

幅水深比の小さな一様弯曲水路における 砂堆発生時の局所流に関する 3次元数値計算

3-D NUMERICAL SIMULATION OF FLOW IN CURVED CHANNEL
WITH SMALL WIDTH-TO-DEPTH RATIO WHEN DUNE DEVELOPED

梶川 勇樹¹・檜谷 治²

Yuki KAJIKAWA and Osamu HINOKIDANI

¹正会員 博(工) 鳥取大学大学院助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

²正会員 工博 鳥取大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

In this study, the 3-D numerical simulation of the flow in a 90° curved channel with small width-to-depth ratio when the dune developed at the outer side of the channel was performed. The FAVOR method was introduced into the governing equations, and the $k-\varepsilon$ model predicted the turbulence. The QUICK scheme and the Adams-Bashforth method were used as the discretization scheme, and the HSMAC method on the collocated grid computed the anomaly pressure. The calculated results were compared with the experimental ones, and the cause of the scour region that appears in the inner side of the curved channel was mentioned from the calculated results.

Key Words : 3-D numerical model, FAVOR method, curved channel, dune, spiral flow, local scour

1. はじめに

河川弯曲部の河床変動に関しては、その防災上の重要性から従来より数多くの研究が行われており、特に一様弯曲水路に関しては実験的に、あるいは解析的に古くから検討がなされている。実験的研究としては、我が国では須賀¹⁾以降、数多くの研究がなされており、主として幅水深比の大きな河川を対象として検討されてきた。近年では幅水深比の小さな中小河川を対象とした研究も進められており、Kawaiら²⁾は90°弯曲水路を用いた河床変動実験により、比較的粗い河床砂の場合には内岸下流部にも洗掘域が発生する可能性を指摘している。また、檜谷ら³⁾はKawaiら²⁾と同条件での実験を行い、河床変動時の詳細な流速測定から、内岸の洗掘現象は外岸における砂堆の発達とそれに伴う流れの変化に起因することを明らかにしている。

一方、このような河道弯曲部における河床変動計算については、近年の飛躍的な計算機の発達以降、3次元モデルによる検討⁴⁾⁵⁾が行われている。しかしながら、従来行われてきた解析的研究では、幅水深比が大きいという条件や、水深と曲率半径の比が小さいという条件下での検討例が多く、幅水深比が小さい条件下での検討例は数少ない。幅水深比が小さい条件下としては、Rüntherら⁶⁾が

Kawaiら²⁾の実験を対象として検討を行っており、実験における平衡河床形状を概ね再現できている。しかし、内岸の洗掘深は小さく、河床の時間的な変化や流況の再現性に関する検討が行われていないため、檜谷ら³⁾が指摘した外岸での砂堆発生、およびそれに伴う流況の変化により内岸洗掘が発生したのかは不明である。杉山ら⁷⁾が幅水深比の小さな弯曲水路を対象として流況と乱流構造に関する詳細な検討を行っているものの、平坦固定床を対象としており、河床変動計算までは考慮されていない。

ところで、このような河道弯曲部を対象とした数値計算では、河道形状あるいは河床の凹凸の表現に一般座標系等が用いられる場合が多い⁴⁾⁷⁾。しかし、曲率が大きく、河道形状がより複雑となる場合、計算点が密や粗になり計算精度の低下を招く恐れがある。また、実河川を対象とする場合、近年はレーザ測量⁸⁾によって河床位のメッシュデータによる整理が容易になってきている点からも、デカルト座標系を用いた方がより実用的である。

そこで本研究では、幅水深比の小さい条件下で実施された檜谷ら³⁾の実験を対象とし、最終的に外岸部での砂堆発生と局所洗掘、および流れの変化に伴う内岸での洗掘現象を再現できる数値モデルの構築を目指して、まず、流れの数値計算モデルの構築を行った。数値モデルにはデカルト座標系におけるFAVOR法⁹⁾を導入し、砂堆発生下における檜谷らの流速測定結果との比較を行った。

