

開水路サイドキャビティ流れにおける 水面振動の発生要因に関する検討

AN EXAMINATION OF DRIVING FORCE OF WATER
SURFACE OSCILLATION AT OPEN-CHANNEL SIDE CAVITY FLOW

門谷健¹・藤田一郎²・椿涼太³
Ken KADOTANI, Ichiro FUJITA and Ryota TSUBAKI

¹学生員 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)

²正会員 学術博 神戸大学教授 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³正会員 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)

It is well known that a surface oscillation is generated by installing a rectangular side-cavity structure to an open channel flow. The intensity of oscillation increases greatly as the increase of the Froude number. In addition, the type of oscillation changes easily depending on the shape of side-cavity and the width of ratio of the main channel to the depth of side-cavity. In our previous experiments, we categorized the oscillation pattern into four types. In the present study, the space-time correlation relations between the surface elevation and the velocity component at the inlet of the side-cavity is examined by the large eddy simulation that allows the water surface variation. It was found that the type of oscillation is largely divided into two types, i.e. with and without a strong depth-velocity correlation.

Key Words : Side-Cavity, surface oscillation, open channel, LES, POD, 3D flow structure

1. まえがき

都市中小河川において、アクセシビリティなどの親水性を高める為に階段等を設置する場合、流水断面積を阻害しないように側岸に凹部を設けて親水施設を設置することが多い。このような側岸凹部においては、洪水時の様な大流量時に予期せぬ水面変動が発生することが知られており^{1,6)}、従って、河道の合理的な設計のためにはこのような水面変動の特性を予め予測しておくことが重要となる。このような観点から、これまで著者らは二次元浅水流モデルに基づく解析を行い、いくつかの重要な知見を得ている^{7,8)}。

側岸に凹部を有する場合はワンド周辺の流れとも見なせ、実験的研究や数値シミュレーションによる検討も行われているが^{9,10)}、上述のような現象が問題となるのは比較的小規模で勾配の急な都市河川でしかも側岸凹部の規模が主流の幅に対して無視できず、水深に比して主流幅が小さい為に流れの三次元性が相対的に強くなる流れ場である。従って、水深平均場を対象とする二次元浅水流近似に基づく解析では詳細な水面変動を再現できない可能

性がある。側岸凹部流れの三次元解析については、矢野・榎津^{11,12)}がLES解析により凹部周辺で発生する組織乱流渦のシミュレーションやVOF法を取り入れた数値解析ならびにPIVにより検討を行い、実験で現れた水面変動に関係すると考えられる組織的な乱流渦が数値解析で再現できることを確認している。

本研究では、ステレオ画像計測によって得られた水面変動の振動モード解析のデータ^{13,14)}を用いて水面変動パターンによる分類を試みるとともに、LESによる三次元数値解析¹⁵⁾の妥当性を検証した。また数値解析より得られた三次元データを用いて、水面変動と内部流れ構造の相関を求めることで水面変動の発生要因に関する検討を行った。

2. 実験結果

(1) 実験方法

実験では2台のCCDカメラで撮影されたステレオ画像を用いて、水面形・表面流速同時計測¹⁴⁾を行った。実験条件は、凹部を設置しない状態で水深(h)が4cm、主流幅

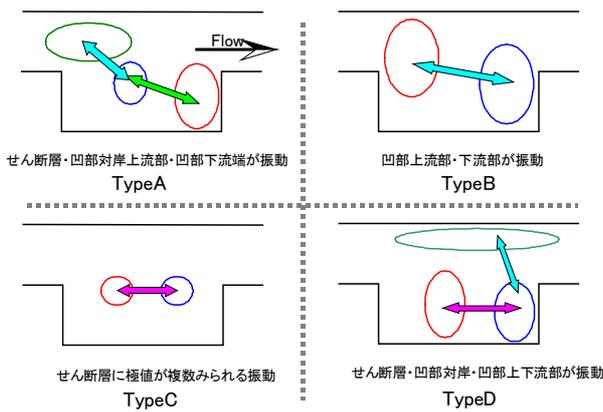


図-1 水面変動に現れるタイプ別パターン

(B)が10cm, フルード数が $Fr=0.6$ および $Fr=0.8$ となる水理条件下において, 凹部長(L)を25, 30, 35cm, 凹部奥行長(b)を5, 6, 7, 8, 9, 10cmと変化させ, 計36ケースにおいてステレオ画像計測を行った. 計測の詳細については, 藤田ら¹⁴⁾を参照されたい.

