

幅広断面開水路における第二種二次流の数値解析

Numerical Study on Secondary Currents of the Second Kind in Wide Shallow Open Channel Flows

北海道大学工学部 環境社会工学科シビルエンジニアリングコース ○学生員 鈴木理沙 (Risa Suzuki)
 北海道大学 工学研究院環境フィールド工学部門 准教授 正会員 木村一郎 (Ichiro Kimura)
 北海道大学 工学研究院環境フィールド工学部門 正会員 岩崎理樹 (Toshiki Iwasaki)
 北海道大学 工学研究院環境フィールド工学部門 教授 正会員 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)

1. はじめに

乱流の非等方性によって生じる第二種二次流は流体工学の分野において古典的な題材であり、これまで多くの研究者が様々な手法を用いて研究を行ってきたという認識があるものの、未だ解明されていない部分も多く、今後も議論を有する題材であると言える。特に、幅広断面開水路の場合の第二種二次流の挙動は不明な点が多く、これまでNezuら¹⁾によって外岸から2.5h以上となる横断位置では二次流セルの存在は確認できないという報告がなされてきたが、一方でBlanckaertら²⁾の実験結果では外岸から2.5h以上離れた横断面でも二次流セルの存在を確認できるという報告がされるなど、二次流に関する基礎的な特性が正確に把握できているとは言えない現状にある。また、壁面と底面の粗度勾配が二次流に及ぼす影響や二次流の発生源とされている壁面と二次流の関係、アスペクト比(=B/h, B:水路幅, h:水深)と二次流セルの大きさ・数との間の関係など、二次流と関連のある種々パラメータは明確になってはきていないもの、両者間の相互関係を詳細に解明するには至っていない。さらにこれまで、Nezuらによって第二種二次流の成因は壁面にあるという指摘がなされてきたが、一方でColombini³⁾は第二種二次流の成因は壁面の影響ではなく流れの不安定性によるものであり、壁面そのものは直接には関係ないとし、その観点から安定解析による検討も行われてきた。

このように、第二種二次流は河床形態の変化に影響を及ぼす水理現象であるにもかかわらず、上述したように未解明な部分が多々あり、これらを明らかにすることは工学的にきわめて重要な課題であると言える。

本論文では、Ali⁴⁾らによって提案された二次非線形k-εモデルを採用した3D(three-dimensional)-RANS(Steady Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations)による数値計算結果とBlanckaertらによる室内実験結果の比較を通して、幅広断面開水路における第二種二次流の基礎的特性の検討を数値解析により行う。

2. 数値解析モデル

本研究における数値解析モデルは3D-RANSモデルを採用した。モデルの基礎式は、流速ベクトル反変成分に関する移動一般曲線座標系における三次元流れの式である。基礎式は連続式、運動方程式、k方程式、ε方程式の

4つで構成される。また、乱流モデルとしては、Aliらによる二次非線形k-εモデルを採用している。数値解析モデルの詳細は島田ら⁵⁾による論文を参照頂きたい。

3. 解析結果と考察

3.1 Blanckaertらによる実験の概要

Blanckaertらはアスペクト比の異なる3つのケースで実験を行い、アスペクト比が第二種二次流に及ぼす影響について検討した。

実験は、幅1.3m、長さ9mの直線水路で、水路底面は直径2mmの準均一な砂粒子で覆われ、砂粒子は塗料で固定され移動不可能とした状態で行われた。実験の水理条件の詳細は表-1に示す。

表-1 Blanckaertらの実験の水理条件

| | Width B[m] | Depth B/H[-] | Velocity U[m/s] | Discharge Q[m ³ /s] | Channel slope i[-] |
|-------|---------------|-----------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| case1 | 1.3 | 11.9 | 0.40 | 0.06 | 6.8×10^{-4} |
| case2 | 1.3 | 8.1 | 0.43 | 0.09 | 6.2×10^{-4} |
| case3 | 1.3 | 6.2 | 0.38 | 0.10 | 4.1×10^{-4} |

3.2 実験との比較と考察

図-2~8にCase1, 図-9~12にCase2, 図-13~16にCase3の条件における実験結果及び解析結果の横断面図を示す。なお、実験結果と数値計算結果を可視化する際のスケールは一致させている。図中の添え字s,n,zはそれぞれ縦断方向、横断方向、鉛直方向を示しており、Vs,Vn,Vzはそれぞれ主流流速、横断流速、鉛直流速である。

