

平成 22 年 5 月 11 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007 ～ 2009

課題番号：19560522

研究課題名（和文） 水工学への応用に向けた浅水乱流数値解析モデルの比較研究

研究課題名（英文） Comparative study on numerical methods for shallow open channel flows

研究代表者

木村 一郎 (KIMURA ICHIRO)

北海道大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：60225026

研究成果の概要（和文）：本研究は、河川、湖沼、海域などの浅水乱流場を対象に、環境や災害などに関する種々の水問題の解決に貢献できる数値解析モデルの構築を目指し、多くの水理条件下でモデルの比較検討を実施し、工学的に最適なモデルの抽出を行った。対象とする流れ場として、浅水格子乱流、開水路キャビティ流、河川蛇行流、混合密度流、馬蹄渦を伴う流れなどを対象に、2次元モデルと3次元モデルの比較、各種乱流モデルの比較を実施し、精度と経済性の観点から最適なモデルを検討した。

研究成果の概要（英文）：We investigated computational models for simulating shallow open channel flows, such as, flows in rivers, seas and lakes. Shallow grid turbulence, an open channel flow with a side cavity, meandering rivers, density mixing current and flows with a horseshoe vortex are employed as test cases. Comparisons between 2D and 3D models and various turbulence models were performed and appropriate models with sufficient accuracy and enough computational efficiency are tuned.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工水理学

キーワード：浅水流，乱流，数値流体力学，開水路流れ，二次流

1. 研究開始当初の背景

近年あらゆる技術が目覚ましい進歩を遂げているにも関わらず、自然災害の被害は後をたたない。水災害も例外ではなく、津波、洪水、高潮などの被害が毎年のように発生する。地球温暖化やそれに伴う異常気象により、自

然災害の規模が将来的に拡大することが懸念され、これらの災害に対抗するブレークスルー的な技術が求められる。一方、環境側面の重要性が増すことで、水に関わる問題はさらに多様化、複雑化の様相を呈している。

河川、湖沼、海洋などの自然環境水域の諸

問題において土木技術の果たす役割は極めて大きい。特に、災害の予測技術を根底から支えるのは水の運動に関する物理、すなわち、水理を正確に予測、解明するという極めて基礎的な技術に他ならない。これを困難なものとしているのは、環境流体現象のほとんどが乱流であり、その理論的解明が絶望的ともいえるほど困難であることに他ならない。

河川、湖沼、海洋などの地球表面に存在する水域は、一般に平面的な広がり水深に比べて大きく、いわゆる浅水域と考えることができる。水の流れは本質的に三次元的なものであるが、このような浅水域における乱流現象は、二次元性が卓越するゆえ、三次元乱流とは異なる様相を呈す。これは時には、全く逆の現象となって現れることがある。例えば、三次元乱流では大スケールから小スケールへ向かうカスケード（ダウンカスケード）が卓越するのに対し、二次元乱流では、逆向きのアップカスケードが卓越する。このように、自然域の水理の予測にあたっては、浅水乱流としての特徴を十分考慮する必要がある。

複雑乱流現象の予測において、理論的手法の適用は前述のように不可能であり、実験あるいは数値解析に頼らざるをえない。特に、数値解析による方法は、条件設定が容易であること、得られる情報量が多いこと、経済的であることなど、優れた特徴を有しており、最近の計算機の目覚ましい発達とあいまって急速に発展を遂げてきた。しかしながら、流体現象を厳密に記述するナビエ-ストークス方程式を直接解いて乱流の解を得る、いわゆるDNS解法は、現在の計算機性能に対しては負荷過大であり、工学的問題への適用は現実的とはいえない。したがって、何らかの単純化、平均化を施したモデル方程式により近似解を得ることが必要となってくる。このようにして生まれてきたのがいわゆる乱流モデルであり、空間平均を基礎とするLESと、時間平均を基礎とするRANSの2つに大別される。これらの乱流モデルは、自然界の流体現象よりはむしろ、機械工学における流体解析分野で著しい発達を遂げてきており、これらの成果をそのまま環境流体へ安易に適用してきた経緯がある。これは、機械工学では主に比較的単純形状の管路流を対象としているのに対し、自然界の乱流現象が乱流そのものの挙動以外に、気象、海象、あるいは複雑境界条件の影響を大きく受け、乱流モデルの重要性が相対的に小さかったためと考えられる。特に、浅水域、すなわち、上面を自由表面に、底面を河床、湖底、海底などによってはさまれた、水平面内の広がり比べて水深の小さい流れ場における乱流については、前述のカスケードアップに代表される特有現象を伴うにもかかわらず、その計算方法については十分な検討がなされている