(2) 実験結果の水面変動強度による分類

藤田ら¹⁴⁾は, ステレオ画像計測によって結果得られた水面変動を, 水面変動強度を基準にして図-1に示すような4つのパターンに分類することを報告している. 各タイプの特徴について以下に示す.

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.

すべての実験結果を4つのタイプによって整理した結果を, 図-2に示す. Type A, TypeBは比較的凹部のアスペクト比(凹部長 L /凹部奥行長 b)の大きいケースに見られ, 凹部上・下流部方向のセイシュ的な振動が見られる. 一方アスペクト比の小さいケースにおいては, 流下方向の振動に加えて, 凹部側岸と対岸側の横断方向の振動も見られる. この要因は凹部内で強い循環流が形成され, それに伴う変動が生じたためと考えられる. Type Cでは強い水面変動は現れていないが, これはType AからType Dへの遷移の過程で, 強い水面変動を起こす条件から外れるためであると考えられる.

3. 実験値と数値解析解の比較

(1) 数値解析概要

対象となる流れ場は自由水面を有し, 三次元性が卓越

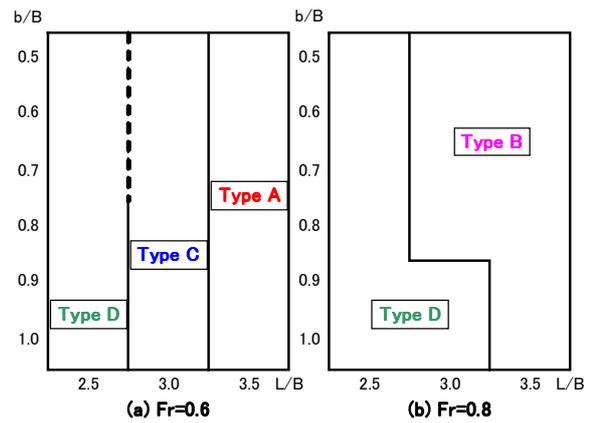


図-2 水面変動のタイプによる分類

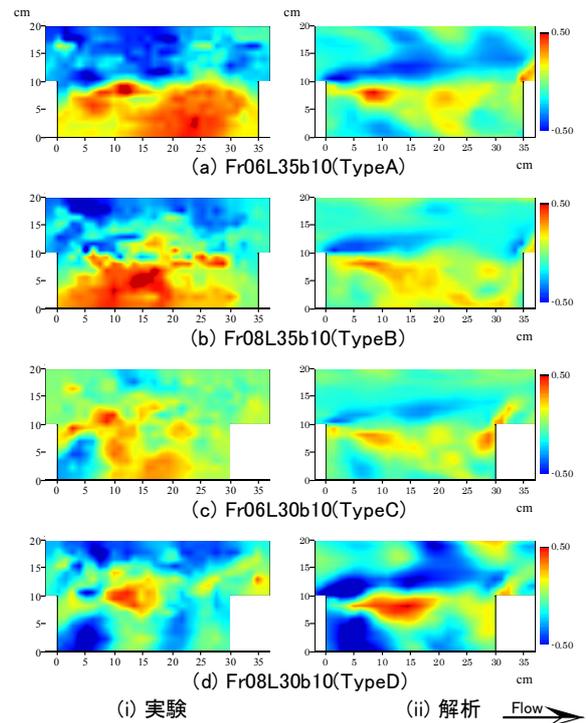


図-3 水深(h)と流下方向流速(u)の相関

するため, 自由水面を取り扱うことのできる密度関数を用いた三次元LES解析を行った. 解析方法については門谷ら¹⁵⁾に詳述している. 水理条件は実験において各タイプの特徴を代表的に示したケースに合わせて, 解析を行った. タイプ別の条件を以下に示す.

