開水路側岸凹部のアスペクト比の違いが三次元流れ構造に及ぼす影響

Effects of aspect ratio of open-channel side cavity on three-dimensional flow structure

門谷 健*・藤田 一郎**・椿 涼太*** KADOTANI Ken, FUJITA Ichiro and TSUBAKI Ryota

*工修 学生 神戸大学大学院工学研究科博士後期課程(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1) ** 学術博 神戸大学教授 神戸大学大学院工学研究科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1) *** 博(工)研究員 名古屋大学大学院工学研究科(〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

By installing a side cavity section to a relatively narrow open-channel flow, water surface oscillation is generated within the side cavity and main channel. It has been found that there exist several modes of oscillation that depends on the aspect ratio and the Froude number by the authors; however, the three-dimensional flow structure has not been clarified so far due to the complexity of flow. In this study, by using a LES model capable to represent surface oscillation, three-dimensional unsteady flow structures and the mass transfer between the side cavity section and the main stream are examined. It was found that for a mode showing a strong correlation between surface and velocity variations, the mass exchange at the side cavity zone becomes significant. It was also made clear that as the decrease of the side cavity width, the three dimensionality of the flow becomes evident.

Key Words: side-cavity flow, LES, 3D flow structure, mass exchange

1. はじめに

河川等の開水路側岸に主流部方向長さに対して比較的 奥行の深い凹部を設置したとき、凹部内に循環渦が発生す ることが知られている.藤田ら¹⁾は実験において直線水路 の側岸に凹部を設置したときに、凹部上流から剥離した流 れの再付着点が凹部内にあるときは大きな循環流が発生 せず流出時は急縮部の特徴が現れるが、剥離流が側岸に再 付着せず凹部下流端に間で達するケースでは凹部内に強 い循環流が発生することを確認している.またどのケース においても凹部下流端で主流部よりも水深が高くなる堰 上げ効果が見られたが、凹部長さが長くなるほど堰上げ水 深が大きくなることも示している.

木村・細田ら²⁵⁹は,正方形の凹部を設置すると,水面のセイシュ(自由水面振動)が起こるケースがあることを実験および二次元浅水流解析モデルによって確認している. このとき,せん断不安定による渦が凹部内に発生するセイシュと共鳴したときに大規模渦へと発達することがあり, セイシュの発生と水面振動の振幅はフルード数に依存することなどを指摘している.

都市河川にこのような親水護岸を設置した場合の災害 対策としては水面の堰上げや水面変動による越水対策が 重要であると考えられる.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 ことが必要となる.このような観点から,これまで藤田・ 椿ら⁶⁹は非構造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.

側岸に凹部を有する場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も行われているが ¹⁰⁻¹³,上述のような現象が問題となるのは側岸凹部の規模 が主流の幅に対して無視できなくなる比較的小規模で勾 配の急な都市河川である.このような場合には,洪水時の 水深に対する水路幅が相対的に小さくなるため,流れの三 次元性が相対的に強くなるものと考えられる.従って,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.また,側岸凹部と主流との質量や 運動量の交換は洪水時における浮遊砂や浮遊物の堆積な どを考える上でも重要だが,二次元モデルで詳細な流れ場 の特徴を調べることは困難であり限界がある.

側岸凹部流れの三次元解析については、禰津ら¹⁴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 ションを行っているが、低フルード数(Fr=0.1)の流れが対 象であるため水面変動の影響は無視している.また、矢 野・禰津¹⁵は同様の側岸凹部流れを LES に VOF 法を取り 入れた数値解析ならびに PIV により検討しているが、やは り低フルード数(Fr=0.27)の流れが対象となっている.

