

側岸凹部の形状変化が開水路流に与える影響

Shape effects of side concavity on open channel flow

藤田一郎*・椿涼太**・熊城秀輔***

Ichiro FUJITA, Ryota TSUBAKI and Shusuke KUMASHIRO

*正会員 学術博 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)

**学生会員 工修 神戸大学大学院自然科学研究科後期課程(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

***学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科前期課程(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

In the present study two-dimensional open-channel flow with a side concavity having various plan shapes was investigated experimentally and numerically. In the experiments, surface and near bottom flow fields were measured using PIV technique and distribution of water depth and fluctuation of water surface was measured using a servo-type instrument. The numerical model is based on the finite volume method (FVM) with MUSCL scheme under unstructured grid system. The numerical results showed fairly good agreements with experiments for mean velocity distribution and mean water level variation within the side concavity. It was found from experiments that time dependent feature of water surface variation is closely related to the shape of the side concavity.

Key Words: side concavity, open-channel flow, PIV, finite volume method, unstructured grid, fluctuation of water surface, power spectrum

1. まえがき

従来の河川整備においては都市部の中小河川を対象とした排水や洪水のための治水機能が重要視され、過密都市に至っては土地が河川周辺にまで高密度に利用されたため、必ずしも好ましい整備状況とは言えなかった。ところが近年の水環境意識の高まりから、人々が水際まで降り立つことができ、水面に直接に触れられるような親水性を考慮した水辺環境の創造が求められ、具体的な事例も散見されるようになってきた。例えば、神戸市では平水時の流量が非常に小さいために、僅かでもウォーターフロントを市民に提供することを目的として、河川護岸に凹部を設け、そこに階段を取り付けて水辺に降りられるような工夫がなされている。しかしながら、このような側岸凹部の設計においては、景観や利便性を重要視するあまり、必ずしも工学的な配慮に基づいた適正な設計が行われているとは言えない側面がある。それは側岸に凹部を取り付けることにより流れ場の構造が非常に複雑になるため、単純な水理計算では予測できない流水抵抗の増大を招く可能性があるからである^{1,2)}。

このような側岸凹部流れは、洪水時のような激しい

流れにおいては非常に複雑な乱流場を呈するだけでなく、興味深い水面変動を引き起こすなど流体力学的にも注目すべき点が多い。ただ、実際には様々な凹部形状の河川構造物が存在しており、凹部形状が変化すれば流れの特性も異なってくることが予想される^{3,4)}。

そこで本研究では、側壁に様々な形状の凹部を設け、PIV解析による表面流と内部流の計測、および水面形、水面変動の計測を行い、側岸凹部形状の影響を調べた。また、非構造格子モデルを用いた二次元的な数値シミュレーションも行い、水面形や流速分布の解析結果を実験値と比較してモデルの有用性に関する検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験装置

実験には長さ 7.5m、幅 0.3m の循環式可変勾配開水路を用いた。水路は全面ガラス張りであり、任意の方向からの可視化観測が可能となっている。この水路の左岸側をアクリル板で区切ることで水路中央部に長さ $L=0.5\text{m}$ 、基本幅 0.1m の側岸凹部を作成した。主流部分は幅 $B=0.2\text{m}$ の直線水路となっ

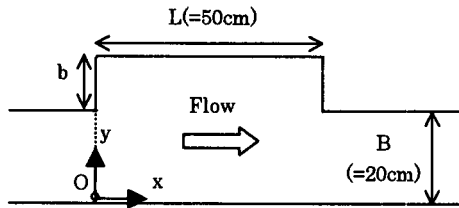


図-1 側岸凹部付近の平面図

表-1 凹部形状の概要

凹部形状	形状名	
	$\theta=45^\circ$	$\theta=60^\circ$
	45U	60U
	45D	60D

ている。凹部の下流端は水路の下流側から長さ 2.0m のところで固定した。凹部幅 b の調節は凹部内に長さ 0.5m のアクリル板を設置し、そのアクリル板の位置を調整して行った。凹部幅は $b=0.05, 0.07, 0.1\text{m}$ の 3 通りとした。側岸凹部のアスペクト比は $As=L/b$ で定義した。図-1 に座標系を示す。側岸凹部の形状は、斜面の傾き θ が異なる 2 種類（45 度と 60 度）の発泡スチロール製の直角三角柱を凹部内に取り付けて変化させた。設置の状況と形状に関するケース名を表-1 に示した。水理条件を表-2 に示す。表中の I, Q はそれぞれ勾配、流量であり、 h_{in}, u_{in}, Fr, Re はそれぞれ凹部流入部 $x=-30\text{cm}$ における平均水深、断面平均流速、フルード数、レイノルズ数を示している。なお、本研究では水路下流端の条件を常に低下背水として実験を行った。

2.2 表面流画像計測システム

表面の流れは平均粒径 $10\mu\text{m}$ 、比重 1.02 のナイロン破碎粒子を用いて可視化し、その流況は鉛直上方からデジタルビデオカメラを用いて撮影した。撮影範囲は水路の流下方向に約 85cm、横断方向に約

