

# ステレオ水面計測法と POD を用いた 側岸凹部流れの水面振動構造の解析

## WATER SURFACE OSCILLATION ANALYSIS OF SIDE CAVITY FLOW USING STEREOSCOPIC IMAGE MEASUREMENT AND POD

藤田一郎<sup>1</sup>・椿 涼太<sup>2</sup>  
Ichiro FUJITA, Ryota TSUBAKI

<sup>1</sup> 正会員 学博 神戸大学教授 工学部 建設学科 (〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町)

<sup>2</sup> 学生会員 神戸大学大学院 自然科学研究科 博士後期課程

When a relatively large side cavity zone is installed in an open channel, the influence of separated vortices and recirculation flow generated at the zone is sometimes exerted to the main flow as water surface oscillation. The mechanism of the oscillation is still not clearly understood because of the complexity of the phenomena. In this research, by using a stereoscopic surface measurement system developed by the authors, time-dependent water surface configurations are successfully measured at a sampling rate of 12Hz, from which general features of the surface oscillation is made clear for a wide range of the Froude number. We then applied the proper orthogonal decomposition (POD) method to the measured data and found out that the surface oscillation can be clearly decomposed into a Seiche-like major mode and sub-modes with smaller wavelengths.

**Key Words :** *Side cavity flow, water surface oscillation, stereoscopic measurement, POD analysis*

### 1. 結論

開水路の側岸に凹部を設置した流れはその比較的単純な水路形状に関わらず、その流れは条件によって複雑に変化する。この側岸凹部流れでは、主流部と凹部内の速度差によるせん断不安定によって流れの変動が発生するが、凹部の形状やフルード数などにより流速変動や水面変動の強度や周期が変化する点がこの流れの特徴である。このような流れの特徴を明らかにすることは、流れの基礎的な理解という点で有意義であるだけでなく、数値計算モデルの再現性の確認のために資料としても有益な情報となる。側岸凹部流れの計測では、これまでに渦構造に注目した研究例がある<sup>1)~6)</sup>。これらの研究では可視化技術、特に PIV による面的かつ定量的な計測法によって、内部流速の検討が行われてきた。しかし、水面変動に関しては、点計測法を組み合わせる程度であり、高々数点の情報により水面変動構造を推定しているに過ぎなかった。そこで、本研究では著者らによって開発されたステレオ水面計測法<sup>7)</sup>を用い、側岸凹部流れの水面変動を面的に計測することで、その変動構造をより直接

的に捉え、その仕組みを明らかにすることを目的とする。まず、フルード数 (Fr 数) と水深を変えたケースでの水面変動強度分布を比較して変動パターンの傾向を分類し、次にそれぞれのパターンを代表するケースについて検討を加える。その際に、固有直交関数展開 POD (Proper Orthogonal Decomposition)<sup>8,9)</sup>を利用して主要な変動構造の抽出を行なう。

### 2. 凹部周辺での水面変動構造

著者らは、凹部周辺での水面変動構造として、その変動位置、方向に注目して3つの変動パターンを想定している(図-1)<sup>6)</sup>。横断振動は、水路幅方向の振動パターンであり水路中央付近を節として両岸が振動するものと考えられる。縦振動は木村ら<sup>1)</sup>により報告された凹部内セイシュとせん断層中の渦との共振現象に相当するものである。循環振動は、せん断層を流下した流れが凹部下流端に衝突し、その反動が主流部を遡上するために生じる循環的な振動パターンである。固定点での水位の時系列計測によって変動周期には幾つかのピークがみられたこ

