

水深と流速の同時ステレオ計測による開水路

サイドキャビティ流れの振動モード解析

Analysis of water surface oscillation mode at side-cavity flow using simultaneous stereoscopic measurement of water depth and velocity distributions

藤田一郎*・松原隆幸**・椿涼太***

Ichiro Fujita, Takayuki Matsubara and Ryota Tsubaki

*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 1-1)

** 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)

*** 博(工) 名古屋大学大学院工学研究科研究員 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

The open-channel flow with a side cavity is known to exhibit various types of free surface oscillations within the cavity zone. A typical type of oscillation observed is similar to the one by a seiche generated in a closed box; however it has been reported that other types of oscillation can also be generated depending on the geometrical and hydraulic conditions. In this paper, a novel technique for measuring two dimensional water surface variations as well as surface velocity distributions is developed and the technique is applied to the flow at the side cavity zone with various aspect ratios of the side cavity. The water surface variation is analyzed by the POD technique while the velocity field is measured simultaneously by the PIV method. It was found that the surface oscillation can be categorized into four types and the water surface oscillation within the cavity zone is closely correlated with velocity variation.

Key Words: side cavity flow, stereoscopic measurement, POD, PIV, oscillation mode

キーワード: サイドキャビティ流れ, ステレオ計測, POD, PIV, 振動モード

1. まえがき

開水路にサイドキャビティ (あるいは側岸凹部) を設置したとき, サイドキャビティ内の流れの循環とともに比較的規則的な水面振動が発生することはよく知られている. たとえば, 木村ら^{1,2)}はワンドを模擬した正方形のサイドキャビティを対象として比較的lowフルード数の流れの実験と浅水流に基づく数値解析を行い, 水面振動と流速変動の関係を明らかにしている. 瀬津ら^{3,4)}は, 可視化実験と三次元数値解析により, 流れ場の乱流構造を考察し, 藤田ら^{5,6)}は主流の水深が比較的大きな場合を対象とし, 広範囲のフルード数に対する水面変動のパターンを可視化実験と非構造浅水流モデルによる数値解析により調べている. 一方, 門谷ら⁷⁾は密度関数を組み込んだ三次元のLESによる数値解析を行い, サイドキャビティ内に流入する流れの三次元構造について検討を行っている. 以上のように, 様々な流れ場を対象とした研究が行われているのは確かであるが, サイドキャビティのアスペクト比の変化が水面振動に及ぼす影響について詳細に検討した例はあまりないのが現状である. そこで, 本研究では, サイドキャビティのアス

ペクト比を多段階に変化させたときの流れ場の応答について, 水面形と流速分布を同時計測することによって検討を行った.

2. 実験方法

4.1 実験装置

実験には, 長さ4m, 幅20cm, 高さ10cmの亚克力製透明開水路を用いた. サイドキャビティ (以後, 凹部と称する) の形状は, 主流部幅 B を10cmで固定し, 凹部長さ L は25~35cmの範囲で5cmずつ, 凹部奥行き b は5~10cmの範囲で1cmずつ系統的に変化させ (定義図を図-1に示す.), 計18通りの凹部形状に対する検討を行った. こ

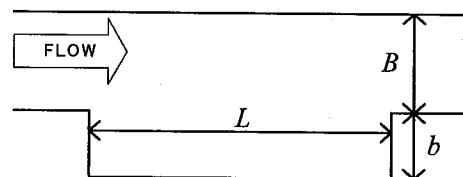


図-1 サイドキャビティの定義図

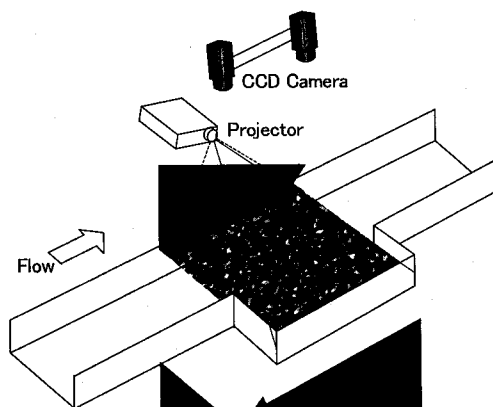


図-2 水面のステレオ計測システム

れは、凹部のアスペクト比 $A_d(=L/b)$ では 2.5 から 7.0 までの範囲、凹部幅比 $A_b(=B/b)$ では 1 から 2 の範囲に相当する。水理条件としては、凹部を隔壁で閉じた直線水路の流れのフルード数(Fr)が 0.6 あるいは 0.8 で、サイドキャビティの上下流各々 1m 程度の範囲で水深 4cm の等流となるように水路勾配を調整した。その結果、 $Fr=0.6$ の場合が勾配 1/500、また、 $Fr=0.8$ の場合の勾配が 1/333 となった。レイノルズ数は、それぞれ 8300($Fr=0.6$)と 11000($Fr=0.8$)である。実験は、各々の等流状態を確認した後、直ちに凹部の隔壁を取り払って行った。

4.2 水面・流速同時画像計測システム

実験における流れの可視化においては、水面の二次元変動と流速変動を同時計測するために、以下のような新たな計測法を考案した。まず、水面変動場の基本的な計測システムは椿ら⁸⁾および Tsubaki ら⁹⁾と同様のステレオ計測に基づくシステムを用いた。ただし、今回の計測では、比較的高速なサンプリング(最高 110Hz)の CCD ビデオカメラ(UNIQ 製 UP-685CL)を図-2に示すように水路上方にステレオ配置し、各々同期させて用いた。ただし、安定的に同期画像を得るためにサンプリング周波数は 75Hz とし、各々 2300 枚(約 30 秒間、 658×491 pixel)の撮影を行った。水面の変動を捉えるために、水はポスターカラーの染料を用いて白濁させ、図-2に示すように対象領域の水面にパターンをプロジェクターで投影させた。投影位置は、撮影点(CCD ビデオカメラ)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止した。水を白濁化させパターンの投影光が水面近傍に映るようにしているため、撮影位置が異なっても向きに応じた同様のパターンを撮影できる点に特徴がある。水位の計測精度はステレオ配置の状況によって変化するが、本研究のセットアップでは計測誤差はおよそ 0.5mm 程度と推定された。

一方、表面流速分布の計測には PIV を用いるが、従来使用しているナイロン破砕粒子は白色であり、白濁化した水とトレーサの識別が困難であるため、本研究では木炭をミキサーにより粉碎し、ふるい分けしたものをトレーサとして用いた。このトレーサは黒色なので輝度の情報からト

