

大川における塩分遡上の解析について

岩佐 義朗・井上 和也・吉村 義朗

HYDRAULIC ANALYSIS OF SALINITY INTRUSION IN OHKAWA BY MEANS OF NUMERICAL METHOD

by *Yoshiaki IWASA, Kazuya INOUE and Yoshirou YOSHIMURA*

Synopsis

This study deals the salinity intrusion in an estuary channel by means of numerical analysis. Basic equations which express the distributions of velocity and salinity in the longitudinal and depth-wise directions are transformed into the finite difference scheme, in which the eddy viscosity and the eddy diffusivity are assumed as the functions of local Richardson number. The model developed here is applied to the Ohkawa (Old Yodo River) in Osaka city. The results obtained are a good realization of its actual behaviour, at least in qualitative aspects. The salinity intrusion affected by the release operation of discharge at Kema weir is also simulated by using this model.

1. 緒 言

河口感潮域で河川の流量が減少すれば、河川内の塩水の遡上は一般に促進される。流量の減少がある程度以上の期間にわたれば、塩水は相当上流まで浸入すると考えられるから、もしその附近に取水施設があれば取水される水に塩分が混入するという問題が生ずる。本研究は、大阪市内の大川（旧淀川）を河口感潮域としてとり上げ、まず塩分遡上現象を解析するための方法を開発し、ついで1984年10月～同年11月にわたる流量低下時の塩分の浸入について観測値と数値解析の結果を比較し、さらに塩分の浸入を軽減するために感潮域の上流端で流量制御（フラッシング操作）が行われた場合について考察するものである。

河口感潮域において塩分が浸入し、混合する形態には周知のように強混合型、緩混合型および弱混合型の3つがある。これらのうちいずれの型が現実の河口に現われるかは、河川の流量、潮汐、地形などによって時間的にも場所的にも複雑に変化するといわれる。強および弱混合型は緩混合型を理想化した場合であって、緩混合型が他の2つを包含していると考えられるとともに、実際にも中間型である緩混合型の出現が最も多い。したがってこれらのことを考え、本研究における解析法は、緩混合型、つまり河川の縦断方向にも水深方向にも密度（塩分濃度）こう配が存在する流れを対象にすることとする。

2. 解析モデルの構成と計算手法

2.1 塩分遡上に係る要因と機構

河口感潮域の塩分遡上を決定する因子として、平均海面高、河川の流量、海水および河川水の塩分濃度、水温、波浪、潮流、風、人工的取排水、地球自転の影響などが挙げられる。実際にはこれらの因子が複雑に作用し合って塩分遡上が生じ、しかもそれらに時間的な履歴の効果が加わるため、個々の影響を一概に論ずることはできない。しかし、低水流量程度以下の流量の河川では、観測によりとくに潮汐の影響が卓越することが知られている。そこで本研究では、塩分遡上に最も影響を与える要因として上述の諸因子のうち、潮汐（具体的には河口の潮位）および河川の流量にとくに注目して解析を行うことにし、塩分遡上の変遷の機

槽を前報¹⁾と同様につきのように考えることにする。すなわち、潮汐の変化が大きい場合、感潮域において流れの空間的变化も大きくなり、その結果成層の安定性が減少し (Richardson 数が小さくなり)、鉛直方向の混合が進み——それはまたさらに Richardson 数を減少させ鉛直方向の混合を一層促進させる——強混合型に近づくのであり、また逆の場合安定性の増大 (Richardson 数の増加) により鉛直方向の混合が抑制され、弱混合型に近づくと考えたことにした。そして、この機構の表現である Richardson 数と、鉛直方向の混合の速さを規定する渦動拡散係数との関係を用いて、塩分遡上の変遷をみることにする。

2.2 基礎方程式

上述のように、本研究では緩混合型を対象に塩分遡上の変遷を追跡しう解析モデルを構成する。一般に流れおよび塩分濃度を規定する基礎方程式は、3次元空間において表現されるが、本研究では取り扱いを簡単にするため、つぎの仮定を設ける。

