

数値流体解析による内川感潮域における水理特性の解明

富山県立大学 学生会員 ○布施 佳樹
富山県立大学大学院 正会員 手計 太一
(株)ハイドロシステム開発 正会員 笹川 幸寛

1. はじめに

河川感潮域とは、上流から流入する河川水と潮汐によって下流から流出入する海水が混合する領域である。河川感潮域における海水の侵入形態は、弱混合型・緩混合型・強混合の3つに大別できる¹⁾。特に、弱混合型の河川では海水が河川内へ楔状に遡上する。これを塩水楔と言い、河川水の塩水化をもたらす。これを水資源利用の上で大きな障害²⁾となる一方で、生物のために重要な場所である。河川感潮域では、潮汐・流速や密度差の影響も受けるため、物理的・生物学的にも複雑な水理形態を成す³⁾。そのため、河川感潮域のように自由水表面を有する複雑な流れを把握することは極めて重要である。

本研究では、富山県西部を流れる2級河川内川を対象に、超音波多層流向流速計(ADCP)を用いて塩水遡上時の流速の鉛直分布を観測し、データ分析を行った。また、大規模で複雑な自由表面流れを解析する強力な手法の1つである界面補足法(VOF法)を用いて対象河川の流況の再現を試みた。

2. 対象河川

本研究の対象河川は富山県射水市新湊地域を流れる庄川右支川の内川である。図-1は内川全体の概略図である。内川の流路延長は2.2 km、奈呉の浦から庄川河口までは西内川(流路延長0.7 km)、奈呉の浦から富山新港までは東内川(流路延長1.5 km)と呼ばれている。西内川の平均河床勾配は約1/544、東内川の平均河床勾配は約1/1214である。

3. 観測

(1) 観測機器

本研究ではTeledyne RD Instruments (TRDI)社製の超音波ドップラー式多層流向流速計(Acoustic Doppler Current Profiler; ADCP)を使用して内川の水深・流速2011年から2013年にかけて合計132回(150



図-1 内川全体の概略図

表-1 ADCPの計測設定条件

計測モード	11
計測総圧	0.05m
計測総数	50
アンサンブルタイム	1.04 sec
ウォーターピング数	3
ボトムトラック数	on
ボトムピング数	3
固定観測における流速誤差の標準偏差	0.77 cm/s
計測コーディネーション	アース コーディネート

日間)の観測を実施している。

(2) 観測方法

西内川では奈呉の浦から庄川河口方向274 mに位置する藤見橋地点において水深・流速の観測を行った。ADCPを取り付けた専用ボートを河川中央部に係留し、連続観測を行った。

(3) ADCPによる流速の鉛直分布と富山湾の潮位

先述したように本研究グループでは3年間で150日間のデータがあるが、ここでは例として2012年9月2日と2015年3月13日の観測結果を図-2に示す。さらに、2012年8月31日16時～9月4日20時と2015年3月13日16時～3月17日20時における潮位を図-3に示す。図-2では水質汚濁防止法のために揚水ポンプが稼働停止する17時から翌日8時までの期間におけるADCPによる流速の鉛直分布の観測結果を示

キーワード 塩水楔, ADCP, VOF法, 内川, 感潮域

連絡先 〒939-0398 富山県射水市黒河5180 富山県立大学 TEL. 0766-56-7500 Email : t217035@st.pu-toyama.ac.jp

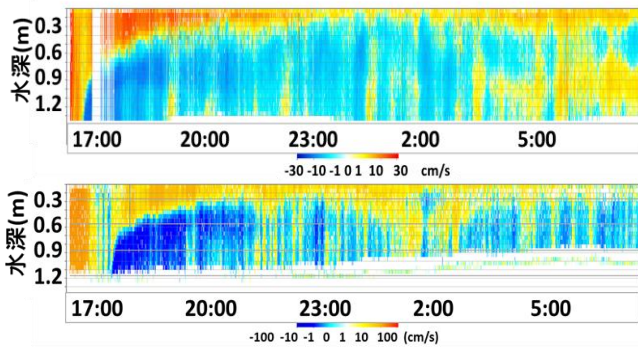


図-2 西内川における流速の鉛直分布の時系列
(2012年9月2日(上図)と2015年3月
13日(下図))