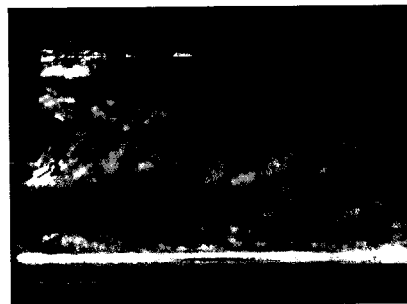


図-3 撮影画像の一例

レーサを容易に識別することができた。この炭粉末トレーサは前述の投影パターンとともに水面高さを表すものとしても利用できる。炭粉末トレーサは、底にナイロン網(網目 0.3mm 程度)を二重に敷いたフルイ(網目 1mm 程度)に入れ、水路の上流部で手動により振動を与えながら投入したので、水表面に散布されたトレーサの粒径は最大 0.3mm 程度と思われる。比重は 1.0 程度である。撮影画像の一例を図-3に示す。黒く見えているのが炭粉末トレーサその他の水面領域をカバーしているのが投影したパターンである。水面下からの上昇流のために、炭粉末トレーサで水面全域を覆うことは不可能であるが、図-3のようにトレーサが存在する場所では流速値だけでなく、水面高さも同時に時々刻々求めることが可能である。実際の動画では水面が旗めいているように見える。

3. 実験結果

3.1 水面変動強度分布

可視化実験による計測は、下流端の堰上げ状態や水温、あるいは流量などの変動の影響をなるべく避けるために、同じフルード数の水理条件に対して連続的に凹部形状を変化させて行った。このようにして得られた水面変動強度(水深時間変化の rms 値)の分布のうち、 $Fr=0.6$ のケース($Fr06$)の結果を図-4に、 $Fr=0.8$ のケース($Fr08$)の結果を図-5に示した。全体的にみると、凹部形状のわずかな違いにより、水面変動強度の分布形状が大きく異なってくるのがわかる。基本的な水面変動のメカニズムは、主流部から凹部への流れの流入、流入した流れが凹部下流端に衝突してせき上がることによって生じる振動、あるいは主流部と凹部の境界面に発達する自由せん断層の大規模変動などが複合したものと考えられるが、図-4や図-5からは、確かにさまざまなモードが重合した水面変動が生じていることがうかがえる。

まず、フルード数の影響をみると、 $Fr06$ のケースでは凹部長さが一定であれば、図-4(d-f)を除いて変動パターンに大きな変化が生じていないのに対し、 $Fr08$ のケースでは凹部形状のわずかな変化に応じて水面変動強度の分布が著しく変化している点が特徴的である。これは、 $Fr08$ の場合、凹部下流端に衝突する流れが相対的に大きくなる

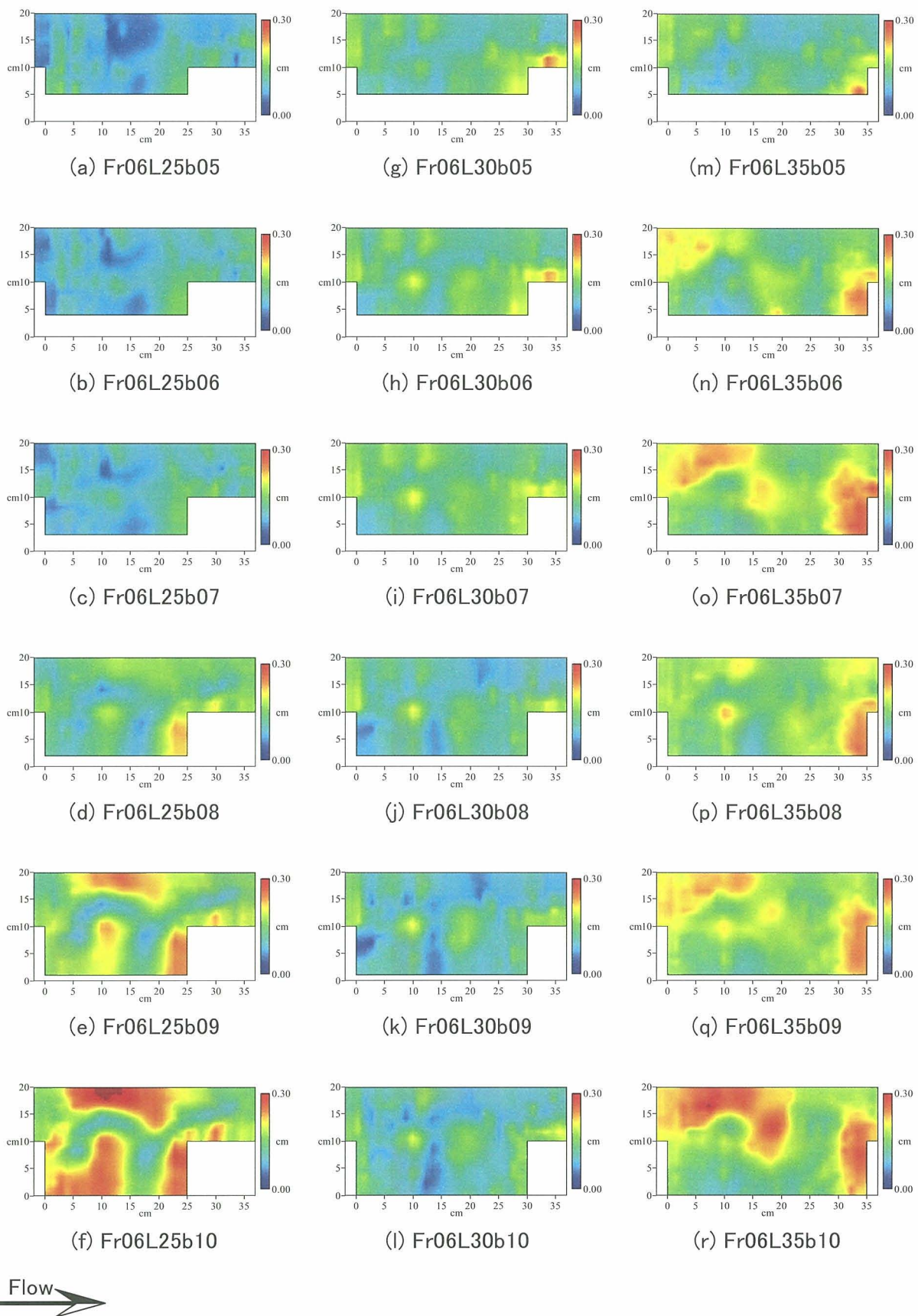


図-4 水面変動強度の分布 ($Fr=0.6$)

