

報文：iRIC NaysCUBE による開水路流れの二次流構造の再現検証

Reproduction test of the secondary current pattern of channel flow by iRIC NaysCUBE

株式会社ドーコン 正会員 ○堀岡 和晃 (Kazuaki Horioka)
株式会社ドーコン 正会員 長谷川 寛也 (Kakuya Hasegawa)

1. はじめに

近年、河川の局所洗掘と対岸砂州高の増大等が維持管理上の課題となっている。この要因の一つに、三次元性の流れである二次流構造が関係していることを挙げる報告が多数みられる。このような河道形成は、二次流構造を含む様々な複合的要因による相互作用の結果と考えられるが、このうち二次流構造の影響が占める割合等についての定量把握には至っていないのが現状である。このことから、河道形成メカニズムを解明するためには、様々な条件における二次流構造の分析と把握が必要と考える。

ここで、二次流のうち第一種二次流は、遠心力が働く湾曲部で発達し、水面付近では内岸から外岸へ、河床付近では外岸から内岸へ向かう流れであり、水粒子が外岸河床を洗掘する方向に移動するため河道形成に大きく影響を及ぼすことは多数指摘されている。

また、二次流のうち第二種二次流は、直線水路において、横断方向にて高速流と低速流が交互に発生する均一ではない流れであり、乱流に起因して発達する。その流速は主流速の2～4%程度と小さいながらも河床せん断応力の横断分布は大きく異なることが指摘されている。

このような二次流は、流下方向流速より数オーダー小さく高精度の計測が必要であることから、実河川において観測するには困難が伴う。一方で、三次元モデルによる流況解析は、iRIC ソフトウェア¹⁾に搭載されている NaysCUBE ソルバー²⁾の普及に伴い、これまでよりはるかに容易となっている。

そこで、本報文は、公開されている実例を基に、NaysCUBE による三次元流況解析モデルの精度を確認した上で、二次流構造の把握を行うこととした。

2. 再現検証の概要

観測値は、三次元流れの観測値の記載のある既往文献より3水路とし、それぞれ福岡ら³⁾による湾曲実験水路における第一種二次流 (CASE-1)、禰津ら⁴⁾による直線河道 (琵琶湖疎水) における第二種二次流 (CASE-2)、同じく直線河道 (愛知用水) における横断流速分布 (CASE-3) とする (表-1)。

表-1 使用した観測値及び検討ケース (CASE-1)

ケース	観測水路	水路	観測値
CASE-1	実験水路	湾曲	第一種二次流
CASE-2	琵琶湖疎水	直線	第二種二次流
CASE-3	愛知用水	直線	横断流速分布

計算値は、これら3水路の形状及び水理諸量を再現した NaysCUBE による計算結果とする。なお、NaysCUBE のバージョンは、3.00.6 64bit (2014/5/19)である。

3. 再現検証計算の条件及び結果

(1) 湾曲実験水路 (CASE-1)

計算水路は、論文に記載されている実験湾曲水路を再現した。具体的には、実験水路と同じ中心曲率半径 $r=4.5\text{m}$ 、水路幅 1.0m、水路延長 24.0m、水路勾配 1/500 の一様湾曲水路、横断形状は水路外岸側3割勾配、固定床のケースを採用した (表-2)。

計算格子は、縦断 100 格子、横断 20 格子、鉛直 10 格子に分割した (図-1)。

表-2 実験水路及び計算水路の設定条件 (CASE-1)