60cm 程度とした。デジタルデータは、パーソナルコンピュータに動画ファイル（AVI ファイル）として取り込んだ後、各々約 900 枚（約 30 秒間のデータに相当）の BMP ファイルに展開し、PIV（Particle Image Velocimetry）の解析に用いた。画像サイズは $720 \times 480\text{pixel}$ で、実際の解析にはフィールド分離した 1/60 秒間隔の画像を用いた。本解析においては 1pixel は 0.13cm 程度であった。

2.3 内部流画像計測システム

内部流の計測は、水平断面に照射した YAG レーザーおよび高解像度クロスコリレーションカメラ（解像度： $1016 \times 1008\text{pixels}$ ）を用いて行った。流れの可視化には、表面流の計測と同じトレースを用い、計測は $As_5, As_5_{45U}, As_5_{45D}$ の 3 ケースについて行った。撮影断面は河床から 1cm の水平断面とし、2 つのアングルで側岸凹部を含む領域をカバーするように撮影した。高解像度クロスコリレーションカメラは 1 回の撮影で 291 セット（582 枚、約 20 秒）の連続画像をビットマップファイルとしてパーソナルコンピュータのメモリに直接記録可能である。なお、1pixel あたりの物理量は 0.036cm 程度であった。

2.4 水面形状および水面変動の計測

水面形の計測にはサーボ式波高計を使用した。サーボ式波高計からの出力は AD カードを取り付けたノートパソコンに取り込み、線形のキャリブレーションにより水深の値に変換した。各点での計測は 10Hz で 48 秒間計測し 480 個の時系列データを得た。計測点は基本的に等間隔にとったが、水面形状の変化や水面変動の大きい部分は計測点を多めにとった。

3. 二次元数値シミュレーション

3.1 数値モデル

(1) 基礎式

表-2 実験ケースおよび水理条件

ケース名	I	Q(m³/s)	h _{in} (cm)	u _{in} (m/s)	Fr	Re	As	凹部形状
As10	1/250	10 ×10 ⁻³	7.44	0.672	0.788	5.0 ×10 ⁴	10	長方形
As7.1			7.52	0.665	0.775		7.1	
As5			7.45	0.671	0.785		5	
As5_45U			7.77	0.643	0.737			45U
As5_45D			7.13	0.701	0.839			45D
As5_60U			7.97	0.628	0.710			60U
As5_60D			7.04	0.711	0.856		60D	

基礎式として用いたのは平面二次元流れの連続式と運動方程式である^{5,6)}。これをベクトル表記したものが以下の式(1)である。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + S + v \left(\frac{\partial}{\partial x} h \frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} h \frac{\partial G}{\partial y} \right) + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial I}{\partial y} = 0$$

ここに、

$$U = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} uh \\ u^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \\ uvh \end{pmatrix},$$

$$F = \begin{pmatrix} vh \\ uvh \\ v^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \end{pmatrix}, \quad S = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ -gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{pmatrix},$$

$$G = \begin{pmatrix} 0 \\ u \\ v \end{pmatrix}, \quad H = h \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{u'^2}{2} \\ -\frac{u'v'}{2} \end{pmatrix}, \quad I = h \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{u'v'}{2} \\ -\frac{v'^2}{2} \end{pmatrix}$$

$$-\frac{u'^2}{2} = 2D_h \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{2}{3}k, \quad -\frac{u'v'}{2} = D_h \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right),$$

$$-\frac{v'^2}{2} = 2D_h \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{2}{3}k \quad (2)$$

また、 h :水深、 u, v : x, y 方向の平均流速、 g :重力加速度、 D_h :渦動粘性係数である。 S_{0x}, S_{0y} は x, y 方向の河床勾配、 S_{fx}, S_{fy} は底面摩擦勾配で Manning の抵抗則で評価した。

(2) 基礎式の積分

基礎式を任意の検査体積 Ω で積分すると、次の積分型の浅水流方程式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (E dy - F dx) d\Omega + \int_{\Omega} S d\Omega + \oint_{\partial\Omega} v \left(h \frac{\partial G}{\partial x} dy - h \frac{\partial G}{\partial y} dx \right) d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (H dy - I dx) d\Omega = 0 \quad (3)$$

実際の数値解析には、移流項、拡散項にグリーン・ガウスの発散定理を用いて面積積分を境界での線積分に置き換えた式を用いる。

(3) 離散化

h, u, v は各セルの中心上で定義し、解の安定化のため、空間二次精度風上手法である MUSCL 法を用いた⁵⁾。時間積分には二次精度のアダムス・バッシュフォース法を採用した。粘性項 $v \left(\frac{\partial}{\partial x} h \frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} h \frac{\partial G}{\partial y} \right)$ と渦動粘性項 $\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial I}{\partial y}$ を求めるためには、もう一度この項にグリーン・ガウスの発散定理を用いる⁷⁾。たとえば、式(3)の検査体積を図-2のセル abc とすると線積

