

感潮水域における塩水遡上予測*

鉄建建設(株) 功刀 智
八戸工業大学 佐々木 幹夫
八戸工業大学 十文字 雄登

1. 緒言

汽水域では塩水の遡上が多すぎても少なすぎてもそこに生息する生き物の環境が変わり被害を受けることになる。汽水域は感潮域となっており、感潮水域では外海と内水の水位差に応じて順流、逆流が生じており、塩水は逆流にのり陸側へ進入する。塩水の動きを支配しているのは順流と逆流である。塩水がどこまで遡上するのかは逆流の強さと流れの継続時間による。潮汐の影響を受けている河口域や湖口域では海水が逆流や順流により遡上したり流下したりしており移流現象が支配的になっている。本研究では、河口における海水の挙動は移流拡散現象により表されるものとして海水の遡上現象を Sasaki, Tanak and Umeda (2009,2012,2015)により示されている基礎方程式で検討してみる。

2. 海水の遡上予測

感潮水域における海水の動きは次式により表される (Sasaki, Tanak and Umeda, 2009))。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(vc)}{\partial y} + \frac{\partial(wc)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (1)$$

ここに、 C は拡散物質で塩分を表しており、 u, v, w は座標 x, y, z 方向の速度、 t は時間、 D_x, D_y, D_z は x, y, z 方向の乱流拡散係数である。座標 z を鉛直方向、 x を順流の方向にとる。このとき、流れと直角方向の未知量の変化は一樣と考えることができる。そうすると式 (1) は式 (2) のように表される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial(c)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (2)$$

いま、水域を鉛直方向に細かく分割し、分割された各水平層の中の拡散を考えることにする。分割の小ささはこの水層内では鉛直方向の変化が無視できるほど小さくなる層厚とする。この時、分割した k 番目の水平方向の水層内において、式 (2) は式 (3) となる (Sasaki,

* Estimation for intrusion of salt water in estuary by Kunugi Satoshi, Mikio Sasaki and Yuto Jyumonji

Tanaka and Umeda, 2009) .

$$\frac{\partial c_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial c_k}{\partial x} + q_k = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xk} \frac{\partial c_k}{\partial x} \right) \quad (3)$$

ここに、添え字 k は水深 h の水の層を水平方向に分割した k 番目の水層を意味している。上式左辺第3 項の q_k は k 番目の水層内に入り出す拡散物質の量であり、場を分割したことにより生じた k 層の吸出し・吹き出し量である。

これ以降は k 番目の水層内の塩分変化を扱う。記述の複雑さを避けるために添え字 k は省略する。

いま、 k 層の吸出し・吹き出し量 q 、および拡散係数 D_x は次のように表される (Sasaki, Tanaka and Umeda, 2012&2015)。

$$q = C_z |u| \frac{\partial c}{\partial x} \quad (4)$$

$$D_x = l_x |u| \quad (5)$$

ここに、 C_z は係数、 l_x は場の代表的なながさである。いま、流れ u を次式(6)のように表せるものとするとき。式(3)は式(7)および(8)のようになる。

$$u(x,t) = u(t) + u'(x,t) \approx u(t) \quad (6)$$

逆流時の現象は次式(7)により表される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} - C_z |u| \frac{\partial c}{\partial x} = l_x |u| \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (7)$$

順流時の現象は次式(8)により表される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (1 + C_z)u \frac{\partial c}{\partial x} = l_x u \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (8)$$

式(7)および(8)の解として逆流および順流時において式(9)および(10)を得る。

$$c = (C_3 - C_1)\{1 - \exp(-\alpha_1\xi)\} + C_1 \quad \text{during backflow} \quad (9)$$

$$c = (C_p - C_1)\exp(-\alpha_2\xi) + C_1 \quad \text{during seaward flow} \quad (10)$$

ここに、 C_1 , C_m , C_p , は拡散場の塩分の最小値、塩分の最大値、逆流から順流への転流時の塩分、また、 α_1 および α_2 は任意の正の定数である。変数 ξ は次のように定義されている変数である。

$$\xi = \beta_1 \int_0^x |u| dt / l_o + \beta_2 x / l_o + X_{01} / l_o \quad (11)$$

上式 (11) において変数 ξ が負の場合は 次式 (12) に示すように $\xi = 0$ となるようにしている。

$$\xi = 0 \quad \text{when} \quad \xi < 0 \quad (12)$$

式 (11) において、 β_1 、および β_2 は常に α_1 and α_2 を正の値とする任意の定数である。これら定数の関係は式 (7) および (9)、並びに、(8) および (10) より以下のようになっている。式 (11) における X_{01} は転流時の塩分フロントの位置に関する距離である。

逆流時は式 (9) を式 (7) に代入することにより次式を得る。

$$\begin{aligned} & \frac{\beta_1}{l_o} |u| (C_3 - C_1) (-1) (-\alpha_1) \exp(-\alpha_1 \xi) + \frac{\beta_2}{l_o} (u - C_z |u|) (C_3 - C_1) (-1) (-\alpha_1) \exp(-\alpha_1 \xi) \\ & = \left(\frac{\beta_2}{l_o}\right)^2 l_x |u| (C_3 - C_1) (-1) (-\alpha_1)^2 \exp(-\alpha_1 \xi) \end{aligned} \quad (13)$$