Type A : $Fr=0.6, L=35\text{cm}, b=10\text{cm}$

Type B : $Fr=0.8, L=35\text{cm}, b=10\text{cm}$

Type C : $Fr=0.6, L=30\text{cm}, b=10\text{cm}$

Type D : $Fr=0.8, L=30\text{cm}, b=10\text{cm}$

(2) 水面変動と流速変動の相関特性

藤田ら¹⁴⁾の提案した実験方法では, 瞬時の水面形と表面流速を同時に測定することが可能であるため, 水面変動と流速変動の平面的な相関値(C_p)を式(1)から得ること

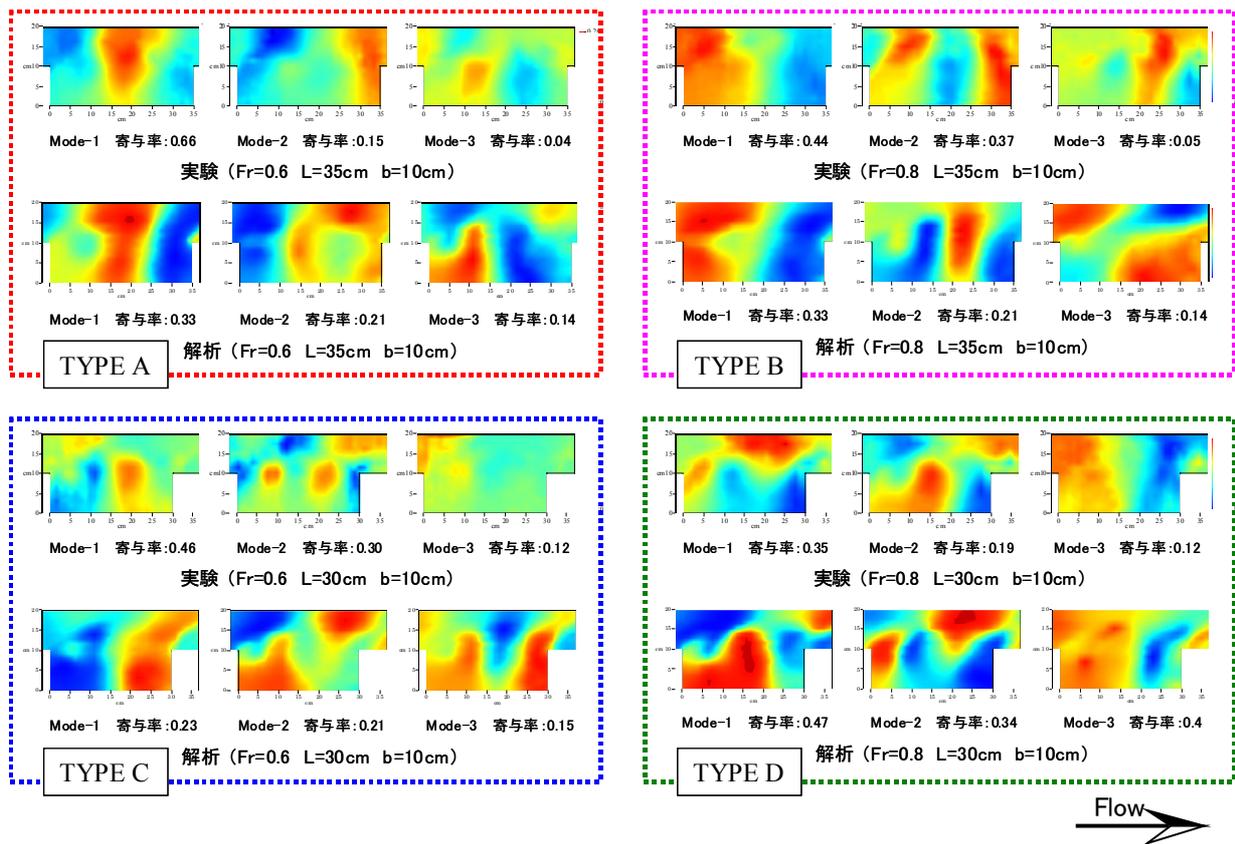


図-4 実験および解析結果のPODによる水面変動パターンの比較

ができる。

$$C_r(\mathbf{x}) = \frac{\sum [h(t, \mathbf{x}) - \bar{h}(\mathbf{x})][u(t, \mathbf{x}) - \bar{u}(\mathbf{x})]}{\sqrt{\sum [h(t, \mathbf{x}) - \bar{h}(\mathbf{x})]^2} \cdot \sqrt{\sum [u(t, \mathbf{x}) - \bar{u}(\mathbf{x})]^2}} \quad (1)$$

ここに、 \mathbf{x} は平面座標 $\mathbf{x}=(x,y)$ を表す。

図-3に、実験および解析に対する C_r の分布を示す。実験結果については、Type A、Type Bにおいては凹部内部で高い正の相関を示しており逆に主流部では負の相関を示している。一方Type Dでは、せん断層中央付近で高い相関特性を示していることが確認できる。Type CはType AとType Dの中間的な分布を示しており、遷移的な状態を表している。一方数値解析結果は、必ずしも実験値を完全に再現できているわけではないが、実験における誤差等を考慮すれば概ね良好にその傾向を示しているといえる。すなわちType A、Type Bでは凹部内で正の相関を示すのに対して、Type Dではせん断層中央付近で高い正の相関特性を示すことが再現されている。

(3) 水面変動のPOD解析

ここでは実験および解析で得られた非定常な二次元水面形にPOD(Proper Orthogonal Decomposition:固有直交関数展開)解析を適用し考察を行う。図-4に各ケースにおけるPOD解析結果の第3モードまでの変動パターンを示す。コンターの赤および青の濃い部分は逆位相となって