水面変動そのものに対する実験では藤田・椿がステレオ 撮影画像を用いて、ステレオ水面形計測を行い水面変動特 性に関する考察を行っている¹⁰,また藤田・松原ら¹⁷はス テレオ水面形計測と水面流速のPIVの同時計測を行い,主 流幅に対する凹部の奥行きやアスペクト比,フルード数な どを変化させたときの水面変動強度,水面変動のPOD

(Proper Orthogonal Decomposition)解析,水面形と表面流 速の相互相関などにより水面変動パターンの考察を行っ ている.門谷らは、三次元 LES 解析¹⁸⁾によって松原らの 実験結果の再現を行っている¹⁹⁾.この結果,ある凹部形状 において強い水面振動が発生することが確認され、このと き水面が周期的な振動を起こすとともに、凹部内の流速も 周期的な変動を起こしていることが確認されている.

本研究では、三次元 LES 解析によって得られた三次元 速度データから凹部のアスペクト比や水深と凹部奥行を 変化させたときの流れ特性について考察を行う.

2. 解析条件

流れの基礎方程式には以下のグリッドスケールで粗視 化された連続式と運動方程式を用いる¹⁸⁾.

 $\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(2(\nu + \nu_e) D_{ij} \right) + f_i$$
(2)

ここにu:速度, ρ :密度,p:圧力,v:動粘性係数, v_e : SGS モデルに基づく渦粘性係数, D_{ij} : ひずみ速度テンソ ル,:時間,f:単位質量あたりの外力である.ただし (i = j = 1,2,3)であり,空間3方向を表す.本研究では,圧 力解法のひとつである Fractional Step 法に密度関数法を適 用した LES(Large Eddy Simulation)を用いる.格子配置はス タッガード格子とし、対流項は2次精度中心差分,密度関 数の移流には風上差分を用いて離散化する. LES の乱流モ デルには標準 Smagorinsky モデルを用いる.

本研究では、密度関数を用いた自由水面を持つ開水路流 れを取り扱っており、水路底面および水路側壁は固定境界 で、境界条件としてノンスリップ条件を与える.水路の上 側の境界に関しては実際の流れでは自由境界となるが、水 路全体にわたって上部境界付近を液相に対し運動量の微 小な気相が占めていることから,水面変形に対する上部境 界の影響は小さいものとして固定境界を用いる. 上部境界 条件にはスリップ条件を与える. 流入・流出境界条件につ いては周期境界条件を用いる.この理由としては、本研究 の解析対象は自由水面を持つ常流でかつ非定常な流れで あるため、流出境界で一定範囲の変動幅で非定常な値を持 つ水深の条件, すなわち適切な圧力条件を与える必要があ り,また流入部では発達した非定常の流速を境界条件とし て与える必要がある.以上の理由から,流入・流出部の境 界条件を周期境界とした.ただし、凹部付近での水面変動 が流入・流出部へ与える影響がなるべく少なくなるように

凹部設置部分に対し解析範囲が4倍以上長くなるよう配 慮した.運動方程式(2.2)の外力項fでは、水深方向の重力 加速度、流下方向への体積力に対応する加速度を与える.

本研究では実験値と数値解析結果との比較を行うことを目的の一つとしている.このため、実験で特に明確な水面変動パターンが得られたケースを中心に表-1に示すようなケースについて解析を行った.格子サイズは Δ x=1.0cm(流下方向に155格子)、 Δ y=0.4cm(主流部横断方向に25格子、凹部内横断方向に15-25格子)、 Δ z=(不等間隔格子、液相約28格子、気相12格子)とした.また、水深はすべてのケースについて、4cmとする.また Δ y=1.0cmとしていくつかのケースについても解析を行った.

表-1 解析ケース [-]:格子数

Casa	フルード数	凹部長さ	凹部奥行	主流幅	平均水深
Case	Fr	L(cm)	<i>b</i> (cm)	B(cm)	H(cm)
F06L25b10		25 [25]			
F06L30b10	0.6	30 [30]			
F06L35b10		35 [35]	10		
F08L25b10		25 [25]	[25]		
F08L30b10	0.8	30 [30]		10	4
F08L35b10		35 [35]		[25]	[28]
F06L30b06	0.6	30 [30]			
F06L35b06	0.0	35 [35]	6		
F08L30b06	0.8	30 [30]	[15]		
F08L35b06	0.8	35 [35]			

3. 水面変動特性

藤田・松原らの実験¹⁷は、ステレオ画像による水面形お よび PIV による表面流速の同時計測であり、局所的な水面 形と流速の時系列データから相関分布を求めることがで きる.図-1 に F08L35b10 と F08L30b10 のケースについて、 実験結果および解析結果から求めた水面形と流下方向速 度 u の相関分布を示す.この2つのケースはわずかなアス ペクト比の違いにもかかわらず明確な違いが見られた¹⁹⁾.