ため、凹部下流端の長さの違いが変動パターンに影響を及ぼしていることが要因と思われる。一方、Fr06 のケース

では、凹部下流端への衝突流れが相対的に小さいため、別の要因が水面変動パターンの支配しているものと考えら

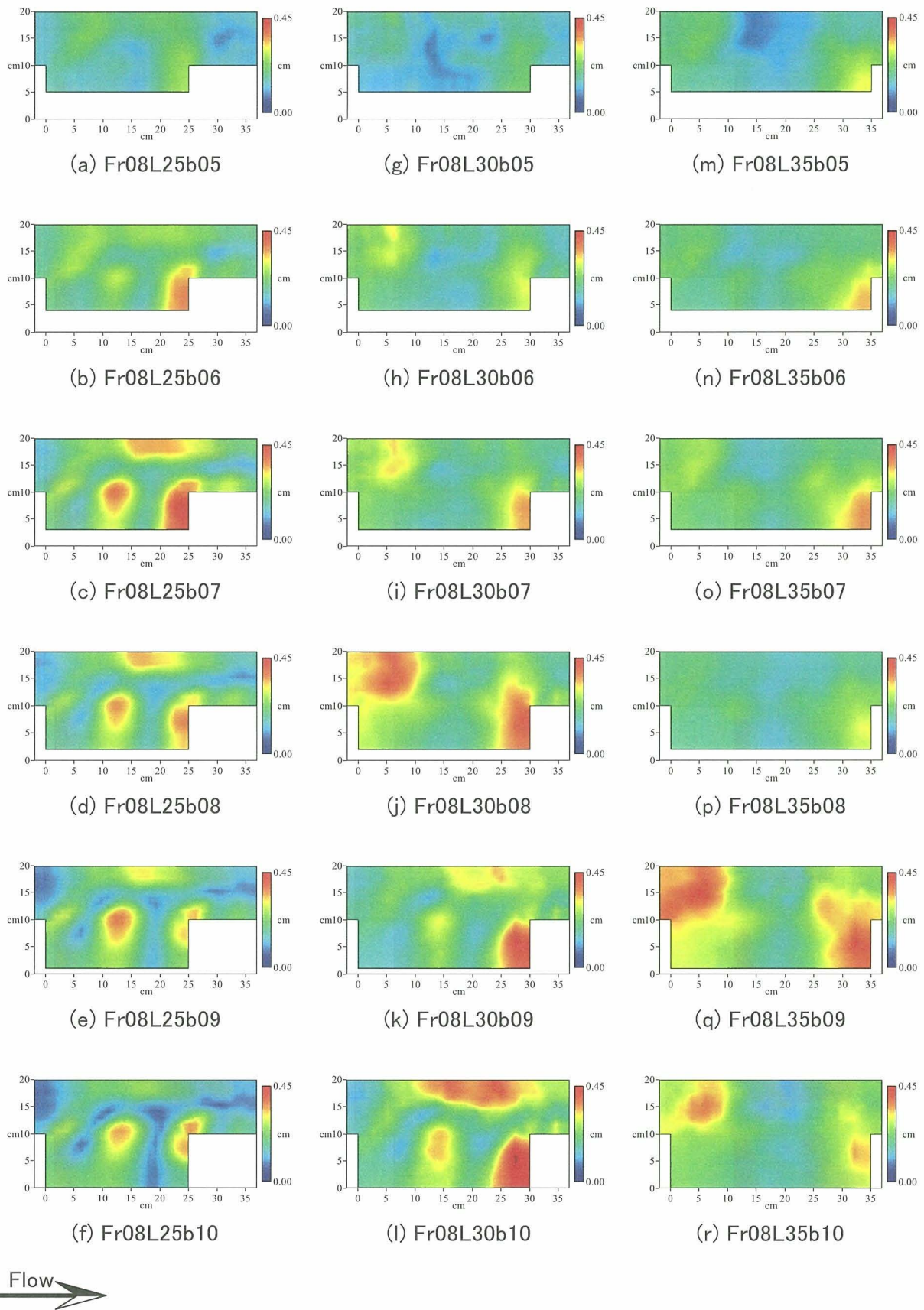


図-5 水面変動強度の分布 ($Fr=0.8$)

れる。なお、 Fr_{06LS25} のケースで図-4(d-f)のモードが他と異なるのは、サイドキャビティ内で循環流が発達しそ

れに伴う変動が生じたことが要因と考えられる。また、図-4(e)(k)(q)に見られるように、同一の凹部奥行 b でも凹部

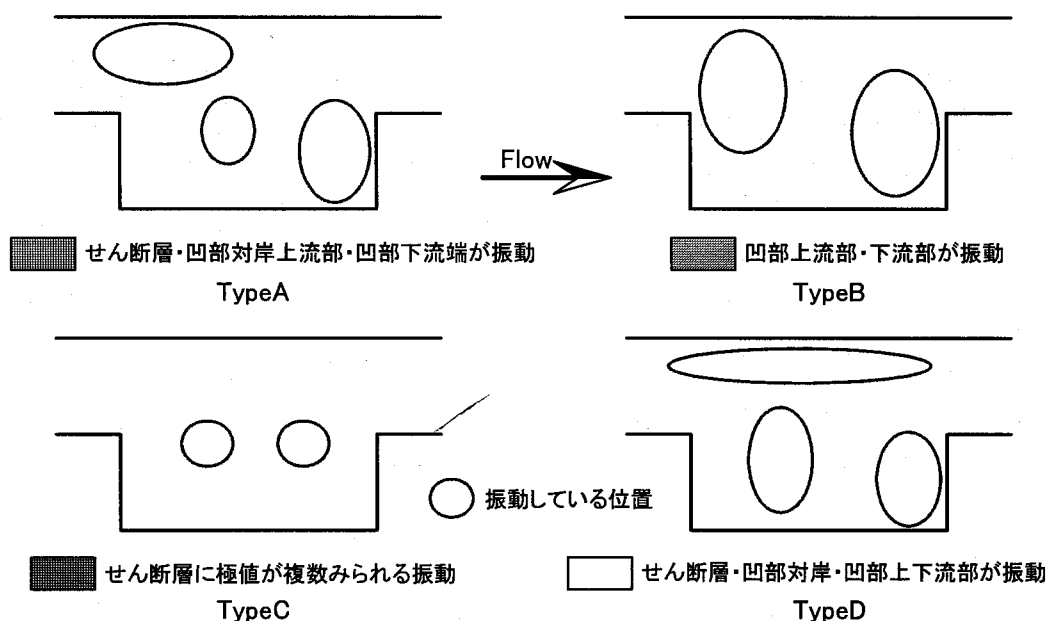


図-6 水面振動モードの種類

長さ L のわずかな変化に対して変動強度が大きく変化している場合があるが、これは水面変動モードが必ずしも連続的には変化しないことを示している。

次に、同一のアスペクト比で変動強度を比較してみると L25b08 (図-4(d)と図-5(d))、L25b09 (図-4(e)と図-5(e))、L25b10 (図-4(f)と図-5(f)) の各ケースは変動強度に違いがあるものの変動の分布形は類似している。これに対し、他のケースでは同じアスペクト比でも全く異なる水面変動分布が生じており、凹部形状が決まれば変動パターンが決定されるわけではないことは明らかである。なお、図-4と図-5では、凡例のスケールが異なっている点に注意されたい。本実験で得られた水面変動のモードを分類すると、大きく分けて4つのタイプに分けることができる。その模式図を図-6に示した。各タイプの特徴を以下に挙げる。

