ)を示す。各図は、サンプリング周波数240Hzのデータの中で、10サンプル毎(時間間隔0.0417sec)の計測値を示している。流速せん断により、主流-凹部境界で流速ベクトルは流下方向に激しく変動している。この主流-凹部境界におけるせん断混合層(以下、凹部混合層)の中央ではx方向の空間スケールが2~3cm程度の渦が存在しており(図-13(a))、時間の経過とともにその渦が下流側に移動している(図-13(b)~(d))。このことより、凹部

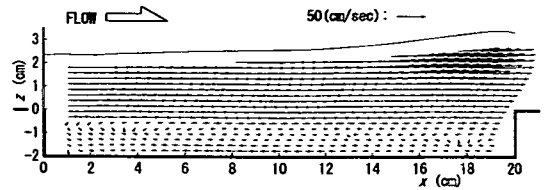


図-14 平均流速ベクトルと平均水面高さ

混合層において流れの組織的な運動が存在していることがわかる。一方、対応する瞬時の水面高さは流下方向に大きくなっており、下流側の段上がり部付近で主流が上向きになるのに対応して最大値をとる。また、凹部混合層での組織渦の位置に対応する部分で、水面形状は局所的に盛り上がり、水面変動と組織運動との間の関連性を示唆している。これは、組織渦による圧力変化に伴って水面が局所的に上昇しているものと推察される。なお、図-13において水面直下の流速ベクトルが得られていないが、これは水面の変形によって他の部分よりも粒子パターンが崩れが大きくなり、PIVのパターンマッチングに用いる参照フレームサイズをある程度大きくする必要があったためである。

(3) 平均流速ベクトルおよび平均水面高さ

図-14に時間平均流速ベクトル $\bar{\mathbf{v}} (= (\bar{u}, \bar{w}))$ と平均水面高さ \bar{h} を示す。主流-凹部境界において流速せん断が大きくなっており、流下方向に凹部混合層が発達している。x = 12~14cm付近から下流側では、凹部の段上りのために主流部の平均流速ベクトルは上向きになっている。それより上流側の凹部内には、ひとつの大きな循環流が存在している。一方、平均水面は流下方向に徐々に高くなっていき、x = 12~14cm付近を境に下流側ではさらに水面が上昇している。また、同一の形状比で常流の場合には、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⁾となるが、図-14では再付着点が明確には確認できない流れとなっている。

(4) 乱れ強度、レイノルズ応力、水面変動強度

x, z-方向乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$, $\sqrt{w'^2}$ 、レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ および水面変動強度 $\sqrt{h'^2}$ の空間分布を図-15に示す。図-15(a)より、凹部流入部の主流-凹部境界付近において $\sqrt{u'^2}$ は大きな値をとっており、これより流れのせん断不安定によって流速変動が生じていることが推察される。図-15(b), (c)に示す $\sqrt{w'^2}$, $-\overline{u'w'}$ はともに、凹部中央付近から下流側の主流-凹部境界およびx = 14cm付近から下流側の水面近傍において大きな値をとっている。前者は凹部混合層での組織運動による流速変動・応力、後者は凹部混合層の流下方向への発達によって生起する大きな水面変動に伴う流速変動を、それぞれ表している

