

# 混合型によらない塩水遡上解析法の開発

田 淵 幹 修\*・滝 川 清\*\*・蓑毛健太郎\*\*\*・喜 田 正 雄\*\*\*\*

## 1. はじめに

感潮河川の塩水遡上の動態を把握することは、生活用水・農業用水などの取水や河口部に生息する生物への影響を考慮する上で重要である。特に環境に配慮した河川改修計画を行うときには塩水遡上特性の変化を予測することが必要となる。しかし、このような場合に用いる手軽な解析法は少ない。事実、地方自治体レベルの河川管理者の、手軽に解析できる方法に対しての要望は多い。

本研究では、簡便性と実用性を両立させるために対象を中小河川として、塩水遡上解析法の開発をおこなった。検証計算は、塩分濃度、水温、水位の詳細な実測値が得られている北九州市の紫川と江川について行った。混合形態は、紫川が弱混合型に近い混合型を示す河川であり、江川では測定日や場所により緩混合型と強混合型のデータが得られている。

江川は洞海湾と遠賀川河口部の 2 箇所の河口を両端に持つ特異な川で、塩水遡上も洞海湾側と遠賀川河口側で違った混合形態がみられるなど複雑である。また、江川では、約 90 分周期の水位の変動と振動流がみられる。この水面振動も塩水遡上解析では考慮した。また、この水面振動の原因は洞海湾と遠賀川河口の湾振動であることが平面 2 次元解析によって分かった。

## 2. 数値解析モデルについて

### 2.1 多層 1 次元モデルと格子

座標系は流れ方向に  $x$  軸、鉛直上向きに  $z$  軸をとり、格子は流れ方向と水深方向に等分割して格子網を形成する。水理量の配置はスタッガードで、差分法はリープ・フロッグ法を用い、移流項は風上差分とした。

水深方向の分割数はその場所の水深に応じて任意に設定するが、同一場所の分割数は水深が変化しても一定とする。このため水深の変化に伴って分割位置は変化するが、これは鉛直方向の流速を水深に比例すると仮定すると自動的に鉛直方向の移流を考慮したことになる。ま

た、この方法は水面の取り扱いが容易であり、鉛直方向の流速の計算を省略できるので計算時間の短縮につながる。

本解析法には水温分布とその流れへの影響も解析できるようになっている。今回の検証では、塩分が遡上する水域では水温が流れや塩分の分布に与える影響は小さいことを確認した上で、水温は実測値の平均的な値を用いた。基礎式の説明でも水温に関する項は省略する。

### 2.2 基礎式

離散化方程式は格子で形成される流体要素（コントロールボリューム）に運動量、流体体積、および塩分の保存則を直接適用して導いた。これらの式より基本的な未知量である流量  $Q_n$ 、水位  $H_n$  および塩分濃度（この論文では塩分濃度を塩素イオン濃度で代表し、塩素イオン濃度の単位をパーミリで表した） $Cl_n$  を求める。密度  $\rho_n$  は塩素イオン濃度の関数として計算される。

次に  $x$  における、水面から  $n$  層目の基礎式を示す。基礎式は格子で作られる歪んだコントロールボリュームに直接保存則を適用して導いているので複雑な式になる。ここでは本質を失わない程度に簡略化した表現とした。下付き添字  $x, n$  は、流れ方向の  $x$  における  $n$  層の値であることを示すが、これが明白な場合は省略している。

運動量保存則

$$\begin{aligned} & \frac{1}{gA_n} \frac{\partial Q_n}{\partial t} + \frac{1}{gAn} \left\{ \frac{2Q_n}{A_n} \frac{\partial Q_n}{\partial x} - \frac{Q_n^2}{A_n^2} \frac{\partial A_n}{\partial x} \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{\rho_n} \sum_{i=1}^n ((\rho_n - \rho_{n-1}) H_n) \right] \\ & + \frac{1}{gA_n} \left\{ \frac{E_n B_n Q_n}{A_n} - \frac{\rho_{n+1} E_{n+1} B_{n+1} Q_{n+1}}{\rho_n A_{n+1}} \right\} \\ & + \frac{\tau_{0n} S_n}{\rho_n g A_n} + \frac{\tau_{1(n+1)} B_{n+1}}{\rho_n g A_n} - \frac{\tau_{1n} B_n}{\rho_n g A_n} = 0 \quad \dots\dots (1) \end{aligned}$$