Type A: せん断層付近、凹部対岸上流部、凹部下流端が強く振動。

Type B: 主流部を含めた凹部上・下流部が強く振動。セイシュ的な振動。

Type C: せん断層に複数の極値がみられる振動、変動強度は小さい。

Type D: せん断層付近、凹部対岸、凹部上下流端が強く振動。

このうち、Type Cは他のタイプとは異なって凹部下流端への流れの衝突の影響が小さく、せん断層内に3つの節を持つ弱い振動モード、すなわち、凹部長さを3等分するような振動モードを表している。このような振動モードの存在は、従来の点計測法で認識することは非常に難しいが、本研究で用いた水面のステレオ計測法では、微弱な水面変動も良好に計測できていることは強調してもよい。

一方、凹部下流端に衝突する流れが強い場合には、Type Bのようなセイシュ的な振動が発生する。ただし、振動の範囲は凹部内のみにとどまらず、凹部上流側の主流にまで及んでいる点が注目される。このような状態は、凹部長さが相対的に長い $L=35$ のケースでよく発生しており、さらに凹部の幅 b が大きくなるほどその傾向が強くなっている。

これに対し、凹部形状のアスペクト比が小さい場合(概ね3.5程度以下)には、凹部内の再循環流が発達するため、振動のモードは縦振動から横振動へと遷移しType Dの振動が発生するようになる。この場合の横振動の構造は複雑であり、振動のピークが3箇所が発生する点が特徴的である。流れ方向には、凹部長さを2等分するような波長成分があり、3波長の振動が現れるType Cとは明らかに異なるモード遷移が生じていることがわかる。また、Type Aは、Type BとType Dの中間のモードと位置づけることができる。

強調すべき点は、このような振動モードの遷移がわずかなアスペクト比の違いによって生じる場合があることである。例えば、Fr08L30b08 (図-5(j)) から Fr08L30b09 (図-5(k)) では、アスペクト比で3.8から3.3、凹部幅 b にしてわずか1cmの違いで、振動モードがType BからType Dへと遷移している点が注目される。

3.2 平均流速分布

前述のように表面流速分布は炭粉末トレーサを用いた表面流の可視化画像を対象としてPIVにより求めた。水面変動があるため、画像の1画素に対応する物理サイズは厳密には高さによって異なるはずだが、撮影地点が水面よりも十分高い(約1m程度)ため、今回は水面を平面

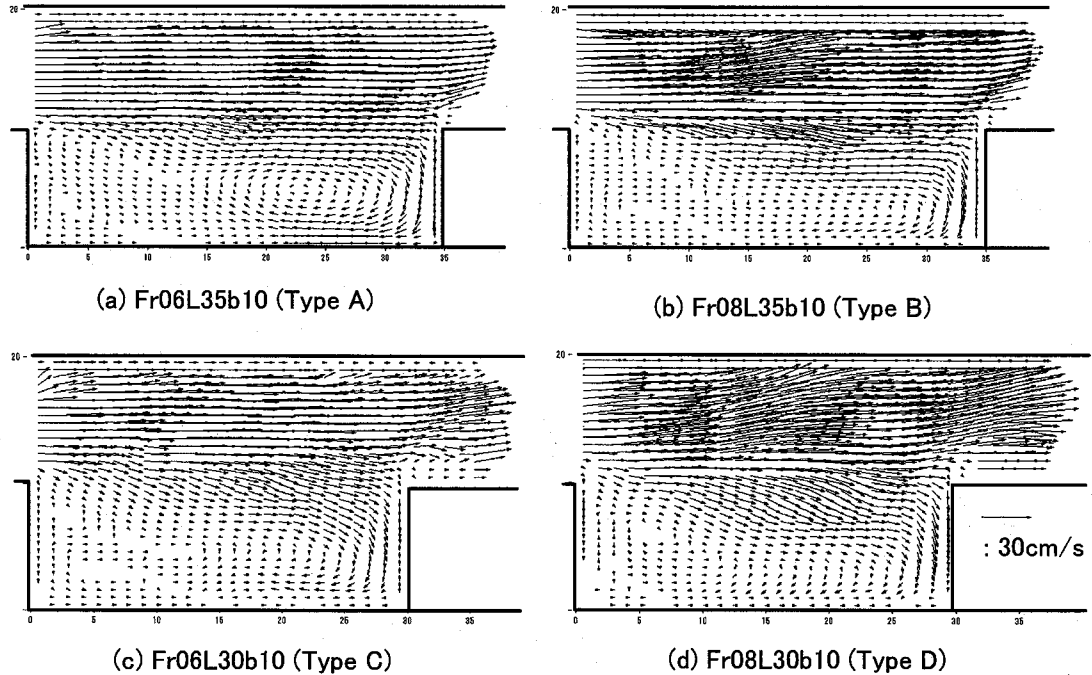


図-7 Type 別平均表面流速分布の比較

と見なして解析を行っている。また、斜め撮影になっているため、無歪画像を生成した後に PIV を適用した。水面には図-3 に示したように、トレーサだけでなくパターンも投影されているため、単純な PIV の適用では良好な結果は得られない。そこで、PIV 解析の際のテンプレート内に十分な量のトレーサが含まれている場合のみの流速値をピックアップして平均流速を算出した。ちなみにトレーサのないパターンの中の部分では流れの動きを検出できないため、生データでは流速値がほぼゼロとなる。前述の各振動モードに対応する典型的な表面流速分布を図-7 に示した。計測時間がまだ不十分なことで、トレーサの分布がばらつくために、主流部などでは流速分布にばらつきが見られるが、凹部内では比較的良好な平均流速分布が得られた。図-7(a)から図-7(d)に示しているのは、Type A から Type D までの代表的な流速分布である。図-7 からわかるように、どのケースでも凹部内の下流側に 1 つの大きな循環流が生じているが、Type 毎の違いは明確ではない。ただ、Type A では凹部内の壁面で強い逆流が生じ、明瞭な循環流が発生している。これに対し、Type D では循環流は明確ではなく、主流から凹部内への流体の流入の方が顕著となっている。いずれにしても、水面変動に現れたような明確なモードの違いは、平均流速分布には現れないことがわかった。

4. 水面変動場の POD による解析

4.1 POD 解析の概要

これまでの結果より水面変動のモードにはいくつかの

タイプが存在していることがわかったが、ここではステレオ計測で取得可能となった時々刻々の二次元水面変動場に対して固有直交関数展開 POD(Proper Orthogonal Decomposition)解析を適用し、水面変動の主要構造についてさらに詳細な検討を行う。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主成分分析と同等の解析法である。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。同時にこの行列の各固有値および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）の変動強度を表し、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。各固有ベクトルと計測データからは各々のモードで 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。その変動は POD の仕組みからセিশュのような定常波を 1 つのモードで表現することになる。