表-1 実験条件

弯曲角 (°)	90	平均粒径 d_m (mm)	0.6
水路幅 B (cm)	20	流量 Q (ℓ/s)	4.0
曲率半径 r (cm)	60	平均水深 h (cm)	4.0
水路床勾配 i_b	1/300	幅水深比 B/h	5.0

表-2 計算条件

メッシュ数	x方向	70	Δt (sec)	0.001
	y方向	70	$\Delta x, \Delta y$ (cm)	2.0
	z方向	40	Δz (cm)	0.5
下流端水位 $h_t = 4.0$ cm, 粗度係数 $n = 0.014$				

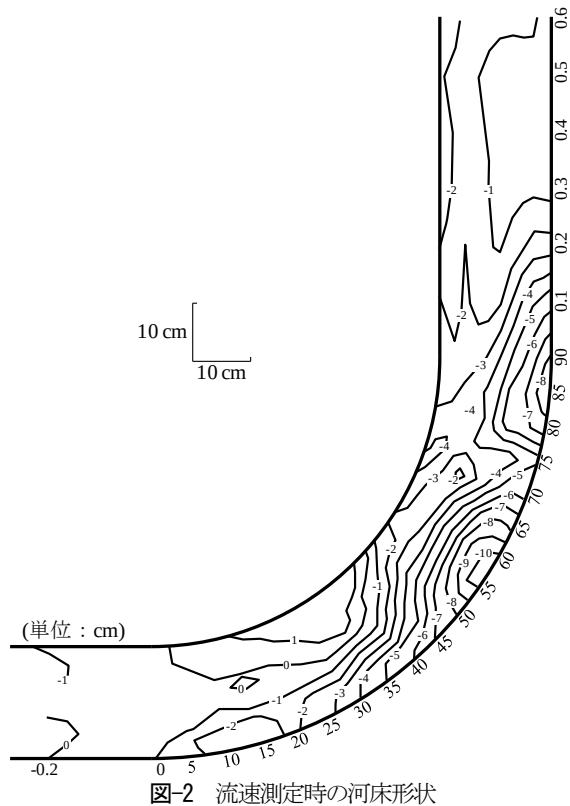


図-2 流速測定時の河床形状

さらに、螺旋流が卓越する時間帯では一時的な内岸洗掘が発生し、水理条件によっては内岸にも洗掘域が発生する可能性を指摘している。このような、砂堆発達に伴う外岸の局所洗掘現象、および内岸洗掘現象を再現するには、まず、外岸への主流の潜り込みによる螺旋流の発達過程を再現できる数値モデルが必要不可欠であり、本研究では、図-2の河床形状を対象とした数値計算を行う。

(2) 計算条件

表-2に計算条件を、図-3に本解析で使用した計算メッシュをそれぞれ示す。図には弯曲部のみを示しているが、実際の計算では上下流に70cmの直線部を設置している。また、計算の発散を避けるため、壁面境界セルの体積率が5%未満の場合、そのセルは固体壁面として取扱った。

4. 計算結果と考察

以下、図-3に示す波線の各横断面で流速分布の比較等を行っていくが、本数値モデルではデカルト座標系を採用しているため、計算点と実験による流速測定点とを完全には一致できない。そのため、計算値については流速測定点近傍の流速値より補完した値を示している。