とは言いがたい。近年、自然水域における各種計測技術が急速な発展を続け、数値計算の境界条件となりうる豊富な情報が得られるようになった。一方、境界適合格子、非構造格子、移動座標系、自由水面の捕獲法など、複雑境界条件を計算スキームに忠実に反映させる計算手法が各種提案されるに至った。これらの周辺技術の発達で、乱流計算手法そのものの重要性を相対的に引き上げ、残された乱流モデルの精度向上という極めてベーシックな部分が、環境流体現象の予測精度を向上させ最後の壁となりつつある。

2. 研究の目的

工学的に優れた数値解析モデルとは、一言でいえば「精度と計算機負荷のバランスのとれたモデル」ということになる。この最適なモデルは、対象とする現象や目的によって異なってくる。したがって、的確なモデル選択を行うためには、多くの水理条件の下で、モデル間の比較研究を十分に行う必要がある。これまで、多くの乱流計算手法が提案されてきているが、こと浅水乱流においてそれらの比較検討は十分行われているとは言い難い。本研究では、実現象をふまえた代表的な浅水乱流現象を数例とりあげ、計算精度と計算機負荷（計算時間、記憶容量）に着目しながら、乱流モデルの比較、検討を実施する。

3. 研究の方法

研究の視点は、次の2つの大別される。

① 流れの3次元性を考慮した2次元モデルの検討

② 乱流モデルの検討

モデルの比較を行うにあたって、流れの特性を反映させつつも単純化させた次のような流れ場を想定した。

① について

- ・第一種二次流を考慮した平面二次元モデル（開水路キャビティ流、河川蛇行流）
- ・馬蹄渦を考慮した平面二次元モデル

② について

- ・密度混合流
- ・浅水格子乱流
- ・開水路湾曲流

4. 研究成果

4.1 流れの三次元性を考慮した平面二次元モデル

(1) 第一種二次流を考慮した平面二次元モデルの検討

【目的】河川側岸のワンドのようなキャビティにおいては、循環流とそれに伴う二次流（第1種二次流）に留意する必要がある。循環流に伴う二次流は底面付近の物質を循環の中心に寄せる働きがあり、Tea-pot 効果と呼ばれることもある。二次流は三次元的な流

れ構造であるため、これを平面二次元モデルに反映させるためには何らかのモデル化が必要である。これについては、Kalkwijk & de Vriend (1980) が流線座標において初めて提案して以来、直交座標系及び一般曲線座標系への拡張、流線の曲がりと二次流発達にラグを考慮したモデル、二次流に伴う流速分布の変化を考慮したモデルなどが提案され、高性能化が進んでいる。しかしながら、これらを実河川へ適用した例は少ない。そこで、まず、単純なドーナツ型の水路に剛体回転流場を与え、浮遊砂輸送特性を検証する。次に河川ワンドを模した矩形平面キャビティ内の流れと浮遊砂輸送特性について、実験結果との比較を通じて検討する。用いる平面二次元モデルは次の4通りとする。

- Model I 二次流の影響を考慮しないモデル
- Model II 二次流の影響を考慮するがラグは考慮しないモデル
- Model III 二次流の影響と共にラグも考慮するモデル
- Model IV 二次流の影響と共に、ラグ、および二次流による流速分布の変形を考慮するモデル