① 流れおよび塩分濃度は河川の横断方向について一様である。

② 流れおよび塩分濃度は河川の縦断方向および水深方向で構成される鉛直二次元の平面内で扱う。

①の仮定により、基礎式を横断方向に積分して河川の幅をとり入れることができ、また②の仮定により河川の曲りは無視されることになる。

さて、 x 軸を河川の縦断方向上流向きに水平に、 y 軸を横断方向に、また z 軸を鉛直上向きにとる。流れの基礎方程式に関してさらにつぎの仮定を設ける。

(i) 鉛直方向の加速度は重力のそれに比べ十分小さい。すなわち圧力は静水圧分布とする。

(ii) 流体に作用する物体力には重力のみを考える。

(iii) セン断応力には z 軸に垂直な平面内に作用する成分 (τ) だけを考える。

(iv) 水は非圧縮性であり、密度は塩分濃度のみによって変化する。

(v) Boussinesq の近似が成立する。

運動方程式

$$x \text{ 方向 } \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$z \text{ 方向 } -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{連続式 } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

塩分濃度に関する拡散方程式

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad \dots\dots\dots(4)$$

ただし、記号は慣用のとおりである。以上の4式に密度と濃度の関係 (状態方程式) を加えて基礎方程式系が構成される。

2.3 差分式

前報¹⁾と同様に、流れの中に考えられた control volume について(1)~(4)式を積分した関係より、差分式が導かれる。積分にあたって control volume の横断方向の大きさ、つまり河川の幅 B が必要であるが、後にこの解析モデルを適用する大川の横断面の形状よりみて、 B は水深方向に変化しないもの (すなわち、長方形断面) とする。control volume について積分した結果および差分式は、前報のそれらと比べ幅 B が含まれる点だけが異なるが、煩をいわず差分式を示せば以下のようである²⁾。

(1) 自由表面を含まない control volume (内部) について

運動方程式

$$x \text{ 方向 : } \frac{u_{i,k+1/2}^{n+3} - u_{i,k+1/2}^{n+1}}{2\Delta t}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{\Delta x B_{v_i}} (u_{i+1/2, k+1/2}^{n+1} u_{i+a, k+1/2}^{n+1} B_{i+1/2} - u_{i-1/2, k+1/2}^{n+1} u_{i-1+b, k+1/2}^{n+1} B_{i-1/2}) \\
 & + \frac{1}{\Delta z} (w_{i, k+1}^{n+1} u_{i, k+1/2+c}^{n+1} - w_{i, k}^{n+1} u_{i, k-1/2+d}^{n+1}) \\
 & + \frac{1}{\rho_{i, k+1/2}^{n+2} \Delta x B_{v_i}} (\rho_{i+1/2, k+1/2}^{n+2} B_{i+1/2} - \rho_{i-1/2, k+1/2}^{n+2} B_{i-1/2}) \\
 & - \frac{1}{\rho_{i, k+1/2}^{n+2} \Delta x B_{v_i}} \rho_{i, k+1/2}^{n+2} (B_{i+1/2} - B_{i-1/2}) - \frac{1}{\rho_{i, k+1/2}^{n+2} \Delta z} (\tau_{i, k+1}^{n+1} - \tau_{i, k}^{n+1}) = 0 \dots\dots\dots (5)
 \end{aligned}$$

$$\alpha \text{ 方向: } \rho_{i+1/2, k+1/2}^{n+2} = g \left(\sum_{l=a}^{K-1} \rho_{i+1/2, l+1/2}^{n+2} \Delta z - \frac{1}{\alpha} \rho_{i+1/2, k+1/2}^{n+2} \Delta z \right) + 2 \rho_{i+1/2, S}^{n+2} \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{連続式} \quad \frac{1}{\Delta x B_{i+1/2}} (u_{i+1, k+1/2}^{n+3} B_{i+1} - u_{i, k+1/2}^{n+3} B_i) + \frac{1}{\Delta z} (w_{i+1/2, k+1}^{n+3} - w_{i+1/2, k}^{n+3}) = 0 \dots\dots\dots (7)$$