上式左辺の第 6 項および第 7 項の Reynolds 応力は、次式のように混合距離理論を基本とし、濃度勾配の効果は Richardson 数に応じて Reynolds 応力が指数的に低減するものとした。式中の定数は  $-0.3$  である。

$$\frac{\tau_{1n}}{\rho_n} = (\kappa H_n)^2 \left| \frac{\partial (Q_n/A_n)}{\partial z} \right| \left| \frac{\partial (Q_n/A_n)}{\partial z} \right| \exp(m R_n) \quad \dots\dots\dots (2)$$

流体体積保存則

\* 正 会 員 熊本大学講師 工学部環境システム工学科  
\*\* 正 会 員 熊本大学教授 沿岸域環境科学教育研究センター  
\*\*\* 学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科博士前期課程  
\*\*\*\* 正 会 員 (株)リバー・デザイン(福岡市)

$$\frac{\partial A_n}{\partial t} + \frac{\partial Q_n}{\partial x} = -B_n E_n + B_{n+1} E_{n+1} + q_n \quad \cdots (3)$$

塩分の保存則

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (A_n C_{ln})}{\partial t} + \frac{\partial (Q_n C_{ln})}{\partial x} \\ &= \frac{1}{N-n+1} \frac{\partial (B_n E_n C_{ln})}{\partial z} dH_n + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ A_n K \frac{\partial C_{ln}}{\partial x} \right\} \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (A_z)_n K_z \frac{\partial C_{ln}}{\partial z} \right\} \quad \cdots (4) \end{aligned}$$

ここで、 $H_n$ ：第  $n$  層の厚さ、 $B_n$ ：流路幅、 $A_n$ ：流積、 $S_n$ ：潤辺、 $F_n$ ：内部 Froude 数、 $E_n$ ：連行係数、 $R_n$ ：Richardson 数、 $\tau_{0n}$ ：壁面せん断応力、 $\tau_{1n}$ ：層間せん断応力、 $q$ ：流路単位長当たりの横流入量、 $(A_z)_n$ ：一格子の層間断面積、 $K$ ：流れ方向の拡散係数、 $K_z$ ：水深方向の拡散係数、 $\kappa=0.4$  はカルマン定数。

式 (1) の左辺、第 3 項はコントロールボリュームに作用する圧力項である。式 (1) 左辺の第 4 項、式 (2) 右辺の第 1 項と第 2 項、式 (3) の右辺第 1 項は連行現象に関係する項である。

式 (1) 左辺の第 5 項の壁面摩擦、底面摩擦には、Manning の抵抗則を用いる。

連行係数の算定は次式を用いた。式 (5) は須賀 (1984) による式で、式 (6) は  $R_n$  が小さいときの式 (5) の不都合を除くために導入した。

$$\frac{E_n}{V_n} = \frac{2.0 \times 10^{-3}}{R_n^{1.5}} \quad (R_n \geq 0.185) \quad \cdots (5)$$

$$\frac{E_n}{V_n} = \exp(-6.585 R_n - 2.465) \quad (0 < R_n < 0.185)$$

$$\cdots (6)$$

ここで、 $V_n$  は境界面上層の平均流速と下層の平均流速との差の絶対値で、 $R_n$  は Richardson 数である。

拡散は、Keulegan (1949) の安定条件を利用し Keulegan 数  $\Theta$  の値が次式の限界値  $\Theta_c$  以下の時に考慮する。

$$\begin{cases} \Theta_c = 0.127 & (R_e < 450) \\ = 0.178 & (R_e > 450) \end{cases} \quad \cdots (7)$$

ここで、 $R_e$ ：Reynolds 数

流れ方向の拡散係数は式 (8)、水深方向の拡散係数は式 (9) を用いた。

$$K = C_k h u_* \quad \cdots (8)$$

$$C_k = 5.36 B \quad (\text{m, sec. 単位})$$

ここで、 $u_*$ ：摩擦速度、 $h$ ：水深。

$$K_z = (\kappa H_n)^2 \left| \frac{Q_n / A_n}{\partial z} \right| \quad \cdots (9)$$

境界条件は、上流端で固有流量を、河口で余弦カーブで近似した潮位を与える。

### 3. 実測値による検証

#### 3.1 紫川と江川の概要と計算条件

紫川は、河口 (紫川大橋) から約 2.15 km 地点の取水堰までが感潮河川となっている (図-1)。1991 年の 4 月 17 日 (大潮) と 4 月 11 日 (小潮) の調査結果 (北九州市, 1991) を検証データとして用いる。計算に用いた主な水理量は、大潮・小潮の順で、固有流量 (堰からの越流量で実測) が 1.98, 3.92 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )、潮汐の振幅が 0.575, 0.25 (m) で、Manning の粗度係数は 0.03 である。