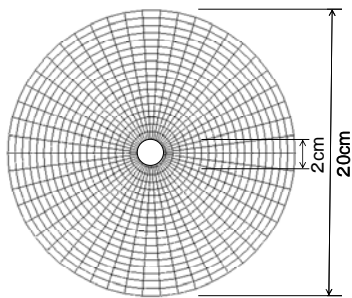


図1 単純剛体回転流れ場と計算格子

【単純剛体回転流れ場への適用】最初に極力単純化した回転流場としてドーナツ状水路に剛体回転流を与えた場合の浮遊砂輸送を考える。図1に流れ場の平面図と計算格子を示す。これに角速度 $\omega = 0.5$ (rad/s)、水深 $h = 1$ (cm)の定常循環流を与え、初期浮遊砂濃度を5%として浮遊砂輸送と河床変動を計算する。図2は計算開始後 $t = 10$ (sec)における河床高を4モデルで比較したものである。いずれの条件でも堆積は軸対称に生じている。二次流を考慮したModel II-IVでは堆積が水路中心部に集中して生じていることからTea-pot効果が再現されていることが確認できる。図-3は河床高の半径に沿う分布を示したものである。Model I-IIIの結果では河床高の最大値が内岸近傍で生じており、特にModel IIでは水路中心付近の河床が高くなっている。これに対し、Model IVでは内岸から少し離れた箇所でピークが見られる。この変化は、二次流に伴う流速分布の変化をもたらしたものと考えられる。

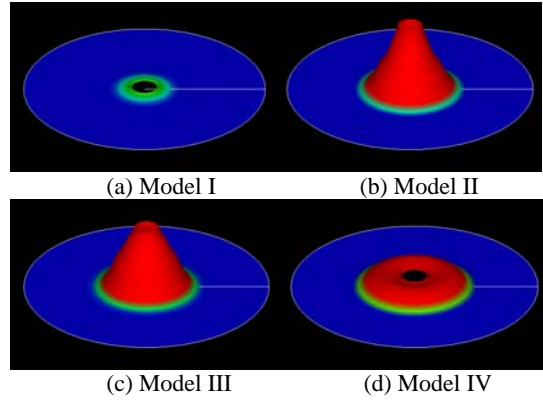


図2 堆積パターンの比較 (t=10sec)