図-1(a)はF08L35b10 ケースについての比較であるが,実 験では主流部で負の相関, 凹部内で正の相関があらわれて いる.特に凹部中央のせん断層付近では強い正の相関を示 している. 解析においても同様の傾向がみられ,特にせん 断層付近で高い相関特性を示している. この様な傾向が現 れる理由としては以下のことが考えられる.一般に凹部内 では主流が凹部下流端に衝突することにより下流端から 凹部側岸に沿った逆流が発生し, 凹部下流付近で循環渦が 形成される. 今回解析を行った範囲においては、どのケー スも凹部内で下流から上流に向かう逆流が確認でき, 流速 に対して凹部長さが比較的短いときには、逆流が上流付近 にまで達する.一方凹部流れにおいては上流からはく離渦 が発生し、せん断層で発達しながら流下して行く. 渦が通 過するときに、 せん断層の主流側の流速は相対的に加速さ れることになり, 凹部内から主流部への水面が相対的に低 下する. また渦が通過した後, 主流部から凹部内への流入 が発生し、この流れが逆流と衝突することにより水面の上 昇がおこると考えられる.図-1(a)と同様の相関特性は, F06L35b10のケースなどでも見られた. これらのケースに ついて、POD(Proper Orthogonal Decomposition)解析を行い、水面変動の周期特性を検討した結果、凹部長さや水路幅などを代表長さとする閉鎖性・半閉鎖性水域のセイシュの周期に近いということがわかっている^{17,19}.このことから、これらのケースの水面変動では複数方向のセイシュの成分が含まれていると考えられる.

図-1(b)では実験および解析ともに、凹部中央付近で高い 正の相関があらわれ、その周囲では負の相関となっている. このケースでは凹部内全体で、強い周期的な水面変動の発 生がみられた. POD 解析の結果,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いることがわかった ²⁰⁾, これは凹部長さを基準とするセイシュの周期 T=0.96s 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のセイシュ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 イシュの振動 T=0.80s に比較的近い. POD 変動パターンか らは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確認できた. 第1モードと 第2モードの時間変動の位相はπ/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. 水面変動の最も大きくなる凹部下流端最奥部の水面変動 と、内部流速の相関係数を取ってみると、凹部設置区間全 体で高い相関特性があらわれた19. このことから、このケ ースでは水面変動と流速変動が共振を起こしていると考 えられる.この強い周期振動はF08L25b10のケースでも確 認できた.



図-1 局所水深と表面流速の相関係数による実験値およ び解析値の比較

図-2 に解析結果の凹部下流端最奥部における水深(h)の 時系列プロットを示す.実験,解析結果ともにどのケース においても、凹部下流端で変動強度が大きくなっており、 堰上げ効果によって時間平均水深も凹部下流端で最大値 をとることから¹⁹,瞬間・局所的な水深の最大高さは凹部 全体の平均水深に対して高くなると考えられる.よって凹 部内の水面変動を考える場合,この凹部下流端の最奥部で の水深について考察を行うことが最も重要となる.図-2上 段のグラフはフルード数が 0.6、凹部奥行が 10cm のケー スの水面変動である. いずれも変動幅は小さいものの正弦 関数的な周期変動を起こしていることがわかる. 中段のグ ラフは、フルード数が 0.8、凹部奥行が 10cm のケースの 水面変動である. こちらも周期的な振動を示しているが、 全体的にフルード数 0.6 のケースに比較して振幅が大きく なっていることがわかる. 特に凹部長さ F08L30b10 のケー スでは他のケースよりも変動強度が大きくなっているが、 変動周期は他のケースに比べてあまり違いは見られない. 下段のグラフは、凹部奥行が 6cm のケースについての水 面変動プロットである. これらのケースでは周期的な変動 成分は見られるものの、全体的に複雑な変動を示している. これは複数の変動周期が重なり合ったもの、さらに流れの 不規則な乱れ成分の影響を受けていることが考えられる.