拡散方程式

$$\begin{aligned}
 & \frac{c_{i+1/2, k+1/2}^{n+4} - c_{i+1/2, k+1/2}^{n+2}}{2\Delta t} \\
 & + \frac{1}{\Delta x B_{i+1/2}} (u_{i+1, k+1/2}^{n+3} c_{i+1/2+a, k+1/2}^{n+2} B_{i+1} - u_{i, k+1/2}^{n+3} c_{i-1/2+b, k+1/2}^{n+2} B_i) \\
 & + \frac{1}{\Delta z} (w_{i+1/2, k+1}^{n+3} c_{i+1/2+c, k+1/2+d}^{n+2} - w_{i+1/2, k}^{n+3} c_{i+1/2, k-1/2+d}^{n+2}) \\
 & - \frac{D_x}{\Delta x B_{i+1/2}} \left(B_{i+1} \frac{c_{i+3/2, k+1/2}^{n+2} - c_{i+1/2, k+1/2}^{n+2}}{\Delta x} - B_i \frac{c_{i+1/2, k+1/2}^{n+2} - c_{i-1/2, k+1/2}^{n+2}}{\Delta x} \right) \\
 & - \frac{D_z}{(\Delta z)^2} (c_{i+1/2, k+3/2}^{n+2} - 2c_{i+1/2, k+1/2}^{n+2} + c_{i+1/2, k-1/2}^{n+2}) = 0 \dots\dots\dots (8)
 \end{aligned}$$

(2)自由表面を含む control volume (表層) について

運動方程式

$$\begin{aligned}
 \alpha \text{ 方向: } & \zeta_{v_i}^{n+2} \frac{u_{i, S}^{n+3} - u_{i, S}^{n+1}}{2\Delta t} + \frac{u_{i, S}^{n+1}}{2B_{v_i}} \left(B_{i+1/2} \frac{\zeta_{i+1/2}^{n+2} - \zeta_{i+1/2}^n}{2\Delta t} + B_{i-1/2} \frac{\zeta_{i-1/2}^{n+2} - \zeta_{i-1/2}^n}{2\Delta t} \right) \\
 & + \frac{1}{\Delta x B_{v_i}} (u_{i+1/2, S}^{n+1} u_{i+a, S}^{n+1} B_{i+1/2} \zeta_{i+1/2}^{n+2} - u_{i-1/2, S}^{n+1} u_{i-1+b, S}^{n+1} B_{i-1/2} \zeta_{i-1/2}^{n+2}) - w_{i, K}^{n+1} u_{i, K-1/2}^{n+1} \\
 & + \frac{1}{\rho_{i, S}^{n+2} \Delta x B_{v_i}} (\rho_{i+1/2, S}^{n+2} B_{i+1/2} \zeta_{i+1/2}^{n+2} - \rho_{i-1/2, S}^{n+2} B_{i-1/2} \zeta_{i-1/2}^{n+2}) \\
 & - \frac{\rho_{i, S}^{n+2} \zeta_i^{n+2}}{\rho_{i, S}^{n+2} \Delta x B_{v_i}} (B_{i+1/2} - B_{i-1/2}) + \frac{1}{\rho_{i, S}^{n+2}} \tau_{i, K}^{n+1} = 0 \dots\dots\dots (9)
 \end{aligned}$$

$$\alpha \text{ 方向: } \rho_{i+1/2, S}^{n+2} = \frac{1}{2} \rho_{i+1/2, S}^{n+2} g (\bar{H}_{i+1/2} - z_{i+1/2, K}) \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{連続式} \quad B_{i+1/2} \frac{\bar{H}_{i+1/2}^{n+4} - \bar{H}_{i+1/2}^{n+2}}{2\Delta t} + \frac{M_{i+1}^{n+3} B_{i+1} - M_i^{n+3} B_i}{\Delta x} = 0 \dots\dots\dots (11)$$

