高瀬川の塩分遡上に関する 二次元分散モデルの開発

DEVELOPMENT OF A TWO-DIMENSIONAL DISPERSION MODEL FOR THE SEAWATER INTRUSION IN TAKASE RIVER

赤穂良輔¹・石川忠晴²・安河内美咲³・鶴田泰士⁴

Ryosuke AKOH, Tadaharu ISHIKAWA, Misaki YASUKOUCHI, Yasushi TSURUTA

¹正会員 工博 東京工業大学 環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

²フェロー会員 工博 東京工業大学 環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

³学生会員 東京工業大学 環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259番)

⁴正会員 工博 (株)建設技術研究所 (〒330-0071 さいたま市浦和区上木埜 1-14-6)

This study proposes a new depth-averaged two-dimensional convection-dispersion model to investigate the seawater intrusion in well-mixed estuary. The new model considers both barotropic salinity flux and the baroclinic flux caused by weak salinity stratification. Liner salinity profile was assumed and physically meaningful baroclinic flux model was constructed base on hydrodynamic consideration. Then, model verification was carried out by simulating seawater intrusion in Takase River. In the new model, the salinity front arrived earlier and the peak value became stronger, which agrees better with the field data measured at Takase Bridge.

Key Words : Takase River, seawater intrusion, dispersion model, depth-averaged model, baroclinic

1. 序論

本研究で対象とする高瀬川は、図-1に示すように青森県東部に位置する小川原湖と太平洋を結ぶ小河川である。小川原湖はシジミやシラウオなど豊富な水産資源で知られる汽水湖だが、近年、水質の悪化が著しい。この原因は、海面上昇に伴う塩水侵入量増加により、嫌気化した湖心部の高塩分層が膨張し、そこに溶解した物質の表層への回帰速度が大きくなったためである。

そこで塩水侵入を制御するために長期間の塩水侵入現象を簡略で、ある程度の精度が得られる数値モデルを用いた検討が行われている。高瀬川の塩水侵入は基本的に強混合であるため、これまでは経験的二次元モデルが用いられており、小川原湖へ侵入する塩分をよく再現できている^{1,2)}。ただし、強混合とはいえ塩分の鉛直分布をもっているため、特に塩水の先端部では分散による塩水遡上がある。小川原湖へ侵入し蓄積していく塩水はこの先端部分が大きく起因しているため、この分散を考慮した数値モデルを導入することが今後求められる。

塩水流動は基本的に三次元だが、運動の空間スケールを大局的にみると、密度成層に伴う傾圧効果に比較して潮汐変動に伴う順圧変動の効果が支配的である。一方、

高瀬川は中腹に広い浅瀬があるため、二次元モデルではなく平面二次元モデルを用いる必要がある。そこで本研究では、浅水流方程式で求めた順圧的流動に新たな塩分の分散を考慮した数値モデル(分散モデル)により求めた傾圧的流動を加えるという手法を開発した。以上の考えに基づき数値モデルを構築し、現地観測データと比較して適用性を検討した。

図-1 高瀬川の位置

図-2 高瀬川の平面図および断面図の例

図-3 塩分侵入特性

2. 高瀬川の概要

図-2に高瀬川の平面図と断面図の例を示す。河道延長は6.6km、濤の幅は約60m、干潮時の濤の水深は約2.5mである。濤の両側は満潮時には水没する干潟となっており、その最大幅は500m程度である。図-2に示す高瀬橋（河口から5.5km）に観測所が設置されており、水位と流速流向の鉛直分布および上層・下層塩素イオン濃度がモニタリングされており、流速および塩素イオン濃度から換算される流量および塩分より塩水遡上の様子を把握することができる³⁾。観測結果の例を図-3に示す。これによれば、湖水位が比較的低い時期の大潮時に塩水が小川原湖に流入する。また塩分は鉛直偏差を若干持っているものの、高塩分水が大量に流入する場合は概ね強混合状態となっている。特に2つの満潮の間の干潮位が比較的高い場合（例えば7月23日~25日、図-3 赤点線枠）には高塩分が長時間継続し、塩水が大量に湖内に流入していると推測される。