Case1における結果として、図-2に二次流セル分布、図-3~5にはそれぞれ主流流速分布、水平流速分布、鉛直流速分布、図-6に乱れエネルギー分布、図-7~8に無次元化されたレイノルズ応力 $\overline{v_s'v_n'}/U_*^2$ 及び $\overline{v_s'v_z'}/U_*^2$ を示す。図-2を見ると実験と数値計算の二次流セルの分布は位置、大きさともによく一致しており、数値計算モデルは実現象を良好に再現していると言える。これまで、壁面から2.5h以上離れた横断面で生じる二次流が、壁面付近で生じる二次流と比較して強度が小さいという報告もみられるが、Case1はB/h=11.9という幅広断面水路であるにもかかわらず、水路中央付近においても壁面付近の二次流セルとほぼ同程度の強度を持つ二次流セルの存在が確認された。図-3を見ると、分布形状は若干異なっており、数値解析による結果の方が実験結果よりも二

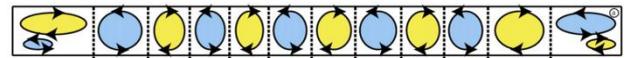
次流が強く現れ、流速分布を大きく変化させる結果となっている。しかし、分布傾向を見てみると、実験結果では二次流セルが隣接し上昇流が生じる箇所では底面付近の低速流塊が上方に持ち上げられ、一方、下降流となる箇所では大きい流速が底面付近まで到達している。数値解析結果でも同様の傾向が見て取れるため、良好な再現ができていえると言われている。流速の値について見てみると、実験結果では断面平均流速 $U=0.40[m/s]$ に対する最大流速の比が $V_s/U=1.20$ 程度であり、数値計算結果では $V_s/U=1.31$ となっているため、数値計算結果の方が若干大きい両者はほぼ一致している。図-4を見ると、数値解析結果の分布は図-2に示す渦の向きに適合する形で水平の流れが発生している。一方、実験結果では分布形状が定まっておらず左右対称の分布となっていない。このような分布となった一つの原因としては、計測時間が180秒間と不十分であり、時間的な平均を満足していないためであると考えられる。計測時間を十分に確保してから計測を行うと数値解析結果のような左右対称の流速分布が得られるものと考えられる。実験結果では断面平均流速に対する最大流速の比は $100V_n/U=4.0$ 程度であり、数値計算結果では $100V_n/U=3.04$ となっており、数値計算結果の方が若干大きい。しかし、図-5に示す鉛直流速分布を見ると、実験と数値解析による結果は概ね一致していることがわかる。こちらも計測時間を十分に確保すると、数値解析のような対称分布になると考えられる。また、数値解析結果を見ると渦の向きに適合する形で流速値の高流速、低流速が存在しており、実験結果でも同様な傾向が見て取れるため、数値解析結果は実現象を良好に再現していると言える。断面平均流速に対する最大流速の比は、実験結果では $100V_z/U=2.0$ 程度、数値解析結果では $100V_z/U=2.33$ となっており、両者はほぼ一致している。

図-6は無次元化された乱れエネルギー tke (turbulence kinetic energy)の分布を示しており、これについて見ていくと、実験結果と数値解析結果の分布形状は一致してはいるものの、乱れエネルギーを摩擦速度 U_*^2 で無次元化した値 tke/U_*^2 に関しては、実験結果では最大値 $tke/U_*^2=1.8$ 程度であるにもかかわらず、数値解析では $tke/U_*^2=5.4$ となっており、数値解析結果の方が大きくなっている。この原因のひとつとしては、先述したように、実験の際に計測時間が不十分であるという原因が考えられ、その分乱れが過小評価されたものと考えられる。図-7に示すレイノルズ応力 $\overline{v_s^2 v_n^2}$ 成分の分布を比較すると、 $\overline{v_s^2 v_n^2}/U_*^2$ の最大値が実験では $\overline{v_s^2 v_n^2}/U_*^2=0.4$ 程度、数値計算では $\overline{v_s^2 v_n^2}/U_*^2=0.53$ となっており、最大値、分布形状ともによく一致していることがわかる。また、数値解析結果では渦の分布位置と合う形でレイノルズ応力値の正負が分布しており、流れの状態を良好に再現できていると言える。図-8に示すレイノルズ応力 $\overline{v_s^2 v_z^2}$ 成分の分布を比較すると、 $\overline{v_s^2 v_z^2}/U_*^2$ の最大値が実験では $\overline{v_s^2 v_z^2}/U_*^2=0.2$ 程度、数値計算では $\overline{v_s^2 v_z^2}/U_*^2=0.16$ と同程度であり、また分布形状もほぼ一致している。しかし、 $\overline{v_s^2 v_z^2}/U_*^2$ の最小値が実験では $\overline{v_s^2 v_z^2}/U_*^2=-0.4$ 、数値計算では $\overline{v_s^2 v_z^2}/U_*^2=-1.35$ と大きく異なる結果となった。こ

