

# 支川合流のある河川汽水域の鉛直 2 次元塩水流動計算 番匠川を例として

九州大学大学院 学生員 石川泰助 真田将平 正会員 橋本彰博 矢野信一郎 フェロー 小松利光

## 1. はじめに

河川汽水域の環境を評価する際、潮汐による塩水流動を時空間的に連続的に把握する必要があり、数値シミュレーションはそのための有力な手段となる。汽水域では河道横断方向にほぼ一様な塩分分布となることが多く、計算負荷低減のために 3 次元の支配方程式を河道横断方向に積分した鉛直 2 次元モデルがよく使われる。ところで、鉛直 2 次元モデルでは単一の河川が対象となるが、本研究で対象とする番匠川 (図-1) のように大きい支川がある場合、潮汐による支川への流出入量を考慮する必要が出てくると考えられる。そこで本研究では陰解法である SIMPLE 解法を用い、支川を本川と同様に計算し、本川計算にカップリングすることが可能な鉛直 2 次元塩水流動モデルを構築した。

## 2. 数値モデルの概要

鉛直 2 次元の輸送方程式は次のように書かれる<sup>1)</sup>。

$$\frac{1}{B} \frac{D(B\phi)}{Dt} = \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x B \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z B \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + P_\phi + \frac{s}{B} F_\phi \quad (1)$$

ここで、 $t$  は時間、 $x$  は河道縦断距離、 $z$  は鉛直座標、 $B(x,z)$  は河道幅、 $s(x,z)$  は  $x$ - $z$  平面上における単位面積あたりの側壁面積、 $u$ 、 $w$  はそれぞれ  $x$ 、 $z$  方向の流速、 $\mu$  は渦拡散係数である。 $\mu$  の算定には  $k$ -モデルを用いた。 $\phi$  は輸送される物理量の濃度で、例えば  $\phi=1$  とすると連続式、 $\phi=|u|$  とすると  $x$  方向の運動量方程式、 $\phi=k$  とすると運動エネルギーの保存式となる。 $P$  は生産項で、運動量方程式では単位体積に作用する力、塩分では 0、 $k$  と  $\phi$  については  $k$ -モデル方程式で定義されるものである。 $F$  は側壁からの FLUX 項で、 $x$  方向の運動量方程式と  $k$  の方程式ではそれぞれ次式で書き、他は 0 である。

$$F_u = \tau_x = -f_b |u| u \quad (2)$$

$$F_k = \eta^3 (f_b (cu)^2)^{3/2} \quad (3)$$

なお乱流シュミット数は 0.8 とした。

本モデルでは計算格子にスタガード格子を使用し、有限体積法により離散化した。また圧力は SIMPLE 解法により解いた<sup>2)</sup>。

次に新たに作成した支川合流部における格子の離散化手法を説明する。 $x$  方向の運動方程式の離散化をする際、図 2-(a)(上から見た図) に示すようにコントロール・ボリューム (CV) をとり、CV の境界における  $u$  の値を次の式のように補間した。なお合

流部の格子点を記号  $i$  で分岐した CV をそれぞれ活字 1・2 で記す。

$$u_{1_{i+1/2}} = 0.5(u_1 + u_{1_{i+1}}), \quad u_{2_{i+1/2}} = 0.5(u_1 + u_{2_{i+1}}) \quad (4)$$

$z$  方向の運動方程式とスカラー量の輸送方程式も図 2-(b) のように CV をとり同様に離散化した。

SIMPLE 解法による圧力と連続式のカップリングにおける流速変化分  $u$  について、合流部のセルでは通常の 2 変数から 3 変数に変わり、鉛直流速変化分  $w$  を含めると 4 変数から 5 変数に変わるが、数学的取り扱いには特に難しいところはない。