項目	設定
水路中心の曲率半径 (m)	4.5
水路幅 (m)	1.0
水路延長 (m)	24.0
水路勾配	1/500
河床	固定床

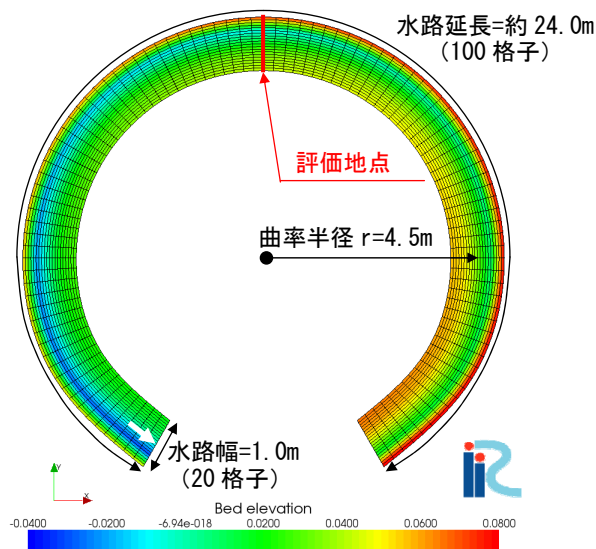


図-1 計算水路及び計算格子 (CASE-1)

計算条件を示す (表-3)。底面及び壁面摩擦はマンニング則とし、粗度係数は不明であることから壁面の粗度係数を $n=0.010$ に固定した上で、底面の粗度係数は実験水位を再現可能な $n=0.0165$ とした。

表-3 NaysCUBE の計算条件 (CASE-1)

項 目	設 定
乱流モデル	二次非線形 $k-\varepsilon$ モデル
移流項の空間差分スキーム	三次精度 TVD MUSCL
河床	固定床計算
計算時間 (秒)	200
計算時間間隔 Δt	0.002
流量 (m ³ /s)	0.018
下流端水位	等流計算
計算セル最小水深 (m)	0.001
粗度係数 (底面)	0.0165
粗度係数 (壁面)	0.010

評価地点における計算結果として、流速強度のコンター及び流速のうち横断・鉛直方向成分のベクトルを示す (図-2)。なお、水深方向は5倍に拡大表示している。流速強度の最大値は、右岸水面の 0.58m/s であった。横断・鉛直方向成分のベクトルの最大値は、最深部の 0.07m/s であり、同地点の流速強度 0.31m/s の約 23%を占めている。

次に、流速ベクトルのうち横断方向成分のみを抽出し、評価地点における観測値と重ねた (図-3)。計算値は、第一種二次流の横断方向成分と分布特性の観測値を良く再現している。その精度は、計算値は観測値の 0.5~1.5 倍の範囲にあり、ほぼ合致する地点もみられる。

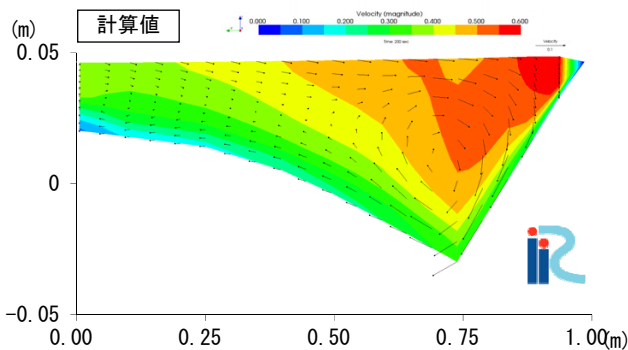


図-2 流速強度の横断・鉛直分布 (CASE-1)

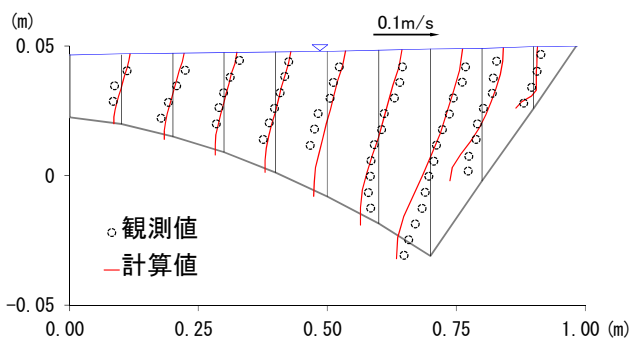


図-3 横断方向流速の観測値と計算値の比較 (CASE-1)

(2) 直線河道 (琵琶湖疎水) (CASE-2)