れは図-6の結果からわかるように数値計算では乱れを過大評価したためにレイノルズ応力 $\overline{v_s^2 v_z^2}$ 成分にも影響が出たものと思われる。

Case2の結果として、図-9に二次流セル分布、図-10に主流流速分布、Case3の結果として、図-11に二次流セル分布、図-12に主流流速分布を示す。図-9及び図-11に示すように二次流セルの分布を実験結果と数値計算結果とで比較してみるとCase2, Case3ともにセル数はどちらも数値計算結果の方が2セル多いという結果になった。セル数は一致してはいないものの、水路中央付近での二次流セルが存在している様子や、水深が大きくなると渦数が減少し、水深に応じて渦のサイズが大きくなるといった傾向など、渦の分布形状に関してはよく一致している。また、図-10に示すCase2の主流流速分布を比較してみると、断面平均流速 $U=0.43[m/s]$ に対する主流流速の比 V_s/U の値が、実験では最大値 $V_s/U=1.23$ 程度、数値計算では最大値 $V_s/U=1.25$ となっており、両者はほぼ一致している。図-12に示すCase3の主流流速分布を比較してみると、断面平均流速 $U=0.38[m/s]$ に対する主流流速の比 V_s/U の値が、実験では最大値 $V_s/U=1.24$ 程度、数値計算では最大値 $V_s/U=1.23$ となっており、こちらについても両者はほぼ一致していることがわかる。Case2, Case3 どちらについても主流流速の分布形状は若干の違いは見られるものの実験結果をほぼ良好に再現していると考えられる。

以上の結果を踏まえると、今回採用した数値計算モデルは実現象をほぼ良好に再現しており、二次流の特性を判断する上で十分なツールであると考えられる。今回、 $B/h=11.9, 8.1, 6.2$ と非常に幅広断面水路における二次流構造について検討を行ったが、今回の検討により壁面の影響があまり及ばない水路中央付近でも二次流セルが存在し、またその強度は壁面付近と比較して減衰していないということがわかった。これまで二次流の成因の一つは壁面の存在によって引き起こされる乱れの非等方性によるものであるとされてきたが、今回の結果はそれに反するものとなった。そこで第4章では、二次流の成因を明らかにするためにに行った数値実験とその考察を示すこととする。