3. 塩分の移流分散モデル

(1) モデルの概要

塩水流動を生じさせる圧力勾配は性質上“順圧(barotropic)”と“傾圧(baroclinic)”に分けられる。順圧

図-4 塩分鉛直偏差の仮定 (a)高瀬橋における塩分の鉛直分布の経時変化(西田, 1993³⁾より転載) (b)直線的な密度分布の仮定 (c)高瀬橋における相対平均塩分と相対塩分偏差の関係 (d)水面と底面の相対塩分偏差の仮定

とは水位差による全層的な圧力勾配であり、これによる運動は浅水方程式で記述できる。一方、傾圧は密度の鉛直分布の差異による断面内の圧力勾配である。

高瀬橋観測所のモニタリングデータによれば、高瀬川の流量は湖水位と河口水位の差に概ね支配されている。このことから傾圧に比べて順圧による流動が大きいものと考えられる。そこで本研究では、浅水方程式を用いて順圧的な流動を求めた後に、傾圧的流動による“分散”を加えることとした。本章では、力学的考察に基づき傾圧の効果を表現し、浅水方程式で表される順圧的塩分移流を補正するモデルを導出する。

(2) 塩分の鉛直分布

傾圧は塩分の鉛直分布によって変化する。それを正確に求めるには鉛直二次元ないし三次元モデルが必要となる。しかし、高瀬川での塩水流入は、図-4(a)に示す西田らの観測結果³⁾のように基本的に鉛直分布がなだらかな強混合であることから、塩分の鉛直分布を線形と仮定することにより簡易なモデルを作成する。

本研究で用いる塩分の鉛直分布の概念図を図-4(b)に示す。ここで、横軸は海水の塩分 S_0 に対する相対塩分 $\sigma = S/S_0$ で定義される相対塩分の鉛直平均値 $\bar{\sigma} (= \bar{S}/S_0, \bar{S}$:塩分の鉛直平均値)であり、左側が淡水($\bar{\sigma} = 0$)、右側が海水($\bar{\sigma} = 1$)である。また縦軸は水面からの深さ z 、水深 h としたとき、 $\zeta = z/h$ で定義される相対水深である。図-4(b)に示すように淡水と海水の場合には塩分は鉛直方向に一様となる。一方、中間密度の場合は下層の塩分が上層に比較して大きくなる。

図-4(c)に観測データより得られた $\bar{\sigma}$ と相対塩分偏差 $\Delta\sigma = \Delta S/S_0$ の関係の一例を潮汐ごとに色分けして示す。 $\bar{\sigma} = 0$ と1で $\Delta\sigma = 0$ 、また偏差が大きい場合は概ね0.5で極大となっている。そこで本研究では、 $\Delta\sigma$ と $\bar{\sigma}$ の関係を

式(2)のように放物線で近似する (図-4(d)) .

$$\sigma(\zeta) = \bar{\sigma} + \Delta\sigma(\zeta - 1/2) \quad (1)$$

$$\Delta\sigma = 4\alpha_0\bar{\sigma}(1 - \bar{\sigma}) \quad (2)$$

ここで, α_0 は0~1の範囲の値をとる偏差係数であり, 値が小さいほど水面と底面の塩分偏差が小さい, すなわち混合が強い状態を表す. また, 淡水密度 ρ に対する塩水の相対密度差を $\varepsilon = \Delta\rho / \rho$ ($\Delta\rho$ は塩水と淡水の密度差) とし, 相対塩分と相対密度差の関係を線形で仮定する.

$$\varepsilon = \varepsilon_0\sigma \quad (3)$$

ここで, ε_0 は海水の相対密度差で0.031とする.

(3) 偏差流速のモデル化

密度差によって生じる過剰圧力は $\rho g \varepsilon$ と書けるので, これを水面から深さ z まで積分することで, 水圧の鉛直分布 $P(z)$, さらにこの圧力を水面から深さ z まで積分することによりその層に働く全水圧が求まる. 具体的にはそれぞれ式(4), (5)より得られる.

$$P(z) = \rho g \int_0^z \varepsilon dz = \rho g \varepsilon_0 \int_0^z \sigma dz \quad (4)$$

$$F(z) = \int_0^z P dz \quad (5)$$

本研究では, モデルを単純化するために, まず式(6)に示す重み関数を定義し, 上層と下層に作用する全水圧 F_u , F_d を式(7)より与える (図-5(a)).