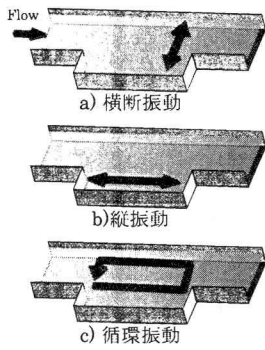


図-1 3つの振動パターン

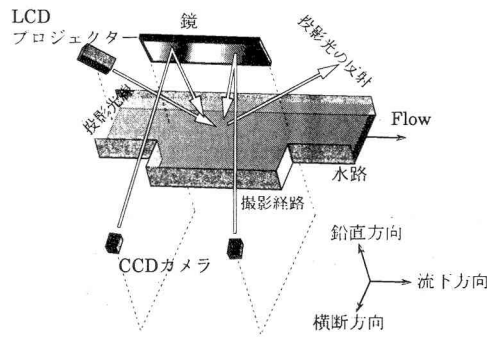


図-2 機器の配置

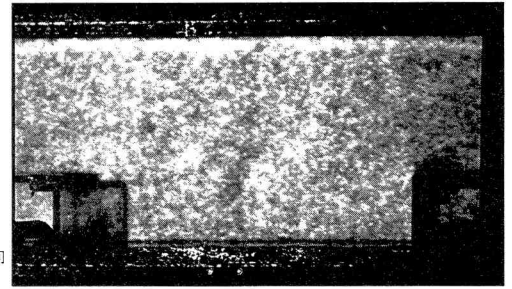


図-3 撮影画像の例

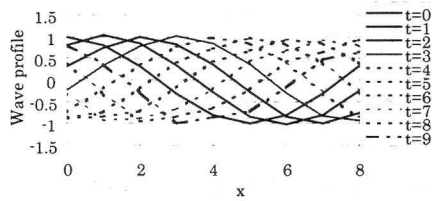


図-4 進行波の時間変動

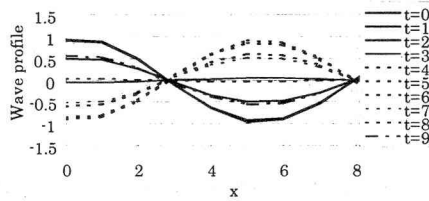


図-5 モード1の時間変動

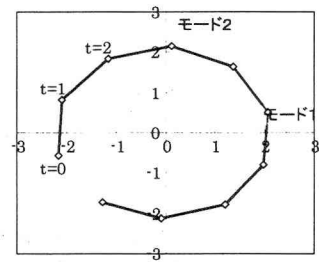


図-6 モード1と2の規準座標の時間変化

とから、これらの振動は単独で現れるだけではなく、複合的に発生すると考えられる。そこで、本研究ではこれらの変動構造を面的に捉え、水理条件との関係を明らかにしていく。

### 3. ステレオ水面計測法

本研究で用いたステレオ水面計測法は、2つの CCD カメラを用いて立体写真測量を水面に対して行うことが基本的な原理となっている<sup>10)</sup>。しかし、水面では光が屈折・反射して、液層に進入した光線は水路底面および側面で更に反射、拡散するなど非常に複雑な経路をとるため、そのままでは水面の位置を特定することは難しい。そこで、まずこれらの光の経路を制御・単純化する目的で水路を循環する水を染料によって白濁化した。更にこの白濁化した水に液晶プロジェクターによってパターンを投影した(機器の配置を図-2に、撮影画像のサンプルを図-3に示す)。投影位置は、撮影点に対し斜めに配置することで、投影光が直接カメラに反射することを防いだ。投影光は、水が白濁化されているため水面近傍でパターンを映すため、撮影位置が異なっても、同様のパターンを撮影できる。本システムで用いた CCD カメラは Hitachi denshi 製 KP-F100 で、 $1304 \times 1024$  Pixels の 10bit グレースケール画像を 12Hz で 150 枚(約 12 秒)の画像を連続撮影可能である。また、パターン投影には明るさ 1000ANSI、解像度  $800 \times 600$  Pixels の Sony 製 VPL-CS4 を用いた。