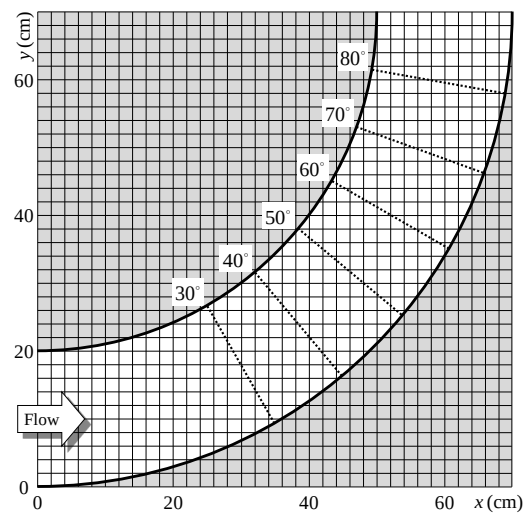


図-3 弯曲部における計算メッシュ

(1) 鉛直流速分布について

図-4に、(a) 流下方向および(b) 横断方向流速の鉛直分布の比較図を示す。図より、全体的に計算値は実験値を再現できていることが分かる。まず、洗掘孔(= 60°)より上流側では、外岸部において実験値同様の2次流の発達が認められる。また、内岸部では主流の剥離に伴う逆流も再現できている。さらに、50°断面の水路中央部付近からは、主流が底面付近へと潜り込んでいく様子が再現できている。一方、洗掘孔下流域では、砂堆への主流の衝突に伴い、底面付近の流速が加速している様子が見てとれる。また、内岸の洗掘孔内(= 70°~ 80°)では、弱いながらも実験値同様、底面で水路中央部へと向かう2次流が再現できている。

この様に、本数値モデルにより概ねの流況は再現できている。しかし、次節に示す平面流速ベクトルからも分かるように、実験では40°付近から主流の内岸からの剥離が生じているものの、計算ではそれより下流側で剥離が生じ、40°断面での水面形の対応が悪い。それに伴い、外岸洗掘孔内への主流の潜り込みも実験に比べて開始が遅く、最大洗掘深が生じている60°断面の外岸洗掘孔内では実験値程の底面流の増加は再現できていない。従って、本数値モデルを河床変動計算へ適用した場合、現段階では外岸での洗掘深を小さく見積もる可能性がある。また、洗掘孔下流域では、砂堆の影響による底面流速の増加が内岸方向へ強く表れており、結果、内岸ではその流れが水面付近にまで達している。これは、先述の剥離の開始が遅れたことにより、底面に潜り込んだ流れが外岸に十分到達する前に砂堆によって内岸方向へ向けられたためと考えられる。従って、今後改善の余地が残るとともに、主流が潜り込む要因を究明しておく必要がある。