計算水路は、論文に記載されている直線水路を再現した。具体的には、実水路と同じ水路幅 $B=17.5\text{m}$ 、水深 $h=2.2\text{m}$ とし、平均流速 $U_m=0.36\text{m/s}$ を計算にて再現した (表-4)。計算格子は、縦断 3 格子、横断 64 格子、鉛

直 10 格子に分割した (図-4)。

表-4 実験水路及び計算水路の設定条件 (CASE-2)

項 目	設 定
水深 h (m)	2.2
水路幅 B (m)	17.5
アスペクト比 B/h (m)	8.0
平均流速 U_m (m/s)	0.36
レイノルズ数 Re	8.0×10^5
フルード数 Fr	0.08

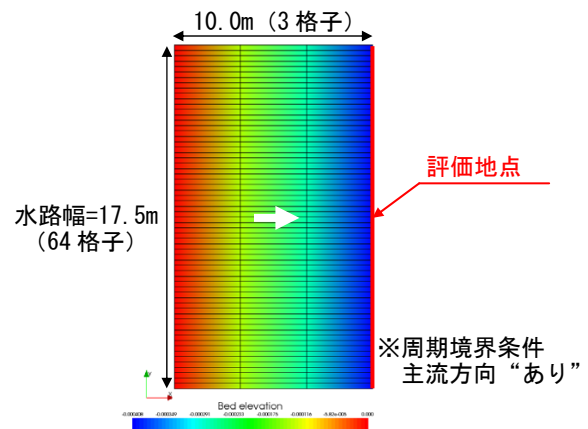


図-4 計算水路及び計算格子 (CASE-1)

計算条件を示す (表-5)。粗度係数と河床勾配は不明であるためマニング則より逆算し、それぞれ $n=0.030$ (壁面 $n=0.010$)、 $i=0.00004076$ 、周期境界条件は主流方向で“あり”、周期境界条件時の流量調整方法は“勾配で調整”とした。なお、出典論文では「水は濁っていて河床をまったく目視できなかった」とあり、図の河岸には堆積物が描かれている。このため、横断形状が不明で縦断的に一様であるかも不明であること、また計算条件をシンプルとした場合の結果の把握を優先することとしたため、河道は矩形一様水路の条件とした。

表-5 NaysCUBE の計算条件 (CASE-2)

項 目	設 定
乱流モデル	二次非線形 $k-\varepsilon$ モデル
移流項の空間差分スキーム	三次精度 TVD MUSCL
河床	固定床計算
計算時間 (秒)	6000
計算時間間隔 Δt	0.05
流量 (m ³ /s)	13.86
下流端水位	等流計算
計算セル最小水深 (m)	1.0
粗度係数 (底面)	0.030
粗度係数 (壁面)	0.010

矩形水路は左右対称であることから、観測値と計算値の比較は、水路中央から左岸端すなわち左岸半分のみを抽出して実施する。計算水路の鳥瞰図を示す (図-5)。

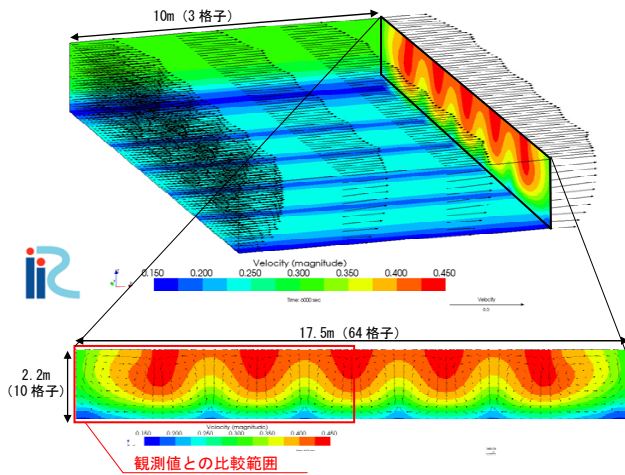


図-5 計算水路の鳥瞰図 (CASE-2)