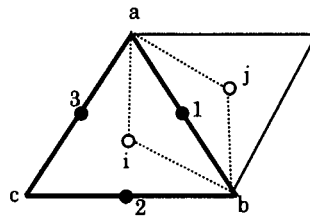


図-2 セル近傍の定義図

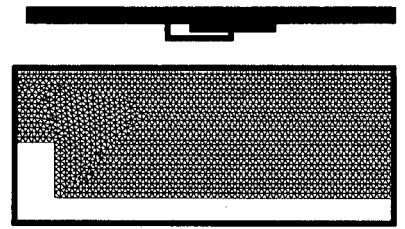


図-3 計算格子

(1)

分にはセル境界 1, 2, 3 上の物理量を用いる。しかし、物理量はセル中心 (i, j) で定義されているため、内挿して境界上(1, 2, 3)の値を得る必要がある⁵⁾。また、粘性項と渦動粘性項に含まれる二次微分を求めるためにはセル境界上での物理量勾配を一旦求める。たとえば境界 1 上の勾配を、検査体積 $ajbi$ での流入出する流束から求めることができる。同様に境界 2, 3 上の勾配を求め、これらを利用してセル abc での二次微分を得る。

(4) 境界条件

上流端では流量を与えた。そのために、水深から流水断面積を求め、これに応じて流速分布を与えた⁶⁾。下流端では水位を与えた。また、壁面は滑り無し条件とした。

(5) 渦動粘性係数

渦動粘性係数は $D_h = \alpha hu_*$ によって評価した。また、定数 α は 0.2 を用いた⁴⁾。 u_* は摩擦速度であり、本研究では Manning の抵抗則から求めた。また、壁面近傍では渦の挙動を考慮し、減衰関数によって渦動粘性係数を調節した^{8), 9)}。

3.2 格子生成法および計算ケース

非構造格子の生成にはアドバンシングフロント法を利用し、生成する格子の大きさを調整することで、格子密度を調節した。本研究では、図-3 に示すような格子幅約 1mm のほぼ等間隔の格子を用いた。計算は As5, As5_45U, As5_45D の 3 ケースについて行い、実験値との比較を行った。

4. 実験結果および計算結果

4.1 流速分布特性

図-4 に実験で得られた表面流の流速分布、図-5 に実験で得られた内部流の流速分布、図-6 に計算で得られた流速分布を示す。内部流および計算値については、凹部の影響が右岸にまで及んでいないため凹部付近のみを示した。計算で得られるのが水深平均流なのに対し、実験で得られたのは水表面と底面付近の流速分布なので単純な比較はできないが、これらの結果や目視による観測から流れの構造について

推察を行う。

まず図-4に着目する。(a)をみると、凹部内には循環流が形成されており、凹部下流端付近からは斜め方向の流れが発生している。(b)、(c)においても同じことが言える。(b)のAs5_45Uのケースにおいては、目視による観測では、凹部内に発生した循環流が上流部の斜面に誘導されて主流部に混入している様子が見られた。(c)では、剥離流れが下流部の斜面上に再付着し、再付着点から斜面に沿って流下していく流れと斜面に沿って逆流し、そのまま循環流になる流れに分かれている様子が見られる。

一方、図-5の内部流の結果を見ると、どのケースにおいても表面流よりも凹部内の循環流ははっきりと現れているが、凹部下流端付近から発生する斜め方向の流出流れは顕著ではない。(a)、(b)においては、表面流と流況が大きく異なっており、三次元性が大きい流れであることが伺える。これらの場合、凹部下流端に向かう流れはあまり見られないが、凹部下流端から発生して循環流になる流れ、または凹部下流端付近から主流部に流出する流れが観察される。このことから、表面付近で凹部下流端に衝突した流れは壁面に沿って下降し、底面付近で循環流になったり、凹部下流端付近から主流部に流出したりするということが推測できる。また図-5(b)の凹部上流端付近の流れを見ると、凹部上流部の斜面に沿って逆流した循環流が表面流とは違って主流部に混入しておらず、そのまま循環流となっている。したがって、表面流において見られた凹部上流部付近の流れは水

面変動と連動して表面付近でのみ起きている流れであると考えられる。一方、図-5(c)を見ると、下流部の斜面上に見られる再付着点近傍の流れなどが表面流の流況と類似しており、他の2ケースに比べて三

