

常流射流混在流れの構造に砂州前縁部地形 と側壁粗度が与える影響

PLANE ANGLE OF SAND BAR FRONT AND SIDE WALL ROUGHNESS EXERTED
INFLUENCE ON STRUCTURE OF THE OPEN CHANNEL FLOW WITH HYDRAULIC JUMP

古川保明¹・池田裕一²・岩崎太志³・須賀如川⁴
Yasuaki KOGAWA, Hirokazu IKEDA, Futoshi IWASAKI, Nyosen SUGA

¹正会員 中央技術株式会社 (〒310-0902 茨城県水戸市渡里町 3082)

²正会員 博士 (工) 宇都宮大学大学院工学研究科エネルギー環境科学専攻助教授 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

³学生会員 宇都宮大学大学院工学研究科エネルギー環境科学専攻 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

⁴フェロー員 工博 宇都宮大学名誉教授 河相工学研究堂 (〒276-0023 千葉県八千代市勝田台 4-2-4)

The flow structure on the sand bars, containing both sub-critical flow and super-critical one, was examined by laboratory experiments and numerical analyses, focusing on the effects of riverbank roughness and riverbed topography. It was shown that the riverbank roughness decelerates the flow along riverbank, which accelerates the flow of the central part of the channel. Then, the flow is super-critical in the center part of the channel and is sub-critical near the riverbank, which was correctly predicted by the numerical analysis. Numerical simulation also clarified that the position of maximum velocity changes downward as the plane angle of sand bar front becomes large. It was suggested that the influence of riverbed must also be taken into consideration in the case of bank revetment.

Key Words : *concentrated flow along river bank, bar roughness, sand bars, SIMPLE method, 2D flow*

1. 緒 論

近年の水際設計に関する考え方は、コンクリートなどの人工材料を用いた対策工に代わって、多自然型工法に見られるように、治水面・環境面・施工性・経済性等について総合的に検討されるようになった。このことによって例えば護岸工には、流水の外力に対し安定でかつ適度な流速低減効果をもたせる水理機能が求められる他に、対象河川に適した設置位置・設置幅・工種等が求められるため、河岸沿い流れに関するさらなる知見を得ることは重要な課題と言える。

一方で、自然河川の中小出水時における常流射流混在流れの挙動が極めて重要となっている。岩崎ら¹⁾は室内実験において、直線水路内に滑らかな砂州前縁部の形状を模擬的に与え(固定床)、その上での常流射流混在流れの形態について検討を行った。その結果前縁部下流側の水深によって、「上流から下流まで常流」、「上流側は常流、前縁部では射流、下流側では常流」、「上流側は水路全幅で常流、前縁部は全幅が射流、下流側は前縁部から落ち込む流れが集中する岸側が射流、その反対側が常流」とい

う3通りの流動形態が現れることを示した。また、この3番目の流動形態について室内実験及び数値実験を行い、小流量時において砂州上及び前縁部で局所射流が発生することにより、河岸沿いに流速の速い領域が現れ、それが流量によらず比較的長い距離にわたって続いていることを明らかにした²⁾。中小出水時といえども条件によってはかなり速い流れが生じ、河岸侵食に多大な影響を及ぼすことになることを指摘している。

しかし未だに現象に関して不明な点が少なくない。例えば鬼怒川においては、大きな河岸侵食力を有しているクランクフロー³⁾の存在が指摘されている。これは、護岸施工によって河岸沿い流れが発達し、対岸の低水路河岸が侵食を受けたことが報告され、今後の現象解明が待たれる所である。この例からも側壁粗度の影響が極めて重要であることがわかる。

そこで本論文では、側壁粗度と河床地形が中小出水時における常流射流混在流れに与える影響についての知見を得るために、模擬砂州形状を与えた直線水路の側壁に粗度を設置し、室内実験を行った。室内実験により、流況及び現象の内容を把握した後、数値解析によって測

表-1 計算及び実験条件表

	CASE 1	CASE 2
L (cm)	600	600
B (cm)	50	50
a (°)	45	45
Lu (cm)	250	250
Ls (cm)	100	100
Ld (cm)	250	250
Hs (cm)	5	5
Q (l/s)	4	4
s (cm)	8	16
t (cm)	1	1
k (cm)	1	1