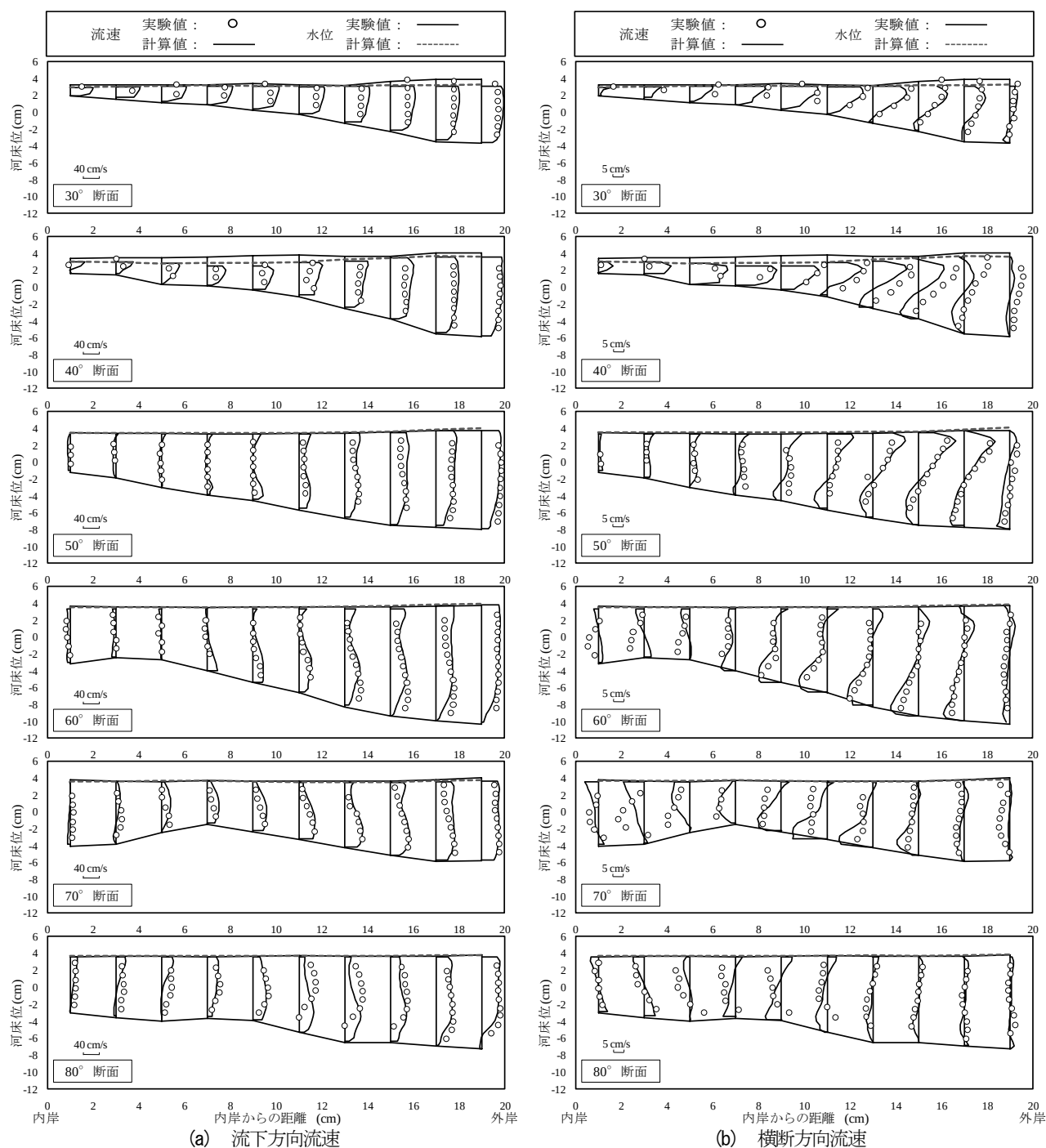


図-4 流下方向および横断方向流速の鉛直分布比較

(2) 平面流速ベクトルについて

図-5に、(a)実験値および(b)計算値による、水深平均、水面、および底面での平面流速ベクトルをそれぞれ示す。図より、実験では40°付近より内岸からの主流の剥離が生じ、最大洗掘深が生じている外岸55°付近に向けて流れが収束している様子が分かる。そして、内岸では逆流域が形成されており、また、55°以降、外岸部に収束していた流れは内岸方向へと発散する様な流況となっている。特に、底面ではその傾向が顕著に表れている。

一方計算では、実験同様、主流の剥離に伴う逆流域の形成や外岸への流れの収束、および底面近傍で内岸への発散傾向が強くなる点など良好に再現できている。また、

FAVOR法を導入することにより、壁面近傍の流向を滑らかに表現できている。しかしながら、前節同様、計算では剥離の発生位置が実験に比べて下流に位置しており、また、剥離直前(= 40°)での内岸における流速がかなり大きい。これを改善するため、予備計算では0-方程式モデルによる検討、あるいは側壁粗度を上げる等の検討を試みたが改善されなかった。この原因としては、FAVOR法の効果による影響、あるいは側壁境界条件、壁関数の問題とも考えられるが、現時点で十分な原因は掴めていない。底面への流れの潜り込みによる局所洗掘現象を高精度に再現するためには、この剥離発生位置を正確に再現することが重要であり、そのため、今後FAVOR法