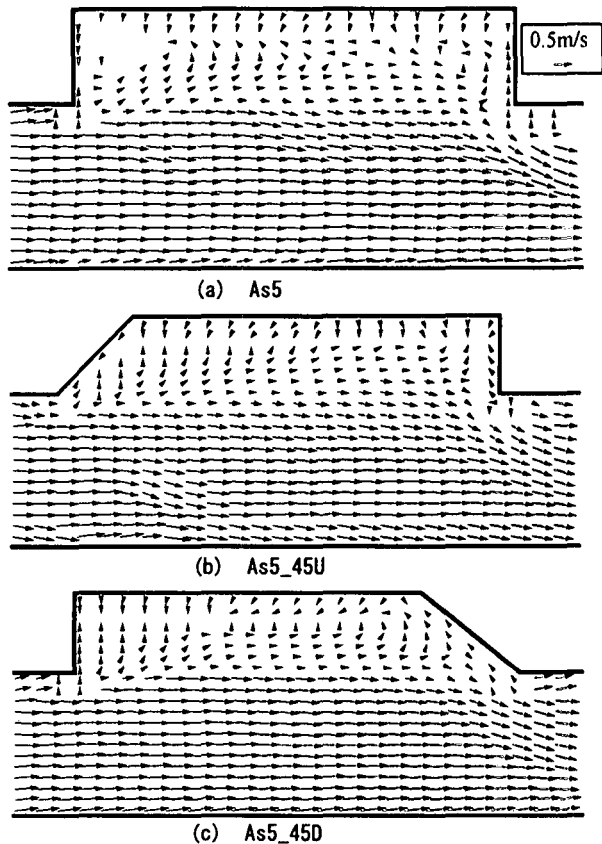


図-4 流速分布（表面流，実験値）

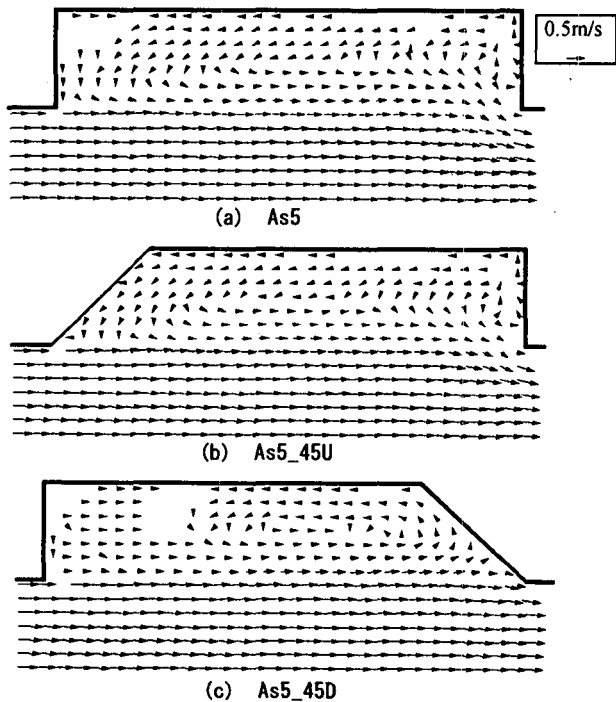


図-5 流速分布（内部流，実験値）

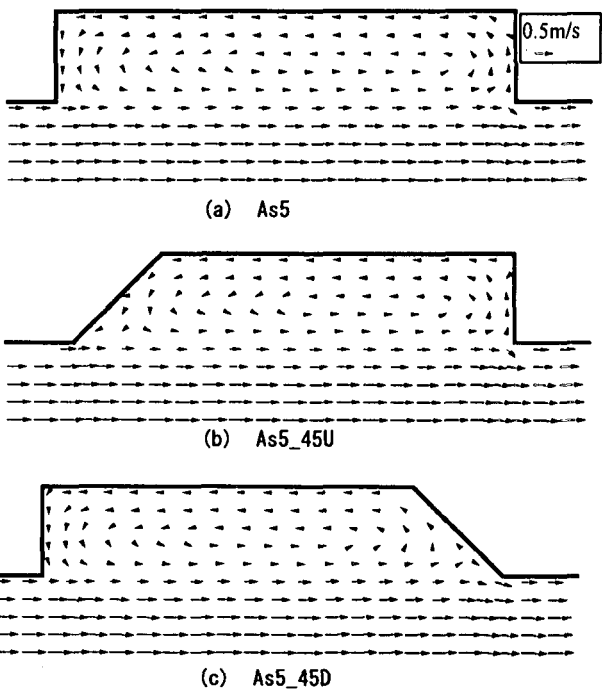


図-6 流速分布（計算値）

次元性が小さい。また凹部内に発生した循環流は凹部上流部まで及んでおらず、凹部上流部は死水域となっている。

図-6 の計算値では、内部流と同様にどのケースを見ても循環流のはっきりと現れており、凹部下流端からの斜め方向の流れはほとんど見られなかった。したがって、この斜め方向の流れは表面流特有のものであると推測できる。細かく見てみると、(a)、(b)においては凹部上流部の流れが内部流の流況とほぼ一致していた。(c)を見ると、凹部上流部の死水域は再現できなかったが、再付着点近傍の流れは良好に再現できていた。

図-7 に計算値と内部流の実験値の流速分布を比較した。内部流は底面付近の値であるため単純な比較はできないが、どのケースにおいてもせん断層発達の様子を概ね良好に計算できた。内部流の主流部中央部において流速が少し小さくなっている部分があるのは主流部の側壁に沿って発達した二次流の影響によると思われる。いずれにしても、対象とした流れは三次元性が強いいため、流れの内部構造を知るためには、内部流の詳細な計測や三次元解析が必要が