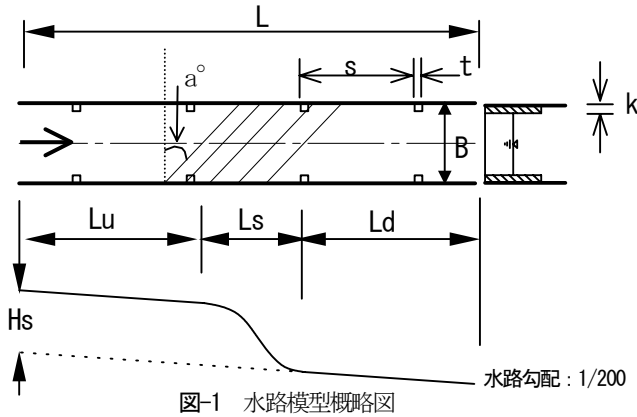


図-1 水路模型概略図

定値と計算値の比較を行い、かつ地形条件を変化させた数値実験を試みた。

2. 室内実験による検討

流れの実現象の特徴を把握し、今回の数値計算の再現性を評価するために室内実験を行った。

(1) 実験装置及び方法

実験には、幅 0.5m、水路長 6.0m の長方形断面開水路を用いた。図-1 は水路模型の概略を示したもので、実験水路の上流端から 2.5m の位置に長さ 1m の斜めスロープを設置した。その縦断形状は余弦関数を用いた滑らかなものとし、平面的には流下方向に対して 45° 傾けて右岸側に流れが集中させるようにした。これは、河道中央から砂州地形に沿って河岸に向かう流れ及び河岸沿いを直進する流れを想定したものである。水路勾配は $S=0.005$ (1/200) に固定し、斜めスロープ部は約 1/20 の勾配とした。水路下流端は段落ちとし、堰上げは行わなかった。また、護岸等による河岸粗度を想定して、側壁には幅 $k=1\text{cm}$ 、長さ $t=1\text{cm}$ の棧粗度を $s=8\text{cm}$ (CASE1) 及び 16cm (CASE2) の間隔で貼り付け、側壁粗度の大小の影響について考慮することとした。なお足立の研究⁴⁾によると、相対粗度間隔 $s/k=8.0$ の時の抵抗が最も大きいとされ、本研究ではそれよりも小さな抵抗も対象としている。

前報²⁾では、流量を変化させた実験を行ったが、砂州前縁部の流れの構造は流量によらず、砂州地形及び下流端条件に支配されることが明らかとなったため、流量は $Q=4.01\text{l/s}$ の一定値に調整し通水した。これは、実河川における中小出水時の流量を想定している。以上に述べた

条件を表-1 に示す。水深の測定はポイントゲージによって行い、流速については染料で可視化した流況をビデオカメラで撮影し、染料の動きを画像解析により追跡して、水深平均の流速場を求めた。その測定精度については、測定断面毎の流量の整合性から検討することにする。

(2) 実験結果及び考察

図-2(a) 及び図-2(b) は、 $s/k=8.0$ 及び 16.0 の時の実験による流速ベクトル図である。図の点線は斜めスロープの始端と終端を表している。図-3(a) 及び図-3(b) は、測定した水深と流速を用いて算出した Fr 数コンター図である。

流れは斜めスロープ上流端にて水路全幅で一様に射流となる。その後、斜めスロープに従って流れが右岸側に集中していくために、右岸側から 0.1m の幅の領域において水深が大きく、それ以外では小さくなっていた。スロープ上で右岸側に集中した流れはスロープ終端になると左岸側へ拡がりつつ反転していた。また左岸側ではスロープ終端周辺で弱い逆流域が見られ、流れが側壁から剥離していることが確認できた。これらはほぼ前報²⁾ と同じ結果である。

流速ベクトル図及び Fr 数の分布を見ると、前報では右岸沿いに見られた高速領域はほぼ水路中央に寄せられ、射流のまま下流端まで達していた。これは、側岸に設置した棧粗度の影響によって側壁付近の流れが減速し、その分、水路中央に流れが集中・加速したためである。また $s/k=8.0$ のときの水路の縦断的に見てほぼ中央の速い流れは、 $s/k=16.0$ のときと比べて、下流まで延伸しており、より水路中央部の流れが強められる結果となった。なお、図-3(a) 及び図-3(b) の $x=300\sim 350\text{cm}$ における白い部分は、 Fr 数が 3.0 以上となる位置を表している。

図-4 に測定値から算出した断面毎の流量の平均値に対する相対誤差を示す。この図から、測定誤差が大きいものもあるが、平均的に見て誤差率は 1 割を下回っている。測定精度に関する流速測定値補正については今後の課題である。

3. 数値実験による検討

(1) 計算方法とプログラム

本研究では、前報²⁾の SIMPLE 法改良プログラムに以下に示す 1 点の修正・追加をして、砂州上の 2 次元流れの計算を行った。側壁粗度の影響を考慮に入れるため、側壁近傍では粗面乱流から滑面乱流まで全乱流領域にわたる対数則を適用して (例えば日野⁵⁾ p182)、壁面近傍の格子点の位置 (y) と流速値 (u) とからせん断応力あるいは摩擦速度を求め、壁面付近の拡散係数を計算させるようにした。また、壁面の相当粗度は足立の式⁴⁾を参考に求めた。相当粗度の値は $s/k=8.0$ のとき $ks=9.22\text{cm}$ 、 $s/k=16.0$ のとき $ks=6.10\text{cm}$ である。この SIMPLE 法は、他の方法に比べて数式が比較的単純で計算時間も短くて済