おり、どちらも水面変動の各モードの腹に相当している。緑の部分はほとんど振動せず各モードの節に相当する。以下、実験値と解析値について考慮する。

Type A：実験・解析ともに第1モードで凹部設置域の中心とその上・下流の振動を示していることがわかる。また、第2モードでは主流部で上・下流の振動が発生していることがわかる。第3モードでは特に、凹部のせん断層付近に振動が現れている。

Type B：第1モードは実験・解析ともに、凹部設置域全体にわたって上・下流の振動が現れている。解析の第2モードは、実験の第3モードと同じパターンを示しており、逆に実験の第2モードが解析の第3モードに近いパターンを示している。

Type C：第1モードは実験・解析ともに、凹部内での振動パターンを示している。第2モードでは、解析では凹部側上流と主流部側下流付近を同位相とする振動が現れている。実験では第1・第2のどちらのモードにおいてもせん断層付近に強い値が見られるが、これは水面変動が相対的に微小なため、ステレオ画像中心付近の振動が捕らえられやすくなっているためであると考えられる。

Type D：第1モードと第2モードが実験と解析で入れ替わっているが、どちらのパターンも非常によく一致している。この二つのモードは、周期が等しく相補的な振動を起こしているものと考えられる。

表-1 POD解析結果の振動周期 (s)

		実験		解析	
		Mode1	Mode2	Mode1	Mode2
Type A	1st. Peak	2.27	1.19	1.18	1.18
	2nd. Peak	1.18	2.27	2.13	2.13
Type B	1st.	1.96	1.96	1.92	0.60
	2nd.	2.27	2.27	1.43	0.85
Type C	1st.	0.62	0.63	2.04	0.63
	2nd.	0.99	-----	0.63	-----
Type D	1st.	0.71	0.71	0.75	0.75
	2nd.	0.56	0.56	-----	-----

(4) POD変動周期による検討

ここでは、POD解析結果の周期特性についてセイシユやRosshiter¹⁶⁾の半経験式と比較し考察を行う。各式の詳細は藤田ら¹⁴⁾を参照されたい。表-1に実験および解析結果の第1, 第2モードの卓越周期の上位二つの値を示す。