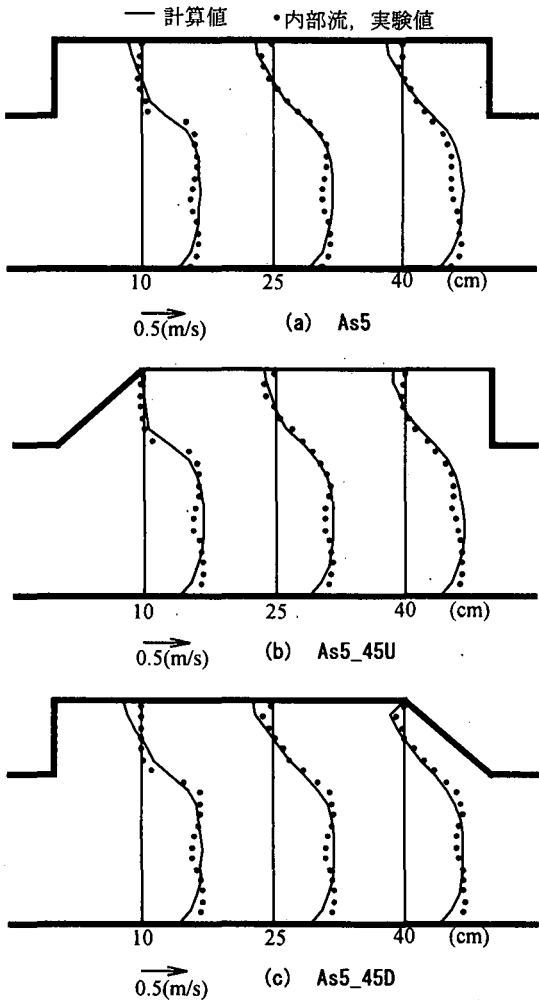


図-7 流下方向流速 u 分布の比較

ある。

4.2 水面形状

凹部の形状変化による水面形への影響を調べるために、図-8 に示すような a 軸を設定し、点 O, B, C, D の座標値を一致させ、それらの点間の座標値はそれに合致するように換算して左岸側壁に沿う水面形の比較を行った。図-9 に実験で得られた水面形と等流せき上げ状態の水深 h_0 、図-10 に計算で得られた水面形を示す。

まず図-9 の実験値について比較を行う。長方形凹部の場合は、アスペクト比別に比較すると顕著な差は見られないが、 As が大きいほど点 C における水

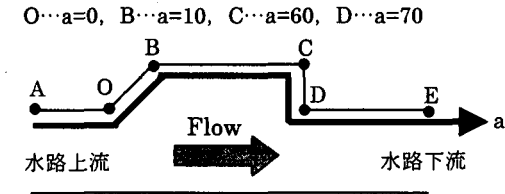


図-8 a 軸の概要

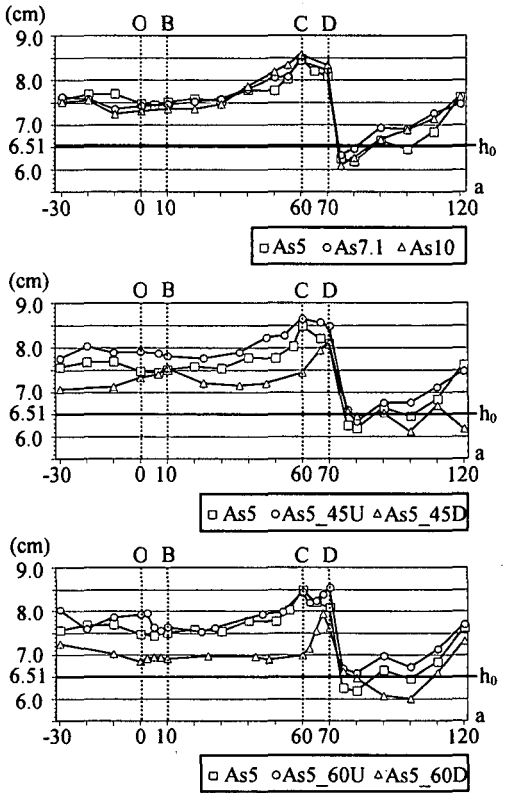


図-9 a 軸に沿う水面形の比較 (実験値)

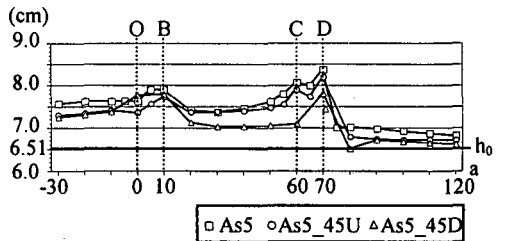


図-10 a 軸に沿う水面形の比較 (計算値)

深が大きくなるという傾向が見られた。また、点 C に近づくにつれて As が大きい方が水面の上昇が大きくなっている。台形凹部においては水面形に顕著な差が見られた。As5_45U および As5_60U の 2 ケースにおいては、As5 と比べて水深が上昇するのに対し、As5_45D と As5_60D においては水面上昇が全体的に抑制できており、特に As5_60D において顕著であった。したがって、凹部下流端の形状が主流部に対して滑らかであるほど水面の上昇は抑制できると考えられる。