### 4. 水理条件

実験は、長さ 7.5 m、幅 0.2m の水路の中央付近に長さ 0.5m、幅 0.1m の凹部を設置した循環型可変勾配水路で行った。この凹部形状を固定して、水深およびフルード数と水面変動パターンを明らかにするために、水深を 4,6,8,10cm と変化させ、またそれぞれの水深で主流部の Fr 数を 0.15~1.05 程度まで変化させた。勾配は、直線水路部の水深が等流水深となるよう調整した。

### 5. POD (固有直交関数展開) によるモード分解

水面変動の構造を抽出するために POD を用いたモード分解を行った。POD は、多変量データの持つ情報を、少数個の総合特性値に要約することができる。具体的には、各点での時系列データを用意し、2点の分散共分散を計算して分散共分散行列を求める。次にこの分散共分散行列の固有値を大きい順に求め、同時に各固有値の固有ベクトルを求める。ここで、各固有値の大きさは、分離された各変動パターン(モード)の変動強度をあらわし、固有ベクトルは面的な変動の傾向、つまりどの部分が振動しているかを表す。次に、各固有ベクトルと計測データから各々のモードで1つずつ規準座標の時間変化を求めることができる。各モードの固有値はそのモードの変動強度を、固有ベクトルは変動の面的なパターンを、規準座標の時間変化は変動の時間変化を表す。逆にこれらの情報から波形を再合成することができ、全てのモー