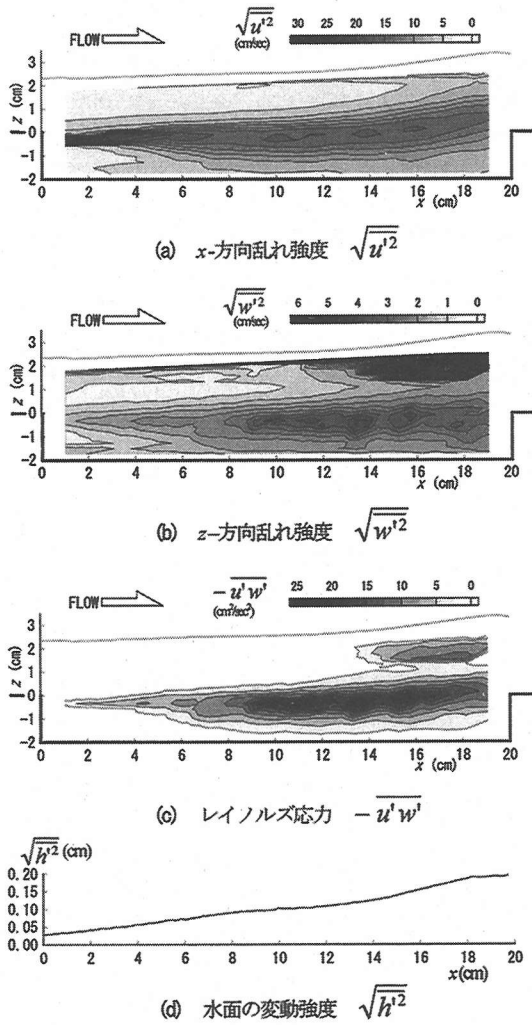


図-15 乱流諸量および水面変動強度
(a)～(c)は平均水面高さを併示

と考えられる。一方、 $\sqrt{h'^2}$ (図-15(d))は流下方向に大きくなっていき、その増加率は $\sqrt{w'^2}$ 、 $-\overline{u'w'}$ が大きな値をとる $x = 14\text{cm}$ 付近から下流側で大きくなっている。以上のことより、①凹部上流側の主流-凹部境界ではせん断不安定性により生じた流速変動が卓越すること、②凹部の中央部($x = 6\sim 8\text{cm}$)から下流側の主流-凹部境界ではせん断混合層が発達していくこと、③ $x = 14\text{cm}$ 付近から下流側では、②に加えて水面境界の変動に伴う流速変動が活発になること、がわかった。なお、前報⁹⁾においては鏡を用いた計測(図-2参照)を行ってなかったため水面近くの統計量が得られてなかったが、本文では、上述のようにPIVの参照フレームサイズによる限界はあるものの、水面近くの統計量が評価されており、計測範囲が拡大さ

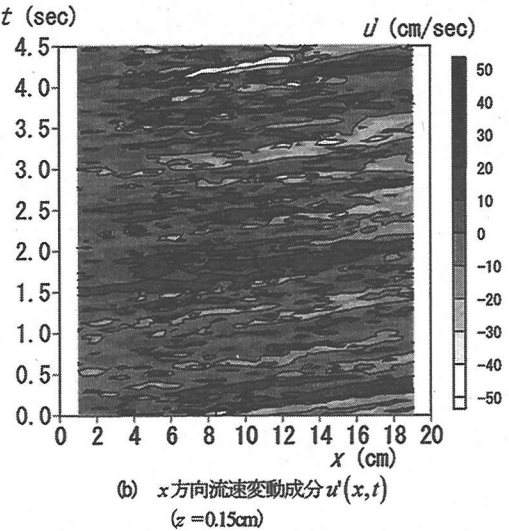
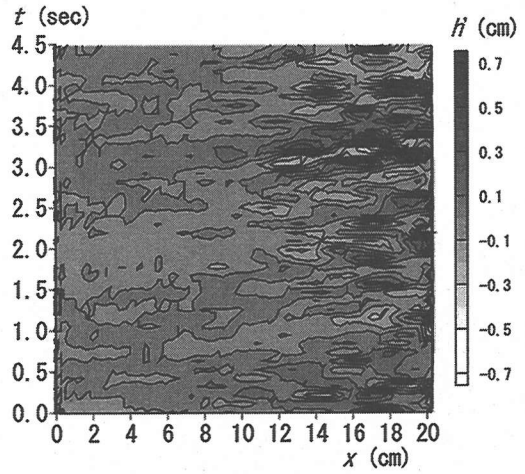


図-16 水面高さおよび流速の時空間変動

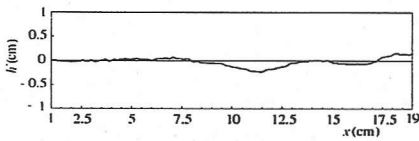
れていることがわかる。

5. 水面・流速の変動成分の相互関連

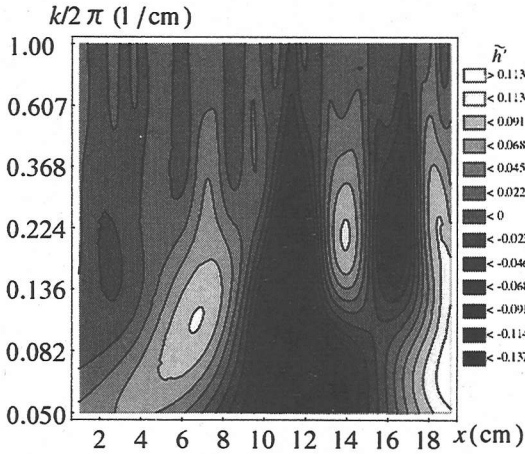
自由水面と流れ場との相互関連を調べるために、流速ベクトルと水面高さの変動成分を対象として、ウェーブレット解析と主成分分析を行った。

(1) 水面と流速の時空間変動

図-16は、時間(t)-空間(x)平面での水面変動 $h'(x,t)$ および x 方向流速変動成分 $u'(x,t)$ の分布である。ここで、変動成分 $h'(x,t)$ 、 $u'(x,t)$ は、平均水面高さ \bar{h} と時間平均



(a) 瞬時の水面変動 h' の空間分布



(b) 空間-波数平面におけるウェーブレット係数 \tilde{h}' の等値コンター

図-17 一次元連続ウェーブレット変換 (Mexican hat ウェーブレット)