$$w_u = \begin{cases} 1 & 0 \leq \zeta \leq 1/2 \\ 0 & 1/2 \leq \zeta \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$w_d = \begin{cases} 0 & 0 \leq \zeta \leq 1/2 \\ 1 & 1/2 \leq \zeta \leq 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} F_u = \int_0^{\zeta} P \cdot w_u d\zeta = F(1/2) \\ F_d = \int_0^{\zeta} P \cdot w_d d\zeta = F(1) - F(1/2) \end{cases} \quad (7)$$

今, 図-5(b)のように順圧分布を P_t (赤線), 実際の圧力分布を P (青線) とすると傾圧は $P_c = P - P_t$ (緑斜線) となる. 塩水層厚が縦断方向に変化するため上層では $P < P_t$ となり右向きに傾圧が生じ, 合力 f_u (青矢印) は順圧成分による合力 f (赤矢印) に対して小さく, 下層では $P > P_t$ となるので, 合力 f_d は大きくなる. 本研究では, モデルを単純化するために, 傾圧成分を Δf とし, f_u , f_d を以下の様に表す(図-5(c)).

$$\begin{cases} f_u = \partial_x F_u = f - \Delta f, \\ f_d = \partial_x F_d = f + \Delta f \end{cases} \quad (8)$$

式(8)を整理することで傾圧成分は式(9)より得られる.

図-5 圧力分布のアンバランスによる速度残差の生成メカニズム (a) 重み関数および全水圧 (b) 密度および水圧の鉛直分布, (c) 合力のアンバランス, (d) 流速の鉛直分布

$$\Delta f = \frac{1}{2} (\partial_x F_d - \partial_x F_u) \quad (9)$$

その結果, 順圧により生じる平均流速 $\bar{u}$ に対して, 偏差流速 u' が生じる. 本研究では, 流速の鉛直プロファイルと塩分プロファイルと同様に以下のような線形と仮定する(図-5(d)).

$$u(\zeta) = \bar{u} + u' = \bar{u} + \Delta u(\zeta - 1/2) \quad (10)$$

$\bar{u}$ による塩分フラックスに u' による付加的な塩分フラックスを加えることで, 移流分散モデルの構築を行う. 層内の傾圧成分 Δf による力のアンバランスが界面での摩擦によって解消されると仮定し, 更に界面摩擦が偏差流速 Δu の2乗に比例すると仮定することで式(11)が得られる. ここに ϕ は無次元のパラメータである.

$$\rho \phi \Delta u^2 = \Delta f \quad (11)$$

式(1), (2)で仮定した塩分の鉛直分布を式(4)に代入し, 式(5)~(9)を順番に解くことで, 偏差流速 Δu が式(12)より得られる.

$$\Delta u = \pm \sqrt{\frac{g \varepsilon_0 h^2}{8 \phi} \left| \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial x} \right|} = \pm \sqrt{\frac{g \varepsilon_0 h^2}{8 \phi S_0} \left| \frac{\partial \bar{S}}{\partial x} \right|} \quad (12)$$

なお, 正負の符号は $\partial \bar{S} / \partial x$ の符号と一致する. すなわち, 上層の偏差流速は塩分の低い方から高い方へ, 下層では逆向きに向かうことになる.

(4) 塩分の付加的フラックス

平均流速および偏差流速によって生じる塩分フラックスは式(13)のように書かれる。

$$Flux = \overline{S}\overline{U} + \int_0^{\zeta} s'u'd\zeta \quad (13)$$

ここに $\overline{S}$, $\overline{U}$ は平均塩分および平均流速, s' , u' は偏差塩分を表す。式(1), (9)を代入することで付加的フラックスは次式より得られる。

$$\begin{aligned} \int_0^{\zeta} s'u'd\zeta &= \int_0^{\zeta} \Delta u \Delta s (\zeta - 1/2)^2 d\zeta \\ &= \pm \frac{\alpha_0 \overline{S} (S_0 - \overline{S})}{6S_0} H^2 \sqrt{\frac{g\varepsilon_0}{2\phi S_0}} \left| \frac{\partial \overline{S}}{\partial x} \right| \end{aligned} \quad (14)$$