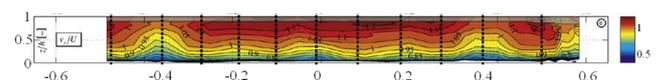


(a)Case1の実験における二次流セル分布

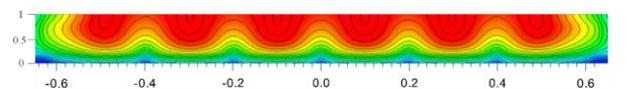


(b)Case1の数値解析による二次流セル分布

図-2 Case1の二次流セルの実験と数値解析結果

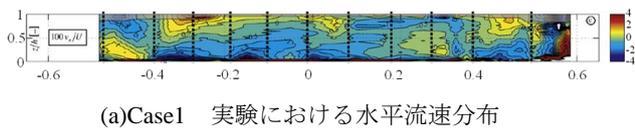


(a)Case1の実験における主流流速分布

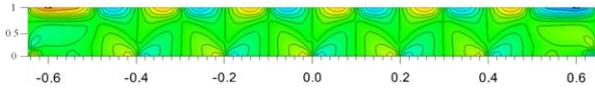


(b)Case1の数値解析による主流流速分布

図-3 Case1の主流流速の実験の数値解析結果

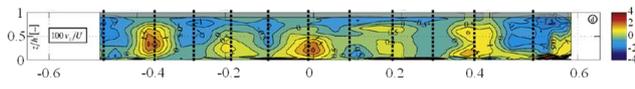


(a)Case1 実験における水平流速分布

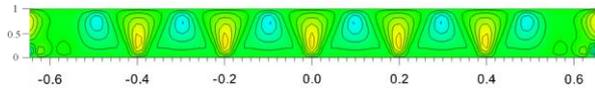


(b)Case1 数値解析による水平流速分布

図-4 Case1 水平流速の実験と数値解析結果

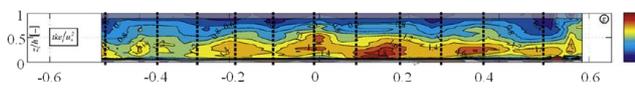


(a)Case1 実験における鉛直流速分布

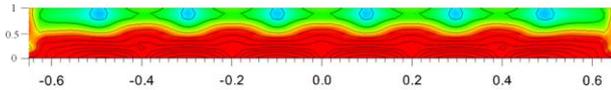


(b)Case1 数値解析による鉛直流速分布

図-5 Case1 鉛直流速の実験と数値解析結果

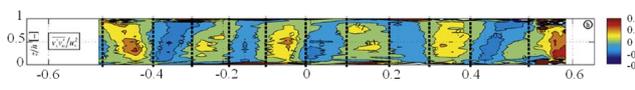


(a)Case1 実験における乱れエネルギー分布

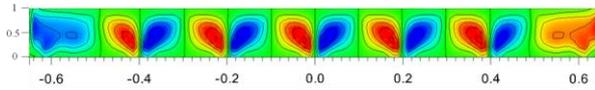


(b)Case1 数値解析による乱れエネルギー分布

図-6 Case1 乱れエネルギーの実験と数値解析結果

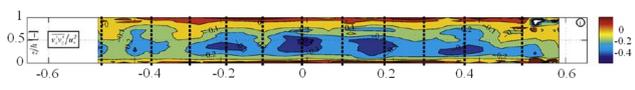


(a)Case1 実験におけるレイノルズ応力 $\overline{v_s'v_n'}/U_*^2$ 分布

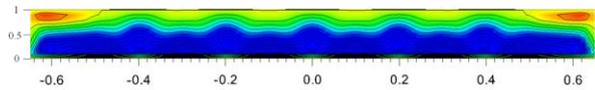


(b)Case1 数値解析によるレイノルズ応力 $\overline{v_s'v_n'}/U_*^2$ 分布

図-7 Case1 の $\overline{v_s'v_n'}/U_*^2$ の実験と数値解析結果

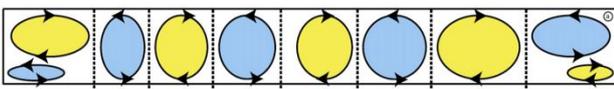


(a)Case1 実験におけるレイノルズ応力 $\overline{v_s'v_z'}/U_*^2$ 分布

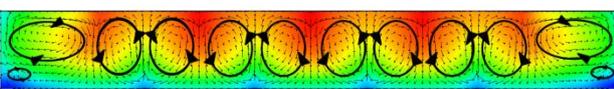


(b)Case1 数値解析によるレイノルズ応力 $\overline{v_s'v_z'}/U_*^2$ 分布

図-8 Case1 の $\overline{v_s'v_z'}/U_*^2$ の実験と数値解析結果

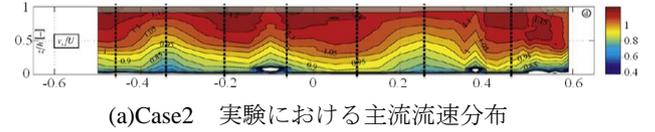


(a)Case2 実験における二次流セル分布

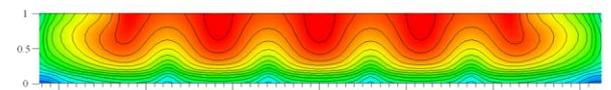


(b)Case2 数値解析による二次流セル分布

図-9 Case2 二次流セルの実験と数値解析結果

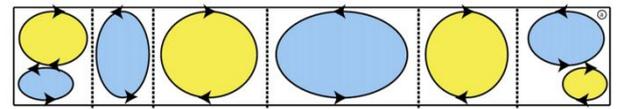


(a)Case2 実験における主流流速分布