流速ベクトル \bar{u} をそれぞれ基準として算出している。図-16(a)に示す $h'(x,t)$ の振幅は流下方向に大きくなっている。特に、主流の平均流速ベクトルが上向きになる $x = 12 \sim 14 \text{ cm}$ より下流側(図-14 参照)では、振幅が大きだけでなく、正負の変動が帯状に流下方向につながっており、下流側への位相の伝播を認めることができる。一方、図-16(b)の $u'(x,t)$ についても、同様な正負の変動の帯が認められ、位相は下流側にほぼ一定速度で伝播している。これは凹部混合層での組織渦の移流によるものと考えられる。また、両図におけるそれら帯の傾きから判断すると、 $h'(x,t)$ 、 $u'(x,t)$ の伝播速度はほぼ等しい値をとっており、水面変動と主流-凹部境界での組織運動には相関があることが推察される。

(2) 水面変動の伝播特性

水面変動 $h'(x,t)$ に連続ウェーブレット変換⁹⁾を適用することによって主要な水面変動成分を抽出し、その結果より $h'(x,t)$ の流下方向への伝播特性を調べる。ウェーブレット変換の特徴は、マザーウェーブレットと呼ばれる関数を拡大、縮小、移動させて変換に用いることによって、解析対象の信号に含まれる局所的な変動特性を抽

出できることにある。筆者らは、連続変換のウェーブレット係数の極値によって信号の局所的な波数/周波数特性が抽出されることを利用して、凹部混合層における組織運動の挙動を解析している⁹⁾。ここでは、水面変動 $h'(x,t)$ を対象にして同じ手順で解析を行うことによって、水面の変動特性を抽出する。

a) 一次元連続ウェーブレット変換による水面変動の特性抽出

得られた水面変動の時空間分布 $h(x,t)$ に対して、時刻 t における水面変動の空間分布および位置 x での水面変動時系列を対象として、一次元連続ウェーブレット変換を施す。解析に用いたマザーウェーブレットは、次式に示す Mexican Hat ウェーブレット $\phi_h(\xi)$ (式(8))と Morlet ウェーブレット $\phi_m(\xi)$ (式(9))である。

$$\phi_h(\xi) = (1 - 2\xi^2) \exp(-\xi^2) \quad (8)$$

$$\phi_m(\xi) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma_m} \exp(-\xi^2 / \sigma_m^2) \exp(-i\xi) \quad (9)$$

ここに、 ξ は独立変数(ここでは、時刻 t もしくは位置 x)、式(9)中の σ_m は分布の幅を規定する任意の実数、 i は虚数である。時刻 t での $h'(x,t)$ の空間分布は流下方向に局所的な変動を呈するため空間分解能が比較的高い $\phi_h(\xi)$ を、位置 x での $h'(x,t)$ の時系列はかなり周期的な変動となるため周波数分解能がよい $\phi_m(\xi)$ をそれぞれ用いた。

図-17に、瞬時の水面変動 h' の空間分布と空間-波数平面におけるウェーブレット係数 \tilde{h}' の等値コンターを示す。図-17(b)に示す \tilde{h}' の極値 $\tilde{h}'(x,k)_{\text{lim}}$ に着目すると、対応する座標 k_{lim} 、 x_{lim} は水面変動 h' (図-17(a))の極値の位置および空間スケールとよく一致しており、この瞬間の h' の波長は凹部下流側になるにしたがい小さくなっている。

b) 時空間平面における水面変動の走時挙動

図-18は、ウェーブレット係数極大値 $\tilde{h}'(x,k)_{\text{max}}$ の位置 x_{max} と空間スケール $2\pi/k_{\text{max}}$ を各時刻 t ごとに抽出することにより、 $x-t$ 平面における $\tilde{h}'(x,k)_{\text{max}}$ の分布を示したものである(空間スケール $2\pi/k_{\text{max}}$ は図中のシンボルで区別している)。図中で帯状に連なるプロットは水面変動 $h'(x,t)$ の伝播挙動を表すものであり、主要な水面変動は $x = 5 \sim 6 \text{ cm}$ 付近から下流側に向かって、ほぼ一定の周期で伝播していることがわかる。このような $\tilde{h}'(x,k)_{\text{max}}$ の帯は、約 20.6 sec の間に 127 個確認できたので、水面変動の平均的な発生周期は約 0.16 sec となる。

図-19は、 $\tilde{h}'(x,k)_{\text{max}}$ の各帯において次式で定義される局所的な伝播速度 c_1 を算出し、全計測時空間での度数分布を示したものである。

$$c_1 = \frac{x_{\text{max}}(x, t + \Delta t) - x_{\text{max}}(x, t - \Delta t)}{2\Delta t} \quad (10)$$