Type A：実験の第2モード, 解析の両モードで約 $T=1.18s$ の周期が卓越している。これは、凹部長さ(L)を基準とする閉鎖性セイシユの周期 $T=1.12s$ に相当する周期となっている。また、 L を基準とする半閉鎖性セイシユ($n=2$)の周期 $T=2.23s$ に近い周期もみられ、凹部上下流方向の振動が起こっていることがわかる。

Type B：実験の両モード, 解析の第1モードにおいてピークとなっている振動は、半閉鎖性セイシユの周期 $T=2.23s$ に近く、図-4から考えると半閉鎖性の振動が起こっていると考えられる。実験の両モードでは、Rosshiterの半経験式($n=1$)から得られる周期 $T=2.37s$ に比較的近い値も現れている。

Type C：卓越周期は、約 $T=0.63s$ となっている。これは、凹部横断方向長さ($B+b$)を基準とする閉鎖性セイシユの周期： $T=0.64s$ に近い値および、 L を基準とする半閉鎖性のセイシユ($n=2$)の周期 $T=0.64s$ と一致し、横断方向の振動および流下方向の振動が重なっていると考えられる。

Type D：実験で $T=0.71s$, 解析で $T=0.75s$ という周期が、非常に卓越しており、これは凹部長さを基準とするセイシユの周期とはあまり一致していないが、凹部幅を基準とする $T=0.63s$ のセイシユや凹部側壁の中心と凹部対岸の上流または下流を結ぶ対角線の長さ $0.25m$ を基準長さとするセイシユの振動 $T=0.80s$ に比較的近い。POD変動パターンを見ても凹部設置区間の上流側と下流側の二つの領域でそれぞれ振動を起こしていることがわかる。第1モードと第2モードの時間変動の位相は $\pi/2$ ずれており、実際の水面変動では凹部を設置した部分の凹部下流側をおよび、主流部上流側を中心とする二つの循環振動として表れている。

4. 内部流れ構造

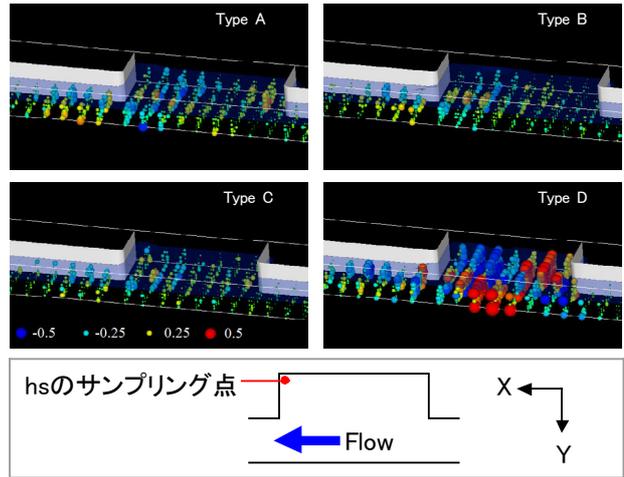


図-5 凹部下流端水深 h_s と流下速度 u の相関図

(1) 凹部最下流端水深と流下方向速度の相関特性

以上で見てきたように、数値解析結果はある程度実験結果を再現できていると考えることができる。以下では、解析結果を用いて、水面変動と内部流れ構造について考察を行う。それは、実験では三次元的な流れ場の非定常な空間計測を行うことが困難なためである。水面変動のサンプリング点は、凹部内で最も平均水深が高く変動も大きくなる¹⁵⁾凹部下流端とした。

解析は三次元的なデータを持っているため、凹部下流端水深(h_s)と速度やスカラー(f)との相関係数を以下の式で求めることができる。

$$C_r(dT, \mathbf{x}) = \frac{\sum [h_s(t) - \bar{h}_s][f(t-dT, \mathbf{x}) - \bar{f}(dT, \mathbf{x})]}{\sqrt{\sum [h_s(t) - \bar{h}_s]^2} \cdot \sqrt{\sum [f(t-dT, \mathbf{x}) - \bar{f}(dT, \mathbf{x})]^2}} \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{x} は空間座標 $\mathbf{x}=(x, y, z)$, dT は相関を求める h_s と f との時間の差を表す。