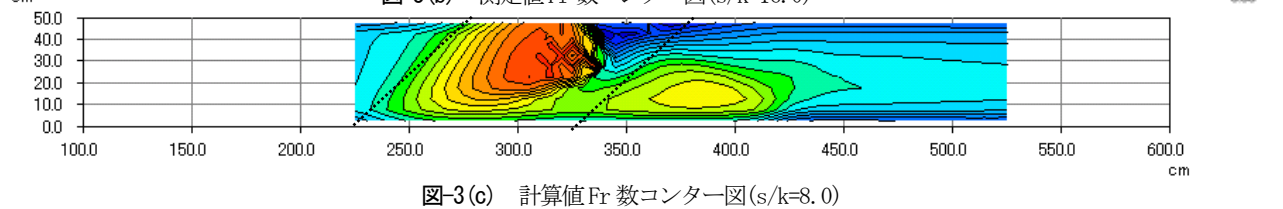
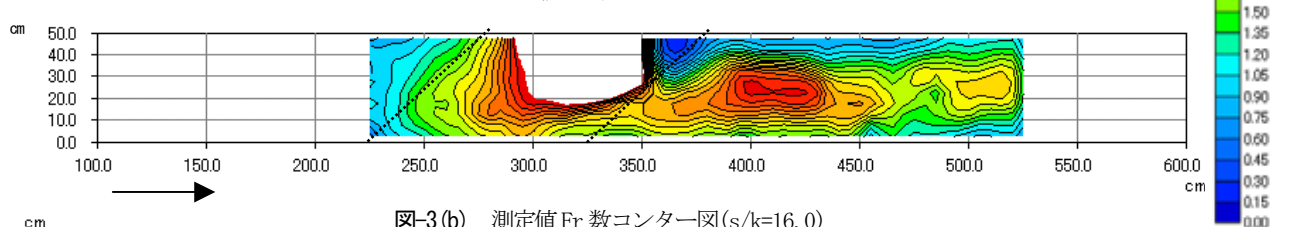
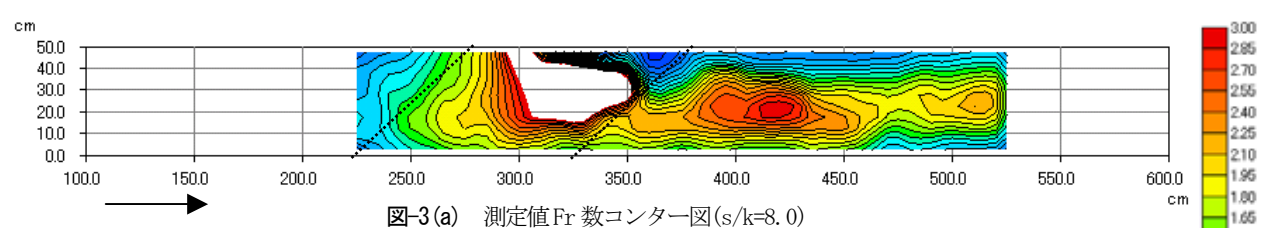
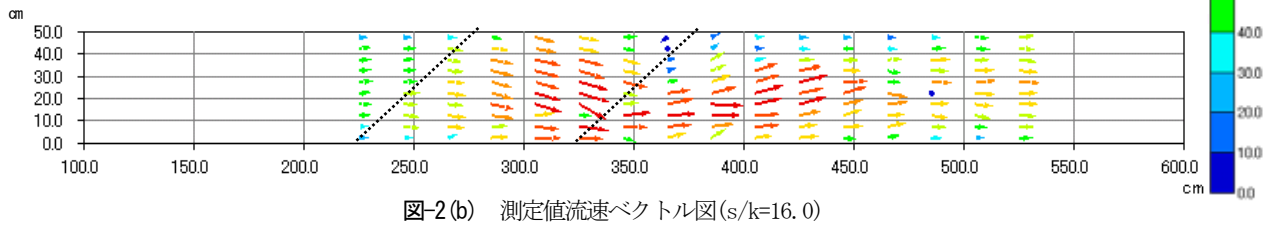
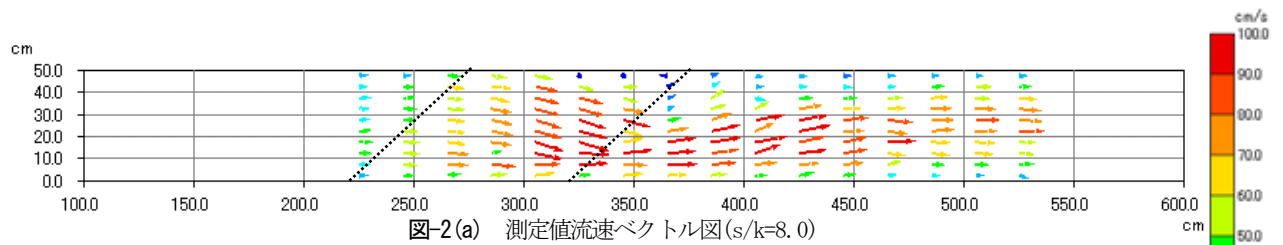