F08L35b10, F08L30b10 のケースについて, 凹部下流端 水深を基準に速度場のデータに対して条件付平均操作を 行った. すなわち時間平均値よりも水面が高いとき(*Δh* Positive), 全時間平均(Average), 平均値よりも水面が低い ときの(*Δh* Negative)の水平断面ベクトル図(*z*=2cm)および, 三次元流線図を図-3 に示す. (a)の F08L35b10 のケースで は, どの条件でもあまり変化は見られない. このことから も凹部下流端の水深と内部流れ構造との直接的な相関は 小さいということを確認することができる.

図-3(b)の F08L30b10 のケースにおいては、凹部下流端の 水深の状態によって、流れ構造が大きく変化していること が確認できる. 流線から(b1)の凹部下流端水深が平均値よ りも大きいときの流れ構造は、凹部下流付近で強い循環渦 が形成されていることが確認できる.また凹部全体にわた る循環渦も形成されていることがわかる.このとき、ベク トル図から z=2cm 付近の断面では、凹部と主流部の境界 (y=10cm)の上流部および下流部で主流部から凹部内への 流入が起こっており、凹部の中央付近で流出が起こってい ることが確認できる.



図-3 速度場の条件付平均を取った場合の水面断面流速分布(底面からの高さ2cm),および流線の比較

下流端水深が,平均値よりも下回るときの内部流れ構造 は(b3)から,凹部下流付近および凹部全体的な循環構造は 見られず,凹部下流端から凹部中心付近までの循環構造が 形成されていることが確認できる.このとき水平断面ベク トル図では(b1)のときとは逆で,凹部上流付近および凹部 下流付近で流出が起こり,凹部中央付近で流入が発生して いることが確認できる.これははく離渦が発達して大規模



(a) F08L35b10



(b) F08L30b10 図4 仮想トレーサを用いた凹部流れの可視化

渦に成長するということあらわしていると考えられ、この ケースについて仮想トレーサを用いて流れの可視化を行 った図-4(b)においても、この大規模渦構造を確認する事が できる.また、この大規模渦の発生頻度は水面変動の周期 と一致することからも、速度場と水面変動が強い共振を起 こしていると考えることができる.

4. 凹部内外の質量交換特性

図4 では仮想トレーサを用いて流れの可視化を行うこ とで、せん断層付近の渦構造を視覚的にとらえることがで きる.(a)および(b)の違いは、(a)のケースではせん断層に 複数の渦が見られるが、(b)ケースでは大きな一つの渦が発 達している点である.この大きな渦が、凹部内の流れ場全 体に周期的な速度変動を及ぼしていると考えられる.本研 究では初期条件として凹部内の三次元空間に10万個の仮 想トレーサを配置している.このトレーサの凹部内への残 留率を見ることによって、間接的に凹部内外の質量交換特 性を確認することができる.図-5(a)に凹部奥行10cmの ケース、(b)に凹部奥行6cmのケースについて示す.(a) の図では、F08L30b10およびF08L25b10の水面および速度 場の強い振動を起すケースで単位時間当たりのトレーサ の減少が大きくなっていることがわかる.これはせん断層 で発達した大規模渦が凹部内奥からのトレーサの流出を