図-5に同時刻($dT=0$)の h_s - u 相関を三次元的にプロットしたものを示す。赤は正の相関(Max:0.5), 青は負の相関(Min:-0.5), 球の大きさは相関値の絶対値を表す。ただし主流の流れ方向は図面上で右から左であり、 u は左向きが正である。Type A, Type B, Type Cが比較的相関が低いものに対して、Type Dでは凹部全体的に高い相関を示していることがわかる。これはType Dの変動モードが他のケースとは大きく異なることを示唆している。

(2) 相関特性の時空間分布

ここでは、各タイプを代表してType BとType Dの比較を行う。図-6, 図-7に dT を変化させたときの h_s と流下方向流速成分(u)および圧力(p)との相関係数をプロットした図を示す。どちらの変数においても、図-6のType Bよりも図-7のType Dの方が高い相関特性を示しており、成分別に見ると水深と関係の深い p との相関が最も高くなっている。

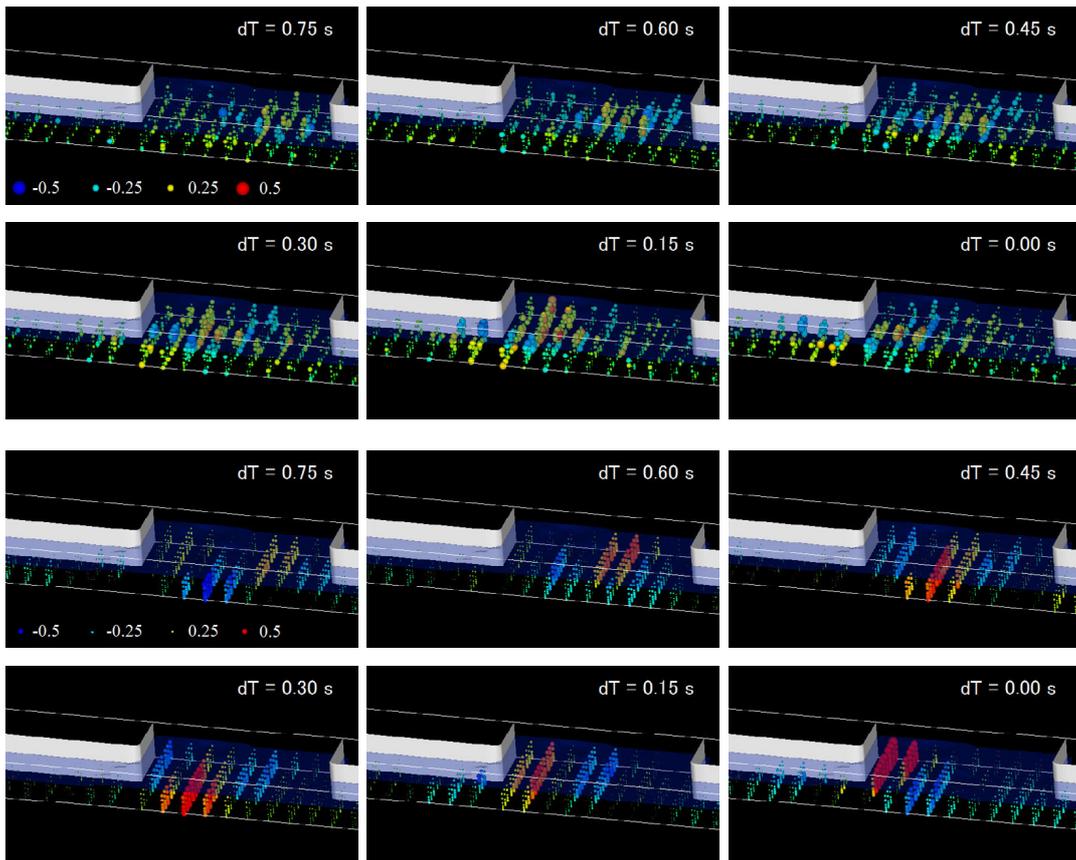


図-6 dT を変化させたときの $hs-u$ (上二段), $hs-p$ (下二段) 相関係数プロット (Type B)