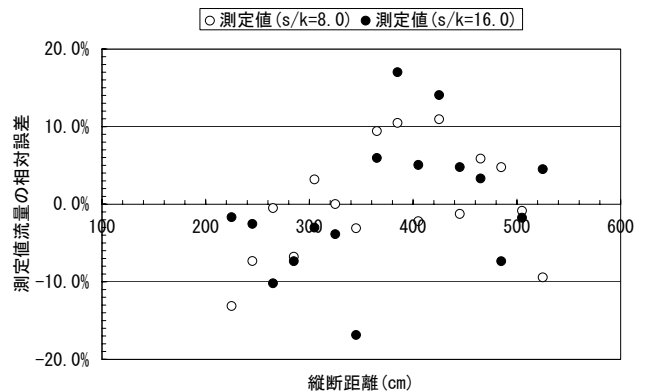
表-2 数値実験条件表

	CASE3	CASE4
流路長・河道幅 (cm)	600, 50	600, 50
メッシュ数(流下方向×横断方向)	120×10	120×10
メッシュサイズ(流下方向×横断方向)	5cm×5cm	5cm×5cm
河床の粗度係数	0.014	0.014
基本河床勾配	0.005	0.005
流量 (l/s)	4	4
斜面角度 (a°)	30	60
相対栈間隔 (s/k)	8	8
渦動粘性係数の係数 ε	0.14	0.14

むといわれている。また、将来的に河床変動計算に発展させる際に、常流・射流混在の影響を受けにくいと考えられることからスタッガード格子を導入した。

(2) 計算条件

計算に用いた各パラメータの値を表-1 及び表-2 に示す。まずは表-1 のように水路及び河床形状、流量などを前述した水路実験に合わせて、流れの再現性と特徴を検討する。次に前縁部の平面角度を表-2 のようにケースに応じて変化させ、その影響を数値計算結果から検討することにする。計算の際には初期条件として、各断面の水位が一定で、断面平均水深が等流水深になるように設定して



から、時間進行法によって計算を進め、各格子のフラックスの平均残差が基準値以下になるまで計算を繰り返した。

(3) 側壁粗度の影響

図-5~10 は、測定した水位の縦断分布と計算で得られた値を比較したものである。右岸側及び左岸側では斜めスロープ上及びその下流側の水深が、計算値より測定値の方がやや小さい値であるが、波形についてはおおむね良く再現できている。y=2.5cm 地点計算値の斜めスロープ下流側の水深の増大については、下流端水深の設定の仕

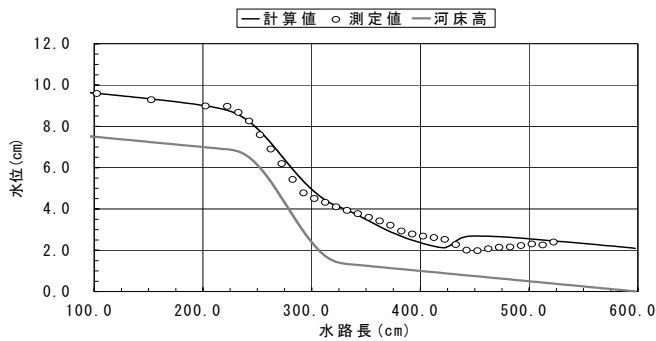


図-5 $y=2.5\text{cm}$ 地点の計算値と測定値の比較図($s/k=8.0$)

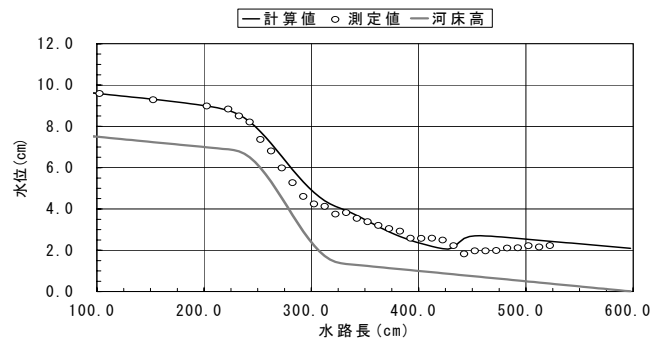


図-8 $y=2.5\text{cm}$ 地点の計算値と測定値の比較図($s/k=16.0$)

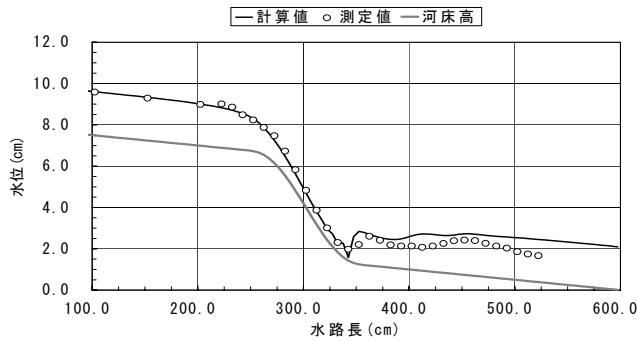


図-6 $y=27.5\text{cm}$ 地点の計算値と測定値の比較図($s/k=8.0$)

