異なる水深における開水路第二種二次流に及ぼす水深の影響の再現計算

3D Computation on Secondary Current of the 2nd kind in Open Channel Flows under different depths

北海道大学工学部 環境社会工学科 ○学生員 原 佑輔 (Yusuke HARA) 北海道大学 工学研究院 准教授 正会員 木村 一郎 (Ichiro KIMURA) 北海道大学 工学研究院 教授 正会員 清水 康行 (Yasuyuki SHIMIZU)

1. はじめに

一般に上流から下流に向かう流れを主流と呼び、その主 流に対して垂直な横断面内の流れを二次流と呼ぶ。この二 次流は、第一種二次流と第二種二次流の2種類に分けられ る。第一種二次流は、水路の湾曲部分で遠心力が原因で発 生し、主流流速の 20%以上の大きさになる時もある。本 研究で取り扱う第二種二次流は、乱流の非等方性が原因で 発生するものであり、直線水路でも発生する。第二種二次 流の大きさは、一般に主流の2~3%以下である.主流に比 べると非常に小さな流れであり、そのメカニズムも単純で はないため、予測や測定は容易ではない。しかし、第二種 二次流によって河川の抵抗や河床変動などが影響を受け ることが指摘されており、その結果、河川の流速や水深な どにも影響が及ぶ。このため、第二種二次流は実河川の治 水や環境にも影響を及ぼしていると考えられ、生態系保全 や減災などを意識した細やかな河川管理のためにも、第二 種二次流の挙動を正確に予測することが必要となってい る。本研究の目的は、第二種二次流の実用的予測モデルの 構築と、これを用いた第二種二次流に及ぼす水深の影響の 解明の二点である。

本研究では乱流モデルとして \mathbf{k} - $\mathbf{\epsilon}$ モデルを用いる。 \mathbf{k} - $\mathbf{\epsilon}$ モデルは RANS 型の乱流モデルであり、比較的粗い計算格子で計算できるのが特徴である。これまで第二種二次流を、LES、ASM、RSM などの高次の乱流モデルで計算された例は数多くあるが、 \mathbf{k} - $\mathbf{\epsilon}$ モデルによる再現例はあまりなされていない。 \mathbf{k} - $\mathbf{\epsilon}$ モデルによる第二種二次流に対する実用性が立証できれば、その経済性から、工学的価値は大きい。そこで、既往の実験結果と同条件で数値計算を実施し、計算精度と、二次流に及ぼす水深の影響を考察する。

2. 実験および数値計算の水理条件

今回、計算結果との比較に使用したのは、Blankaert ら ¹⁾ の実験のデータである。この実験は表-1に示す通り、全部で3つの水理条件で行われている。3つの条件では、水路幅は一定であるが、水深、流量、水路勾配が異なる。

実験での主要な観測項目は流速分布であり、鉛直方向36箇所以上の流速分布の測定を、ADVP(Acoustic Doppler Velocity Profiler)を用いて行われている。ADVPは、同時に3つの速度成分を測定できる。また、測定地点は水路の入り口から6.5m地点である。

3 数値計算

(1)数値解析法の概要

数値計算は、木村²⁾らによって開発された三次元デカルト座標系 Fortran コードを使用して行った。また計算格子は直交格子とし、いくつかの試行錯誤の結果、表-2のような計算格子数を設定した。

また水面の条件は、水面を摩擦の無い剛体のふたで覆った条件で計算し、水面の上下移動は水圧変化として計算する rigid lid 法を用いた。

(2)乱流モデル

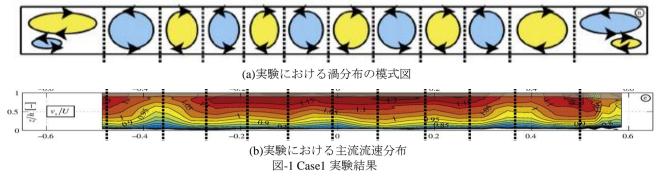
乱流モデルは、線形 $k-\epsilon$ モデル、二次非線形 $k-\epsilon$ モデル、三次非線形 $k-\epsilon$ モデルの 3 つある。いずれも渦粘性モデルであるがレイノルズ応力の構成則が異なり、速度勾配の何次式まで考慮するかでモデルが異なる。

表-1 実験における水理条件

	Width	Depth	Discharge	Channel slope
	B[m]	H[m]	$Q[m^3/s]$	
Case1	1.3	0.11	0.06	6.8×10^{-4}
Case2	1.3	0.16	0.09	6.2×10^{-4}
Case3	1.3	0.21	0.10	4.1×10^{-4}