図-5 凹部内仮想トレーサ残留率の時間変化

促進しているためであると考えられる. このことは(a)の図 において上記2ケース以外のケースではトレーサの残留 率は単調減少であるのに対して、上記2ケースにおいては 瞬間的には増加しているようにも見えるように振動して いることからも確認できる. この振動は大規模渦の発生頻 度すなわち水面振動の周期に一致する.なお、他のケース については流出特性に顕著な差異は認められなかった.(b) の凹部奥行き6cmのケースでは、フルード数が0.8の2ケ ースがフルード数0.6のケースに比較して、トレーサの減 少速度が大きくなっていることがわかる. 凹部奥行き 10cm のケースに比較して全体的に減少速度が大きくなっ ているが、これは凹部の奥行が浅いためせん断層の渦によ る混合の影響を受けやすいためであると考えられる. 図-6 は凹部と主流部の境界面における横断方向流速の絶対値 の平均を各ケースについて比較したものである.一般的に は凹部奥行 b=6cm のケースに見られるように、フルード 数によって一定の値をとると考えられるが,強い振動を示 した 2 ケースについては他の同じフルード数のケースに 比較して大きな値となっていることがわかる.また、今回 の解析結果では F06L35b10 のケースでも他の同じフルー ド数のケースよりも大きな値をとっていることがわかる.

以上でみてきたような大規模渦構造が発生する原因の 一つとして、凹部設置部分の対岸影響が考えられる.そこ で F08L30b10 のケースに対して、主流幅 *B* を 10cm から 40cm, ~と変えて解析を行った. 図-7 に示すように解析結 果から求めた水面変動強度分布の比較から、主流幅を大き くした場合、強い水面変動はあらわれないことがわかった. このことから、周期的な水面変動の発生条件には対岸の影 響が含まれることがわかる. 凹部周辺での変動強度の分布 パターンは比較的一致しているので、この凹部形状によっ て発生した水面変動が対岸で反射し凹部内で変動の増幅 が起こっていると考えられる.



図-6 凹部と主流部の境界面における横断方向速度成分の絶対値の平均値の比較



図-7 主流幅を変化させたときの水面変動強度分布の変化 (Fr=0.8, L=30, b=10)

5. 凹部奥行の違いによる平均流れ構造の変化

図-8の上の6ケースは凹部奥行b=10cmのケースの時間 平均流線を図示したものである.図-9(a)に示すような凹部 下流端付近で水深方向にチューブ状となった二次元的な 渦構造が形成されている.凹部内底面付近では若干上昇す る流れも見られるが,全体的には凹部底面全体で大きな渦 構造を形成している.水面付近では,底面に比較するとコ ンパクトな渦構造となっており,これは主流部表面付近の 速い流れに連行されて流出が促進するためであると考え られる.水面付近の渦の大きさは,横断方向長さを凹部奥 行に一致すると仮定すると流下方向長さはどのケースに おいてもは凹部の奥行のおよそ 1.5~2 倍となっていて, 渦の大きさはほとんど変化していない.これは水面付近の 大規模渦のスケールが,凹部形状よりも主流部の流速に依 存するためであると考えられる.

下の4ケースは凹部奥行 b=6cm のケースの流線を図示 したもので、凹部奥行が水深に対し相対的に小さくなって いる. どのケースにおいても凹部内下流側の底面付近から 上流・水面方向へ向かう流線が形成されている. このよう な流れ場が形成される理由として、底面付近では凹部上流 付近から凹部中央にかけて凹部内への流入が発生するが、 水面付近では主流流速は相対的に大きくなるため慣性力 も大きくなり流入する位置は底面の流入位置よりも下流 側に移動するためであると考えられる.また、凹部上流端



図-8 各解析ケースの時間平均流線の比較



図-9 凹部奥行の違いによる流れ構造の変化

の水面付近では主流部の速い流れに連行されて凹部内からの流出が促進されていることも理由として考えられる. この結果,凹部内底面付近から流入した水塊は凹部上流の水面方向へと移動する.また凹部水面付近から流入した流れも上流へ向かう逆流を形成し,凹部全体としては図-9(b)に示すように歪んだチューブ状の流れ場を形成している. このように凹部奥行によって流れ場の構造が変化したことの理由として、b=10cmのケースでは凹部の奥行が水深に対して相対的に大きくなるため,凹部内部での底面および水面による拘束が大きくなり,鉛直方向の流れが形成されにくくなるためであると考えられる.