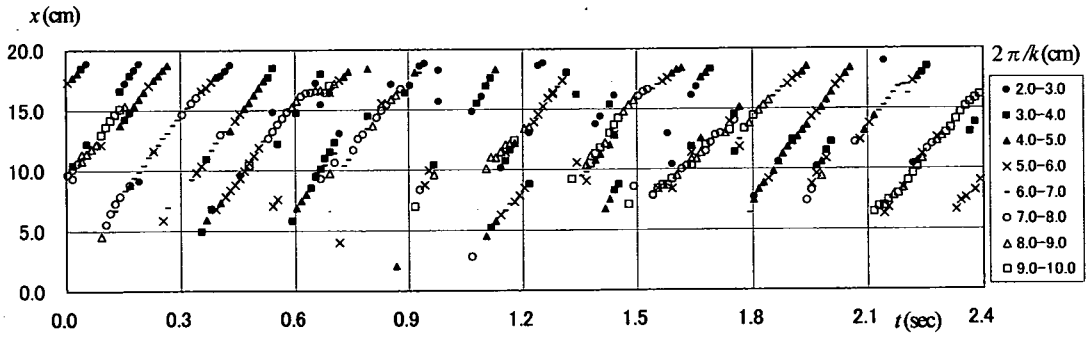


図-18 時空間平面上の $\tilde{h}^*(k, x)_{\max}$ の分布 (波数特性)

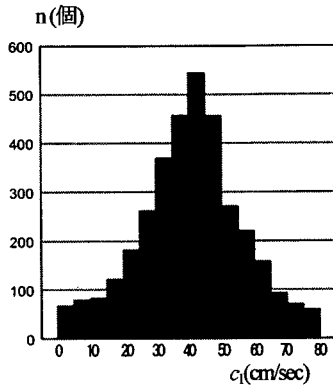


図-19 水面変動の伝播速度

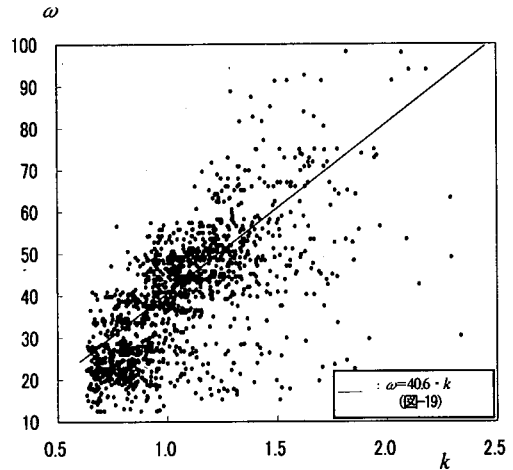


図-20 水面変動の時空間スケールの関係

ここに、 Δt は計測時間間隔(1/240 sec)であり、 x_{\max} は同一帯上で $2\Delta t$ 離れた $\tilde{h}^*(x, k)_{\max}$ の位置である。これより、水面変動の平均伝播速度 \bar{c}_1 は 40.6 cm/sec, その標準偏差は 15.8 cm/sec となる。

c) 水面変動の時空間スケールの関係

次に、連続ウェーブレット変換を各位置 x における水面変動 $h(x, t)$ の時系列に適用し、時間 t 角周波数 ω の平面上で流れ場を解析した(上述の $h(x, t)$ の空間分布に対する解析と同一の方法を用いている)。ここでは、位置 x におけるウェーブレット係数極大値 $\tilde{h}^*(t, \omega)_{\max}$ の卓越角周波数 ω_{\max} と卓越波数 k_{\max} の関係より、水面変動の空間スケールと時間スケールとの関係を調べる。

図-20 は、上記2つの方法で抽出したウェーブレット係数極大値の座標 (x, t) が一致し、かつ、式(10)で算出される伝播速度 c_1 と式(11)で算出される位相の伝播速度 c_2 との偏差の絶対値 $|c_1 - c_2|$ が標準偏差(15.8 cm/sec)より小さい事象のみについて、 k_{\max} と ω_{\max} の関係をプロットしたものである。

$$c_2(x, t) = \frac{\omega_{\max}(x, t)}{k_{\max}(x, t)} \quad (11)$$

同図には、図-19 の平均伝播速度 \bar{c}_1 による直線を併記している。図-20 より、水面変動 $h(x, t)$ の卓越波数 k_{\max} と卓越角周波数 ω_{\max} との間にはかなり高い正の相関がある。また、プロットの大部分は波数 $k < 1.5$ rad/cm (対応する空間スケール: $2\pi/k > 4.18$ cm), 角周波数 $\omega < 60$ rad/sec (対応する時間スケール: $2\pi/\omega > 0.105$ sec) の範囲に存在し、低波数・低角波数の変動の伝播速度は \bar{c}_1 に比べて小さい値となっている。

(3) 水面変動と流速変動の主成分分析

水面変動と凹部内部での流速変動を対象に主成分分析を施すことにより、変動成分間の相互関連について検討する。流速変動成分を対象とした主成分分析は固有直交関数展開 POD (proper orthogonal decomposition)¹³⁾ と称されており、著者らは開水路凹部流れの流速変動成分に対して