江川は、洞海湾側河口と遠賀川河口の二つの河口を持つ延長約 8 km の河川で、両河口から海水が遡上して、河川全域が潮汐の影響を受ける特異な河川である (図-1)。

1995 年 12 月 12 日 (大潮) と 12 月 20 日 (小潮) の調査結果 (北九州市, 1995) を検証データとして用いる。計算に用いた主な水理量は、大潮・小潮の順で、潮汐の振幅が 0.755, 0.36 (m) で、Manning の粗度係数は 0.03 である。河川流量は 9 つの支川の合流地点で流域面積と 1 部の実測に基づく流出率による推定値を与えた。

江川では 1997 年の著者らの水位および流速測定で、江川の水位変動には潮汐より短周期の振動が入っていることがわかっている (図-2, 図-3)。

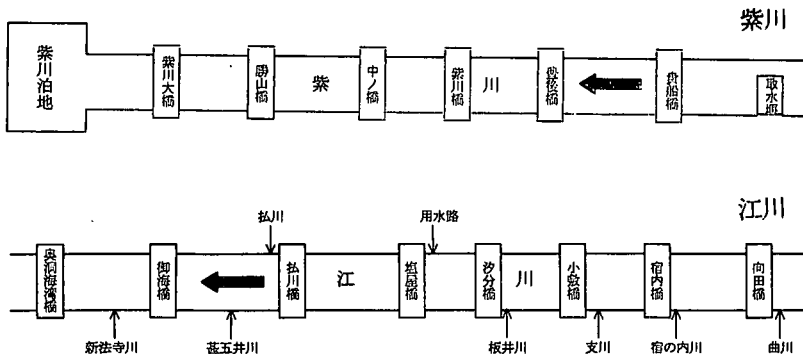


図-1 紫川と江川の概要図

実測水位から潮汐の水位を除いた水位の振動特性は、振幅が約 0.13 m、周期が約 90 分である。

図-4 は、平面 2 次元解析によって江川も組み込んだ洞海湾の湾振動特性を調べたもので、湾口より一定の振幅と周期の長周期波を入射させ、定常状態になった時の水面変動の振幅を入射波の振幅で除して、この増幅率の周期特性を図示したものである。これより、江川河口(奥洞海)の共振周期が約 90 分で、江川の水面振動の周期と一致した。このことより水面振動の原因が湾振動であることが分かる。なお、平面 2 次元解析は田淵・滝川・西濱 (2001) の解析法を用いた。

塩水遡上の検証計算でもこの振動を考慮している。

格子間隔は、紫川、江川とも  $x$  軸方向が 50 m、水深方

向は 3～11 分割して、間隔は計算された水位に応じて約 5～20 cm の間を変化する。

初期条件は満潮時潮位で、流速、塩素イオン濃度とも 0 とし、最初はほぼ 1 周期の潮汐計算のみ行う。塩水遡上の計算は潮汐計算の時刻と実測が行われた最初の時刻が一致したとき、実測値を初期条件として読み込み、以後実測値が無くなる時刻まで計算を続ける。

なお、今回の検証を行う前段階では、塩素イオン濃度の初期条件を 0 (出水で塩水がフラッシュされた状況) として計算を開始し、実測値で検証しながら解析法の基本的な部分の構築を行った。

### 3.2 検証計算の結果と考察

混合形態が異なる場合の計算例を、図-5 と図-6、図-7 に示す。図-5 は紫川の小潮満潮時の塩素イオン濃度と流速の分布で、弱混合に近い混合型となっている。図-6 と図-7 は、江川のそれぞれ大潮と小潮の満潮時の塩素イオン濃度分布で、対応する実測値も図示している。濃度分布は強混合に近い。

計算式の定数など固定でも異なる混合形態が自動的に計算されていることが分かる。

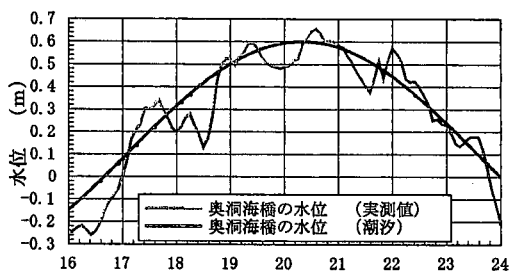


図-2 実測水位の経時変化 (大潮：奥洞海橋)