拡散方程式

$$\begin{aligned}
 & \zeta_{i+1/2}^{n+2} \frac{c_{i+1/2, S}^{n+4} - c_{i+1/2, S}^{n+2}}{2\Delta t} + c_{i+1/2, S}^{n+2} \frac{\zeta_{i+1/2}^{n+2} - \zeta_{i+1/2}^n}{2\Delta t} \\
 & + \frac{1}{\Delta x B_{i+1/2}} (u_{i+1, S}^{n+3} c_{i+1/2+a, S}^{n+2} B_{i+1} \zeta_{i+1}^{n+2} - u_{i, S}^{n+3} c_{i-1/2+b, S}^{n+2} B_i \zeta_{i-1}^{n+2}) - w_{i+1/2, K}^{n+3} c_{i+1/2, K-1/2}^{n+2} \\
 & - \frac{D_x}{\Delta x B_{i+1/2}} \left(B_{i+1} \frac{c_{i+3/2, S}^{n+2} - c_{i+1/2, S}^{n+2}}{\Delta x} - B_i \frac{c_{i+1/2, S}^{n+2} - c_{i-1/2, S}^{n+2}}{\Delta x} \right) \\
 & + D_z \frac{c_{i+1/2, S}^{n+2} - c_{i+1/2, K-1/2}^{n+2}}{\Delta z} = 0 \dots\dots\dots (12)
 \end{aligned}$$

ここに、 B_{v_i} : 運動方程式を適用する control volume の平均幅、 $B_{i+1/2}$: 連続式を適用する control volume

の幅, ζ_{vi} : 運動方程式を適用する control volume の表層の平均厚さ, $\zeta_{i+1/2}$: 連続式を適用する control volume の表層の平均厚さ, $M_{i+1}^{n+3} = \sum_{S=i+1} u^{n+3} \Delta x$, S : 表層の control volume, K : 表層と内部の境界の層の番号である。
(5)式の第5項および(9)式の第6項は幅 B の縦断方向の変化を考慮した項であり, また B_i には control volume への流入・出に関する有効幅として $B_{i+1/2}$ と $B_{i-1/2}$ の小さい方がとられる。移流項の u および c の添字に現われている a, b, c および d には, 上流側の量が移流されるように, すぐ前の流速が正であれば0, 負であれば1がとられる。

2.4 分・合流点の扱い

例として合流点を考える。**Fig. 1** は合流部の平面図を模式的に示したもので, 河川1 (R 1) と河川2 (R 2) とが合流角度0で断面 CC' において合流して河川0 (R 0) になるとする。この場合, 連続式および拡散方程式が適用される合流点の control volume は平面的にみれば $BDD'B'$ であるから, 差分式においても断面 BB' , DD' および $D'D'$ での移流および拡散によるフラックスを考えればよい。control volume $ACC'A'$ について適用される運動方程式では, 断面番号を図の $g-1/2, g, g+1/2, g'+1/2, \dots$ のようにとり,

$$u_{g+1/2, k+1/2}^{n+1} = (u_{g, k+1/2}^{n+1} + u_{g+1, k+1/2}^{n+1})/2, \quad u_{g'+1/2, k+1/2}^{n+1} = (u_{g, k+1/2}^{n+1} + u_{g'+1, k+1/2}^{n+1}) \dots \dots \dots (13)$$

によって, 断面 CC'' および $C'C'$ の移流速度を決めることにする。(13)式を用いて自由表面を含まない control volume $ACC'A'$ の場合, x 方向の運動方程式はつぎのように差分化される。