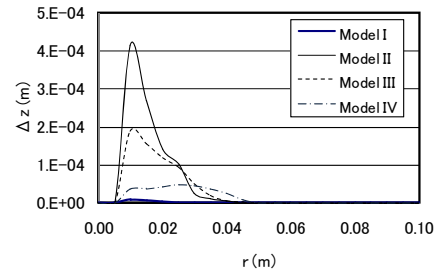


図3 半径上の河床高分布の比較

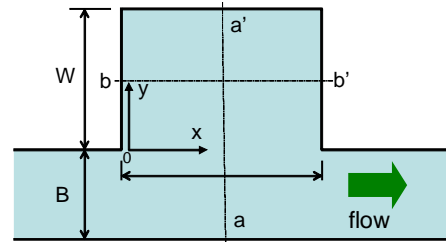


図4 側岸キャビティを有する流れ場の平面図

【側岸キャビティを有する開水路】河川ワンドを単純化したモデルとして、開水路側岸に矩形の平面キャビティが存在する場合を考える (図4)。

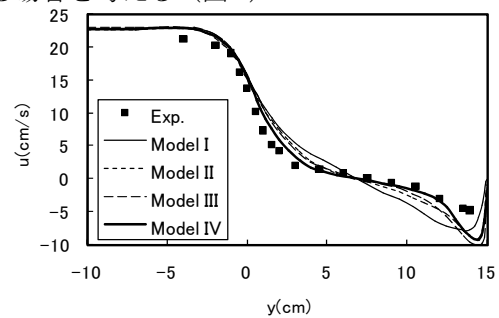


図5 a-a' 断面の流速分布の比較

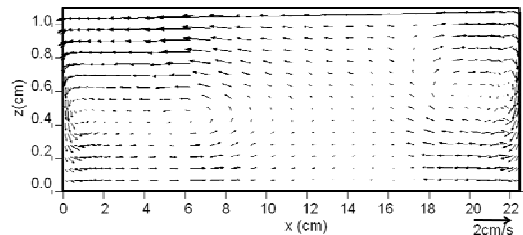


図6 b-b' 鉛直断面の流速ベクトル

図5は a-a' 断面における流速分布であり、ラグと流速分布変化の双方を考慮したモデルによる結果が実験と最も適合する。図6は b-b' 断面における鉛直面内の流速ベクトルを、仮定された鉛直流速分布から再構築したものであり、2つの逆回りの循環流がみられ、二次流の特性と合致している。図7は Model IV の計算結果における $t=100\text{s}$ 時点の浮遊砂堆積状況であり、キャビティ中央付近に集中して堆積する様子が良好に再現されている。

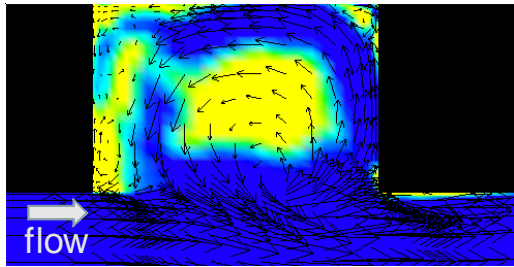


図7 浮遊砂堆積状況 ($t=100\text{s}$) (Model IV)

(2) 馬蹄渦を考慮した平面二次元モデル

橋脚などの周辺に発生する馬蹄渦は局所洗掘現象において支配的な現象といえる。従来馬蹄渦を平面二次元モデルでモデル化する試みは一部のアドホック的な方法以外では行われていなかった。今回その基礎となるモデルを提案する。

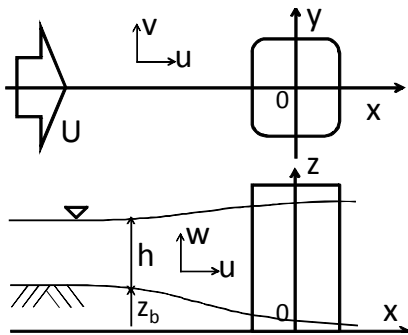


図8 馬蹄渦を伴う流れ場の模式図

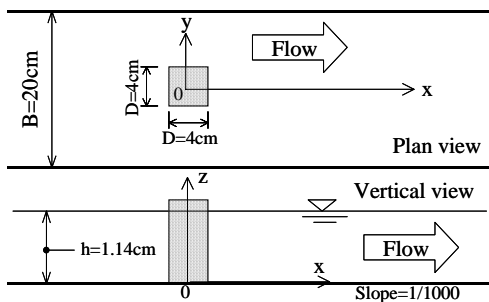


図9 角柱周辺の流れ場の模式図

図8に対象とする流れ場の模式図を示す。簡単のため、流れ場は水路中心の主流方向の軸 (x 軸) に対して左右対称とし、中心軸上で横断方向の流速は0とする。中心軸上の x 方向 (主流方向) と y 方向 (横断方向) の三

次元流速を鉛直座標のべき乗の形で表す。これらを流れの基礎方程式に代入し、各係数間の関係式を求めることによりモデルの導出を行った。今回はモデル化の第1段階とし、 x 方向は2次まで、 y 方向は0次までの項を考慮することとした。