故に

$$\frac{\beta_1}{l_o} - \frac{\beta_2}{l_o} (1 + C_z) = \left(\frac{\beta_2}{l_o}\right)^2 l_x \alpha_1 \quad (14)$$

よって、定数 α_1 は次式のようなになる。

$$\alpha_1 = \frac{\frac{\beta_1}{l_o} - \frac{\beta_2}{l_o}(1+C_z)}{\left(\frac{\beta_2}{l_o}\right)^2 l_x} \quad (15)$$

順流時は式 (10) を式 (8) に代入することにより次式を得る。

$$\begin{aligned} & \frac{\beta_1}{l_o} u(C_p - C_1)(-\alpha_2) \exp(-\alpha_2 \zeta) + \frac{\beta_2}{l_o} (1+C_z) u(C_p - C_1)(-\alpha_2) \exp(-\alpha_2 \zeta) \\ & = \left(\frac{\beta_2}{l_o}\right)^2 l_x u(C_p - C_1)(-\alpha_2)^2 \exp(-\alpha_2 \zeta) \end{aligned} \quad (16)$$

故に、

$$-\frac{\beta_1}{l_o} - \frac{\beta_2}{l_o}(1+C_z) = \left(\frac{\beta_2}{l_o}\right)^2 l_x \alpha_2 \quad (17)$$

よって、定数 α_2 は次式のようになる。

$$\alpha_2 = \frac{-\frac{\beta_1}{l_o} - \frac{\beta_2}{l_o}(1+C_z)}{\left(\frac{\beta_2}{l_o}\right)^2 l_x} \quad (18)$$

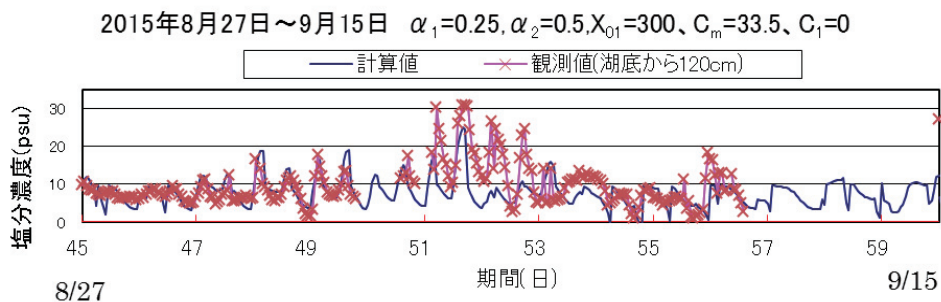
定数 β_1 および β_2 は α_1 and α_2 を正の値とする任意の定数であるが、次のようにとって良い。

$$\beta_1 = 1 \quad \beta_2 = -2 \quad (19)$$

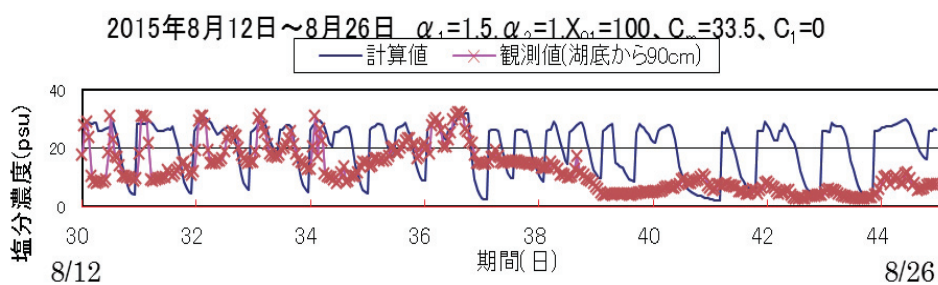
式 (15) および (18) は定数 α_1 and α_2 が場の代表的な長さ l_o 、混合距離 l_x 、および分割水平水層内の吹き出し・吸い込み係数 C_z より計算されることになるが、係数 l_x および C_z の値が現段階では見当がつかないので観測値があればそれとの比較により塩分の混合係数として係数 α_1 and α_2 を検討することができる。本研究では場の代表的な長さ l_o を 3600m としているがこれは移流拡散としての場は速さ 1m/s、時間 3600s で広まる距離を場の代表的な長さとしてとっている。