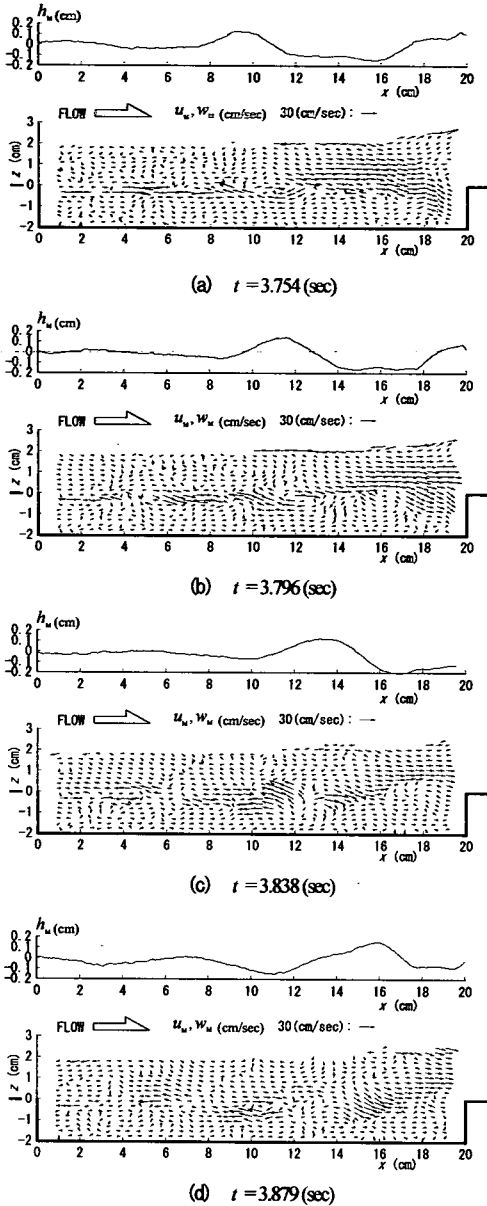


図-21 瞬時の流速と水面高さの変動成分
(各図において、上側が h_w の流下方向分布を、
下側がベクトル (u_w, w_w) を表す。)

POD 解析³⁾を行っている。この主成分分析もしくは POD 解析は、変動成分の分散共分散行列の固有方程式(後述の式(16))を解くことによって変動成分を各モードに分解し、主要な変動成分の空間パターンを抽出する統計的手法である。ここでは、後述するように、主要な水面変動と対応する流速変動を対象に分散共分散行列を構成することにより、水面変動と流速変動の主要パターン(相互関連)を明らかにする。

a) 解析対象とする水面・流速の変動成分

主成分分析は、多変量変動成分の分散共分散行列を用いて、すべての変動成分と最も相関が高い固有ベクトルを見出す固有値問題である。したがって、分散共分散行列の構成によって、期待される結果が得られるかが決まると考えられる。ここでは、主要な水面変動と流速変動の相互関連が明確に現れるように、各位置における流速値 $\mathbf{v}(x, z, t) = (u(x, z, t), w(x, z, t))$ と水面高さ $h(x, t)$ の時系列に多重解像度解析¹⁾(基底関数: Daubechies (N=10)¹⁰⁾を適用し、次に示すように各計測値を3つの周波数帯に分解する。

$$u(x, z, t) = u_L(x, z, t) + u_M(x, z, t) + u_H(x, z, t) \quad (12)$$

$$w(x, z, t) = w_L(x, z, t) + w_M(x, z, t) + w_H(x, z, t) \quad (13)$$

$$h(x, t) = h_L(x, t) + h_M(x, t) + h_H(x, t) \quad (14)$$

ここに、下添字 L の付く物理量は周波数帯 $f \leq 0.47\text{Hz}$ 程度のトレンドを含む平均的な変動成分、下添字 M は $f \approx 0.47 \sim 15\text{Hz}$ 程度の水面変動 $h(x, t)$ の卓越周波数帯を含む変動成分、下添字 H は周波数帯 $f \geq 15\text{Hz}$ 程度の高周波数の変動成分を表す。ここで、高周波数側の閾値は、図-20 より、水面変動の卓越する角周波数の上限 (60rad/sec) に最も近い多重解像度解析の周波数(約 15Hz) を、一方、低周波数側の閾値は、ほぼ時間平均的な流速・水面高さが得られる多重解像度解析の周波数(約 0.47Hz) を、それぞれ選んだ。これら3つの周波数帯のうち、 $h(x, t)$ の卓越周波数帯を含む変動成分 $\{u_M(x, z, t), w_M(x, z, t), h_M(x, t)\}$ を対象として主成分分析を行う。図-21 に、図-13 に対応する時刻での $\{u_M(x, z, t), w_M(x, z, t), h_M(x, t)\}$ の分布を示す。

b) 分散共分散行列の構成および主成分分析の概要

分散共分散行列 $[R]$ を算出する際、水面変動成分 $h_M(x, t)$ と流速変動成分 $u_M(x, z, t), w_M(x, z, t)$ の次元が違うため、これらから直接的に $[R]$ を構成できない。ここでは、水面変動は流体内部の流速変動による運動圧力の変化と重力復元力が関係していると仮定し、水面変動に対応する速度スケール $v_{hm}(x, t)$ を以下のように定義する。