次に図-10 の計算値に着目すると、水面形の変化が実験値に比べると小さくなっていたり、点 C での水面上昇が過小評価されていたりするものの、凹部形状の変化が水面上昇に与える影響については良好に再現できていた。したがって、水位変化の定性的な相対変化については、本モデルでも概ねその状況が把握できるということがわかった。

4.3 水面変動強度

図-11 に水面変動強度 h' の分布を示す。 h' は次式で定義した。

$$h' = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_i - h_m)^2 / n}}{h_m} \quad (4)$$

ここに、 n :データ数、 h_i :瞬間水深、 h_m :時間平均水深である。なお、As5_45D は As5_60D に、As5_45U は As5_60U にそれぞれ傾向が似ており、 θ が大きいほど影響がはっきりと現れていたため As5_45U と As5_45D は掲載しなかった。アスペクト比別に比較すると、 As が小さくなるほど水面変動強度が大きくなっており、特に凹部上流端付近の主流部と凹部下流端付近において顕著であった。このことから、これらの領域の水面変動は相互に作用を及ぼしており、 As が小さいほどその作用が大きくなると言える。次に台形凹部のケースと比較すると、As5_60U では上流部の水面変動がさらに大きくなった。これは上流側の斜面に誘導された流れの主流への混入のためである。逆に As5_60D においては全体的に水面変動強度が小さく、特に上流部の水面変動があまり見られなかった。これは凹部下流端の形状が流れに対して滑らかなため、水面変動の相互作用が起こりにくいからである。

4.4 水面変動の時系列特性

(1) As5 のケースについて

凹部上流端付近の主流部と凹部下流端付近の水面変動強度が大きかったので、それらの部分の時間的な水面変動の特性を調べるために、図-12 に示した P 点および Q 点における無次元水深 h_i/h_m の時系列データを求めた (図-13)。

P 点においては、やや長い周期の低周波振動が卓越しており、非常に大きい水面変動を引き起こしている様子が伺える。Q 点においては、低周波振動に加えて複数の変動が重なり合って複雑な水面変動が起こっており、変動量も P 点における変動量よりも若干大きくなっていた。これらの点における水面変動のパワースペクトルを図-14 に示す。P 点に関してはピーク周波数が 1 つだけ得られ、その値は 0.352Hz であった。Q 点に関しては、0.352Hz、0.996Hz の 2 種類のピーク周波数が得られ、低周波振動 (周波数 A) と高周波振動 (周波数 B) の 2 種類の振動が発生していることがわかる。低い方のピーク周波数は P 点におけるピーク周波数と一致している。ここで、それぞれの振動が起こっている範囲を調べるために図-15 に 2 種類のピーク周波数におけるパワー値の分布図をプロットした。低周波振動は凹部付近の全域で起こっており、その変動も大きいことがわかる。分布形が水面変動強度の分布と類似していることから、流れ場で発生している水面変動のうちほとんどが周波数 A をもった低周波振動であるということがいえる。