3. 塩分の予測

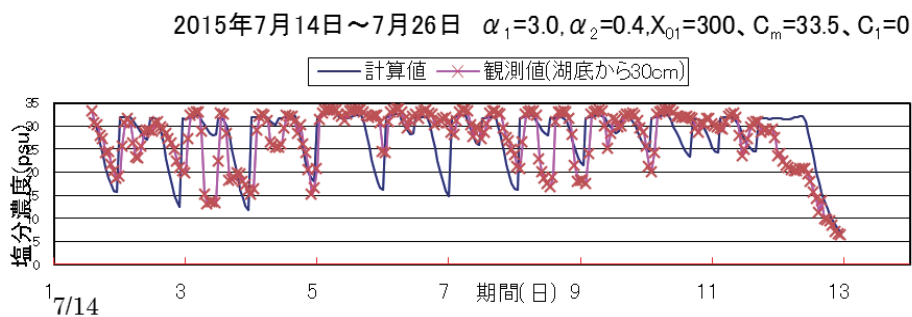
図1に十三湖の湖口近くで実施した塩分の現地観測と計算との比較を示した。この地点の全水深は126cmあり、図1 (a) は湖底から120cm、(b) は90cm、(c) は30cmの高さにおける観



(a) 湖底から 120 cm地点、全水深 $h = 126$ cm



(b) 湖底から 90 cm地点、全水深 $h = 126$ cm



(c) 湖底から 30 cm地点、全水深 $h = 126$ cm

図1 十三湖における塩分現地観測と理論の比較

測値と塩分予測値との比較になっている。ここに、理論では湖水位の変化より求めた湖口近くの計算流速を用いており、計算において流速 u (式 (11)) は正確な値を必要としていない。その不正確さは係数 α_1 および α_2 に反映しているが観測値とよく合う係数 α_1 および α_2 を見出すことにより流速の不正確さが解消されている。とはいえ、順流や逆流の長さ、転流時刻は実現象に合っている必要はある。図において湖底から60cmの地点における観測と理論の比較は紙面の都合上割愛した。図1より、塩分変化は複雑になっているが理論はこの変化を良く再現できているようである。

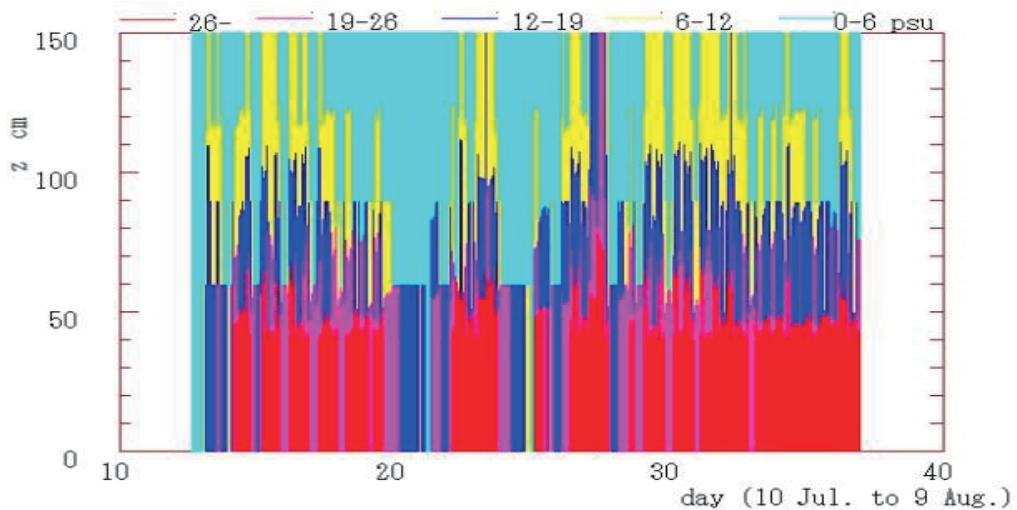


図2 Sasaki, Tanaka & Umeda の理論による塩分鉛直分布の予測
(2015年7月10日～8月9日)

図2に式(9&10)による塩分の予測結果を示した。図は湖口の近くの同じ観測地点(図1)の塩分変化であり、期間は7月12日～8月7日であり、図より7月30日から8月7日までは終日底面付近は高濃度の塩分となっていることがわかる。

4. 塩分の予測

本研究により以下のことが明らかとなった。

- (1) Sasaki, Tanaka and Umeda の理論解は感潮水域であれば適用可能である。
- (2) 順流・逆流が強いほど予測精度は良い。
- (3) 地形の影響の強い水域では予測精度は落ちる(慣性力が支配する惰性的な流動)。

参考文献

- [1] Mikio Sasaki, Tanaka H. and Umeda M. 2009. Theory on Salt Water Movement in River Mouth, Proc. 33th IAHR Congress, Vancouver, Canada, 9-14 August, CD-ROM, D3 No5, pp.4158-4165.
- [2] Mikio Sasaki, Tanaka H. and Umeda M. 2012. Prediction of Salt Water Movement in Iwaki River Mouth, Proc. 4th International Conference of Estuary and Coast, 8-11th October, Hanoi, Vietnam, CD-ROM, pp.164-173.
- Mikio Sasaki, Tanaka H. and Umeda M. 2015. Spatial-Temporal Fluctuation of Salinity in Lake Jusan, E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, The Hague, the Netherlands, CD-ROM, 28 June – 3 July, 2015, 9G No4(Wednesday 1 July 2015).