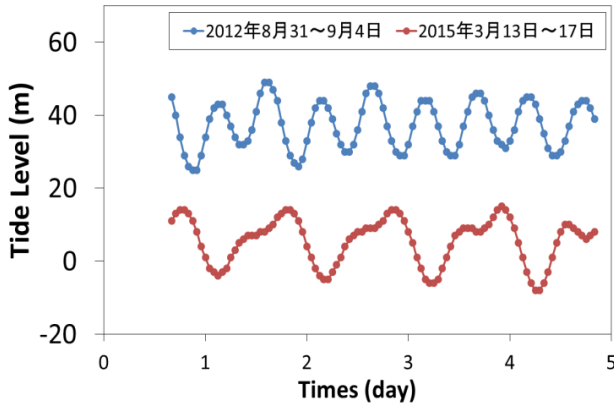


図-3 富山湾における潮位

している。暖色系(黄色～赤)が河川上流から海洋に流れる順流, 寒色系(水色～青)が海洋から流入する逆流である事を表している。

著者らのグループでは, 西内川で明瞭な楔状に塩水が侵入している事^{4), 5)}や塩水楔が進入する直前に全層で逆流現象が発生している事⁶⁾を明らかにしている。図-2からも塩水が明瞭な楔状に侵入していること, そして塩水楔侵入直前の全層逆流現象が認められる。さらに, 塩水楔の後半で順流と逆流が交互に周期的に発生していることがわかった。

(4) 流速の周期特性

ここでは, データ欠測が少ない2012年8月31日16時26分～9月4日19時57分と2015年3月13日16時26分～17日19時57分の期間で計測した各層の流速データのパワースペクトルを解析した。解析結果を図-4a, 図-4bに示す。図-4aは年間潮位が最も高い8月におけるパワースペクトルである。本図から, 全層で12時間と24時間に強い周期性が認められる。また, 水深25cm, 95cmにスペクトル強度が弱い層が存在し, 下層のスペクトル強度が全体的に高いことが分かる。図-4bは年間潮位が最も低い3月におけるパワースペクトルである。水深20cm～80

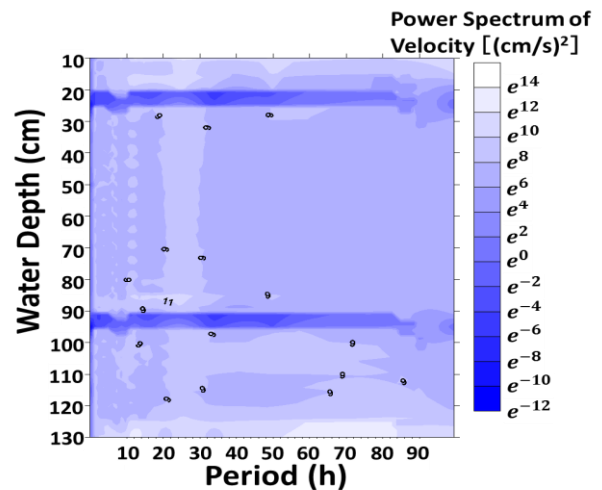


図-4a 西内川における流速のパワースペクトル
(2012年8月31日11時～9月4日14時)

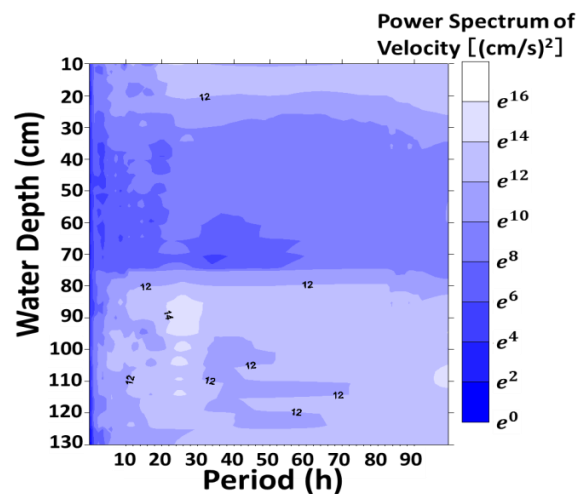


図-4b 西内川における流速のパワースペクトル
(2015年3月13日16時～17日20時)