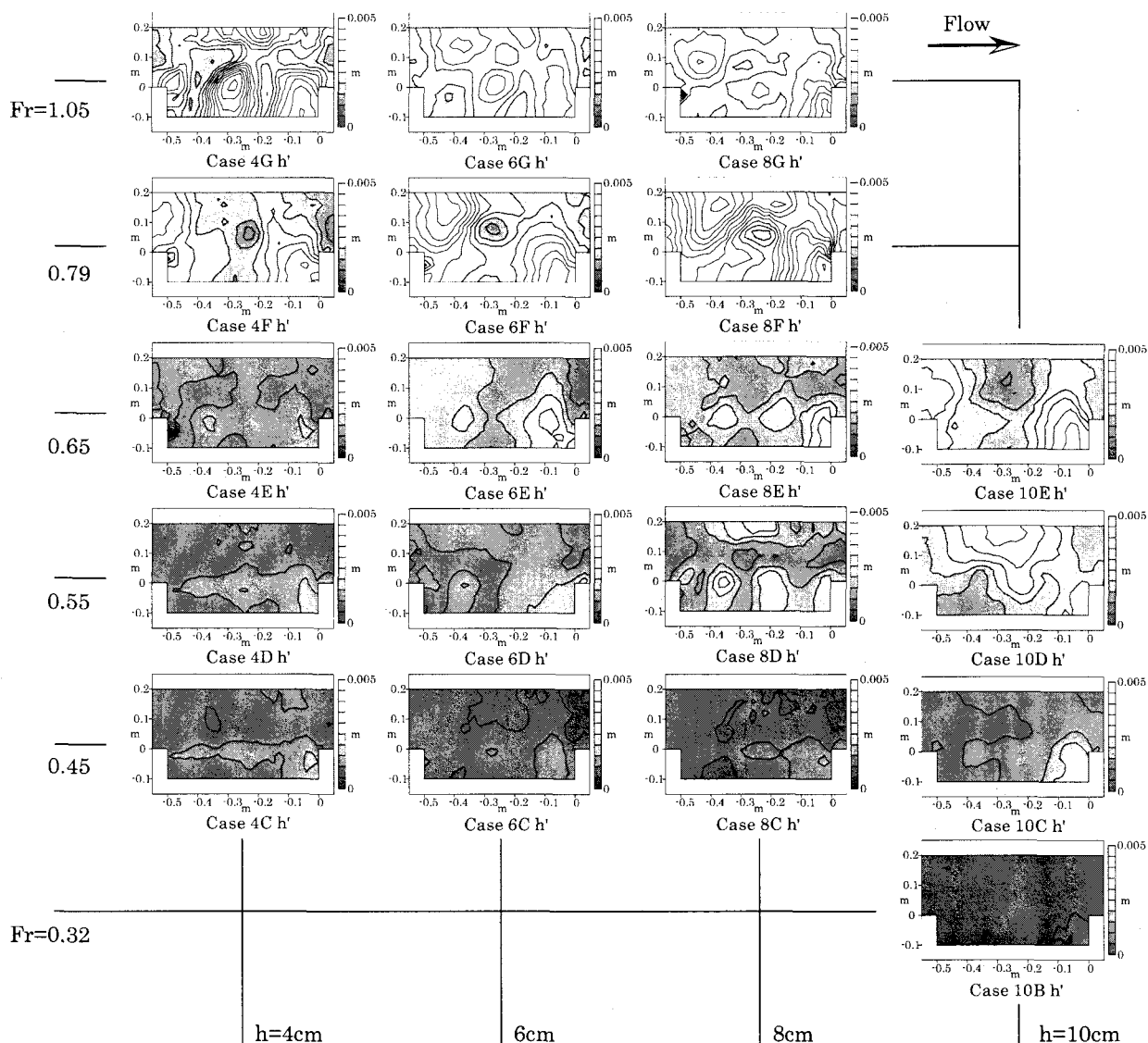


図-7 水面変動強度の比較（上に行くほど Fr 数が大きく、右に行くほど水深が大きくなる）

ドを用いて波形を再合成すると、元の計測データに戻る。

### (1) POD による非定常波の抽出

POD では、分散共分散行列を用いてモードの抽出を行うが、同一時刻での空間 2 点同士の分散共分散を用いると、非定常波を 1 つのモードで表すことはできないが、複数のモードを組み合わせると表現することができる。この様子を確認するために、正弦波が時間と共に進行する非定常波を与えて POD を行い、各モードの関係を調べた。与えた正弦波は時間  $t$  の進行によって、振幅 2、波長 10 の波形が速度 1 で進行する式 (1) および図-4 に示すような波である。

$$y = \cos\left(\frac{x-t}{5}\pi\right) \quad (1)$$

解析の結果、寄与率はモード 1、2 ともに 50% であり、この二つのモードで変動を再現できる。モード 1 の波形の時間変動を図-5 に示す。モード 2 の波形はモード

1 と節と腹の位置が入れ替わり、位相が 90 度ずれた波形であった。これらモード 1、2 の結果を合成した波形は与えた波形 (図-4) と一致した。

図-6 はモード 1 と 2 の規準座標を  $x, y$  平面上にプロットし、その位置の時間変化を調べたものである。二つのモードは位相が 90 度ずれているため、このようなプロット上では円状の軌跡を描いていることがわかる。

以上の正弦波の移動を対象にしたモード分解により、非定常波は複数のモードの組み合わせによって表現されることが確認できた。このことから、POD により複数の主要なモードが得られた場合に、それぞれのモードが個別の変動を現しているとは限らず、複数のモードによって 1 つの変動を表している場合があることが確認できる。また、それぞれのモードの対応関係は、変動波形や変動周期などに注目して判別することが必要となる。