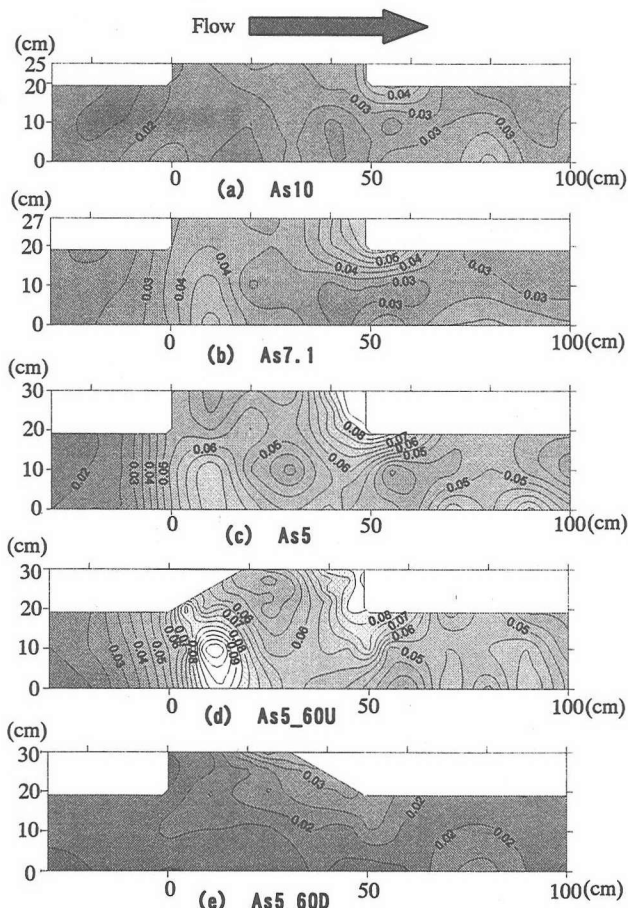


図-11 水面変動強度 h' 分布

このような水面振動現象の原因について考察すると以下になる。側岸凹部に流入した流れは凹部下流端に衝突するために部分的に堰上げられ隅角部（図-8 の C 点）で最大水深が生じる。流れが定常であればこの状態が継続されるはずであるが、実際には大規模な渦運動のために最大水深の状態は保持されず、隅角部から主流への流体の連行によってこの状態は解除され、隅角部の水深は急激に減少する。この水深変化が隅角部から上流側に向かう重力波となり、凹部内だけでなく主流部へも伝播する。非常に大雑把な見積ではあるが、このときの伝播速度は主流の平均流速 u から重力波のみの伝播速度 $(gh)^{1/2}$ を減じたものに相当すると考えられる。この水面変動は凹部上流端付近の断面まで到達した後に、急縮によって一部が反射し、再び隅角部へ向かうようになる。このときの伝播速度は $(gh)^{1/2} + u$ と見積もることができる。従って、このような水面変動に対応する周期 T は近似的に次式で表すことができる。

$$T = \frac{L}{\sqrt{gh} + u} + \frac{L}{\sqrt{gh} - u} \tag{5}$$

ちなみに、実験値 $h=0.0745(\text{m})$, $u=0.671(\text{m/s})$ を用いると $T=3.05(\text{s})$ が得られるが、これは実験における周期 $1/0.352=2.84(\text{s})$ と概ね一致している。ただ、このような規則的な変動が持続しているのは、単に

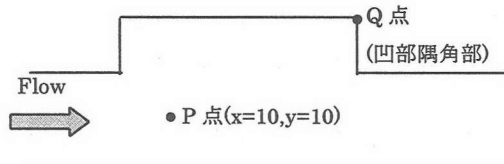


図-12 P点, Q点の概要

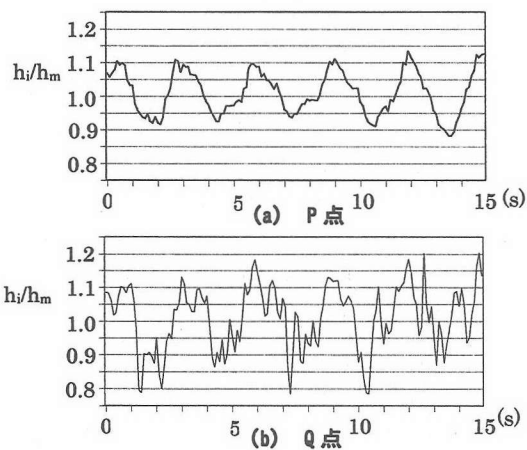


図-13 無次元化水深 h_i/h_m の時系列データ

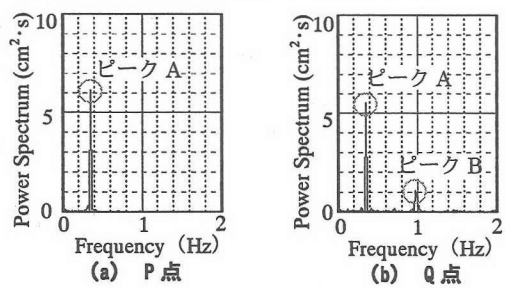


図-14 パワースペクトル分布

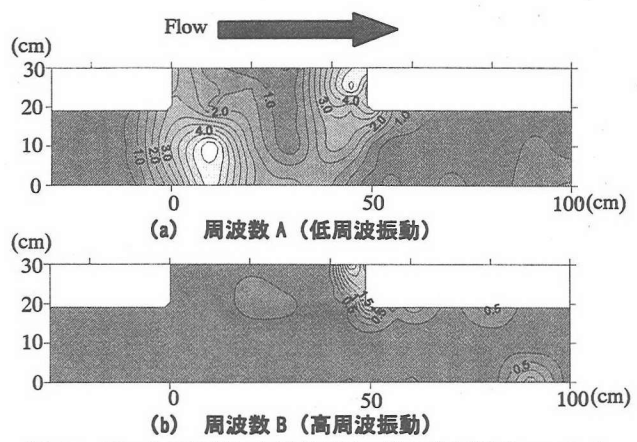


図-15 ピーク周波数におけるパワー値の分布(単位: $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)

重力波の伝播だけが要因ではなく大規模渦の隅角部からの流出と水面変動の共振現象も大きく関与しているものと思われる。

一方、高周波振動は凹部下流端付近およびそれよりも下流部でしか見られない。したがって、この高周波振動は剥離渦が凹部下流端に衝突することによって発生するものと思われ、フルード数が大きい流れ（主流において $Fr=0.8$ 程度）であるためにその変動が上流側には伝わりにくいものと推測される。

(2) 形状変化の影響

表-3に各ケースにおける水面変動のスペクトル解析によって得られた2つのピーク周波数を示す。周波数 A で () を付したものは、変動の程度が非常に弱いものであるということを示している。アスペクト比別に比較すると、 As が小さくなるほど周波数 A, B ともに大きくなっている様子が伺える。また、 As_{10} においては低周波振動はあまり見られなかったが、これは As_5 のケースで見られたような共振現象が顕著でなかったためと思われる。台形凹部の場合を比較すると、 As_5_{45U} と As_5_{60U} からはともに As_5 に近いピーク周波数が得られた。このことと図-11 の水面変動強度から、凹部上流端の形状を変化させても水面変動の卓越周波数は変わらないが水