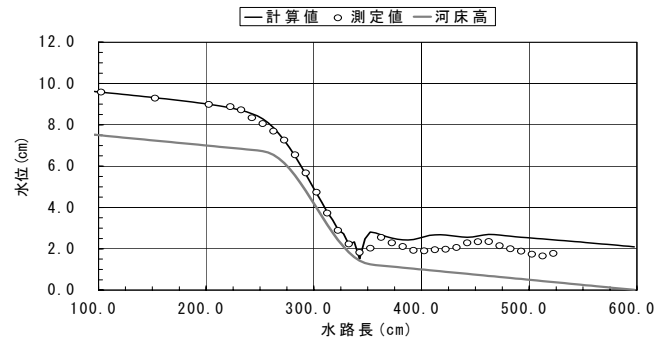


図-9 $y=27.5\text{cm}$ 地点の計算値と測定値の比較図($s/k=16.0$)

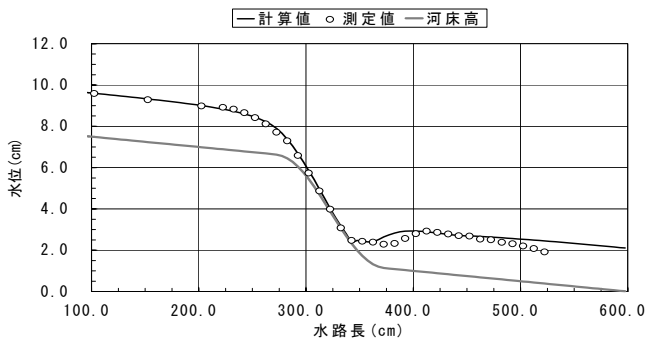


図-7 $y=47.5\text{cm}$ 地点の計算値と測定値の比較図($s/k=8.0$)

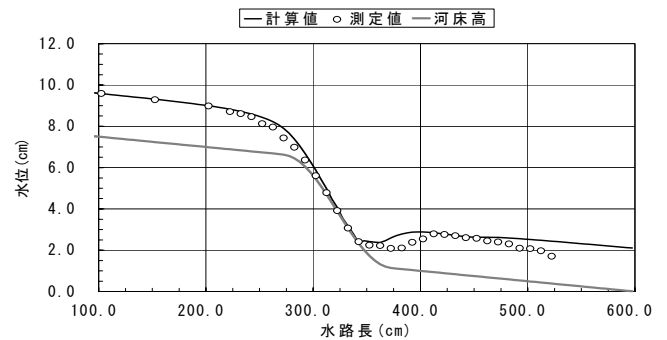


図-10 $y=47.5\text{cm}$ 地点の計算値と測定値の比較図($s/k=16.0$)

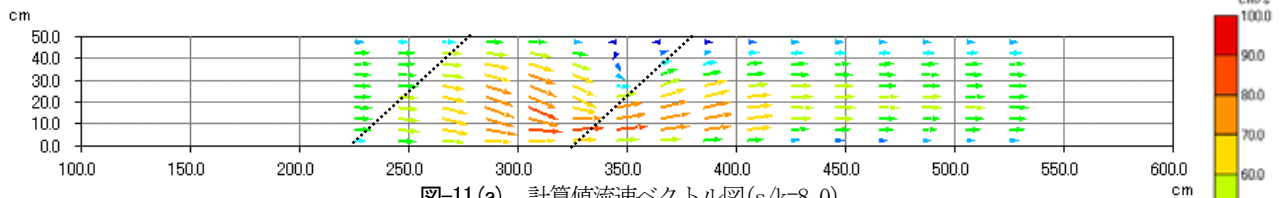


図-11(a) 計算値流速ベクトル図($s/k=8.0$)

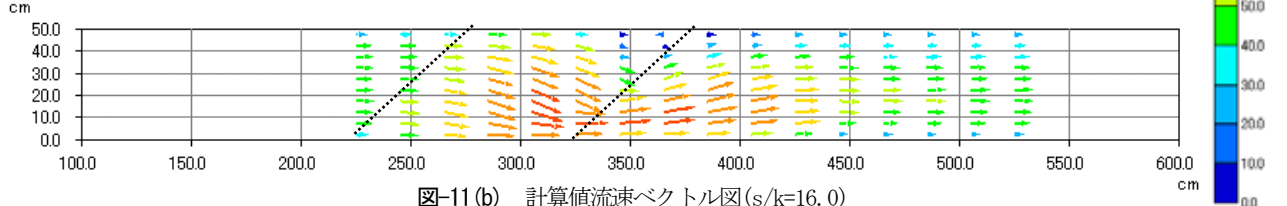


図-11(b) 計算値流速ベクトル図($s/k=16.0$)

方や局所的に細かいメッシュを形成すること等によって改善されると思われる。図-11(a)及び図-11(b)に $s/k=8.0$ 及び 16.0 のときの計算値流速ベクトル図を示す。また図-3(c)に $s/k=8.0$ のときの計算値 Fr 数コンター図を示す。流速ベクトル図及び Fr 数について図-2(a)・2(b)・3(a)と比較すると、流速及び Fr 数の計算値はやや小さい。これは、下流端水深の与え方によっては流速が大きくなり計算が収束しないことがあるため、下流端水深をやや大きめにして流速を抑え、計算の収束を優先させたことが影響しているものと考えられる。しかし平面的な流況につ