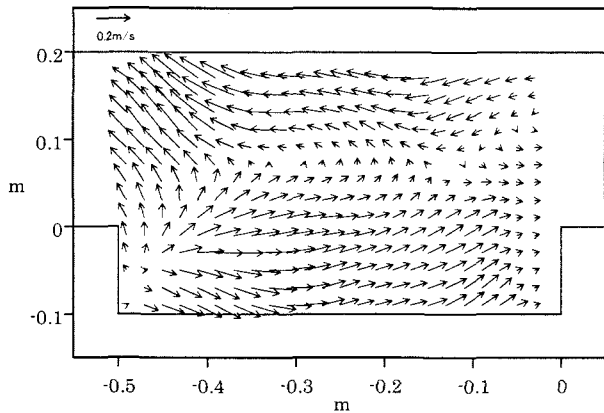


図-8 Case 8F の水面波の波速（水面形が波速により移流されると仮定し、オプティカルフロー法により計算）

## 6. 計測結果

本研究で計測された結果を以下に示す。まず、各ケースの水面変動強度分布を示し、水理条件による流れ構造の変化を捉えた後、それぞれの変動構造を考察する。

### (1) 水面変動強度分布

各ケースで計測された水面変動の分散の分布を図-7に示す。ここでは、全体的な変化をとらえるため、変動強度の無次元化は行っていない。得られた結果を整理すると以下のようなものである。Fr 数の小さなケースでは、凹部付近のせん断層に変動の強い部分が、連なっていることが確認できる (Case 4C, 8C など)。ここでは上流部から渦が発生し、下流部に向けて発達しながら移動していく。この渦中心は水位が低くなり、この渦の移動と凹部内での縦振動が共鳴して、このような分布となっていると考えられる。

次に、Fr 数が 0.6~0.8 程度のケースでは凹部内の下流端と凹部上流の主流部側の変動が強く現れている (Case 6F, 8F など)。水面形の時間変化を確認するため、水面形に対してオプティカルフロー法<sup>11)</sup>を用いて波の伝播速度を確認したところ (図-8) せん断層では上流から下流部に向けて変動が伝播しており、主流部では、逆に下流部から上流に向けて波が伝わっている様子が確認できる。よって、この変動は循環振動であると考えられる。

最後に、Fr 数が 1 程度のケースでは、せん断層に変動の強い部分が見られる (Case 4G, 8G など) ことから、Fr 数が小さなケースと同様、せん断層の渦と凹部内のセイシュが共鳴していると考えられる。主流部では、波が上流にほとんど伝播しないために、流速の遅い凹部内で変動が循環していると考えられる。

### (2) Case 8C の水面振動構造

水面変動強度分布から、Fr 数の小さなケースでは、主流部と凹部のせん断層に変動の強い部分が、連なっていることが確認できた。このような変動パターンをもつ流れを代表して Case 8C の水面振動構造を調べた。まず、水面変動の時系列データに対して POD を適用した。図-9 に示すのは各モードの寄与率と累積寄与率である。これによれば、モード 1 の寄与率は 0.4 と比較的大きく、またモード 5 までで累積寄与率が 0.9 を超えていることが確認できる。よって、モード 5 までで主要な変動が再現される。次に各モード間の対応を調べるため、それぞれのモード間の規準座標値を各時刻でプロットした。この中で、モード 1 と 2、モード 2 と 3 (図-10)、ならびにモード 3、5 のプロットは円状の構造を示しているため、これらのモードの組み合わせは、水面波の移動を表していると考えられる。

これら 3 つの組み合わせで水面変動の再合成を行ったところ、モード 1 と 2 では、せん断層部で流下し主流部では上流に向かう循環が現れた。モード 1 と 2 の寄与率の合計は 0.6 程度であることから、このような循環的な波の伝播は水面変動の主要な構造となっていることが考えられる。モード 2 と 3 の再合成波は、移動方向が不規則に反転をしていたため、このモードでは、非周期的な変動を表していると考えられる。最後にモード 3 と 5 の再合成波は、せん断層を流下する水面変動が現れており、せん断層中を流下する渦のパターンが抽出されていると考えられる。

### (3) Case 8F の水面振動構造

Fr 数が 0.6~0.8 程度のケースでは凹部内の下流端と凹部上流の主流部側の変動が強く現れていることが、変動強度分布から明らかとなった。このような変動パターンをもつ流れを代表して Case 8F の水面振動構造を調べた。水位変動時系列に対し POD を適用した際の各モードの寄与率と累積寄与率を図-11 に示す。これによれば、モード 1 の寄与率が 0.6 程度と大きく、モード 2 で 0.2 程度と大きく下がっている。次に、各モードの対応を調べるため規準座標の時間変化を調べたところ (図-12)、モード 1 と 2 の対応が非常に良いことがわかった。それ以外の組み合わせでははっきりした対応は確認できなかった。寄与率および対応関係から、モード 1 とモード 2 がこのケースの主要な水面変動を表していることが確認でき、その再合成波には凹部内およびせん断層では流下して、凹部対岸の主流部で遡上する循環構造がみられた。