表-2 計算格子

	横断方向格子数	鉛直方向格子数
Case1	110	10
Case2	100	10
Case3	60	10



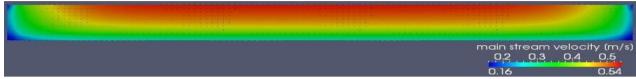


図-2 線形 k-ε model による主流流速コンターと流速ベクトル

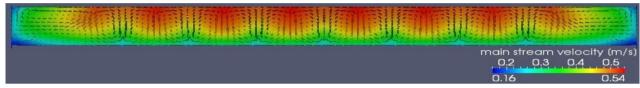


図-3 二次非線形 k-ɛ model による主流流速コンターと流速ベクトル

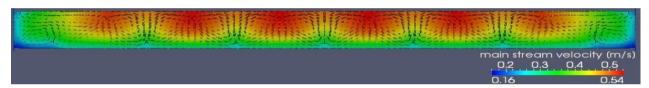


図-4 三次非線形 k-ɛ model による主流流速コンターと流速ベクトル

4計算結果と実験結果との比較

(1)乱流モデルによる再現性の相違の考察

実験 Casel を対象に、乱流モデルの違いによる再現性の 相違を考察する。図-1に実験における渦分布の模式図と主 流流速コンターを示す。実験における二次流は、両側壁付 近で水面渦と底面渦が上下に重なって形成され、それ以外 の領域では回転方向が相反する渦が横並びで形成されて いる。この横並びのセルのことを以下内部セルと呼ぶこと にする。図-2 は線形 k-ε モデル、図-3 は二次非線形 k-ε モ デル、図-4 は三次非線形 k-ε モデル、による主流流速コン ターと断面内の流速ベクトルを表わしている。図-2、図-3、 図-4 を比べると、線形 k-ε モデルの結果のみ二次流が全く 再現されていない。二次非線形 k-ε モデルと三次非線形 k-ε モデルではいずれも二次流セルが明確に再現された。 内部セルの数を図-1と比較すると、実験は10個、二次線 形 k-ε モデルは 12 個、三次非線形 k-ε モデルは 10 個であ り、二次非線形 k-ε モデルでは2個多い。三次非線形 k-ε モ デルでは Casel 実験における二次流のパターンを良好に 再現している。

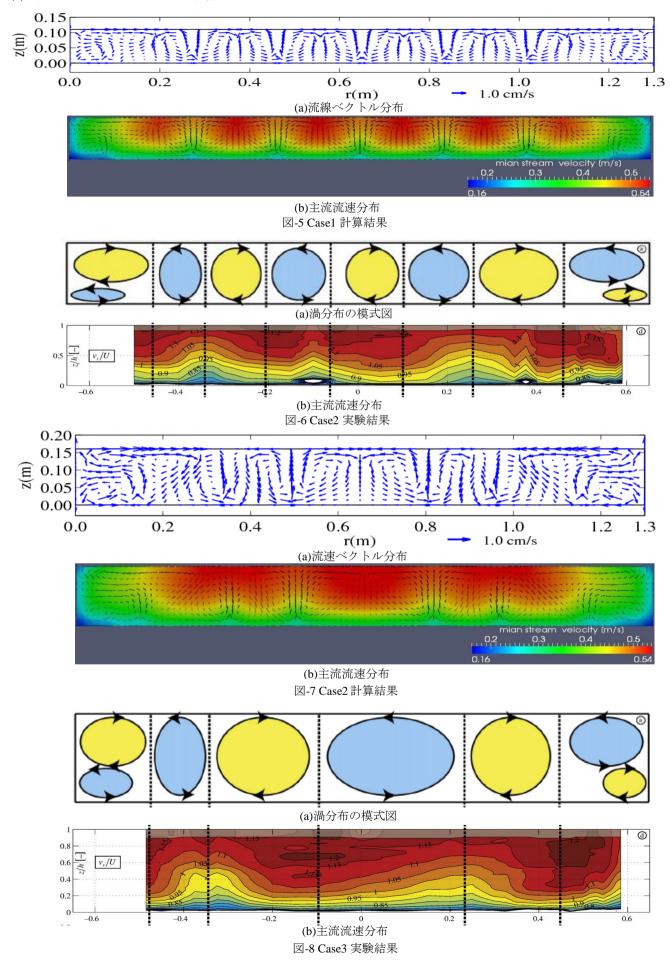
一方、主流の流速分布に着目すると、実験結果では、内部セルが隣接し上昇流が生じる箇所では底面付近の低速流塊が上方に持ち上げられ、一方、下降流となる箇所では大きい流速が底面付近まで到達している。二次および三次