いては、実験との適合性はおおむね良好と言える。

図-12及び図-13にそれぞれ $y=2.5\text{cm}$ 地点及び $y=47.5\text{cm}$ 地点の流速値（流速ベクトルの絶対値）の x 方向変化を示す。測定値がかなりばらついてるのが目立つが、これは画像解析から得られたデータをそのままプロットしているためで、今後何らかの補正あるいは平滑化が必要であろう。このままの形で計算値と測定値を精緻に比較するのは難しいが、下流端や測定値が他のものと大きく外れている箇所を除き、流速の測定値と計算値の相関係数を求めた所、 $0.75\sim0.85$ 程度の適合性は得られている。

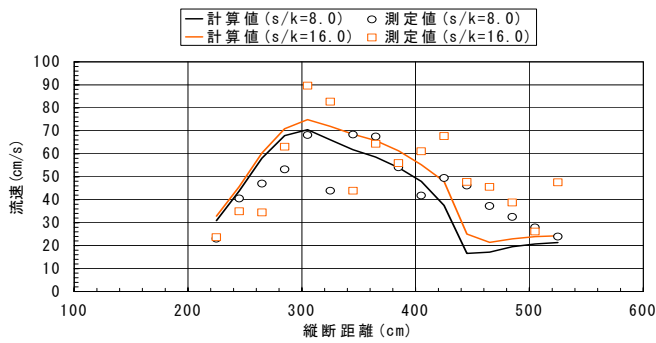


図-12 流速の計算値と測定値との比較(y=2.5cm 地点)

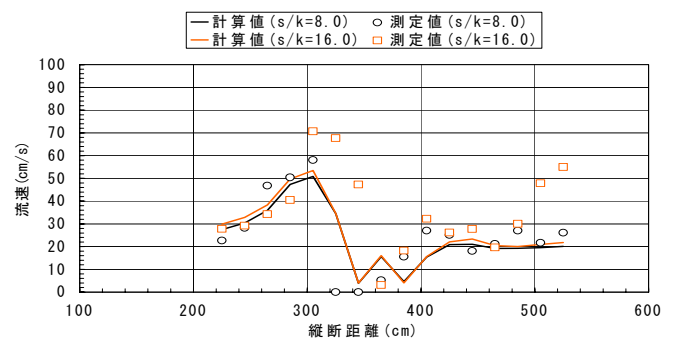


図-13 流速の計算値と測定値との比較(y=47.5cm 地点)

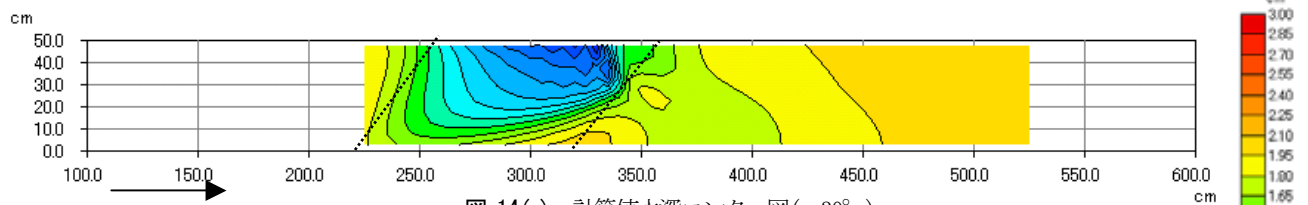


図-14(a) 計算値水深コンター図(a=30°)

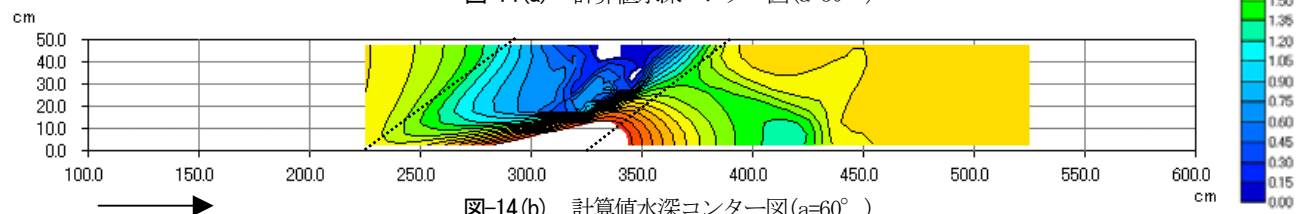


図-14(b) 計算値水深コンター図(a=60°)