モデルの検証として、既往の角柱周辺の三次元流れの計算結果を用いる。図9に流れ場の模式図を示す。

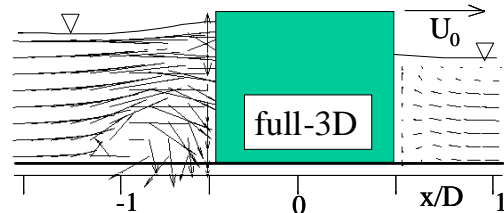


図10 三次元解析における中心軸上の鉛直流況

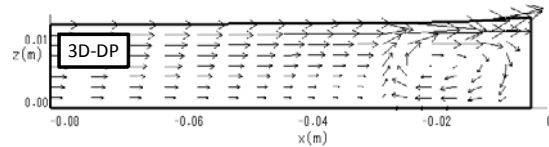


図11 本モデルによる鉛直面内の流況

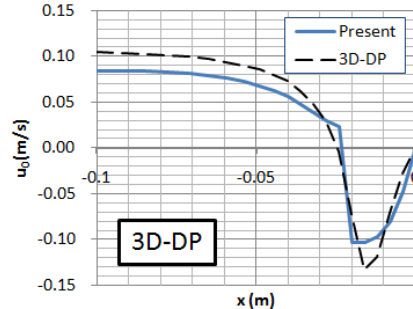


図12 底面付近の主流流速の比較

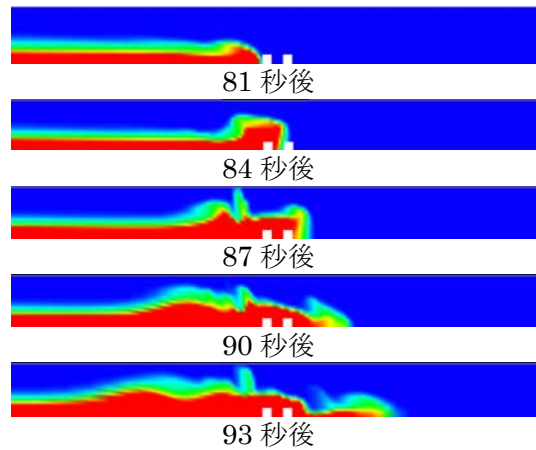


図13 密度混合流場における乱流モデル

図10に三次元解析における鉛直面内の流れの状況を表す。角柱の上流側に馬蹄渦が再現されている様子がわかる。一方、図11は本モデルにおける鉛直面内の流況を示す。馬蹄渦が再現されているが、その計上はII三次元解析結果よりも鉛直方向に拡大されてい

る。図 12 は底面付近の主流方向流速の分布を本モデルと三次元解析結果と比較したものであり、両者は良好に適合している。

4. 2 乱流モデルに関する検討

(1) 密度混合流場における検討

密度混合流場における乱流モデルを検討するため、ブロックを設置した水路への塩水くさびの侵入挙動に関する実験と同条件で実験を行い、モデルを比較した。用いたモデルは、次の4つである。

- ① Munk & Anderson モデル
- ② 標準型 $k-\epsilon$ モデル
- ③ 2次非線形 $k-\epsilon$ モデル
- ④ リチャードソン数を網領した非線形 $k-\epsilon$ モデル

図 13 はシミュレーションの一例である。塩水くさびの遡上速度などの比較の結果、リチャードソン数を渦動粘性係数に反映させた非線形 $k-\epsilon$ モデルがもっとも良好な結果を与えた。また、係数をチューニングした Munk & Anderson モデルも比較的良好な結果を与えることがわかり、計算機負荷が小さいことから実用面で有利なモデルであることが判明した。