$$v_{hm}(x, t) = \text{sgn}(h_M(x, t)) \cdot \sqrt{g|h_M(x, t)|} \quad (15)$$

ここに、 $\text{sgn}(h_M(x, t))$: $h_M(x, t)$ の符号、 g : 重力加速度である。

以上の変動成分 $\{u_M(x, z, t), w_M(x, z, t), v_{hm}(x, t)\}$ を用いて分散共分散行列 $[R]$ を構成し、次式の固有方程式を解くことにより n 次モードの固有値 λ_n および固有ベクトル Φ_n を求める。

$$[R]\{\Phi_n\} = \lambda_n\{\Phi_n\} \quad (16)$$

また、固有値 λ_n は、そのモード n に含まれる変動成分

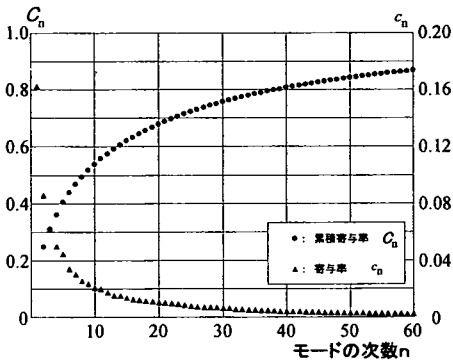


図-22 累積寄与率および寄与率(全687モード中の60モードを表示)

のエネルギーを表しており¹³⁾、次式で算出される累積寄与率 C_n 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割合を表す。

$$C_n = \sum_{m=1}^n c_m = \sum_{m=1}^n \lambda_m / \sum_{i=1}^N \lambda_i \quad (17)$$

ここに、 c_m : m 次モードの寄与率、

$$c_m = \lambda_m / \sum_{i=1}^N \lambda_i \quad (18)$$

N : 全変動成分の個数(全モード数)である。なお、式(16)の固有値計算には、MATLABを利用した。

c) 水面変動と流速変動の相互関連

図-22に、60モードまでの累積寄与率 C_n および寄与率 c_n を示す(全モード数 $N=687$)。累積寄与率 C_n より、40モードまでで変動成分の約80%の変動エネルギーが再現できている。ここでは、そのうち寄与率 c_n が0.02以上である10モードまで($C_n=0.54$)の主成分(固有ベクトル)を対象として、水面・流速の変動成分の相互関連を考察する。

1~10次の固有ベクトル ϕ_n の空間分布を図-23に示す。各図の上部は ϕ_n の水面変動部分に、下部は ϕ_n の流速変動部分に、それぞれ対応している。また、各図のキャプションにはそのモードの寄与率 c_n を併記している。 ϕ_n の空間分布は水面・流速の変動成分間の主要な相関パターンを表現している。

図-23(a), (b), (e)より、1, 2, 5次モードの ϕ_n の水面変動部分は $x=14\sim 15\text{cm}$ から凹部下流側で変動している。対応する ϕ_n の流速変動部分も凹部下流側、特に段上がり部でかなり大きな空間スケールにわたって卓越している。以上より、これらのモードの主成分は主に凹部段上りの影響による変動パターンを表していると考えられる。一方、その他のモードにおいては、 ϕ_n の流速変動部分は主流-凹部境界で局所的に卓越しており、これらの主成分(変動パターン)は凹部混合層における組織運動

に起因するものと推察される。それら卓越部での右下向き、左上向きのベクトルは、組織運動における主流(高速流体)の凹部への潜り込み、凹部内の低速流体の主流への巻き上げをそれぞれ表していると考えられる。対応する ϕ_n の水面変動部分は、主に凹部中央から下流側段上がり部にかけて大きく変動しており、その振幅は上述の1, 2, 5次モードのものに比べて大きな値をとる。さらに、 ϕ_n の水面変動部分の卓越する位置(x 座標)は流速変動部分の卓越位置(x 座標)とほぼ一致しており、水面での極大値(凸部)・極小値(凹部)の位置は、低速流体の巻き上げ(左上向きのベクトル)・高速流体の潜り込み(右下向きのベクトル)にそれぞれ対応している。以上のことより、①凹部内で最も卓越する流速変動(低次の1, 2, 5次モード)は凹部下流側の段上りに起因すること、②凹部中央から下流側に伝播する水面変動と凹部混合層での組織運動の間には高い相関関係があること、が推察される。

6. 結 論

本研究で得られた結果をまとめると、以下のようである。

(1) 水面・流速の同時画像計測法について：

- (i) 流体内部と水面形状を同時撮影し、同一画像フレーム内に可視化画像を得ることができた。
- (ii) 可視化画像の輝度勾配から水面形状を抽出する計測アルゴリズムを提示した。水面形は1画素の幅の曲線として表現でき、その計測精度は高い。これより、瞬時の水面形状を時間連続的に得ることができる。
- (iii) 流速に対する画像計測手法(CECアルゴリズムを用いたPIV)を併せて用いることにより、内部流速と水面高さの同時計測を可能にした。