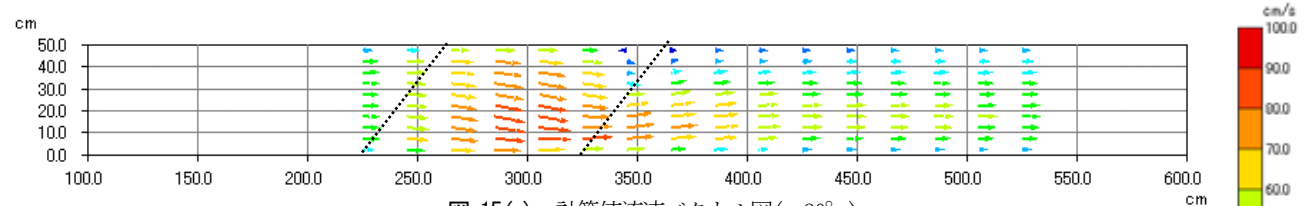


図-15(a) 計算値流速ベクトル図(a=30°)

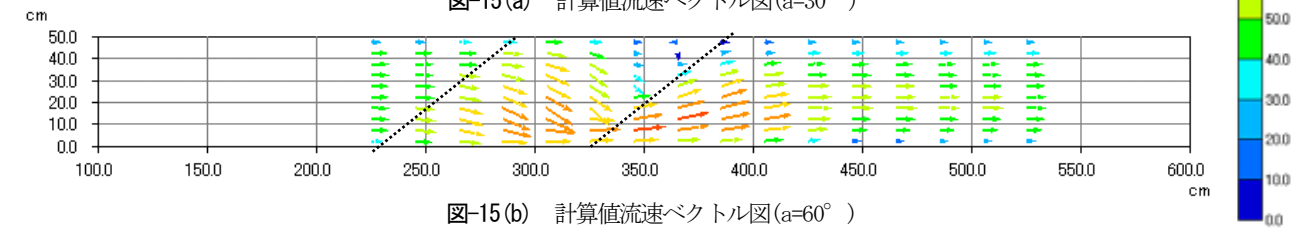


図-15(b) 計算値流速ベクトル図(a=60°)

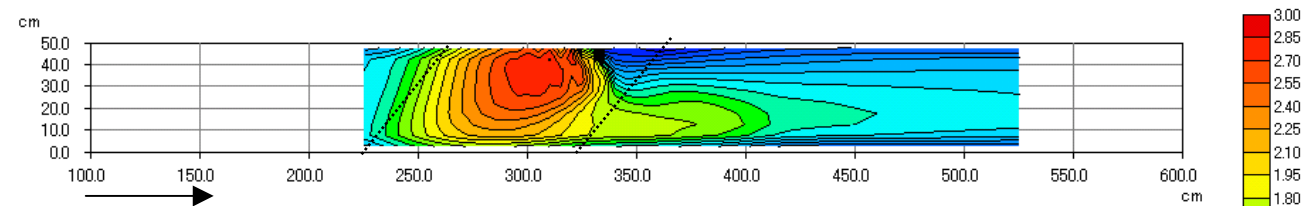


図-16(a) 計算値Fr 数コンター図(a=30°)

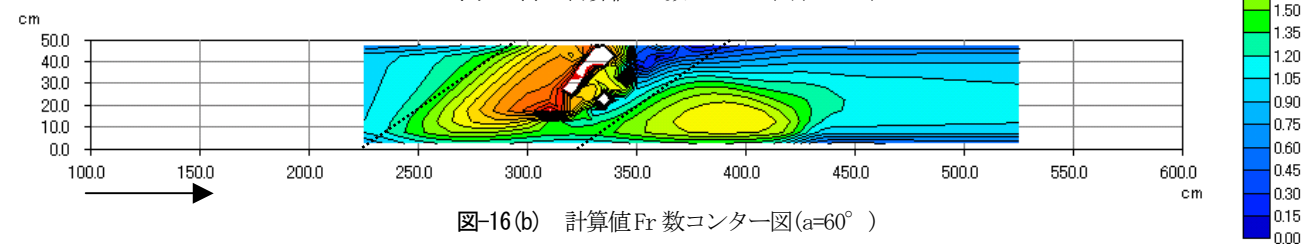


図-16(b) 計算値Fr 数コンター図(a=60°)

特に平面的な流速の発達箇所や全体の流向の様子等、流れの大きな特徴も概ね再現できている。

これらの図を見ると、側岸沿いの流速については兩岸とも $x=300\text{cm}$ 付近で最大となっている。左岸ではその場

所が斜面が始まったやや下流の地点であり、斜面が平面的に斜めに向いているために横断方向の流速成分も大きくなっている。右岸ではその場所が斜面が終わるところにあたり、左岸側からの流れも集中した結果、流速が最

大になったものといえる。また流れが集中する右岸では、粗度間隔が小さければ流速も低減される傾向にあり、護岸等の水理設計時には注意を要するところといえる。

(4) 前縁部の平面角度の影響

次に前縁部の平面角度を変化させた数値実験を行った。計算条件は表-2に示す通りで、表-1に示した case 1 と合わせて、同じ側壁粗度に対して 30° 、 45° 、 60° の3通りの数値実験を行ったことになる。