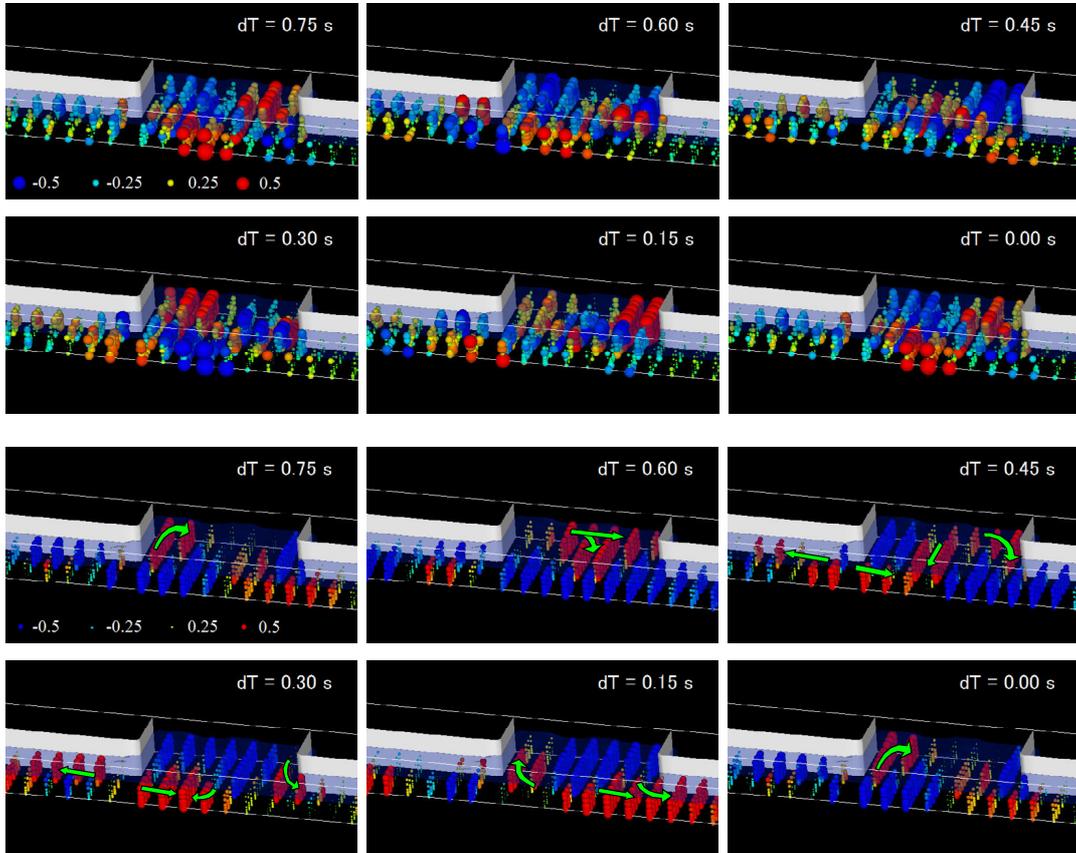


図-7 dT を変化させたときの $hs-u$ (上二段), $hs-p$ (下二段) 相関係数プロット (Type D)

Type Bでは、 u 、 p どちらの図からも相関の高い部分を表す赤や黄色の部分が dT が0に近づくにつれて、凹部の下流端に近づくことがわかる。これは半閉鎖性のセイシュの進行速度にほぼ一致する。また、 p の図では、相関の高い部分が横断方向にも振動しながら進行していることから、横断方向のセイシュも発生していると考えられる。また u の図では、圧力が高くなると同時に底面付近での正の相関値が高くなっており、底面付近から流入している凹部内に流れ場によって、水面変動が起こっていることがわかる。