(2) 水面変動を伴う凹部流れの解析に関して：

- (i) 本計測法により、浅い凹部をもつ開水路流れ(射流)の水面高さ・流速分布を同時測定した。瞬時の水面・流速の空間分布より、凹部混合層における組織運動と水面変動との間に関連性があることがわかった。
- (ii) 平均水面高さ、平均流速、乱流諸量などの空間分布から以下のことが明らかになった：①凹部上流側の主流-凹部境界では、せん断不安定により生じた流速変動が卓越する。②凹部の中央から下流側の主流-凹部境界では、せん断混合層が下流側に発達していく。③凹部下流側では、水面変動に伴う流速変動が活発になる。
- (iii) ウェーブレット変換を用いて水面変動の伝播挙動を調べた。水面変動はほぼ一定周期をもって下流側に伝播していること、水面変動の伝播速度、卓越波数

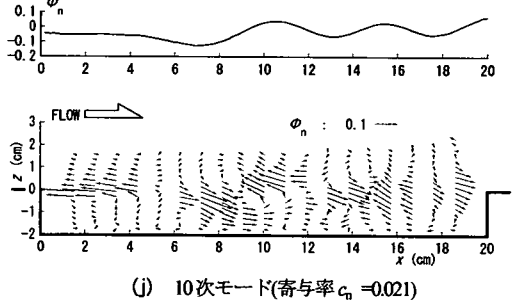
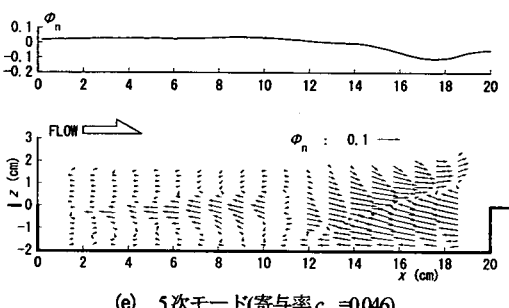
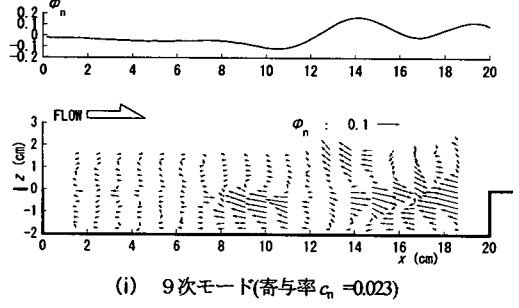
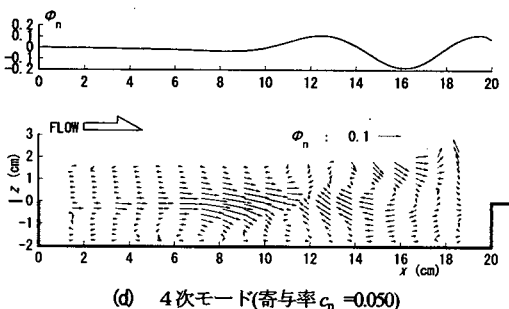
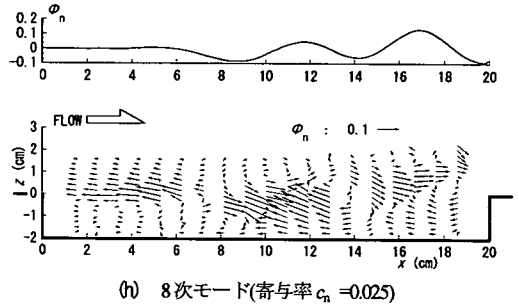
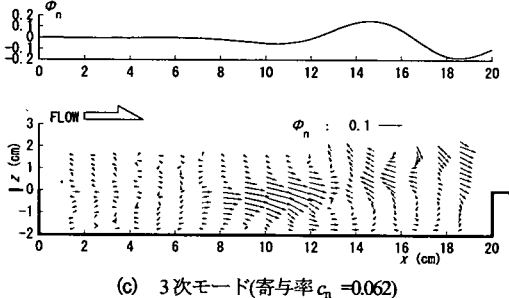
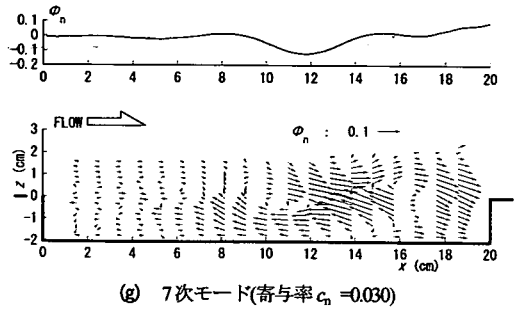
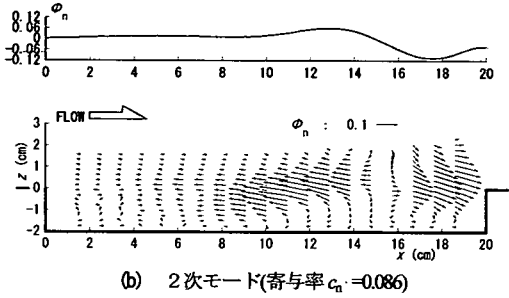
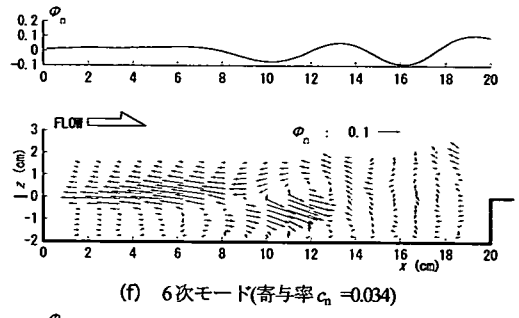
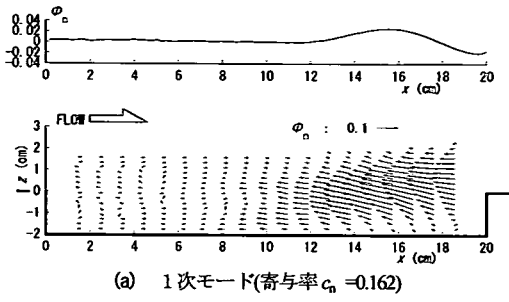