ここで、時空間変動データ $h(x, y, t)$ を考える。 x, y : 空間座標、 t : 時間座標である。POD では、計測された変動値を最も良く再現できる空間変動パターン $\Phi_k(x, y)$ と時間変動成分 $a_k(t)$ の積より表現する。ここに、 k : モードであり、次式のモード n までの累積において $error$ が最小となる組み合わせを得る。

$$h(x, y, t) = \sum_{k=1}^n \Phi_k(x, y) a_k(t) + error. \quad (1)$$

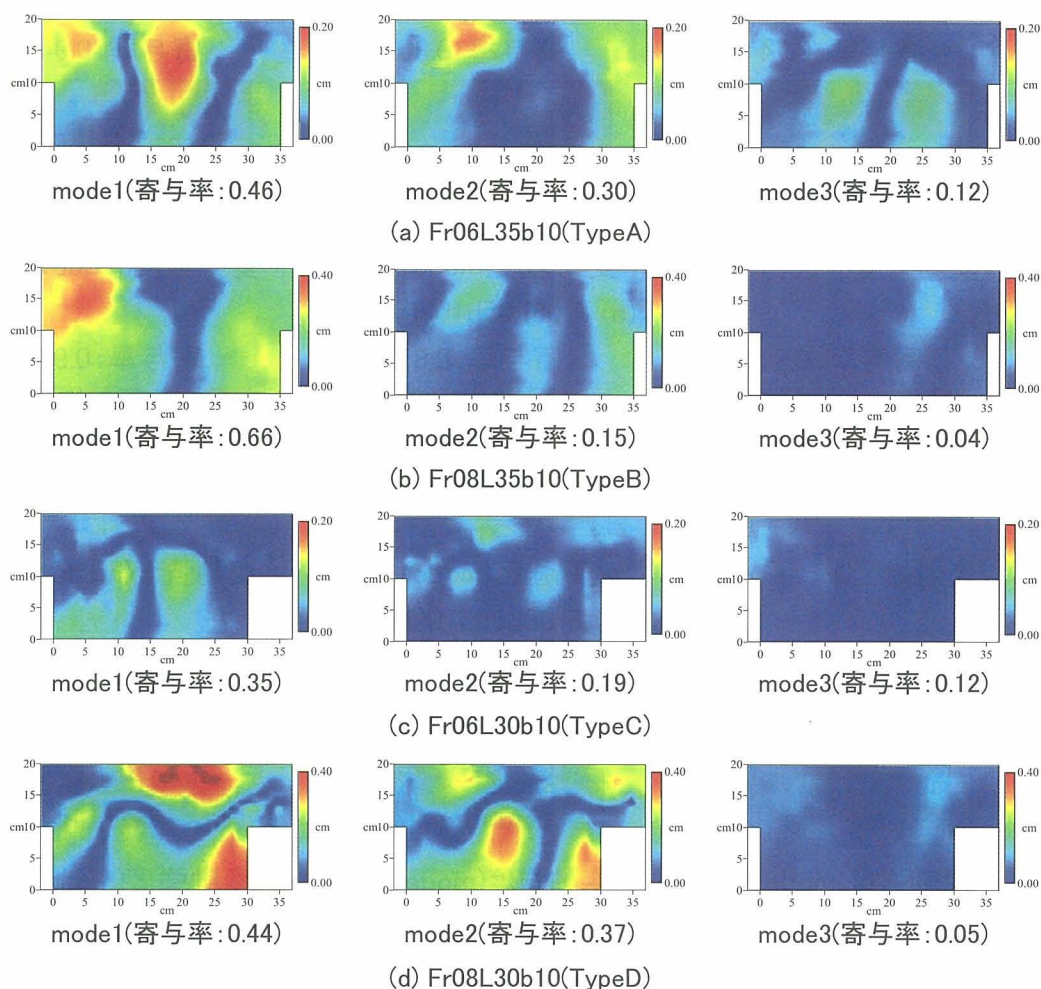


図-8 各モードの水面変動強度

また、それぞれのモードには寄与率があり、寄与率が高いモードから第1モード、第2モード、・・・と呼ぶこととする。

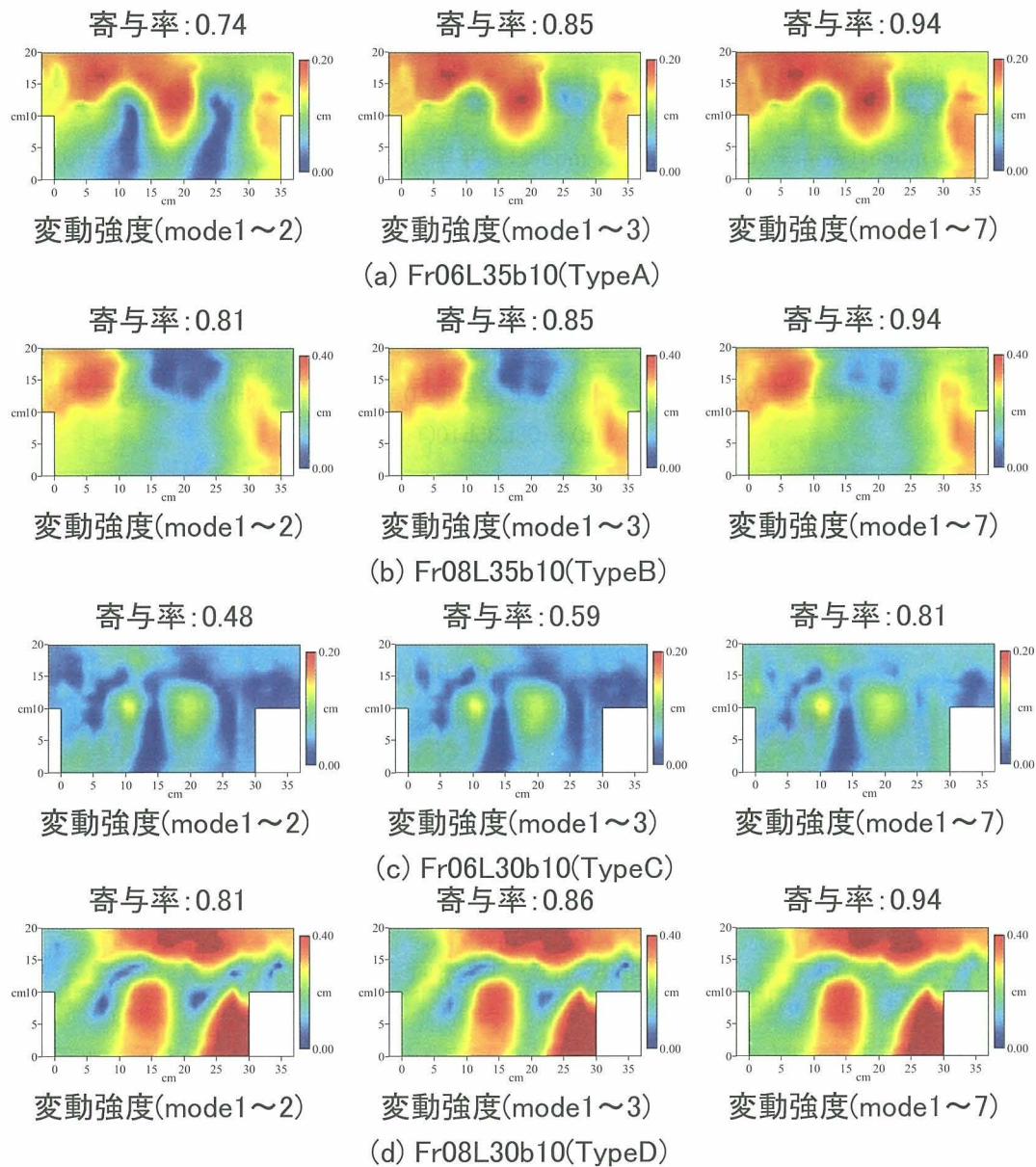
4.2 各モードの寄与率

ステレオ計測で得られた各ケースの二次元水面変動データに対して POD 解析を行って得られた第1モードから第3モードまでの水面変動強度を図-8に示す。各々前述の4つの Type の代表例についての結果を示している。これらの結果より、第1モードが占める寄与率は Type B が最も大きく 0.66、Type A と Type D がそれぞれ 0.46、0.44 とほぼ同程度、Type C が最も小さく 0.35 となっていることがわかる。Type C の値が小さいのは、他の Type と比べると明確な振動パターンが生じていないことが要因と考えられる。ここで得られた第1モードの各変動強度の分布パターンあるいは変動の極大値の発生箇所を図-4 および図-5 に示した計測値のそれらと比較すると、第1モードの分布は各 Type の特徴をうまく捉えていることがわかる。これに対し、第3モードの

寄与率はどのケースにおいても 10%程度以下であるため、第1モードと第2モードの再合成により、オリジナルの変動構造は十分に再現できるものと考えることができる。図-9には、各々、第2モード、第3モード、第7モードまでの成分を合成して再合成した変動強度を示したが、これからは第2モードまでを用いた再合成で十分であることがわかる。図-10には、第1、第2モードの規準座標をプロットしたが、どの Type も円状のパターンを示していることから、第1、第2モードの合成で振動的な特性についても十分再現可能と考えることができる。