cmにスペクトル強度が弱い層が存在し, 80cm以下でのみで12時間, 24時間に周期性が認められる。また, 図-4a, 図-4bの両図を比較すると, 季節によって各層におけるスペクトル強度の現れ方に相違がある。図-5aに図-4a中の水深25cm, 95cm, 110cmのパワースペクトルを示す。水深25cm, 95cmの全体的なスペクトル強度は弱い, 12時間と24時間に顕著な周期特性がある。そして, 図-4bにおける水深50cm, 110cmのパワースペクトルを図-5bに示す。12時間と24時間の顕著な周期性は下層の水深110cmのみで認められた。

(5) 流速データを用いた塩淡水界面の抽出の試み

ADCPを用いて観測した流速の鉛直分布の時系列データから, 塩淡水界面を自動的に抽出する方法を検討した。まず, 各層の流速を約79.8秒(60アンサンブル)の移動平均を計算する。例えば, 図-6は17時4分9.98秒～17時5分29.82秒(図中の赤線)と18時

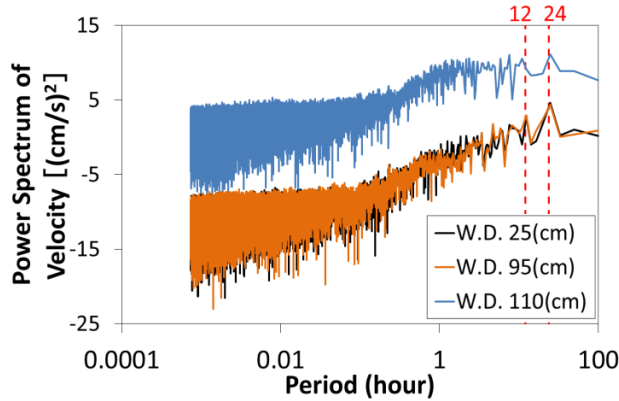


図-5a 流速のパワースペクトル(25cm, 95cm, 110)

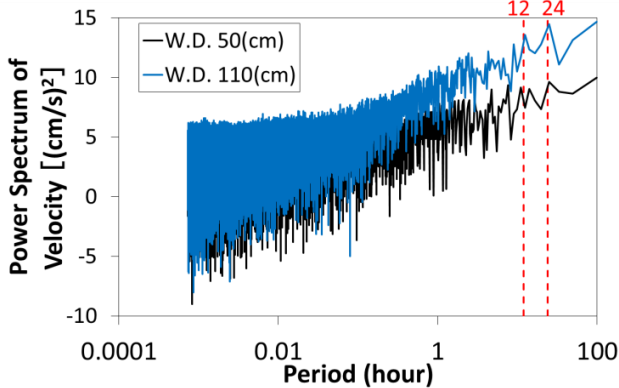


図-5b 流速のパワースペクトル(50cm, 110cm)

17 時 19.2 秒～18 時 18 分 38.94 秒(図中の青線)における各層の平均流速の鉛直分布である。次に順流と逆流の流速差が大きい事を利用して、図-6 中のように各時刻での各層の流速値の変化を ΔU として、各時刻で ΔU 値が最小値である水深を塩淡水界面として判定した。その判定結果を図-7に示す。

図-7 からわかるように、本研究で提案する方法を用いると塩水楔先端部分の界面を明瞭に抽出できる。楔の先端や後半にある乱れについては、先述したように、塩水楔侵入直前には全層逆流が発生すること、そして、塩水楔後半でも順流と逆流が交互に発生する現象が起こるに起因している。

本抽出方法は前述したように、順流と逆流の流速差が大きいことを利用した抽出方法である。そのため全層で順流または逆流が発生すると、各層毎の流速差(ΔU)が小さくなり、界面に乱れが生じると考えられる。