Type Dでは、すべての成分において dT が表-1の水面変動周期 $T=0.75s$ の倍数に等しい、すなわち位相が等しくなるとき、ほぼ同じ相関特性分布を示した。図-7では、 $dT=0.00s$ および $dT=0.75s$ の図ではほぼ近い位相となっており、相関特性分布も似たものになっていることがわかる。また、水面変動の逆位相に近い $dT=0.30s$ と、 $dT=0.00s$ を比較すると各成分の相関特性分布も逆位相となっている。このことから凹部内で水面変動と速度場に強い共振が起こっているため、速度場も周期的な振動を起こしていると考えられる。また p の分布図から、水面の高い部分、すなわち圧力と水深の正の相関を示す赤い部分が図-7の h_s - p 相関の図で矢印で示すように、凹部下流側を中心に時計回りに循環していることがわかる。凹部下流端から凹部内にまわり込んで凹部中間付近から凹部上流方向と対岸方向に分かれ、凹部上流側を中心としてそれぞれ時計回り、反時計回りに主流部上流方向へまわり込んでいく水面の動きも確認できる。このとき、対岸へ向かった波の山は下流からさかのぼってきた波と重なり、凹部の対岸で大きな水面変動を起こしている。

以上の検討から凹部における振動は、流れの凹部への流入が主要因となって水面変動場と共振するもの(Type D)と、それ以外のものに大別できることがわかった。

5. あとがき

これまで、実験等で確認されてきた水理条件の異なる凹部流れによる水面変動特性を、数値解析によってある程度再現できることがわかった。Type AとType C、Type BとType Dを見比べてもわかるとおり、比較的僅かな凹部形状の違いで大きく変化した。特にType Dでは強い振動が発生し、これまで一般的に水面変動の大きくなることの知られていた凹部下流端のみならず、凹部の対岸側にも強い水面変動が見られた。また、Type Dでは水面変動と内部の流れ場との相関特性が高くなることがわかった。このことから水面変動が流れ場との強い共振を起こしていると考えられる。このような水面変動は、実河川においては災害要因となる恐れがあり、河川設計において重要な意味を持つと考えられる。今後の課題としては、凹部長さをより詳細に変化させて形状による水面変動の

変化を捉えるため実験や解析を行い、強い水面変動の発生条件等をより詳細に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 藤田一郎・小澤純・長浜弘典：直線水路に設置された側岸凹部が主流に与える影響について，応用力学論文集，Vol.4，pp.549-556，2001.
- 2) 藤田一郎・椿涼太：直線水路に設置された側岸凹部が主流に与える影響について，水工学論文集，46巻，pp.821-826，2002.
- 3) 木村一郎・細田尚・安永良・村本嘉雄：開水路流れ死水域周辺の水面振動・流体混合特性，水工学論文集，第41巻，pp.711-716，1997.
- 4) Kimura, I. and Hosoda, T.: Fundamental properties of flows in open channel with dead zone, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.123, pp.98-107, 1997.
- 5) 椿涼太・藤田一郎・中野淳：湾曲部に設けた側岸凹部流れに関する研究，水工学論文集，第48巻，pp.59-864，2004.
- 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.969-977，2004.
- 7) Tsubaki, R. and Fujita, I.: Estimation of flow past a side cavity using a finite volume method with an unstructured grid, *Proceedings of the Sixth International Summer Symposium*, p.149-152, 2004.
- 8) 椿涼太・藤田一郎：非構造格子浅水流数値モデル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50巻，pp.763-768，2006.
- 9) 中川研造・河原能久・玉井信行：ワンド内の流れの水理特性に関する実験的研究，水工学論文集，第39巻，pp.595-600，1995.
- 10) 禰津家久・鬼束幸樹・池谷和哉：PIVを用いた開水路凹部流れにおける水平渦構造の解析，土木学会論文集，No.677/II-55，pp.53-61，2001.
- 11) 禰津家久・鬼束幸樹・矢野勝士：側壁に凹部を有する開水路流れのLES解析，水工学論文集，第46巻，pp.403-408，2002.
- 12) 矢野勝士・禰津家久：開水路ながれにおける側壁凹部流れのPIV計測およびLES計算，応用力学論文集，Vol.7，pp.961-968，2004.
- 13) 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.
- 14) 藤田一郎・松原隆幸・椿涼太：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，応用力学論文集，Vol.10，pp.813-824，2007.
- 15) 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.
- 16) 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.

(2007. 9. 30受付)