4.3 水面変動の周期特性

図-10のプロットから明らかなように、水面変動の周期的な構造は第1、第2モードで再現可能と思われることから、水面変動の卓越周期を第1モード規準座標の時系列データのスペクトル解析から検出し、各ケースの比較を行うこととした。



図一9 再合成後の変動強度分布の比較

ここではまず、水面変動の周期に関する理論値を以下に列挙する。木村ら¹⁾の比較的アスペクト比が小さい凹部（ワンドを想定していると思われる）流れの研究では、水面変動周期は閉鎖性水域のセイシュの周期と一致すると指摘している。閉鎖性水域でのセイシュの周期は次式で与えられる。

$$T = \frac{2L_s}{n\sqrt{gh}} \quad (2)$$

ここに、 T ：振動周期（s）、 L_s ：水域の長さスケール、 g ：重力加速度、 h ：代表水深、 n ：振動モード（ $n=1,2,\dots$ ）である。ここでは流下方向のセイシュを考える場合には水域の長さスケールとして凹部長 L を、横断方向のセイシュを考える場合には

水域の長さスケールとして凹部奥行 b +主流幅 B を用いる。

一方、本研究で扱う凹部はアスペクト比が比較的大きいため変動が凹部内部に留まらない可能性がある。この場合には半閉鎖性水域のセイシュの発生も考えられるため、その周期についても検討する。半閉鎖性水域でのセイシュは次式で与えられる。

$$T = \frac{4L_s}{(1+2n)\sqrt{gh}} \quad (3)$$

ここに、 n ：振動モード（ $n=0,2,4,\dots$ ）であり、水域の長さスケールとしては凹部長 L を用いる。

また、藤田ら⁶⁾が提案している主流部の流速を考慮したセイシュの周期は次式で与えられる。

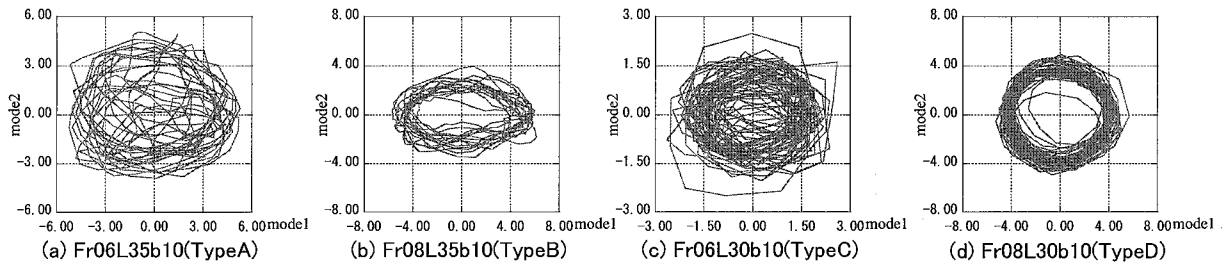


図-10 規準座標のプロット(Mode1 vs Mode 2)