上式に含まれる2つのパラメータ ϕ と α_0 については第5章で検討する。

4. 塩分流動モデル

(1) 全体モデル

前章で述べたように、順圧による塩分の流動計算には浅水流方程式を用いる。具体的には、水平方向の塩分偏差による順圧の効果を考慮した次式より求める。

$$\begin{aligned} \partial_t h + \partial_x M + \partial_y N &= 0 \quad (15) \\ \partial_t M + \partial_x \left(\frac{M^2}{h} + \frac{gh^2}{2} (1 + \varepsilon) \right) + \partial_y \left(\frac{MN}{h} \right) \\ &= -gh(1 + \varepsilon) \partial_x z_b - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \partial_x (h\tau_{uu}) + \partial_y (h\tau_{uv}) \\ \partial_t N + \partial_x \left(\frac{MN}{h} \right) + \partial_y \left(\frac{N^2}{h} + \frac{gh^2}{2} (1 + \varepsilon) \right) \\ &= -gh(1 + \varepsilon) \partial_y z_b - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \partial_x (h\tau_{uv}) + \partial_y (h\tau_{vv}) \end{aligned}$$

ここに、 z_b は底面高、 $\overline{U}$, $\overline{V}$ を x , y 方向の鉛直平均流速としたとき、 M , N は x , y 方向の線流量（単位幅あたりの体積フラックス）で $\overline{U}h$, $\overline{V}h$ に等しい。また τ_{bx} , τ_{by} は底面せん断応力、 τ_{uu} , τ_{uv} , τ_{vv} は平均流に対して水深平均を施したレイノルズ応力であり、本論文ではそれぞれマニングの式および0方程式モデルにより与えた。

塩分の輸送方程式は次式で書かれる。

$$\partial_t (h\overline{S}) + \partial_x (M\overline{S} + F_x) + \partial_y (N\overline{S} + F_y) = 0 \quad (16)$$

ここで $M\overline{S}$ と $N\overline{S}$ がそれぞれ x , y 方向の順圧による塩分フラックスであり、 M , N は式(15)より得られた値を用いる。また、 F_x , F_y は前章で求めた傾圧による塩分の付加的フラックスであり、それぞれ次式より求められる。

$$F_x = \pm \frac{\alpha_0 \overline{S} (S_0 - \overline{S})}{6S_0} h^2 \sqrt{\frac{g\varepsilon_0}{2\phi S_0}} \left| \frac{\partial \overline{S}}{\partial x} \right| \quad (17)$$

$$F_y = \pm \frac{\alpha_0 \overline{S} (S_0 - \overline{S})}{6S_0} h^2 \sqrt{\frac{g\varepsilon_0}{2\phi S_0}} \left| \frac{\partial \overline{S}}{\partial y} \right| \quad (18)$$

(2) 横断方向の塩分流動のモデル化

図-2に示したように、高瀬川の中下流部には広い浅瀬があり、河道縦断方向への塩分輸送に大きな影響を与えている⁴⁾。塩水流は主に滞を遡上するが、滞の塩分が表層へ上昇すると干潟に塩水が流入する。この過程では滞と干潟の高低差が塩水流動に影響を及ぼし、滞表層の水のみが干潟に流入する（図-6(a)）。

本研究では、この過程を以下のように簡略化して取り扱った。図-6(b)に示すように浅瀬の水深を h_1 、滞の水深を h_2 とし、それぞれの鉛直平均塩分を $\overline{S}_1$, $\overline{S}_2$ とする。密度効果のために滞の深部にある高塩分水は干潟に侵入できない。そこで滞と干潟の間の流動に関与する滞の塩水は干潟底面より上の部分であると考え、塩分の鉛直平均値を $\overline{S}_2'$ とみなして前節と同様の計算を行う。すなわち式(19)で変換する。

$$\overline{S}_2' = \frac{1}{\zeta_0} \int_0^{\zeta_0} S d\zeta \quad (19)$$

ここに、 $\zeta_0 = h_1/h_2$ は干潟に対する滞上層の相対水深である。式(17), (18)の $\partial \overline{S} / \partial x$ および $\partial \overline{S} / \partial y$ を式(19)より求められる上部の平均塩分を用いて算出する。