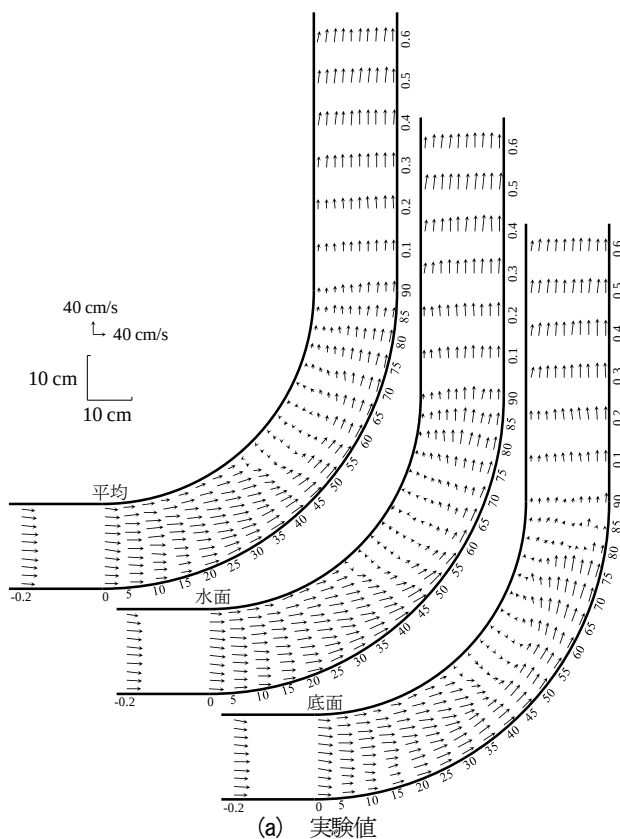


図-5 平面流速ベクトル

導入下における上記原因について究明する必要がある。

(3) 鉛直流速ベクトルについて

図-6に、(a)実験値および(b)計算値による、外岸付近の鉛直流速ベクトルを示す。実験では、洗掘孔上流域において洗掘孔内に向かう下降流が生じ、45°~60°断面では水深中央部から底面付近にかけて流速が増加していることが分かる。また、洗掘孔下流域では砂堆部での上昇流が顕著に見られる。一方計算では、内岸剥離の遅延に伴う主流の潜り込みの遅れから、外岸より3cm地点において、洗掘孔内に向かう下降流は再現できているものの、45°~60°断面における水深中央部以下の流速の増加は再現できていない。しかし、外岸より5cm地点では洗掘孔内に向かう下降流と同時に、水深中央部以下の流速の増加も再現できていることが分かる。また、砂堆部での上昇流も再現できており、本数値モデルの妥当性が伺える。

(4) 横断流況と内岸洗掘の発生について

檜谷ら³⁾によれば、内岸洗掘の発生は外岸の洗掘孔内で発生する螺旋流により主流が内岸へ向き、内岸へ衝突した主流が外岸同様の螺旋流を形成して、それにより洗掘が生じるとしている。先述のように、本数値モデルでは外岸洗掘孔内での2次流に加え、内岸洗掘孔内では外岸同様の2次流が発生していた。そこで、ここでは内岸洗掘発生時の流況について計算結果による考察を加える。