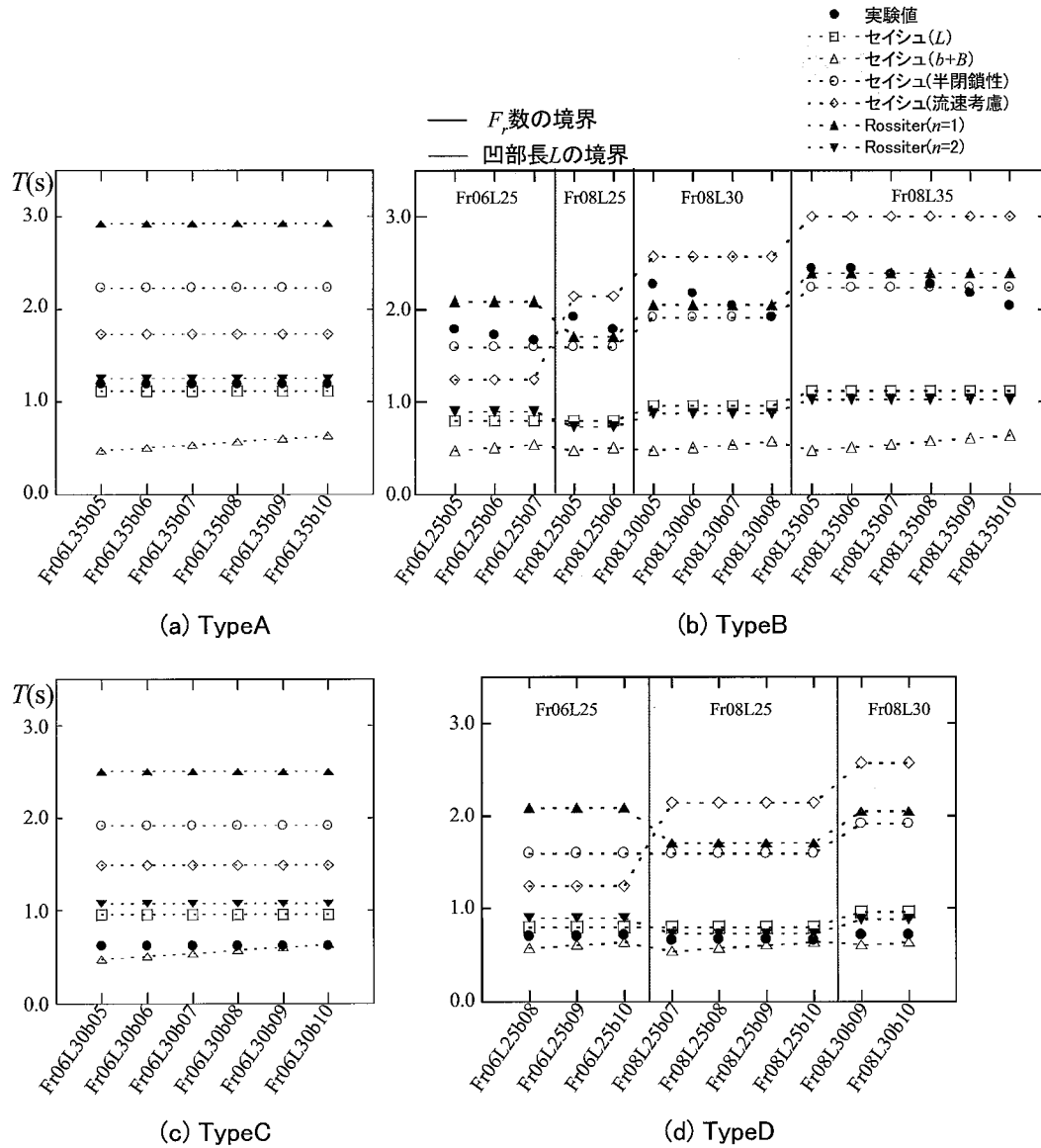


図-11 水面振動周期の実験値と理論値の比較

$$T = \frac{L}{\sqrt{gh} + U} + \frac{L}{\sqrt{gh} - U} \quad (4)$$

水域の長さスケールとして凹部長 L を用いる．以上の各セイシュの他に，圧力変動において広く用い

られている以下に示す Rossiter¹⁰⁾による半経験式も併せて検討する．

$$St = \frac{f_n L}{U} = \frac{n - \gamma}{M + 1/\kappa} \quad (5)$$

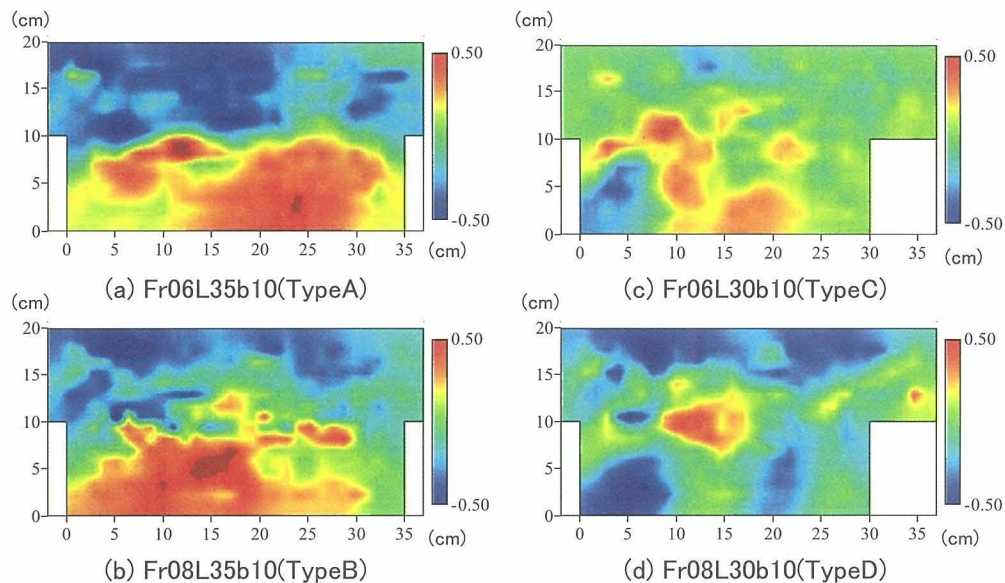


図-12 流速・水面変動の相関特性($u'h'$)

ここに、 n : 振動モード ($n=1,2,3\dots$)、 f_n : n モードの振動周波数、 M : マッハ数である。 γ および κ は実験定数で、ここでは Rossiter による値である $\gamma=0.25$ 、 $\kappa=1/1.75$ を用いた。 藤田ら⁶⁾は式 (5) のマッハ数をフルード数に置き換え、セイシュの理論式から算出された卓越周期を振動数 (1/s) の無次元量であるストローハル数 S_r に変換して検討しているが、このストローハル数は無次元化に主流部の流速および凹部長 (流下方向の長さ) を利用しているので縦振動を対象としている。 本研究では POD 解析により横振動と思われる振動が検出されていることから無次元化は行わず、逆に Rossiter の式により算出されるストローハル数を周期に変換して周期の検討を行う。

図-11 に実験によって得られた水面変動の卓越周期と理論値をプロットしたものを Type 別に示した。 Type A はケースによらず一定の振動周期を示しており、その値は流下方向の閉鎖性水域セイシュと Rossiter の第 2 モードに近い値を示している。 図-8 と比較すると第 1 モードの振動パターンは、形としては $n=2$ のセイシュに対応しているが、周期は、第 1 モードではなく第 2 モードの振動に一致している。 振動の上流端が凹部内ではなく主流部に位置することから、Type A は閉鎖性セイシュの振動成分を含むが、流れに依存する振動要素も入った複合的な振動を表しているものと考えられる。

Type B は全体的には半閉鎖性水域セイシュの周期と一致している。 また Fr08 ケースでは Rossiter の第 1 モードとも近い値となっている。 ただ、第 1 モードの変動のパターンは閉鎖性水域セイシュの空間スケールと一致するが半閉鎖性水域セイシュとは一致しない。 木村ら¹⁾は振動周期としセイシュ

の周期の 2 倍に相当する周期を検出しており、それは凹部上流端で発生した剥離渦の下流端への衝突位置の変化に起因するとしている。 半閉鎖性水域セイシュの周期は閉鎖性水域セイシュの周期の 2 倍に相当するので木村らの報告のように Type B の振動は凹部上流端で発生した剥離渦の下流端への衝突位置の変化に起因する振動と考えられる。 これは Gharib and Roshko¹¹⁾の定義する Shear-layer モードの振動とみなすことができる。 ただし、図-11 からわかるようにフルード数の境界・凹部長の境界別にみていくと凹部奥行が大きくなるにつれて周期が短くなっていることが確認できる。 このことから水面変動構造は凹部長だけでなく、凹部奥行の変化による影響を受けていることがわかる。