(3) 数値解析手法

本研究では、文献⁵⁾と同様に三角形格子における有限体積法を用いて基礎方程式の離散化を行った。Godunov系統の計算手法を採用しており、特性線に沿って波動方程式を分解し、波の風上方向を考慮した定式化を行うことで、安定かつ高精度に移流計算を行うことができる。

図-6 横断方向の塩分流動特性 (a)横断方向断面図、(b)分散モデルの滞における塩分の取り扱い

5. モデル検証

本モデルの妥当性を検証するため、高瀬川を遡上する塩分流動計算を行った。対象として表-1に示す期間について行った。これらの期間は高瀬橋観測データが前後で連続的に得られており、かつ通過塩分が多い期間である。

(1) 計算条件

図-7(a)に計算領域および計算格子を示す。計算格子数は66369とした。両端の境界条件には、図-7(b)に示すような河口水位(赤線)と小川原湖湖心水位(青線)を与えた。各水位はそれぞれ河口観測所と小川原湖観測所で年間を通じて1時間ごとに観測されている。初期水位は小川原湖水位、河道内の初期流速は静止状態とし、初期塩分は0.9[PSU]、下流端は全ての期間について河口付近の塩分として文献⁶⁾を参考に33.0[PSU]とした。なお、計算時間間隔は、解の収束性を考慮して0.25秒とした。

(2) 観測データを用いた偏差係数の設定

式(14)に示すように、傾圧による塩分の付加的フラックスには ϕ と α_0 という2つのパラメータが含まれている。

表-1 計算期間

(a)	1999年1月26日0:00～1999年1月28日0:00
(b)	2002年8月4日12:00～2002年8月7日12:00
(c)	2005年8月15日12:00～2005年8月18日12:00
(d)	2006年1月14日0:00～2006年1月17日0:00

図-7 計算条件 (a) 計算領域, (b) 境界条件

(a) 上げ潮時における上層と下層の塩分の時間変化例

(b) 上層と下層の平均塩分と塩分差の関係

図-8 観測データによる偏差係数 α_0 の設定

ここで、 α_0 は混合の強弱を表すパラメータとなっているため、大潮・小潮などの潮位変化に依存すると考えられる。そこで本研究では、以下の様に観測データを用いて α_0 の回帰式を作成する。

まず、高瀬橋観測所で観測されている上層と下層の塩分(図-3)を用いて以下の様に α_0 を求めた。図-8(a)のように、遡上時の上下層の平均塩分と塩分差の関係を整理すると図-8(b)に示すようになり、式(2)と類似の性質を示す。すなわち中央でピークをとり両端でゼロとなる。そこで、上下層の塩分差が比較的大きな潮汐を対象として、式(2)を用いて各潮汐での α_0 を求め、また対応する潮汐の満潮時の湖水位と河口水位の差の最大値 ΔHe との相関性を調べた。

ここで、高瀬橋での観測データは欠損および異常値となる期間があるため、比較的連続的にデータが得られている2003～2006年の高塩分が長時間継続した潮汐を対象として求めた。得られた結果を図-9に示す。年度ごとに色を分けて表示しているが、いずれの年度についても ΔHe に対して負の相関があることが明らかである。得られた式(20)の線形回帰式を用いることで、高瀬川における塩水遡上時の混合の強さと潮位変化の関係性をある程度表すことができる。回帰結果を図-10に示す。

$$\alpha_0 = -1.4748 \times \Delta He + 0.6771 \quad (20)$$

なお、藤原ら⁷⁾によって行われた現地観測より得られた高瀬橋断面の水理特性によると、逆流から順流に転じる際に、上層の塩分が減少し2層構造になることが示されている。そこで、本検証では湖水位が河口水位より低い場合は、式(20)の最大値とした。また、もう一つのパラメータ ϕ は数値計算結果が観測値に近くなるように経験的に定めた。その結果 $\phi = 0.0018$ を得た。