計算結果として、流速強度のコンター、流速のうち横断・鉛直方向成分のベクトル及び二次流の回転向きを重ねたものについて、既往論文⁴⁾の観測結果からの引用図と並べて示す(図-6)。なお、観測値の座標軸は鉛直方向を y 、水路横断方向を z としており、計算値との比較図はこれにならった(iRICによる座標軸とは異なる)。

計算結果は、二次流セル数は観測値が5に対し、計算値の5と一致する。また、二次流の流速の回転方向は、左岸端のみ逆向きであり一致しないものの、5つ中4つで一致した。なお、左岸端が一致しない理由の一つに、河岸の堆積物が影響した可能性が推測される。流速強度の最大値は、水路中央水面(図では右端)の 0.447m/s であった。横断・鉛直方向成分のベクトルの最大値は、左岸端から6メッシュ内岸側、水面地点の 0.014m/s であり、同地点の流速強度 0.374m/s の約3.7%を占める。

流線の横断分布を示す(図-7)。計算値では、水路左岸の下端に小型の底面渦が確認できるが、観測値では堆積物の影響のため観測されていない。

河床せん断応力 τ_b については、その横断面平均値 $\bar{\tau}_b$ で除して無次元化した $\tau_b/\bar{\tau}_b$ の観測値と計算値を重ねた(図-8)。無次元化した河床せん断応力の横断方向における大小の分布特性は、観測値と計算値はよく一致している。その値は、計算値は観測値の0.8~1.2倍の範囲にあり、横断方向 z/h の位置も概ね一致している。矢印で示した上昇流部と下降流部の横断位置は、中央の3箇所はほぼ一致するが、左岸端は計算値では発生しなかった。

(3) 直線河道(愛知用水) (CASE-3)

計算水路は、論文に記載されている直線水路を再現した。具体的には、水路幅 $B=4.1\text{m}$ 、水深 $h=1.6\text{m}$ とし、平均流速 $U_m=0.42\text{m/s}$ を計算にて再現した(表-6)。計算格子は、縦断3格子、横断50格子、鉛直15格子に分割した(図-9)。

計算条件を示す(表-7)。粗度係数と河床勾配は不明であるためマニング則より逆算し、それぞれ $n=0.020$ (壁面 $n=0.020$)、 $i=0.00003770$ 、周期境界条件は主流方向で“あり”、周期境界条件時の流量調整方法は“勾

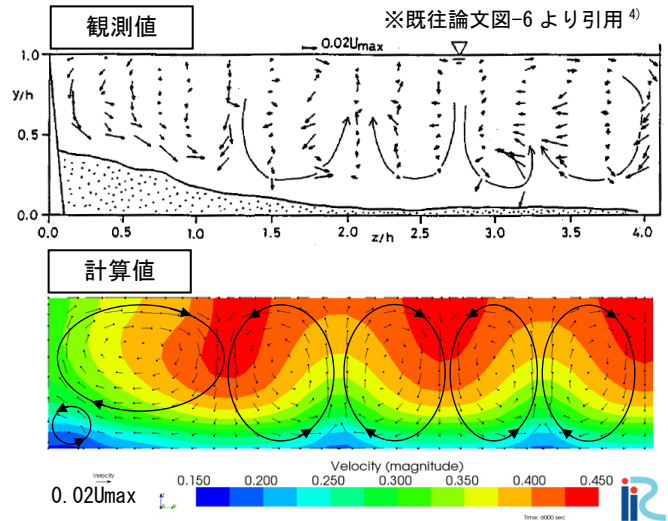


図-6 流速の横断・鉛直分布の比較 (CASE-2)

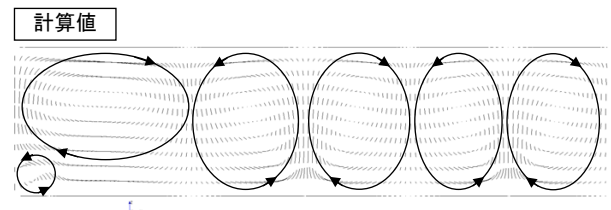


図-7 流線の横断分布 (CASE-2)