### (4) Case 8G の水面振動構造

Fr 数が 1 程度のケースでは、せん断層に不連続的に変動の強い部分がみられた。このような流れを代表して Case 8G の水面振動構造を調べる。水面変動の時系列データに対して POD を適用した際の各モードの寄与率と累積寄与率を図-13 に示す。これによれば、モード 1

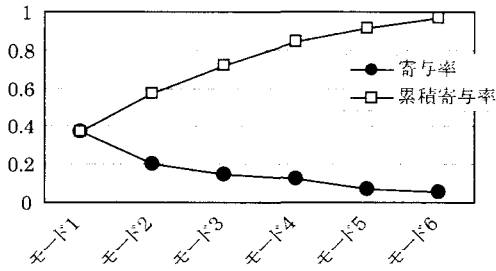


図-9 Case 8C のモード寄与率と累積寄与率

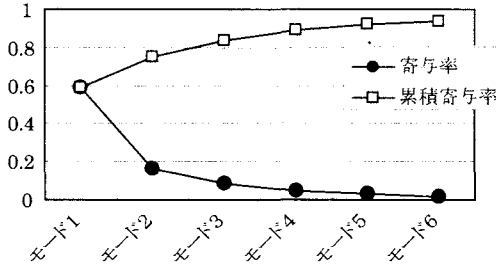


図-11 Case 8F のモード寄与率と累積寄与率

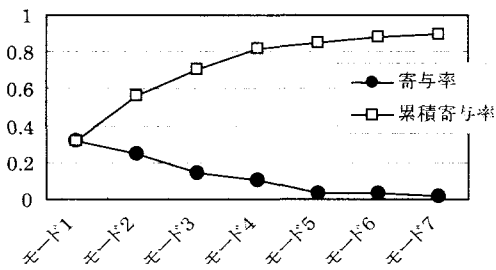


図-13 Case 8G のモード寄与率と累積寄与率

の寄与率が比較的小さく、またそれ以降のモードでも、累積寄与率の増加はなだらかである。よって、卓越したモードがみられず、水面変動は複数のモードによって再現されていることがわかる。また、各モード間の対応関係を規準座標のプロットにより確認したところ(図-14)、やや不明瞭であるが、モード1, 3間に対応関係が確認できた。しかし、全体的にはモード間の対応は弱く、関連は曖昧であった。よって、このケースでは他のケースに比べ、変動の規則性が弱いと考えられる。

### (5) 主要モードと副次モード

ここまでは、変動パターンの異なる3つのモードについて個別に検討してきた。各ケースのPOD解析において、寄与率の最も大きいモード1の振動に着目すると図-15(a),(c),(e)に示すように凹部付近で上流部と下流部が交互に上下する振動を抽出していることが確認できる。また、この主要モードに対応する変動をもつモード(副次モード)を図-15(b),(d),(f)に示す。主要モードと副次