$$\begin{aligned} & \frac{u_{g, k+1/2}^{n+3} - u_{g, k+1/2}^{n+1}}{2\Delta t} \\ & + \frac{1}{\Delta x \Delta v_g} (u_{g+1/2, k+1/2}^{n+1} u_{g+1/2, k+1/2}^{n+1} B'_{g+1/2} + u_{g'+1/2, k+1/2}^{n+1} u_{g'+1/2, k+1/2}^{n+1} B'_{g'+1/2} \\ & - u_{g-1/2, k+1/2}^{n+1} u_{g-1/2, k+1/2}^{n+1} B_{g-1/2}) + \frac{1}{\Delta z} (w_{g, k+1/2}^{n+1} u_{g, k+1/2}^{n+1} c - w_{g, k}^{n+1} u_{g, k-1/2}^{n+1} c) \\ & + \frac{1}{\rho_{g, k+1/2}^{n+2} \Delta x \Delta v_g} (\rho_{g+1/2, k+1/2}^{n+2} B_{g+1/2} - \rho_{g-1/2, k+1/2}^{n+2} B_{g-1/2}) \\ & - \frac{1}{\rho_{g, k+1/2}^{n+2} \Delta x \Delta v_g} \rho_{g, k+1/2}^{n+2} (B_{g+1/2} - B_{g-1/2}) \\ & - \frac{1}{\rho_{g, k+1/2}^{n+2} \Delta z} (\tau_{g, k+1}^{n+1} - \tau_{g, k}^{n+1}) = 0 \dots \dots \dots (14) \end{aligned}$$

ここに, $B_{g+1/2}$: **Fig. 1** に示される合流後の河川の幅, $B'_{g+1/2}$ および $B'_{g'+1/2}$: 合流前の R 1 および R 2 の河川の幅である。その他の式についての差分式および自由表面を含む control volume についての差分式はすべて省略する。

計算法の構成や計算手順は前報¹⁾と同様であるので省略する。ただ, せん断応力の計算には, 前報と異なり次式を用いた。すなわち, 底面に接しない面では,

$$\frac{\tau}{\rho} = A_z \frac{\partial u}{\partial z} \dots \dots \dots (15)$$

また, 底面では

$$\frac{\tau}{\rho} = \gamma_b^2 u_b^2 \dots \dots \dots (16)$$

とする。ただし, u_b : 底面に接する control volume での流速, γ_b^2 : 抵抗係数 ($\gamma_b^2 = 0.0026$ とする), A_z : 渦動粘性係数である。さらに, A_z および (8) 式中の渦動拡散係数は 2.1 で述べたように流れの安定性によって規定されるとして, つぎのような Richardson 数の関数とした³⁾。

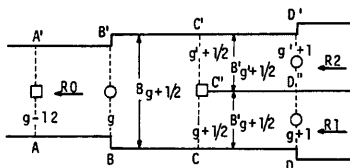


Fig. 1 Confluence (○: velocity point, □: salinity point).

$$A_z = A_{z_0} e^{-1.5R_i}, \quad D_z = D_{z_0} e^{-3R_i} \quad (R_i > 0) \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 A_{z_0} および D_{z_0} は中立状態 ($R_i = 0$) のときの A_z および D_z であり、また $R_i < 0$ (不安定) のときには、 $A_z = A_{z_0}$ 、 $D_z = D_{z_0}$ とする。なお、Richardson 数には局所 Richardson 数を用いる。

3. 塩分遡上の観測と解析の比較およびフラッシング操作への応用

3.1 大川の概要

淀川は毛馬地点で新淀川と大川（旧淀川）に分流する。大川は大阪市内を流れ、京橋付近で寝屋川を合流し、毛馬地点から 4 km の地点で中之島をはさんで堂島川と土佐堀川に分流した後、この地点から 3.5 km 下流で再び合流して安治川となって大阪湾に注ぐ (Fig. 2)。その全長は、毛馬地点からほぼ河口とみられる安治川大橋まで約 10 km にわたっている。大川に沿っては、桜宮橋通りより上流に、大阪臨海水取水口などのいくつかの取水口が設けられている。

大川の特徴の一つは、上流端の毛馬水門の放流流量が制御されるため、流量が人為的に操作されていることにある。淀川の流量が少ないとき、大川沿いの塩分遡上を抑制するため、河口での潮汐の下げ潮後半以外は放流流量を少なくし、その分貯留された水を下げ潮後半に一気に放流するという方法（フラッシング操作とよばれる）がしばしば採られている。本研究ではフラッシングが行われたときの塩分遡上の挙動を先に導いた方法により数値解析して検討する。