4. 数値解析

(1) 支配方程式

本研究では OpenFOAM (Open source Fields Operation And Manipulation)というオープンソースの CFD ツールを利用した。本研究で利用した VOF 法の基礎方程式である連続方程式(1)と Navier-Stokes 方程

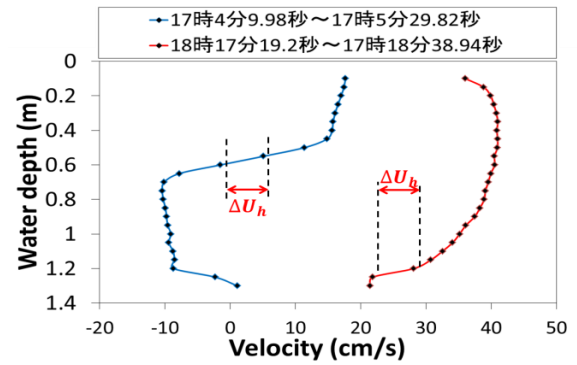


図-6 流速のプロファイル(標本 60 個毎平均)

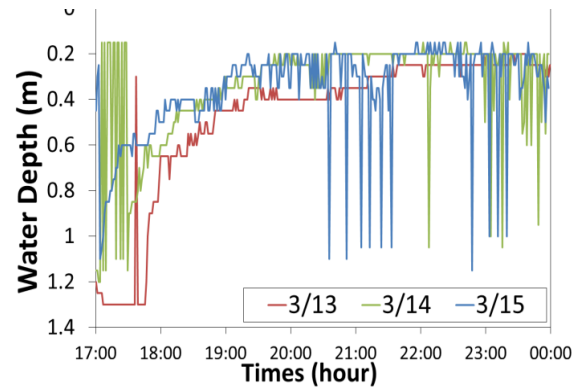


図-7 塩淡水界面の抽出結果

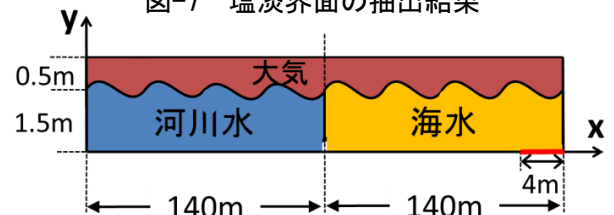


図-8 数値流体解析モデル

式(2)は以下の通りである。

$$\nabla \cdot U = 0 \cdots (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 U + f_s \cdots (2)$$

ここに、 ∇ は3次元領域におけるベクトルの微分演算式、 U は流速ベクトル、 ρ は密度、 p は動圧、 g は重力加速度、 ν は動粘性係数、 f_s は外力である。

(2) 潮位条件を加えた数値流体解析モデル

ここまで詳述した西内川における特徴的な流況の再現するための数値解析モデルを図-8のように構築した。計算時間短縮のために、河川部分(図-8 青部分)と海水部分(図-8 黄色部分)のx方向(縦断方向)をそれぞれ実河川長の1/5の140mづつの合計280mとした。y方向(鉛直方向)は西内川の水深1.5mと大気層0.5mの合計2.0m、z方向(川幅方向)は0.1mとした。格子の大きさは $\Delta x : \Delta y : \Delta z = 2 \text{ m} : 0.1 \text{ m} : 0.1 \text{ m}$ とし、計算格子数は2100個である。初期条件として青色で示した範囲には淡水($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$)、黄色で示した範囲に