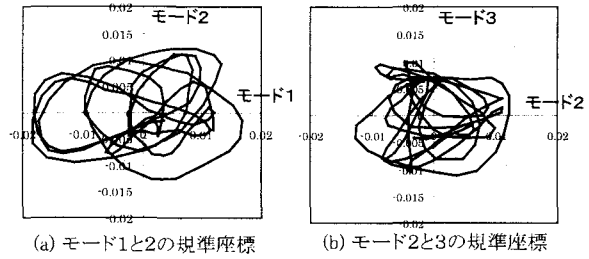


図-10 Case 8C のそれぞれのモード間の対応図

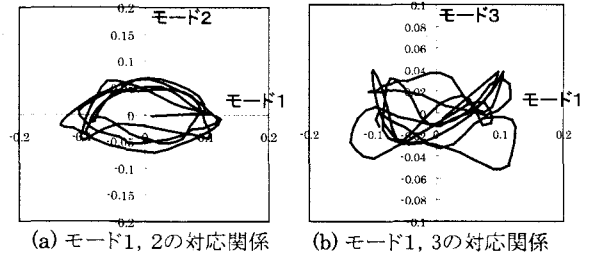


図-12 Case 8F のそれぞれのモード間の対応図

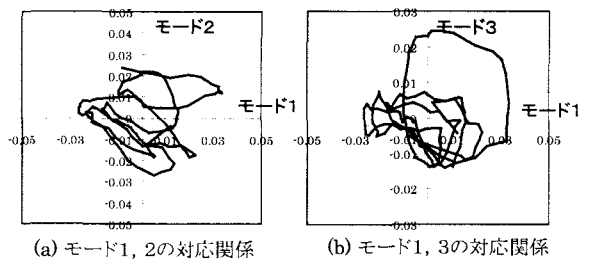


図-14 Case 8G のそれぞれのモード間の対応図

モードの関係をみると、まず主要モードはその変動パターンから凹部付近で上下流方向に振動するセイシユ的な振動だと考えられる。これに副次モードが組み合わされることにより、定常波動的な振動だけでなく波の流下および遡上が再現される。よって、本研究の条件下での水面変動は、流下方向のセイシユ的振動(縦振動)がベースとなって、これに副次モードが共鳴することにより、循環振動が起きることがわかった。Fr数が小さなCase 8Cの2つのモードには(図-15(a),(b))せん断層部にいくつか極値がみられる。これらは、渦の流下に伴う局所的な水面の低下の様子をしている。Case 8F(図-15(c),(d))では、副次モードに振れたような変動パターンが現れている。これは、位相がずれた三つの横断振動が流下方向に並んでいる構造と考えることができる。またFr数が0.6~0.8程度のケースでは、水面変動強度分布(図-7)で凹部下流端と上流端で変動の強い部分がみられたが、このケースではモード1の寄与率が0.6程度と大きかった事から、とくに縦振動が強く起こったものと考えられる。