3.2 計算の条件

(1) 計算対象領域

計算対象領域は、Fig. 2 に示すように安治川大橋から毛馬水門までの区間で、簡単のため木津川および寝屋川の分・合流は考えないことにする。図中の黒丸が計算断面であり、 $\Delta x = 200$ m として計 65 断面（うち 15 断面は土佐堀川）がとられている。また、 $\Delta s = 1.0$ m であり、計算の時間間隔は $\Delta t = 5$ 秒である。

(2) 計算対象期間

流量の減少時において、塩分遡上の観測^{4,5)} が行われた 1984 年 10 月 16 日から同年 11 月 10 日までの 26 日間とする。

(3) 境界条件

上流端においては毛馬水門からの放流流量の観測値を、下流端においては河口（大阪湾）の潮位の観測値

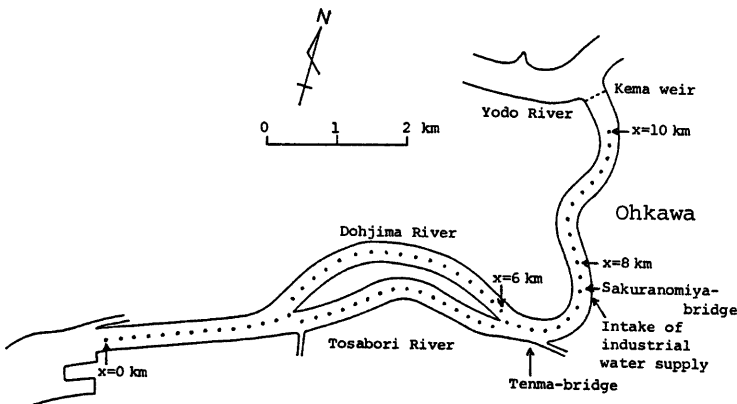


Fig. 2 Ohkawa (Old Yodo River).

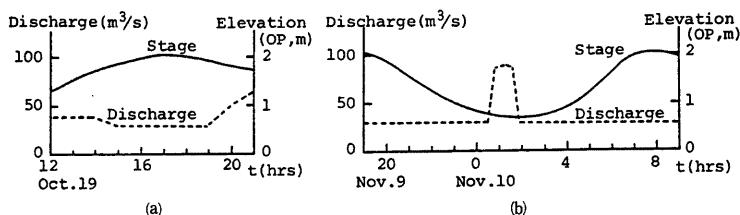


Fig. 3 Boundary conditions: stage at Osaka bay and discharge from Kema weir on Oct. 19 and Nov. 9-10, 1984.

をそれぞれ与える。また、下流端の塩分濃度は水深方向に一樣に20‰とする。

(4) 初期条件

境界条件の初期値ではほぼ定常状態になるまで計算を行い、これを初期条件とする。

(5) 渦動粘性係数、渦動拡散係数

2, 3の予備的な計算の結果より、 $A_{z0} = D_{z0} = 80 \text{ cm}^2/\text{s}$ と試算的に定めた。また、水平方向の渦動粘性係数および渦動拡散係数には、成層の有無にかかわらず $10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ を与えた。

3.3 計算結果と観測値の比較

大川沿いの取水口のうち一番下流に位置するのは、桜宮橋のすぐ下流にある大阪臨海工水取水口である。したがって、ここではこれよりやや下流の天満橋から上流端の毛馬水門までの区間の塩分遡上をみることにする。計算の対象期間内には計3回の観測が行われているが、そのうち10月19日（小潮時）および11月9日～10日（大潮時）について、観測値と計算値を比較する。

Fig. 3(a) および **(b)** は、それぞれの観測日における下流端の潮位および上流端の毛馬水門の放流量を示したものである。図より、10月19日では潮位の変化の幅は小さく、また下げ潮時の21時頃に約 $60 \text{ m}^3/\text{s}$ の流量によるフラッシング操作が行われていることが見られ、一方11月9日～10日では、潮位の変化の幅はかなり大きく、また10日未明に流量を約 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ から約 $80 \text{ m}^3/\text{s}$ に急変させる顕著なフラッシング操作が行われていることなどが見られる。