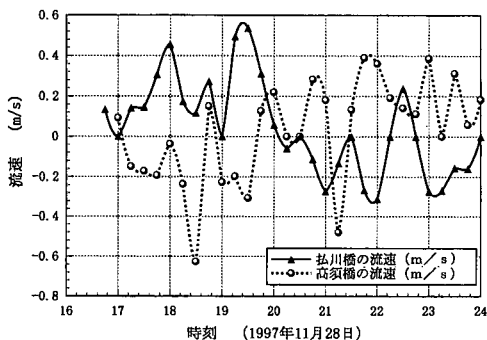


図-3 実測流速 (水面流速) の経時変化

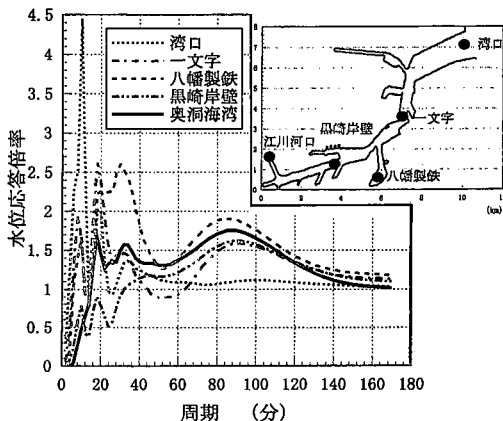


図-4 洞海湾の湾振動特性

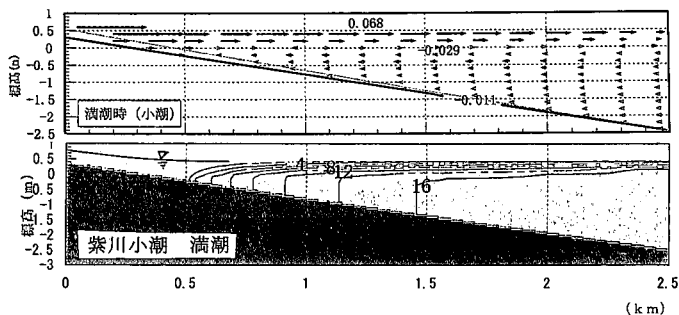


図-5 紫川の塩素イオン濃度 (単位：パーミリ) と流速分布の計算結果 (小潮満潮)

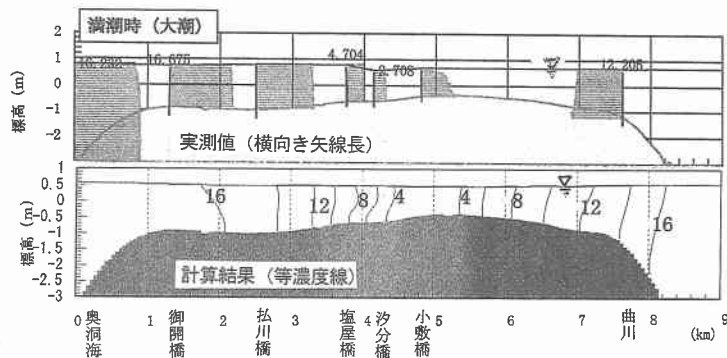


図-6 江川の塩素イオン濃度 (単位: パーミリ) 分布の実測値と計算結果 (大潮満潮)

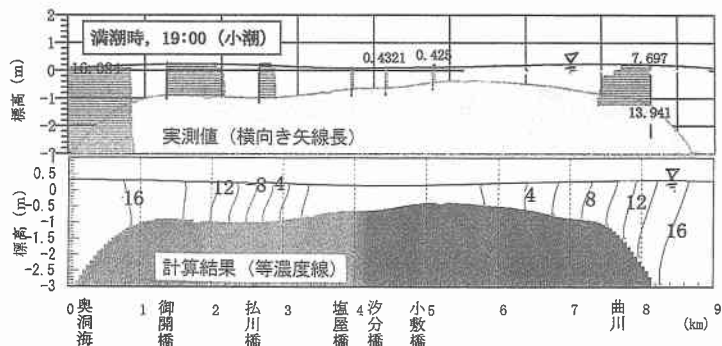


図-7 江川の塩素イオン濃度 (単位: パーミリ) 分布の実測値と計算結果 (小潮満潮)

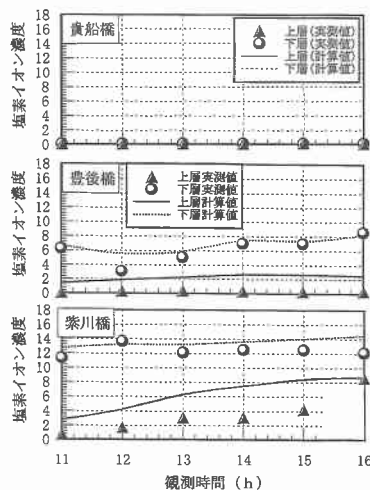


図-8 塩素イオン濃度の経時変化 (紫川: 小潮)