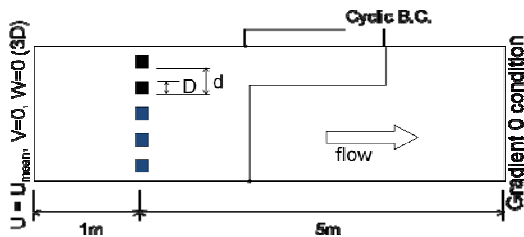


図 14 浅水格子乱流における計算領域

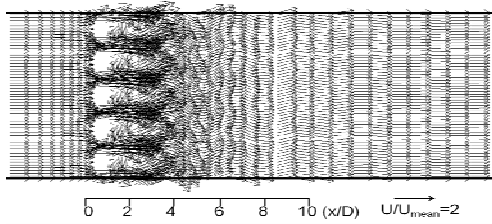


図 15 線形モデルによる計算結果

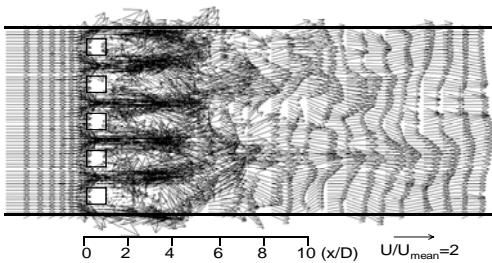


図 16 2次非線形モデル (擾乱を加えた場合)

(2) 浅水格子乱流における乱流モデルの検討

図 14 に示すような角柱が多数横断方向に並んだ部分の下流側に生じる流れ場 (浅水格子乱流) は、渦の合体に伴う乱れエネルギー

のアップカスケードに特徴がある。このような場における乱流モデルについて検討を行った。線形モデルでは図 15 に示すように渦がシンクロナイズして発生し、アップカスケードは再現されなかったが、2次非線形モデルを用い、かる上流端に擾乱を加えることで、図 16 に示すような不規則な渦の合体とアップカスケードを再現できることがわかった。

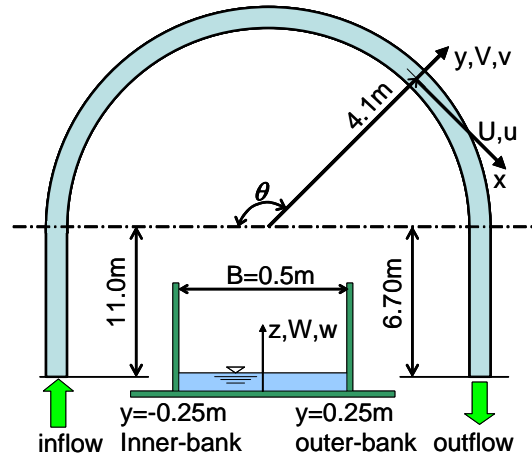
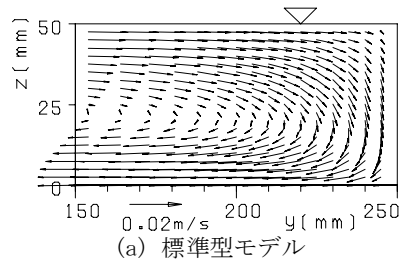


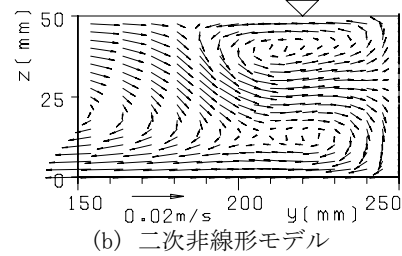
図 17 Booiij の実験における水路の概要

(3) 開水路湾曲流

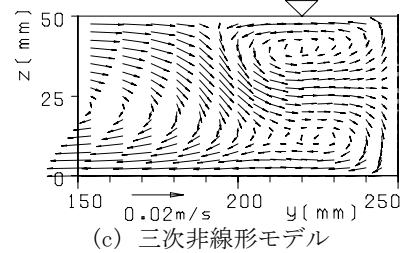
開水路湾曲部においては、遠心力と横断方向の圧力勾配の不均衡により発生する第一種二次流が発生することが知られているが、これとともに、外岸のごく近傍に第一主二次



(a) 標準型モデル



(b) 二次非線形モデル



(c) 三次非線形モデル

図 18 断面内の流速ベクトルの比較

流と逆向きの渦が形成される。これを外岸セルとよぶ。外岸セルは規模は小さいが、外岸の近傍で発生するため、河床変動や側岸浸食などに影響を及ぼすことが予想されるため、十分な注意の必要な現象といえる。図 17 は計算の対象とした実験 (Booij,2003) の装置概要である。