なお、自由水面の取り扱いについては銭<sup>3)</sup>らの方法に従った。

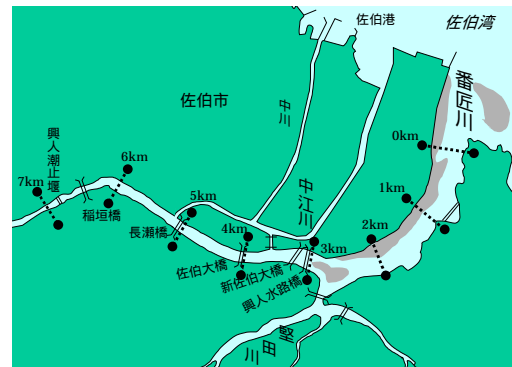


図 1 番匠川汽水域の平面形状

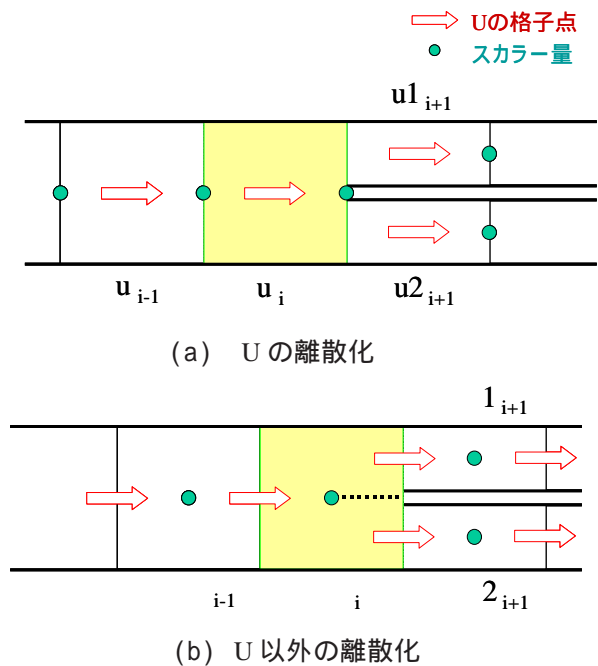


図 2 合流部セルの離散化図

3. 計算条件

計算領域は、図 1 に示す番匠川本川と河口上流 2.6km で本川に流入する堅田川とし、下流端を河口より 4km 沖の地点、本川の上流端を興人潮止堰(河口より上流 6.8km 地点)、支川の上流端を合流部より 2.6km 上流地点とした。地形データ  $B(x, z)$  は、2002 年に国土交通省が実施した測量結果に基づき作成した。なお今回の計算では、河口より 0~2km の区間右岸側の浅瀬といった主流と異なる流動をする部分は計算領域から除き、河床形状が複雑な部分は縦断方向に移動平均をかけて凹凸を除去している。また河口より外側の領域での河道幅は、河口 0.0km からの距離  $x$  / 2 で与えた。

境界条件は、下流端では静水圧分布を仮定して予測潮位を与え、上流端では本川は番匠橋観測所、支川は堅田橋観測所における流量データ値をもとに水表面のセルにおける連続式の生成項に流量を与えた。塩分の境界条件は、下流端では計算領域から流出する場合には自由流出、流入する場合は鉛直方向一様に 33.7psu と与え、上流端の流入水を 0psu で与えた。また今回、式(2)、(3)における摩擦損失係数  $f_b$  を 0.004、係数  $\alpha$  を 0.8、 $\beta$  を 0.4 とした。

以上の条件で 2001 年 8 月 4 日に行った現地観測結果<sup>4)</sup>を対象に数値計算を行った。データを計測した時間帯は図 3 に示すとおりである。8 月 1 日から 4 日までの長島における予測潮位を図 4 に示す。これを近似的に 1 日周期の準定常状態とみなし、図 4 に示す潮位条件を繰り返し与えた。なお上流からの淡水流量は一定とし、本川は 4.81t/s、支川は 0.92t/s を与えた。

4. 計算結果と観測結果との比較

8 月 4 日(大潮)の塩分の縦断分布図について、観測結果を図 -5 に、計算結果を図 -6 に示す。図 -5 より満潮時、塩水はおおよそ弱混合形態で侵入しているが、先端付近は 25psu 程度と海水に比べかなり希釈された塩水が存在している。また干潮時には、水位の低下に伴い塩水が後退している様子が見られる。図 -6 より計算結果はそれらの傾向を概ね再現していると考えられる。しかしながら計算結果では先端付近で、現地計測の結果よりも塩淡水成層が強い傾向にある。これは乱流シュミット数を 0.8 に固定していることが原因であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、有限体積法のコントロール・ボリュームの設定方法を工夫し、合流を考慮した鉛直 2 次元塩水流動モデルを作成した。計算結果は番匠川における観測結果と概ね一致した。今後は支川での観測も行い、妥当性を検証したいと考えている。