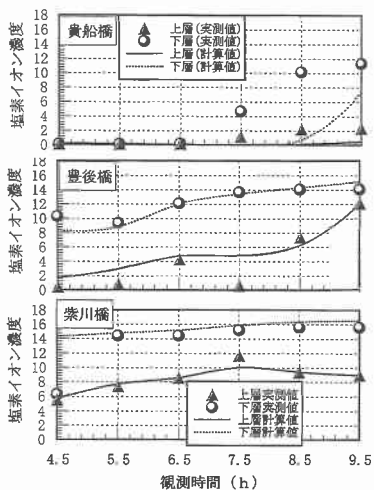


図-9 塩素イオン濃度の経時変化 (紫川: 大潮)

図-8～図-11は、観測地点の2割水深(上層)および8割水深(下層)での塩素イオン濃度の実測値と計算値の経時変化である。観測地点は図-1参照。

これらの図に示される実測値と計算値はよく一致して

いる。合っていないと見られる点もあるが、この原因には、モデルの不都合のほか、時間的変動を考慮していない固有流量(河川流量)など外部条件の不確かさ、点で捉える実測値と平均量の計算値の差などが考えられる。

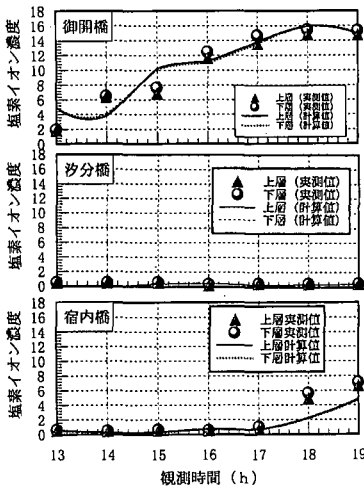


図-10 塩素イオン濃度の経時変化 (江川：小潮)

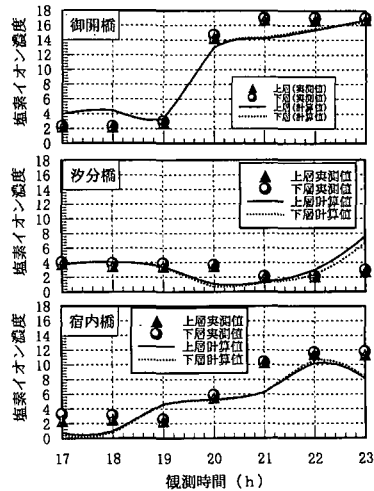


図-11 塩素イオン濃度の経時変化 (江川：大潮)

なお、江川の実測データは河川の中央と左右岸の3ヶ所で得られており、3ヶ所のデータ間で有意な差が無いことを確かめている。

#### 4. 結 論

本研究では、塩水遡上を解析できる実用的な数値解析法の開発を目的とし、モデルの構築と検証を行った。検証計算では、紫川で弱混合形態を、江川で緩混合から強混合形態を表現でき、実測値に対応する解析結果が得られた。また、濃度についても実測値と計算値の一致は良好で、工学あるいは生態系などについて検討する基礎資料を得るといような実用に対しては、十分な精度を得られたといえる。

この解析法の特徴は、①河川固有の定数を除き他の定数は一定として弱混合から強混合までを検証している。これにより、塩水の混合形態の違いを意識せずに解析できる、②実測値の無い河川や計画河川でも検証無しで使

える精度を持つ、③川幅方向の変化を無視して流れ方向と水深方向の変化のみを考える多層1次元モデルで使いやすい解析法となっている、といえる。

最後に、この研究を進めるにあたって、北九州市建設局下水道河川部に資料の提供などのご協力を頂いた。ここに謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 北九州市 (1991): 北九州市建設局土木河川課：平成3年度都市河川紫川生態系(基本)調査業務、調査報告書。
- 北九州市 (1995): 北九州市建設局土木河川課：江川基本計画。
- 須賀寛三・高橋 晃 (1983): 感潮河川における塩水くさびの水利Ⅱ内部抵抗係数と運行係数の実用式、土木研究所報告第160号-2, p. 22。
- 田淵幹修・滝川 清・西濱繁樹 (2001): 運動量保存則の直接離散化による浅水流体運動の数値解析法、熊大工学部研究報告(投稿中)。
- Keulegan, G. H. (1949): Interfacial instability and mixing in stratified flows, Jour. Res. Nat. Bur. Stand. Vol. 43, pp. 487-500。