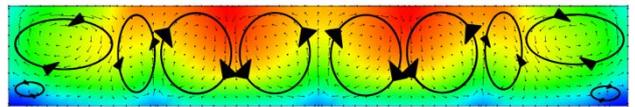


(b)Case2 数値解析による主流流速分布

図-10 Case2 主流流速の実験と数値解析結果

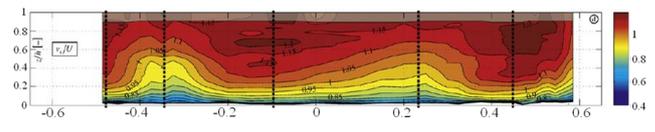


(a)Case3 実験における二次流セル分布

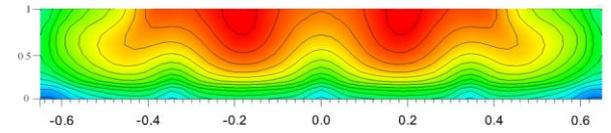


(b)Case3 数値解析による二次流セル分布

図-11 Case3 二次流セルの実験と数値解析結果



(a)Case3 実験における主流流速分布



(b)Case3 数値解析による主流流速分布

図-12 Case3 主流流速の実験と数値解析結果

4. 二次流の成因に関する数値実験

今回二次流の成因を明らかとするため、様々な条件で数値解析を行った。まず初めに Case1 と同様の水理条件において横断方向、主流方向ともに周期境界条件とし、壁面の影響が出ない場合において数値実験を行い、二次流セルが存在するかどうかを確かめた。この計算ケースを Case4 とする。

図-13 及び 14 に Case4 で得られた数値解析結果の横断面図を示す。この数値実験は $t=1000[s]$ まで計算を行った。計算開始後すぐに乱れが生じることはなかったが、図-13 に示すように $t=360[s]$ あたりで水路中央付近に乱れが生じ始め、図-14 のように $t=1000[s]$ に達する間にその乱れが水路全体に及び二次流セルを形成していくという結果が得られた。生成された二次流が水路全体に及んだということより、一度生成された二次流は減衰することなく維持され、流れに更なる乱れを生み、二次流セルをさらに増加させるということがわかった。 $t=360[s]$ あたりで生じた最初の乱れは計算の打ち切り誤差によるものと考えられ、何らかの不安定性によってこれが増幅され、その擾乱が二次流へと発達したと考えられる。このこと

により、壁面のみが二次流の成因ではなく、壁面の影響が及ばない範囲でも流れの不安定性が原因で二次流に発展するという仮説が立てられる。そこで、流れに強制的に擾乱を与えた場合に、この擾乱が二次流に見られるような水深スケールの渦列に発展するかどうかを確認するため、以下のような数値実験を行った。数値実験は、水路長さを Case4 よりも長く $L=20\text{m}$ と設定し、残りの水理条件は Case1 と一致させて、横断方向を周期境界条件、主流方向を非周期境界条件、上流端に突起物のような障害物を設置して擾乱を与えたケースにおいて行った。障害物は水路の中央に 2 セル(約 2cm)の高さで設置し、発生したその擾乱が下流に向かってどのように発達していくかに着目した。以下、この計算ケースを Case5 とする。

図-15 及び図 16 にそれぞれ、Case5 における流速分布、下流端横断面での二次流セルの分布を示す。図-15 を見ると、上流端で与えた乱れは下流に影響を及ぼし、流速に変化をもたらす縦渦を発生させており、下流に進むにつれ縦渦の数も多くなっていることがわかる。また図-16 に示す下流端横断面図を見れば、縦渦の存在が見られる箇所において、二次流セルの存在も確認できる。

この数値実験により、突起物によって水中に加えられた小さな擾乱は下流に向けて発達するとともに、二次流と同様の水深スケールの渦列へと発達することがわかった。これは、壁面のみが二次流成因ではなく、壁面の影響が及ばない範囲でも流れの不安定性が原因で二次流に発展するという仮説を裏付ける結果となった。