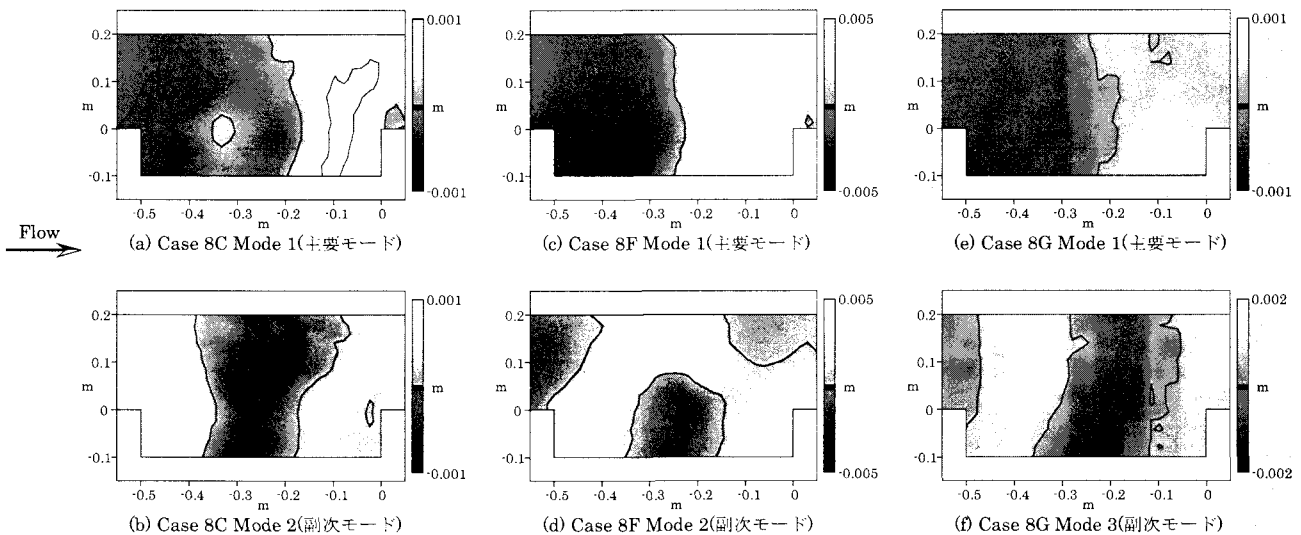


図-15 主要モードと副次モード

## 7. 結論

直線開水路に側岸凹部を設けた際にみられる水面変動をステレオ水面計測法を用いて計測した。この計測では各瞬間の水面形が得られ、これに対しPODによるモード分解を行った。水面変動強度分布から、水面変動パターンは主にFr数により3つに分類された。次に3つの水面振動をそれぞれ検討したところ、Fr数の小さいケースと大きいケースではせん断層を中心に流下方向に進む水面変動がみられた。この水面変動はせん断層中の渦の移流に対応した水面形の移動だと考えられる。また、3つのケースで共通してモード1は、凹部全体の流下方向振動を示していたことから、凹部付近での流下方向のセイシュが水面変動を大きく支配していることが明らかとなった。また、この主要モードに対応する副次モードが共鳴して、水面形が流下および遡上する現象が起きることがわかった。今後は、これらの知見を踏まえ数値解析を行い再現性の確認と向上を図り、最終的には親水設計を施された河道上の速度場や水面形をその変動も含めて数値的に再現することを目指す予定である。

謝辞： POD解析について宮本仁志助教授（神戸大学工学部）、畑洋輔氏（神戸大学修士過程）に助言および協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 木村一郎, 細田尚, 友近文志: 開水路流れ混合層におけるせん断不安定波動の空間的増幅特性, 土木学会論文集, No.509/II-30, pp.99-109, 1994.
- 2) 藤田一郎, 椿涼太, 熊城秀輔: 側岸凹部の形状変化が開水路流に与える影響, 応用力学論文集, Vol.6, pp.967-974, 2003.
- 3) 藤田一郎, 椿涼太: 中小都市河川に設置された側岸凹部構造物の非構造格子有限体積法による影響評価, 水工学論文集, Vol.47, pp.523-528, 2003.
- 4) 大本照憲, 平川隆一: 非越流型水制群を伴う開水路流れの水面振動に関する研究, 応用力学論文集, Vol.6, pp.943-949, 2003.
- 5) 矢野勝士, 福津家久: 開水路流れにおける側岸凹部流れのPIV計測およびLES計算, 応用力学論文集, Vol.7, pp.961-968, 2004.
- 6) 藤田一郎, 椿涼太, 竹島雄介: 側岸凹部を有する開水路流れの水面変動特性に関する研究, 応用力学論文集, Vol.7, pp.969-978, 2004.
- 7) 椿涼太, 藤田一郎: ステレオ画像を利用した自由水面の水位分布計測法の開発, 水工学論文集, 第48巻, pp.523-528, 2004.
- 8) 田村幸雄: 固有直交関数展開のランダム変動場への応用のすすめ, 風工学会誌, 第65号, pp.33-41, 1995.
- 9) 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, No.712 / II-60, pp.11-23, 2002.
- 10) 日本写真測量学会編: 写真による三次元測定-応用写真測量編-, 共立出版株式会社, pp.1-9, 1983.
- 11) 藤田一郎: 時空間微分に基づく高精度PIVの開発, 水工学論文集, 第48巻, pp.721-726, 2004.

(2004.9.30 受付)