図-10 に 08L35b10 および F08L35b06 ケースの水面断面 ベクトル図を示す. (a1)~(a3)までの図は凹部下流ではほと んど同じようなベクトル図となっている. これは底面付近 から、水面付近まで一様な循環渦が形成されているためで あり、二次元的な流れ場の特徴を示している. (al)では凹 部上流付近においても弱い循環渦が認められるが, (a2), (a3)ではこの循環渦は見られず凹部内から主流へ向かう流 れが形成されている.

(b1)では循環渦はほとんど形成されず, 凹部全体にわたって流入が起こっている様子がわかる.(b2),(b3)では凹部下流付近に循環渦が発生しており,凹部下流付近では主流への流出が起こっている.すなわち,底面から流入した流れが凹部内で上昇し,水面付近から流出するという三次元的な流れ構造の特徴を示している.

図-11 は同じケースの横断面の速度ベクトルをプロット したものである. (al), (bl)の図ではともに底面付近から凹 部内への流入が起こっている.特に(bl)では主流部の水深 の半分の高さのまで流入が起こっていることがわかる. (a2)では(a1)で流入してきた流れが形成する循環流に従っ て流出が起こっている.このとき水面と底面付近に渦が形 成される(a3)ではさらにそれが発達していることが確認で きる.しかし循環渦は凹部の主流側に形成されて,凹部全 体の循環渦とはなっていない.(b2)では凹部内の水面付近 で大きな循環渦が形成されているが,(b3)ではその渦では なく凹部底面から発生した渦が発達していることがわか る.このように,凹部奥行に関わらず凹部底面付近に主流 方向回りの循環渦が形成されているが,凹部奥行が大きく なると,この循環渦の影響が凹部側岸に達しにくくなり, 凹部全体では二次元的な流れとなっていると考えられる.



図-10 F08L35b10 および F08L35b06 ケースの水平断面速 度ベクトル図



図-11 F08L35b10 および F08L35b06 ケースの凹部付近の 横断面速度ベクトル図

おわりに

本研究では松原ら¹⁸⁾によって報告された,比較的 僅かな凹部形状の違いで水面変動特性が大きく変化 するケースについて数値解析を行った.特にケース F08L30b10 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 現れることを解析によって再現することができた. またこのケースにおいては、解析結果から水面変動 と内部の流れ場との相関特性を調べた結果、高い相 関を示すことがわかった、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. このような流れ場では周期的な速度場の振動が大規 模渦を形成し,凹部内外の質量交換特性なども変化 することが判明した。また時間平均を行った流れ場 の構造は凹部奥行によって、二次元的な流れ場や三 次元的な流れ場を形成することがわかった.

今後の課題としては、平均的な流れ構造と水面および速 度変動の関係を明らかにすること、実河川洪水時における 実際の水面変動の様子と、実験および解析結果を比較検討 し実河川設計に有用なデータを収集することが必要であ る.また強い水面変動は、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.したがって、凹部長さをより広範に変化させて形 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.その際に予備実験として本手法による数値解析によ ってある程度対象を限定し、詳細な解析や実験を行うとい う手法が有効であると考えられる.

参考文献

- 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.
- 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.
- 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.
- 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) 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.
- 6) 椿凉太・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,48 巻,pp.59-864,2004.
- 7) 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.

- 8) 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,47巻,pp.523-528,2003.
- 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.
- 10) 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, 50巻, pp.763-768, 2006.
- 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.
- (福津家久・鬼東幸樹・池谷和哉: PIV を用いた開水路 回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.
- 13) 禰津家人・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 の影響, 土木学会論文集, No.733/II-63, pp.77-88, 2003.

- 14) 禰津家久・鬼東幸樹・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.
- 15) 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.
- 16)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.
- 17)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.
- 18) 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.
- 19) 門谷健,藤田一郎,椿涼太: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,水工学 論文集,第52巻, pp.757-762, 2008.

(2008年4月14日 受付)