数値解析は 3次元計算とし、乱流モデルには RANS 型の線形標準型 $k-\epsilon$ 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通りを用い、結果を比較した。

図 18 は 3つの乱流モデルで再現された断面内の流況を示したものである。標準型線形モデルでは第一種二次流は再現されているものの外岸セルは再現されていない。一方、二次および三次非線形 $k-\epsilon$ モデルを用いた場合は第一種二次流とともに外岸セルが再現されていることがわかる。また、流速分布やレイノルズ応力分布を詳細に検討した結果、二次非線形モデルよりも三次非線形モデルの再現性が若干高いことが確認された。

Booij の実験の条件では標準型線形モデルでは外岸セルは再現されなかったが、曲率半径を小さくしていくと標準型線形モデルでも外岸セルが再現されることがわかった。これより、外岸セルの発生メカニズムは、Blanckaert の指摘するように、遠心力と乱れの非等方性の相互作用によるものであることが確認された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- 1) 木村一郎, 細田尚, 岩田通明: 水深積分浅水流方程式における馬蹄渦のモデル化, 土木学会水工学論文集, 第 54 巻, pp.1147-1152, CD-ROM proc., 2010.2.
- 2) 萩原佳祐, 木村一郎, 清水康行, 清治真人: 二次流の影響を考慮した水深積分モデルによる蛇行流路における浮遊砂輸送に関する数値計算, 土木学会水工学論文集, 第 54 巻, pp.697-702, CD-ROM proc., 2010.2.
- 3) I. Kimura, T. Hosoda, S. Takimoto and Y. Shimizu: RANS computations on curved open channel flows, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.27, No.2, pp.29-47, 2009.11.
- 4) 滝本慎二, 木村一郎, 清水康行, 細田尚: 急な湾曲部を有する開水路三次元乱流構造に関する数値シミュレーション, 土木学会応用力学論文集, 第 12 巻, pp.749-758, 2009.8.
- 5) 木村一郎, 音田慎一郎, 細田尚, 清水康行: 開水路側方キャビティ内二次流とその浮遊砂輸送への影響を再現する水深積分モデル, 土木学会水工学論文集, 第 53 巻, pp.1075-1080, CD-ROM proc., 2009.2.

6) 工藤拓也, 木村一郎, 清水康行, 安田浩保, 清治真人: 構造物を用いた塩水遡上の制御に関する数値シミュレーション, 土木学会水工学論文集, 第 53 巻, pp.1351-1356, CD-ROM proc., 2009.2.

7) I. Kimura, Wim S. J. Uijtewaal, T. Hosoda and Md. Shahjahan, Ali: URANS Computations of Shallow Grid Turbulence, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.135, No.2, pp.118-131, 2009.2.

8) 木村一郎, Wim S. J. Uijtewaal, 細田尚, Wim van Balen: RANS モデルによる開水路湾曲部における外岸セルの再現性, 土木学会水工学論文集, 第 52 巻, pp.1009-1014, CD-ROM proc., 2008.2.

[学会発表] (計 3 件)

- 1) 齊藤真治, 木村一郎, 清水康行: 浅水格子乱流に関する実験的研究, 平成 21 年度土木学会北海道支部 論文報告集 第 66 号, B-2, pp.1-4, 2010.1.
- 2) 井上倫太郎, 木村一郎, 清水康行: 複断面蛇行開水路乱流の三次元解析, 平成 20 年度土木学会北海道支部 論文報告集 第 65 号, B-5, pp.1-4, 2009.1.
- 3) 木村一郎, Wim S. J. Uijtewaal, 細田尚: 非線形 $k-\epsilon$ モデルによる開水路湾曲乱流の数値シミュレーション, 土木学会中国支部島根会, 平成 19 年度第 4 回研究・事例報告会 概要集, pp.43-44, 2007.12.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 一郎 (KIMURA ICHIRO)

北海道大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 60225026

(2) 研究分担者

細田 尚 (HOSODA TAKASHI)

京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10165558