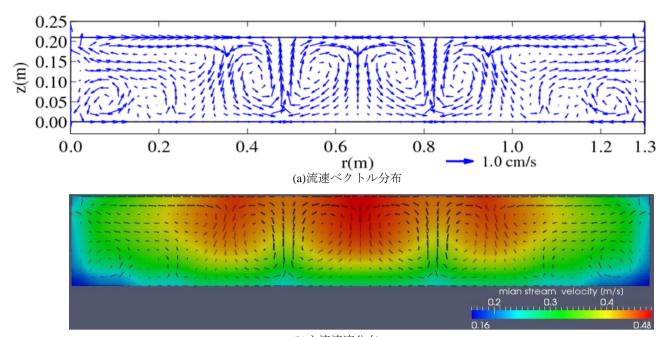
非線形 \mathbf{k} - ϵ モデルによる計算結果でも同様の傾向が見て取れる。流速の値についてみてみると、実験結果では断面平均流速 \mathbf{U} =0.4 $[\mathbf{m}/\mathbf{s}]$ に対する、最大流速の比が \mathbf{V} s/ \mathbf{U} =1.2 程度であり、二次および三次非線形 \mathbf{k} - ϵ モデルの計算結果における最大流速は \mathbf{V} s/ \mathbf{U} =1.25 $[\mathbf{m}/\mathbf{s}]$ であるため、実験の方が若干大きいが両者はほぼ一致している。

また、水平流速の最大値 Vn を比較したところ、実験結果では、断面平均流速に対する最大流速の比は 100Vn/U=1.5 程度であり、三次非線形 k- ϵ モデルの計算結果における最大流速は 100Vn/U=2.0 であるため、計算の方が若干大きい。流速分布形状はほぼ一致していた。同様に鉛直流速の最大流速値 Vz については、実験では、断面平均流速に対する最大流速の比は 100Vz/U=2.0 程度、そして三次非線形 k- ϵ モデルの計算結果における最大流速は 100Vz/U=2.75 であり、計算の方が若干大きい。以上のように最大流速の値は数値解析結果の方が実験結果より若干大きいが、実験結果では流速の測定範囲が限られていることを考慮すると、数値解析結果の誤差は許容範囲と考えられる。

以上より、三次非線形 \mathbf{k} - $\mathbf{\epsilon}$ モデルによる計算結果は、実験における二次流パターンや流速分布を良好に再現することが確認された。したがって、以下の数値解析結果は全て、三次非線形 \mathbf{k} - $\mathbf{\epsilon}$ モデルによるものを示す。

(2)二次流パターンに及ぼす水深の影響





(b)主流流速分布 図-9 Case3 計算結果

a)Case2、Case3 の再現精度の検討

Case2 における実験結果を図-5 に、計算結果を図-6 に示す。数値計算結果では、側壁付近の水面渦と底面渦の再現性は良好である。しかしながら、内部セルについては、その数や配置に実験との相違がみられる。特に、実験では水路中央で上昇流となっているのに対し、計算結果では下降流となっている。この原因の一つとして、実験では二次流パターンが左右対称となっておらず、渦の数が図の左半分においては若干密となっている。この非対称性が計算結果との不一致の一因ではないかと考えられる。

一方、Case3 における実験結果と計算結果をそれぞれ、図-7、図-8 に示す。数値解析では、渦の数や配置はほぼ正確に再現できている。しかし、渦の大きさについては実験との相違がみられ、中央の二つの内部セルが実験より小さく、側壁付近の水面渦は実験に比べて大きい。

以上に述べたように、Case2、Case3 における実験結果の再現性は必ずしも十分とはいえず、今後さらに数値解析モデルの改良が必要であることが示唆された。

Case1~Case3 の数値解析結果を比較すると、二次流パターン、特に内部セルの数が水深に大きく依存し、水深が小さいほど内部セルの数が大きくなることが示された。

7まとめ

本研究では、k-ε モデルを用いた三次元数値計算により 第二種二次流の再現を試みるとともに、二次流パターンに 及ぼす水深の影響を考察した。数値解析結果から、線形モ デルでは二次流が全く再現されず、二次以上の非線形流モ デルでは再現されること、三次非線形 k-ε モデルの結果は 二次非線形モデルに比べて良好であることが指摘された。 また、水深が小さいほど二次流セルの数が増加することが 実験で示されており、数値解析結果においても同様な特性 が再現された。

謝辞

本研究を進めていくにあたり、北海道大学大学院学生、 岩崎理樹氏、初田直彦氏、島田龍市氏より多くの助言をい ただいたので、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- K.Blankaert, A.Duarte, A.J.Schleiss: Influence of shallowness, bank roughness on the variability of flow patterns and boundary shear stress due to secondary currents in straight open-channel1, pp1062-1069,2010
- Kimura, I. and Hosoda, T.: A non-linear k-ε model with realizability for prediction of flows around bluff bodies, Int.J.for Numerical Method in Fluids, Vol.42, pp813-837,2003