表-3 各ケースにおける水面変動の周波数

	周波数 A (Hz)	周波数 B (Hz)
As_{10}	(0.273)	0.840
As_7	0.312	0.918
As_5	0.352	0.996
As_5_{45U}	0.361	1.016
As_5_{45D}	(0.312)	2.48
As_5_{60U}	0.361	0.967
As_5_{60D}	(0.332)	2.109

面変動強度は大きくなると言える。下流端の形状を変化させた As5_45D と As5_60D の 2 ケースについては、他のケースと変動の状況が全く違っていたので、この 2 ケースのパワースペクトル解析の結果を図-16 に示す。低周波振動のピーク周波数 A は P 点では若干見られたが、Q 点において見られるピーク周波数は周波数 B のみで、周波数 A が卓越している様子は見られなかった。これは、凹部下流端の形状が流れに対して滑らかで、堰上げ効果が小さく水面変動が発生しにくいためである。従って、この 2 ケースは水面変動強度も全体的に小さくなっている。また高周波側のピーク周波数 B は他のケースと大きく異なっている。このことから凹部下流端の形状が高周波振動の周波数と関連があるということがわかる。これは、凹部下流端の形状が変わることによって渦の衝突の様子が変わってくるためだと考えられるが、その詳細なメカニズムについては今後の検討が必要である。

5. あとがき

本研究では、直線開水路の側岸に設置された凹部が流れ場に与える影響、ならびにその凹部形状を変化させた場合の水理特性の変化について着目し、二次元数値シミュレーションおよび実験による検討を行った。

シミュレーションに関して言えば、対象としている流れが三次元性の強い流れであるため詳細な流れ構造を再現することはできなかったが、凹部形状の変化による流れの変化など、流れの平均的な構造を再現することはできた。水面形に関しては凹部形状の変化による影響をある程度再現できた。ただ、流れの詳細な内部構造を予測するためには、今後三次元数値シミュレーションも並行して行っていくことも必要である。

一方、実験に関して言えば、本研究においては内部流の PIV 計測は底面付近の断面のみであったが、もっと様々な断面に対して行えばより詳細な流れの三次元的な構造を予測できると思われる。水面形については、時系列データを取得したことにより従来の研究では得られなかった結果を得る事ができた。但し、本研究における計測は点計測であったので、面的な挙動を知るためには今後水面変動の面的な計測、さらには水面変動と流速の同時計測を行う必要がある。

参考文献

- 1) 藤田一郎, 小澤純, 長浜弘典: 直線開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,

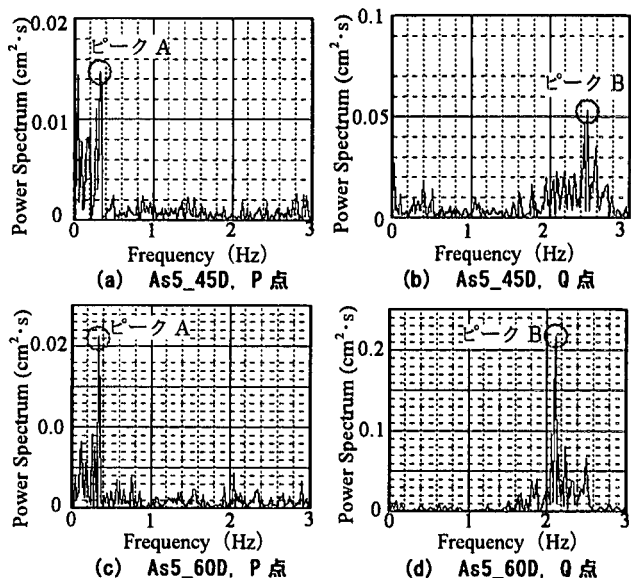


図-16 パワースペクトル分布 (As5_45D,

応用力学論文集 Vol. 4, pp. 549-556, 2001.

- 2) 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, Vol. 46, pp. 403-408, 2002.
- 3) 禰津家久, 鬼束幸樹, 高橋俊介, 乙志和孝: 開水路側壁凹部流れの水面・流速変動特性と開口部形状の効果, 土木学会論文集, No. 712 II-60, pp. 1-10, 2002.
- 4) 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.
- 5) van Leer, B.: Towards the ultimate conservative difference scheme V. A second-order sequel to godunov's method, Journal of Computational Physics, 32:101-136, 1979.
- 6) 長田信寿: 流路変動過程の数値解析法とその応用に関する研究, 京都大学博士論文, 1998.
- 7) Hoffmann, K. A. and Chiang, S. T.: Computational fluid dynamics for engineers, Vol. II, Engineering Education System, pp. 265-291, 1993.
- 8) 木村一郎, 細田尚: 側岸に死水域を有する開水路流れの非定常解析, ながれ, Vol. 12, pp. 399-408, 1993.
- 9) 梶島岳夫: 乱流の数値シミュレーション, 養賢堂出版, 1999.

(2003 年 4 月 18 日 受付)