図-9 $\Delta He - \alpha_0$ の関係

図-10 α_0 の回帰結果

図-11 高瀬橋における塩分の鉛直分布の経時変化

(3) 高瀬橋における流量および塩分の比較

図-11に式(1)を用いて求めた高瀬橋における塩分の鉛直分布の経時変化の計算結果の一例を示す。塩水の先端部では鉛直勾配が大きく、塩分が濃くなるにつれ勾配が小さくなっており、図-4(a)に示した観測データが持つ特徴を二次元モデルを用いてある程度再現できている。

次に、図-12に各計算期間における高瀬橋での流量および塩分の1時間ごとの時間変化を示す。赤線が観測データ、青線が分散モデル、緑線が分散なしの浅水流モデルによる計算結果を示す。ただし、流量は両モデルの結果がほぼ重なるため、分散モデルの結果のみを示す。また、塩分の観測値には上層と下層の平均値を用いた。

浅水流モデルと比較して分散モデルは、いずれの期間についても塩分流入の各ピークの値が高くなり、また侵入し始める時刻が早くなっており、観測結果により近い値となっている。これは、本研究で用いた付加的フラックスによる分散の効果が、小川原湖に侵入する塩水の先端部において適切に働いていると考えられる。

また、2006年の浅水流モデルでは、1月15日以降に塩分が引いていないことが分かる。これは、逆流時に高い

図-12 流量および塩分の観測結果と計算結果の比較

(a) 1999年1月, (b) 2002年8月, (c) 2005年8月, (d) 2006年1月

塩分が浅瀬に侵入し、順流時にも完全にフラッシュされなかったためである。この点についても改善できていることから、本研究で提案した横方向への塩分流動についてのモデル化が効果的に働いていることが示された。

以上より、本モデルは長期間の計算が可能な浅水流モデルと同程度の計算負荷で分散による塩水遡上を考慮できることから、高瀬川から小川原湖へ侵入する塩水フラックスを予測するのに非常に有効であると考えられる。

6. 結論

本研究では、高瀬川の流動特徴を考え、塩分鉛直偏差を加えた新たなモデルの構築する方法を検討した。本研究を通じて得られた結論を以下に示す。

1. 高瀬川の塩水流動において順圧の影響が傾圧の影響を上回ることに着目し、浅水流方程式で順圧下の流動を求めた後に傾圧の影響を考慮した分散モデルで補正を加え塩分の移動を表現した。
2. 高瀬川の中下流部の広い浅瀬が河道縦断方向への塩分輸送に大きな影響を与えていることを考慮し、鉛直塩分偏差を用いて、さらに横断方向の分散モデルを加えた。
3. 高瀬橋における上下層の塩分偏差と、各潮汐の満潮時の湖水位と河口水位の差の最大値との間に高い相関性があることを明らかにし、観測データを用いた偏差係数の設定方法を提案した。
4. 高瀬橋における現地観測データと流量、塩分の時間変化を比較したところ、新たな分散モデルを用いることで、小川原湖へ侵入する塩水の先端部における分散を効果的に考慮できることが明らかになった。

参考文献

- 1) 鶴田泰士, 石川忠晴, 西田修三, 藤原広和, 村井禎美: 小川原湖への海水侵入現象に関わる水理データの整備と復元, 水文・水資源学会誌, Vol.14, No.1, pp.13-26, 2001.
- 2) 石川忠晴, 木下隆史, 赤穂良輔: 小川原湖の長期塩分状態変化モデルの基礎的検討, 河川技術論文集, 第19巻, pp.549-554, 2013.
- 3) 西田修三, 中辻啓二: 緩混合河川における流量と塩分輸送量の算定, 水工学論文集, 第43巻, pp.869-874, 1999.
- 4) 成田舞, 石川忠晴, 藤原広和, 和光一紀: 高瀬川中下流部の浅瀬が塩水遡上に及ぼす影響について, 水工学論文集, 第47巻, pp.955-960, 2003.
- 5) 赤穂良輔, 石川忠晴: 平成23年東北地方太平洋沖地震津波における, 水工学論文集, 第56巻, pp.1543-1548, 2012.
- 6) 成田舞: 青森県高瀬川中下流部の浅瀬が塩水遡上に及ぼす影響について, 東京工業大学, 修士論文, 2003.
- 7) 藤原広和, 田中博通: 高瀬川感潮域の現地観測による水理特性について, 水工学論文集, 第37巻, pp.171-176, 1993.

(2013. 9. 30受付)