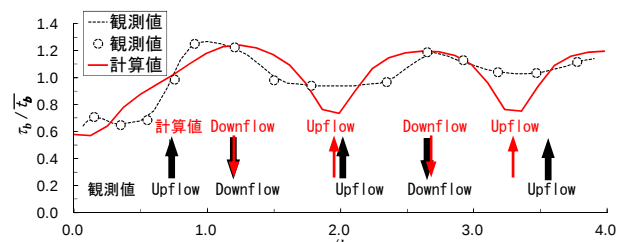


図-8 河床せん断応力の横断方向分布 (CASE-2)

表-6 実験水路及び計算水路の設定条件 (CASE-3)

項目	設定
水深 h (m)	1.6
水路幅 B (m)	4.1
アスペクト比 B/h (m)	2.5
平均流速 U_m (m/s)	0.42
レイノルズ数 Re	6.1×10^5
フルード数 Fr	0.11

配で調整”とした。計算水路の鳥瞰図を示す(図-10)。

計算結果として、流速強度のコンター及び流速のうち横断・鉛直方向成分のベクトルを示す(図-11)。また、流線の横断分布を示す(図-12)。

計算結果は、流速強度の最大値は中央の水面から5メッシュ深い位置にて発生し、 0.54m/s であった。幅の狭い開水路の特徴である最大流速が水面より下に発生する velocity dip 現象(最大流速点の降下現象)が表現された。横断・鉛直方向成分ベクトルの最大値は左右岸の河岸から16メッシュ内岸側、水面地点の 0.0147m/s であり、同地点の流速強度 0.4562m/s の約3.2%を占める。

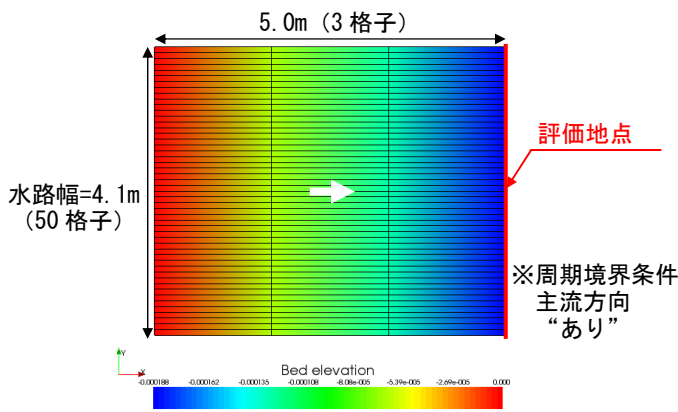


図-9 計算水路及び計算格子 (CASE-3)

表-7 NaysCUBE の計算条件 (CASE-3)

項 目	設 定
乱流モデル	二次非線形 $k-\varepsilon$ モデル
移流項の空間差分スキーム	三次精度 TVD MUSCL
河床	固定床計算
計算時間 (秒)	3000
計算時間間隔 Δt	0.02
流量 (m^3/s)	2.76
下流端水位	等流計算
計算セル最小水深 (m)	1.0
粗度係数 (底面)	0.020
粗度係数 (壁面)	0.020

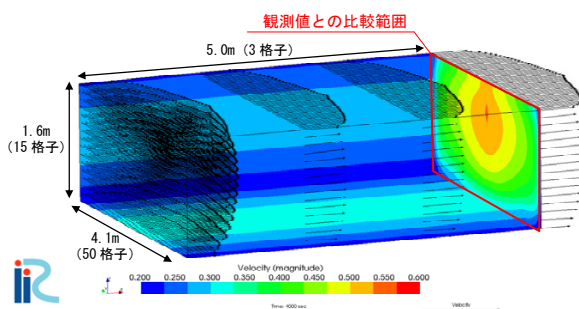


図-10 計算水路の鳥瞰図 (CASE-3)