Type C に関しては水路横断方向の閉鎖性水域セイシュの周期とほぼ一致していることが確認できる。 ただし、空間的には特にせん断層付近で強く振動しており、セイシュ的な横振動とせん断層中の渦が共鳴している振動と考えられる。

最後に Type D は流下方向閉鎖性水域セイシュ、水路横断方向閉鎖性水域セイシュ、Rossiter の第 1 モードに近い値を示していることが確認できる。 この Type の第 1 モードの変動パターンを確認すると横方向の振動が発生しており、このことから Type D では水路横断方向の閉鎖性水域セイシュが発生していると考えられる。

以上のように、本研究の実験範囲という制約はあるがサイドキャビティの形状や流れの条件によって水面振動のパターンを明確に分類することができた。

5. 水面変動と流速変動の相関特性

ここでは、水面形と表面流速の同時計測によって得られたデータからそれらの相関関係を調べる。図-12に流速の流下方向成分 u と水深 h の相関および流速の横断方向成分 v と水深 h の相関分布を示す。流下方向成分 u との相関をみていくと Type A, Type B では凹部内において高い相関がみられる。この2つの Type は大別すれば流下方向の振動、つまり縦振動であった。このことから凹部内の大規模循環渦とセシユ的な振動が共鳴しているものと考えられる。Type C については凹部内中央付近と凹部上流端の主流からの流入部付近で比較的高い相関がみられる。Type D では他の Type と比較して全体的に相関が低い。このように、Type によって水面変動と流速変動には特徴のある相関関係が各々に存在することがわかった。

6. 水面振動 Type の発生領域

各水面振動の Type の発生領域を調べるために、凹部アスペクト比(L/b)と凹部幅比 (B/b) の平面に各 Type の値をプロットしたのが図-13 である。実験条件の範囲が大きいために情報量としてはまだ不十分であるが、フルード数によって発生領域や発生 Type が異なってくることがわかる。共通的に言えることは、アスペクト比が小さくなり、凹部空間が狭くなると Type D の閉鎖性の振動が発生する点である。ただ、その他の領域ではフルード数によって発生する Type そのものが異なってくるため、さらに広範囲にわたる凹部の幾何形状や水理条件に対する検討が必要と思われる。

7. あとがき

本研究では、直線水路にサイドキャビティを取り付けた場合に発生する水面振動について、ステレオ画像計測と PIV による流速計測の同時計測を可能とする手法を開発し、水面振動の発生パターンや発生領域などについて検討を行った。その結果、二次元水面変動場の POD 解析によって水面振動のパターンは4つの Type に分類でき、各々の振動周期は縦方向や横方向のセシユ的な振動で概ね説明できるが、Type C を除けば Rossiter の経験式もよく実験値と一致することがわかった。ただ、POD のモードから得られる大規模な水面変動の空間スケールから予想される振動とは必ずしも一致しない場合もあり、この点については今後の検討が必要と思われる。各 Type の発生条件については、検討した実験範囲が水深一定であるなど不十分だったこともあり、一般的な結論を導き出すには至らなかったが、フルード数別の発生条件には一定の特徴があることがわかった。一方で水面変動と流速変動の相関分布については Type によって異なる特性を示すことを明らかにした。今後は、さらに詳細な実験を通した各変動パターンの発生条件の明確化、および2次元あるいは3次元シミュレーションによる現象の再現計算などを進めていく必要がある。

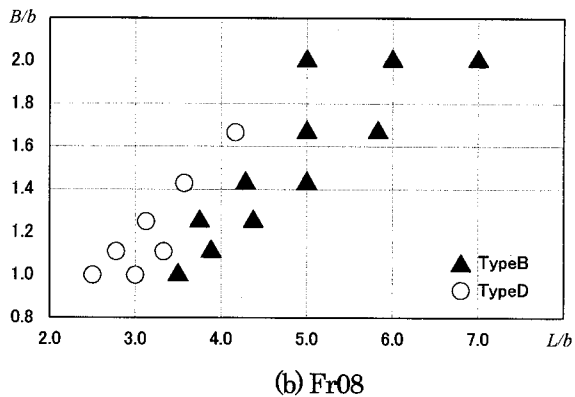
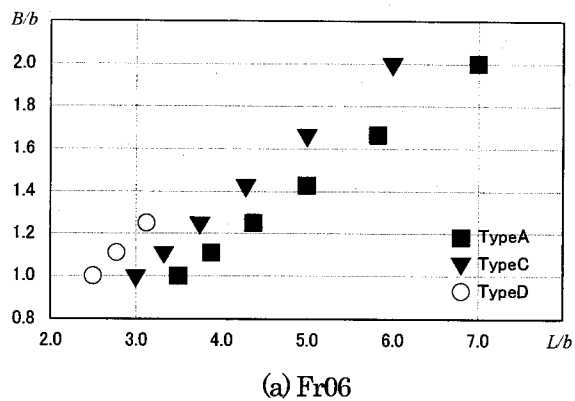


図-13 凹部形状と水面振動の Type の関係

参考文献

- 1) 木村一郎, 細田尚, 友近文志: 死水域を伴う開水路流れの非定常振動特性, 水工学論文集, 第38巻, pp.425-430, 1994.
- 2) 木村一郎, 細田尚, 村本嘉雄, 安永良: 開水路流れにおける死水域内の流体振動に及ぼす水理パラメータの効果, 水工学論文集, 第39巻, pp.779-784, 1995.
- 3) 瀬津家久, 鬼束幸樹, 高橋俊介, 矢野勝士: 側壁に凹部を有する開水路乱流の組織構造に及ぼすフルード数の効果, 土木学会論文集, No.712/II-60, pp.1-10, 2003.
- 4) 瀬津家久, 矢野勝士, 光成洋二: 開水路流れにおける上流ワンドが下流ワンド周辺の質量・運動量交換特性に及ぼす影響に関する研究, 応用力学論文集, Vol. 6, pp.951-958, 2003.
- 5) 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.
- 6) 藤田一郎, 椿涼太: 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, 水工学論文集, 第49巻, pp.535-540, 2005.
- 7) 門谷健, 藤田一郎, 椿涼太, 松原隆幸: 水面変動を考慮したLESによる側岸凹部を有する開水路流れの解析, 水工学論文集, 第51巻, pp.655-660, 2007.
- 8) 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.

- 9) Tsubaki, R. and Fujita, I. :Stereoscopic Measurement of a
Fluctuating Free Surface with Discontinuities, Measurement
Science and Technology, Vol.16, pp.1894-1902, 2005.
- 10) Rossiter, J.E.: Wind-tunnel experiments on the flow over
rectangular cavities at subsonic and transonic speeds,

Aeronautical Research Council Reports and Memoranda,
No.3438, 1964.

- 11) Gharib, M. and Roshko, A.: The Effect of Flow Oscillation
on Cavity Drag, Journal of Fluid Mechanics, Vol.177,
pp.501-530, 1987.

(2007 年 4 月 12 日 受付)