図-14(a)及び図-14(b)は数値実験による水深コンター図である。図中の点線は斜めスロープ始端と終端を表している。図-14(b)の $x=300\sim 350\text{cm}$ 付近右岸側の白い部分は水深が 3.0cm 以上となる地点である。図より、平面的角度が大きくなることにより、 $x=300\sim 350\text{cm}$ 右岸側の水深は大きくなり、左岸側では小さくなっている。それにより右岸側沿いの流れがより強くなり、左岸側の流れの剥離域は大きくなっている。水深が最大となるのは斜めスロープ終端の右岸側であり、斜面の平面的角度が変化してもこの位置は変化していない。その場所では縦断的な水面勾配も大きくなっていることがわかる。これは $s/k=16.0$ の時も同様の結果となることが予測できる。

図-15(a)及び図-15(b)は数値実験による流速ベクトル図である。図より前縁部の平面角度が大きくなるにしたがって、最大流速の生じている縦断的位置が異なっているのがわかる。 $a=30^\circ$ のときは、前縁部の斜面上において全体的に流速が速くなるのに対して、 $a=60^\circ$ のときにはより右岸側に近い場所で流れが速くなり、さらにその下流で最大となっている。斜めスロープ終端の左岸側の $x=345\sim 365\text{cm}$ の位置では流れが逆流しており、角度による変化は見られない。斜面の平面的角度によって河岸沿い流れの形態は異なっていると考えられる。

図-16(a)及び図-16(b)は数値実験による Fr 数コンター図である。図-16(b)において $x=325\text{cm}$ 付近の白い部分は Fr 数が 3.0 以上の地点である。これらの図から、最も右岸沿いの流れは常流となっており、横断的に見て水路中央にいくにしたがって射流域となっている。また、平面的角度が大きくなるにしたがって、 $x=350\sim 400\text{cm}$ の横断的な射流域は拡大していた。また、斜めスロープ上の Fr 数は水深が非常に小さい流れとなることから、計算においても不安定である。これは、局所的にメッシュ間隔を細かくする等の改良点が考えられる。河岸沿い流れの発達箇所は河床地形により、平面的に位置が変化することが確かめられたといえる。

4. 結 論

本研究は、中小出水時の自然河川の砂州地形及び護岸構造物を想定し、例えば鬼怒川上流部のように、急勾配でありながら水深に比して川幅の広い河川での砂州上の2次元流について、それらが常流射流混在流れの構造に与

える影響を検討するために水路実験及び数値実験を行った。水路実験において側壁粗度の影響について把握し、数値実験において河床地形の影響の検討を行った。その結果得られた知見は以下のようである。

(1) 栈粗度を与えた水路実験によって、河岸沿い流れは緩和され、横断的に見て水路のほぼ中央部の流れが促進される。

(2) 平面的な流れの形態としては、河岸沿いにて常流、水路中央部にて射流となり、水路実験における砂州地形の約 3m 下流にまで、射流の影響は延伸している。

(3) 水路実験と数値計算の適合性は、平面的な流速の発達箇所や全体の流向の様子等については概ね良好である。

(4) それを踏まえ、斜面角度を変化させて数値実験を行った結果、斜面の平面的角度が大きくなるにしたがって最大流速の生じている位置が流下方向下流へずれていた。

(5) 河岸沿い流れの発達は、河岸粗度の大小の影響と河床地形の影響の2者によってほぼ説明できる。これは、水路実験と数値実験の結果がほぼ同じであることから確かめられた。

(6) 今回の解析方法では、常流・射流が混在する場合に水面がやや振動する傾向があったが、局所的な射流領域の出現をある程度うまく表現することができた。

今後の課題としては、流速値測定の補正や数値計算の収束性の改良を行い、適合性の向上について検討を行うことが挙げられる。また斜めスロープ平面角度を変えた水路実験を行い、様々な角度から検証を行うことが挙げられる。

通常、護岸構造物等の水理設計においては、周辺河岸もしくは堤防と護岸工の粗度係数を合わせることや、法覆工近傍の流速を低減させること等が求められる。しかしそのみの検討では不十分であり、河川毎に適した護岸工選定の際には河床地形による流れの変化の影響を考慮しなければならないことが、本研究によって示唆された。また従前の災害復旧工事等で良く見られる直線的な護岸工法の改良に資することができると考えられる。

参考文献

- 1) 岩崎太志, 池田裕一, 古川保明: 砂州前縁部における常流射流混在流れの形態に関する基礎的研究, 第60回年次学術講演会, pp219-220, 2005.
- 2) 古川保明, 須賀如川, 池田裕一, 岩崎太志: 砂州前縁部における常流射流混在流れの構造に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第49巻(1), pp523-528, 2005.
- 3) 須賀如川: 大きい河岸侵食力を有するクランクフロアの基本的事項に関する考察, 水工学論文集第49巻(1), pp955-960, 2005.
- 4) 足立昭平: 人工粗度の実験的研究, 土木学会論文集, 第104号, pp33-44, 1964.
- 5) 日野幹雄: 明解水理学, 丸善株式会社, 1983.

(2005. 9. 30 受付)