流速 U を最大流速 U_{MAX} で除して無次元化した U/U_{MAX} の横断分布を示す (図-13)。計算値による最大流速発生位置を含む $U/U_{MAX} = 0.99$ の位置及び範囲と観測値はよく一致しており、最大流速点の降下現象の位置は一致する。また、 U/U_{MAX} は計算値と観測値の値はややズレも確認されるが、全体の分布傾向についてはほぼ再現されている。また、計算値は、水路左岸の下端に小型の底面渦が確認できる。

4. おわりに

本報文は、iRIC NaysCUBE を用いた三次元流況解析を行い、観測値と比較を行った。その結果、NaysCUBE は実験水路と小河川規模の二次流構造である第一種二次流、第二種二次流、最大流速点の降下現象について、本検討条件においては表現可能であること、また再現精度も観測値の 0.5~1.5 倍以内であることを明らかにした。

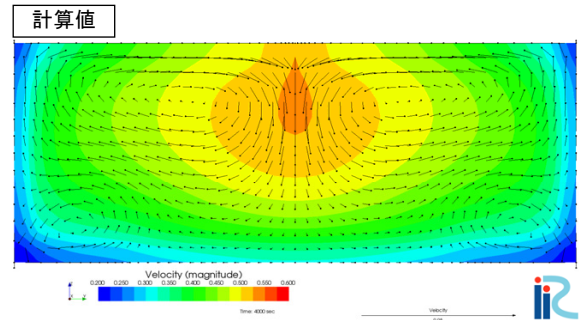


図-11 流速の横断・鉛直分布 (CASE-3)

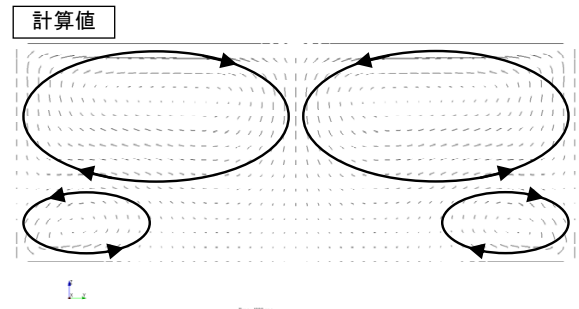
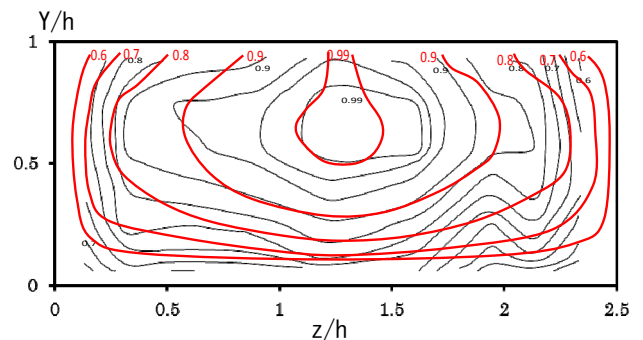


図-12 流線の横断分布 (CASE-3)

図-13 流速 (U/U_{MAX}) の横断方向分布 (CASE-3)

また、実河川レベルの二次流構造の把握が十分に可能であることが改めて確認できた。

今後は、実河川において二極化が顕在化している区間と顕在化していない区間での比較計算を実施し、二次流構造に着目して、河道の二極化等の河道形成の要因を明らかにしていきたい。

謝辞：最後に、本稿作成に際してご助言頂いた北海道大学 工学研究院 環境フィールド工学部門 木村准教授に、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) iRIC : <http://i-ric.org/ja/>
- 2) 木村一郎：iRIC 三次元ソルバー NaysCUBE Ver.2 Solver Manual 第四版、2012.
- 3) 福岡捷二、西村達也、三宮武、藤原剛：緩傾斜河岸を配置した河道湾曲部に流れと河床形状、土木学会論文集、No.509/II-30、155-167、1995.2.
- 4) 禰津家久、富永晃宏、中川博次：河川乱流の野外計測と2次流に関する研究、土木学会論文集 No.467/II-23、P49-56、1993.5.