図-7に、各横断面における流速ベクトルを示す。図より、洗掘孔上流域では外岸において洗掘孔内に向かう強

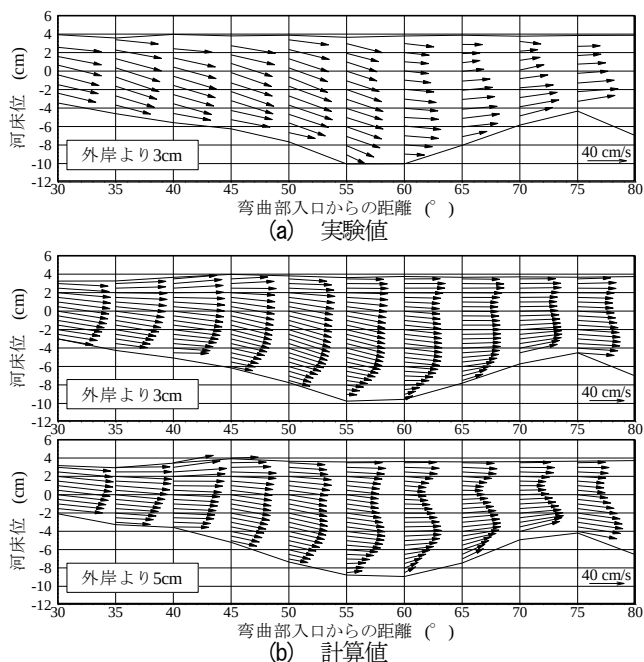


図-6 外岸付近における流速ベクトル

い下降流と同時に、底面で内岸方向へと向かう2次流が発生している。特に、最大洗掘深が発生している60°断面では底面の流れが強い上昇流を伴っており、これらが外岸螺旋流を形成していると考えられる。

一方、洗掘孔下流域では、砂堆の影響による外岸底面での強い流れが内岸洗掘孔内に流入し、底面で外岸方向へ向かう弱い2次流を形成している。ただし、今回対象とした実験では主流が十分内岸に達していない状況であ

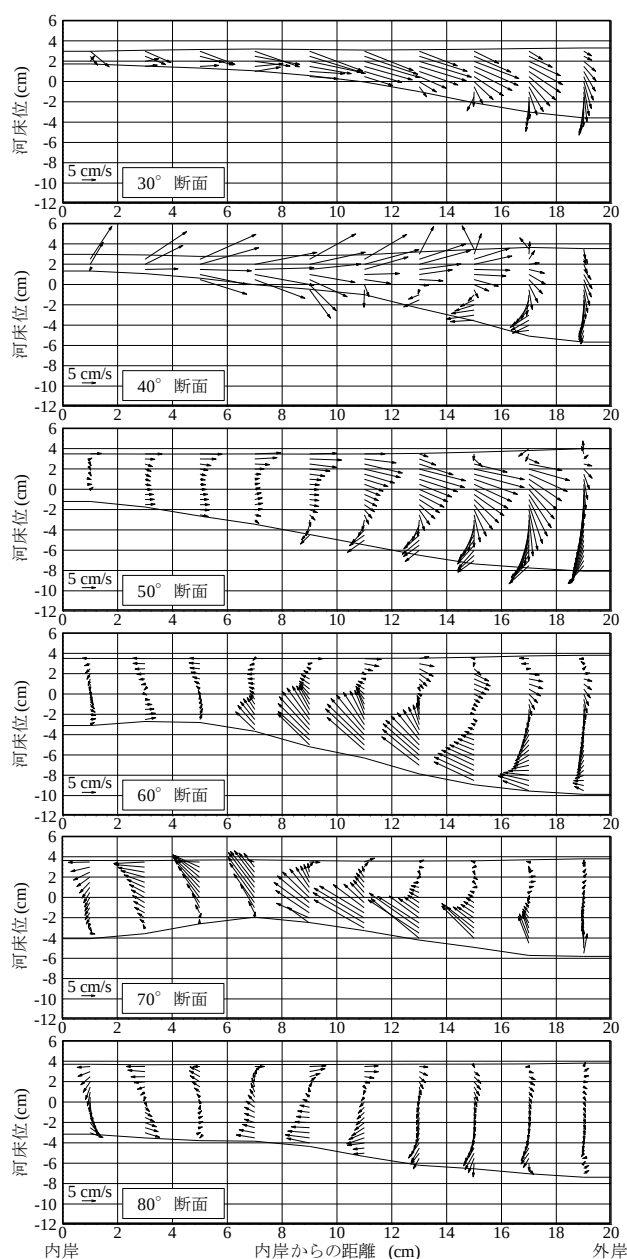


図-7 横断流速ベクトル (計算結果)