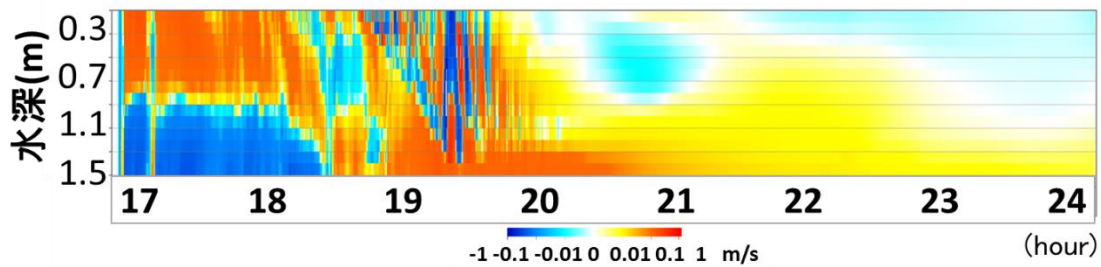


図-9 再現モデルでの流速の鉛直分布の時系列

は海水($\rho=1025 \text{ kg/m}^3$)を設定した。また、赤色の範囲には大気($\rho=1 \text{ kg/m}^3$)を設定した。計算期間は西内川のポンプが稼働停止する17～24時までの7時間である。更に潮位の再現として、底面の右壁面から手前4 mにおいて鉛直方向に流速が周期的な変化をするような12時間と24時間周期の波の合成波を境界条件として与えた。

$$U_y = 0.09\sin(0.000046\pi(t+17600)) + 0.03\sin(0.000023\pi(t+46800)) \quad \dots (3)$$

ここで、 U_y は図-8における鉛直方向の流速、 t は経過時間である。

(3) 数値解析の結果

前章で詳述した観測結果と同様の位置における流速の鉛直分布の時系列変化を図-9に示す。最初の約3時間で塩水楔および、順流逆流が交互に発生する現象が得られた。本稿では1/5の縮小モデルを用いたため、後半の20時以降は塩水の侵入がほぼ停止し、流速はほとんど変化していない。後半で認められる流速の微小な変化は境界条件によるものと考えられる。この結果から、モデルのサイズを実際と同様にすることで、より実際に近い数値解析結果が得られると推測される。

5. 結論

著者らのグループでは富山県射水市新港を流れる内川において ADCP 観測を長期・断続的に行っている。その結果、ADCP 観測による鉛直流速分布の時系列データから特徴的な水理現象が得られている。

西内川で計測した流速のデータを用いて、FFT 解析によるスペクトル解析の結果、年間潮位が最も高い8月は、全層で明瞭な12時間と24時間の周期性特性が得られた。全層にわたって潮位が強く影響していることがわかる。年間潮位が最も低い3月は、下層のみ12時間と24時間の周期性特性が得られたことから、潮位の河川への影響は限定的であること

が言える。

さらに、ADCP を用いて観測した流速の鉛直分布の時系列データから、塩淡水界面を自動的に抽出する方法を検討した。その結果、非常に簡便に塩淡水界面を抽出することができた。

また、西内川の河川縦断距離1/5スケールの再現モデルを作成し、潮位条件として12時間と24時間周期の合成波を境界条件として与えた。その結果、塩水楔、塩水楔直前の全層逆流、そして塩水楔後の界面の振動を定性的に再現することができた。今後、再現モデルのスケールと実際と同様にして解析することで精度向上を図りたい。

謝辞：本研究の遂行にあたり、富山県立大学大学院工学研究科機械専攻准教授の中川慎二先生に OpenFOAM に関するご指導をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：水理公式集[平成11年版]，pp.556-557，1999.
- 2) 中村宏・稲松敏夫：神通川河口の塩水くさびについて，海岸工学講演会講演集 Vol.13pp.295-301，1966.
- 3) 西篠八束：河川感潮域の環境問題，陸水学雑誌 Vol. 56pp.69-74，1995.
- 4) 手計太一・奥川光治・坂本正樹・安田侑子：海水と浄化用水が複雑に交差する内川の水環境に関する基礎的研究，水工学論文集，対 55 巻，pp.S_1663-S_1668，2011.
- 5) 手計太一：内川感潮域における塩水遡上の水理特性，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.68，No.4，pp.I_1327-I_1332，2012.
- 6) 笹川幸寛・手計太一：富山県西内川感潮域において塩水楔先端部に発生する逆流現象，土木学会論文集 Vol. 71，No.5，pp.I_103-I_109，2015.