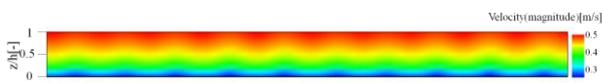


図 13 Case4 の $t=360[\text{s}]$ における流速分布

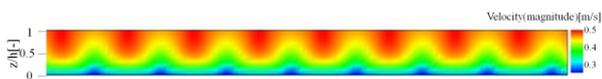


図 14 Case4 の $t=1000[\text{s}]$ における流速分布

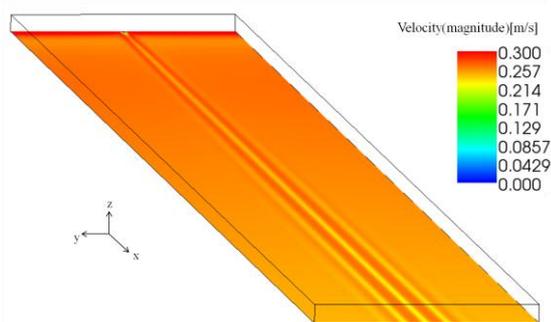


図 15 Case5 流速分布

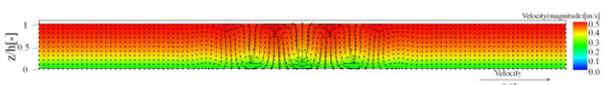


図 16 Case5 二次流セル分布

5. おわりに

本研究では、既往の実験結果と比較することで 3D-

RANS による再現性の検証を行い、幅広断面開水路における第二種二次流の挙動に関する研究を行った。以下に本研究のまとめと今後の課題を述べる。

- 1) 今回採用した 3D-RANS は、第二種二次流の強度を若干過大評価するものの、平均化された流れの様子は良好に再現することができた。しかし、水深が大きくなった場合における渦の数が一致しないなどの課題が残されており、関連するパラメータの検討等を行い、数値解析モデルの改良を図る必要がある。
- 2) これまで壁面から 2.5h 以上離れた横断位置では二次流セルの存在が確認できないという指摘もなされてきたが、今回 3D-RANS による数値解析結果を見ると、壁面から 2.5h 以上離れた横断位置でも明確な二次流セルが確認された。また、 $B/h \geq 10$ など非常に幅広断面水路においても、水路全体にわたり二次流セルは存在し、中央部付近の二次流セルは壁面付近での二次流セルと比較しても強度の減衰は見られなかった。
- 3) 横断方向、主流方向ともに周期境界条件の下行われた数値実験では、流れに壁面の影響が及ばないにも関わらず、計算の打ち切り誤差によって生じた流れの不安定により二次流が発生した。このことから、壁面のみが二次流の成因ではなく、流れに何らかの不安定性が生じることで二次流へと発達するという仮説が立てられた。
- 4) 上流端に障害物セルを設置し、意図的に擾乱を与えた場合における数値実験結果によって、第二種二次流は壁面の存在のみによって引き起こされるのではなく、流れの不安定性が第二種二次流の成因であるということが明らかとなった。

参考文献

- 1) Nezu, I., Nakagawa, H. and Tominaga, A. : Secondary currents in a straight channel flow and the relation to its aspect ratio, *Turbulent shear flows 4.*, Springer-Verlag, pp.246-260, 1985.
- 2) K.Blanckaert, A.Duarte, A.J. Schleiss : Influence of shallowness, bank inclination and bank roughness on the variability of flow patterns and boundary shear stress due to secondary currents in straight open-channels, *Advances in Water Resources*, pp. 1062-1074, 2010.
- 3) M.Colombini : Turbulence-driven secondary flows and formation of sand ridges, *J.Fluid Mech*, vol.254, pp.701-719, 1993.
- 4) Ali, M. S., Hosoda, T., and Kimura, I. : A non-linear k-ε model to predict the spatial change of turbulent structures in large scale vortices, *J. of Applied Mech.*, JSCE, vol.10, pp.723-732, 2007.
- 5) 島田龍市・木村一郎・清水康行 : 一様湾曲水路における三次元流れ構造と河床変動に関する研究, *応用力学論文集*, vol.14, pp.703-712, 2011.