るため、計算でも内岸底面で上昇流を伴う様な明瞭な螺旋流は再現できていない。しかし、主流が十分内岸に達している状況、すなわち、外岸洗掘孔内への主流の潜り込みが大きく、砂堆の影響による外岸から内岸への流入流量が増加すれば、上述の内岸2次流が強い螺旋流を形成し、結果、内岸洗掘へ繋がるものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、幅水深比の小さい一様弯曲水路において、砂堆が発生している状況下での流況計算を試みた。以下に本研究で得られた知見を述べる。

[1] 本数値モデルにより、砂堆発生下にある一様弯曲水路の流況を概ね再現できることが確認された。特に、内岸剥離後の主流が外岸洗掘孔内の底面付近に向け

て潜り込む様子を再現することができた。

[2] 基礎式にFAVOR法を導入することにより、側壁近傍流況を滑らかに表現できることが確認された。しかし、内岸剥離位置が精度良く再現できず、これがFAVOR法の影響によるものなのかは定かではない。

[3] 計算結果から、内岸洗掘発生時の流況について考察した。内岸洗掘は内岸向きの主流、つまり外岸螺旋流底面からの強い流れが内岸に流入し、それが内岸螺旋流を形成して洗掘が生じることが推測された。

以上のことが明らかにされたが、今後は、FAVOR法導入下における側壁境界部について詳細に検討するとともに、主流が外岸へ潜る要因の究明、および砂堆の発生・発達過程が再現可能な河床変動モデルによる外岸洗掘、内岸洗掘現象について検討する予定である。

参考文献

- 1) 須賀堯三：開水路わん曲部河床の安定形状 (その2)，第10回水理講演会講演集，pp.111-116，1966.
- 2) Kawai, S., and Julien, P. Y. : Point bar deposits in narrow sharp bends, *J. Hydraul. Res.*, Vol.34, No.2, pp.205-218, 1996.
- 3) 檜谷治，道上正規，河合茂：一様弯曲水路における河床変動と河床波の特性に関する実験的研究，水工学論文集，第42巻，pp.979-984，1998.
- 4) Shimizu, Y., Yamaguchi, H., and Itakura, T. : Three-dimensional computation of flow and bed deformation, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 116, No.9, pp.1090-1108, 1990.
- 5) Wu, W., Rodi, W., and Wenka, T. : 3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channel, *J. Hydraul. Eng.*, Vol.126, No.1, pp.4-15, 2000.
- 6) R  ther, N. and Olsen, N. R. B. : Three-dimensional modeling of sediment transport in a narrow 90  Channel Bend, *J. Hydraul. Eng.*, Vol.131, No.10, pp.917-920, 2005.
- 7) 杉山均，杉山真悟：粗面河床を有する曲り開水路乱流に関する研究，土木学会論文集，No.747/II-65，pp.71-83，2003.
- 8) 松本健作，名倉裕，玉置晴郎，小葉竹重機，清水義彦，秋山圭史郎：3Dレーザスキャナによる鬼怒川の河道内地形の実測とその河川工学的応用，河川技術論文集，第9巻，pp.253-258，2003.
- 9) C. W. Hirt, J. M. Sicilian : A porosity technique for the definition obstacle in rectangular cell meshes, Flow Science, Inc. Los Alamos, New Mexico, pp.450-469, August 1985.
- 10) 牛島省，禰津家久：移動一般座標系を用いたコロケート格子による自由水面流れの数値解析手法，土木学会論文集，No.698/II-58，pp.11-19，2002.
- 11) 木村一郎，細田尚：非線形k-εモデルによる角柱周辺流れの3次元解析，水工学論文集，第43巻，pp.383-388，1999.
- 12) 杉山均，秋山光庸，松原珠：複断面開水路内の乱流構造解析と縦渦生成に関する研究，土木学会論文集，No.515/II-31，pp.55-65，1995.

(2008. 9. 30受付)