図-23 固有ベクトルの空間分布

(空間スケール)と卓越周波数(時間スケール)との関係が定量的に明らかになった。

(iv) 水面変動の卓越周波数を含む周波数帯での水面・流速の変動成分を対象として主成分分析を行った。その結果より、次のことが推察できる：①凹部内で最も卓越する流速変動成分は凹部下流端の段上がりに起因する。②下流側へ伝播する水面変動と凹部混合層での組織運動の間には高い相関関係がある。

以上の結果より、本研究で開発した水面・流速の同時画像計測法は、水面変動を伴う流れの時間的・空間的な変動特性を把握する上で有用であると言える。また、解析に用いたウェーブレット変換・主成分分析は、多変量からなる水面・流速の特性抽出や相互関連の評価に有効な手法であると考えられる。

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) 宮本仁志, 神田 徹, 兵頭伸幸: 開水路凹部流れにおける乱れの主成分分析, 水工学論文集, 第45巻, pp.505-510, 2001.
- 4) 瀬津家久, 山本義暢: 開水路キャビティー流れの乱流構造に関する研究, 土木学会論文集, No.614/II-46, pp.51-63, 1999.
- 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) Pearson, 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) Dabiri, D. and Gharib, M.: Simultaneous free-surface deformation and near-surface velocity measurements, *Experiments in Fluids*, Vol.30, pp.381-390, 2001.
- 8) 宮本仁志, 神田 徹, 大江和正: 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, 水工学論文集, 第45巻, pp.511-516, 2001.
- 9) Lei, 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.
- 10) 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. もしくは, *Experiments in Fluids*, Vol.29, pp.13-22, 2000.
- 11) 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, II-207, 2000.
- 12) Kanda, T., Fujita, I., Miyamoto, H. and Ikegami, J.: Turbulent behaviors in open channel trench analyzed by using PIV and turbulence model, *Proc. of 27th Congress of IAHR*, Theme B, pp.143-148, 1997.
- 13) Berkooz, G., Holmes, P. and Lumley, J. L.: The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol.25, pp.539-575, 1993.
- 14) たとえば, Daubechies, I.: *Ten lectures on wavelets*, CBMS Lecture Notes Series, SIAM, 1991.

(2001. 7. 9 受付)

SIMULTANEOUS MEASUREMENTS OF WATER-SURFACE AND VELOCITY USING IMAGE PROCESSING TECHNIQUE AND ANALYSIS OF OPEN-CHANNEL FLOW OVER CONCAVE BED WITH WATER-SURFACE FLUCTUATION

Hitoshi MIYAMOTO, Tohru KANDA, Kazumasa OOE and Kenji SHIMOYAMA

We have developed an image processing method for simultaneously measuring the water-surface elevation and the velocity vectors in open-channel flows. After taking an image in which both the particles in flowing water and the water-surface are visualized, a boundary growing process is employed for detecting the locations of water-surface using the gradient of luminance in the image and a particle image velocimetry is utilized for measuring the velocity vectors in the channel. Then, the present measuring technique is applied to the supercritical flow in the channel with a concave bed. Analysis of the instantaneous data of the water-surface elevation and velocity using the wavelet transform and principal component analysis indicates that there exists the interaction between dominant water-surface fluctuations and organized motions in a mixing layer along the concave.