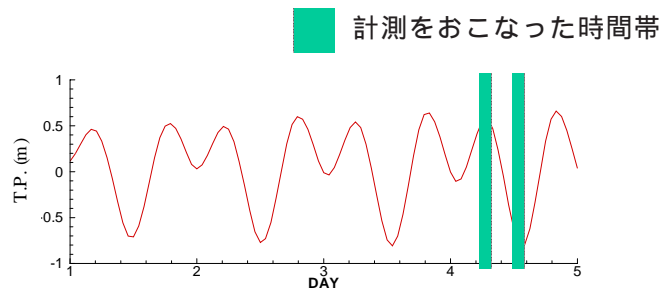


図 -3 2001 年 8 月の長島における予測潮位

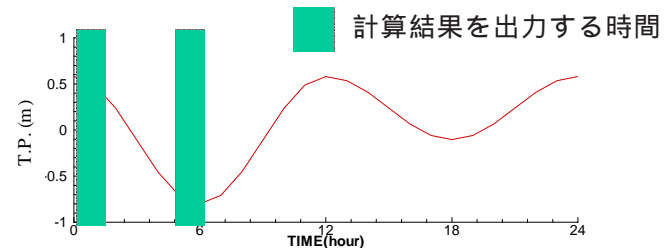


図 -4 計算で与えた潮位

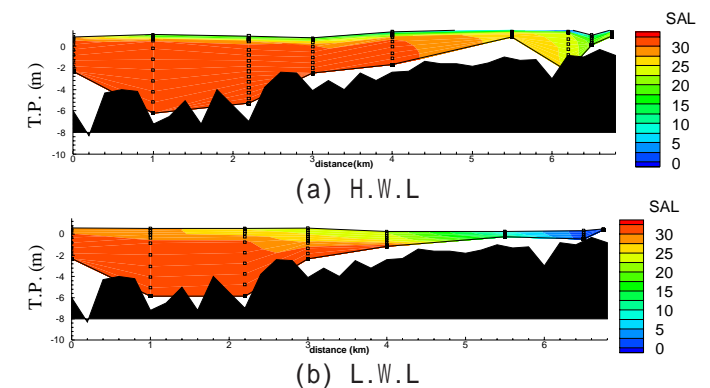


図 -5 塩分の縦断分布図 (観測結果 2001 年 8 月 4 日)

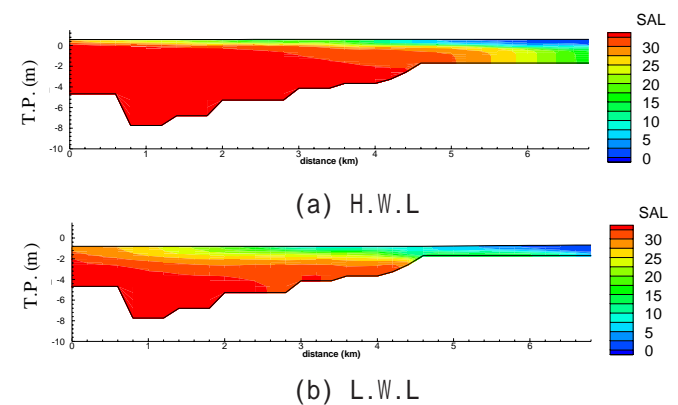


図 -6 塩分の縦断分布図 (計算結果)

参考文献

- 1) 鈴木伴征ほか(1999): 水工学論文集 43 巻 pp.881-886
- 2) 荒川忠一(1994): 数値流体力学、東京大学出版会
- 3) 銭新ほか(1997): 海岸工学論文集 pp.1051-1055
- 4) 中茂義明(2002) 卒業論文