(1) 濃度の縦断分布と遡上距離

Fig. 4 は、10月19日の17時および19時における塩分遡上を塩素イオン濃度 (Cl^-) の等濃度線によって示し、観測値と計算値を比較したものである。図より観測にみられる濃度分布の値と形状は、全体的にみれば計算によってかなりよく再現されているといえる。しかし、観測値では等濃度線の間隔が密で弱混合型に近い混

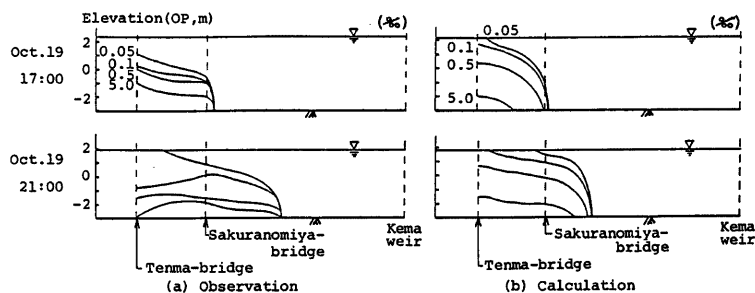


Fig. 4 Comparison of salinity intrusion on Oct. 19, 1984.

合形態を示しており、遡上の先端付近では等濃度線が集中しているのに対し、計算値では等濃度線が縦断方向にも水深方向にも比較的疎であり観測値にみられるより拡散がやや進んでいるようである。Fig. 4 では観測値および計算値のいずれにおいても、17時から21時にかけて塩分はより上流への遡上を止めていないが、これは Fig. 3(a) に示される17時以前の上げ潮の影響が残っていることや、17時以降の下げ潮がきわめてわずかであることによると考えられ、この場合には Fig. 3(a) 程度のフラッシングは塩分の遡上を静止させるほどの効果はもたないといえる。Fig. 5 は塩分遡上の先端として、 Cl^- 濃度が 0.1‰ (100 ppm) である等濃度線の最上流端の位置を探り、その時間的な変化を示したものである。観測値では塩分の浸入する速さが計算値よりも大きく、とくに19時から行われているフラッシングにより計算では22時に塩分遡上が静止しているのに観測ではフラッシングにかかわらず同じ速度で塩分の浸入が続いていることがみられる。つまりこの場合の観測においては、17時までの上げ潮の影響が17時以降のかなり長い時間にわたって持続すると考えられる。計算では先述のように縦断および水深方向の拡散が進み、その分上流へ塩分が浸入する度合いが減少するが、実際には10月19日のような小潮時においては観測にみられるように、水深方向の濃度こう配の大きい弱混合型（塩水楔）に近い形になり、下層における縦断方向の密度こう配の増大により塩分の浸入が継続するのであろう。計算では control volume の厚さを $\Delta z = 1.0 \text{ m}$ としているため観測に現われる急な密度こう配を十分表現できないことや、弱混合型に近い場合に水深方向の混合を Richardson 数の関数で表わされる拡散係数によって評価できるかなどの問題があろう。

Fig. 6 および Fig. 7 は、11月9日～10日の大潮時について、先と同様の結果を示したものである。Fig. 7 の観測値をみると、9日夜に塩分遡上の先端は徐々に後退しており、とくに10日1時の急激なフラッシング時に著しい。これはもちろん下げ潮の効果と放流操作による流量増加の重複作用によるものである。計算においては、塩分の先端の位置は観測値よりつねに 400～600 m ($2 \sim 3 \Delta x$) だけ上流にあるが、計算値と観測値が互いに並行した挙動を示していることが注目される。しかし、Fig. 6 の濃度分布をみると観測値と計算値は相当異った形状となっており、観測では下層にのみ塩分濃度の高い水が存在するが、計算では水深および縦断方向のいずれにも塩分の拡散がやや大きすぎるようである。

Fig. 5 と Fig. 7 より、小潮時においては観測値の方が計算値よりも塩分遡上の速さが大きく、また大潮時には観測値の方が計算値よりも塩分遡上の距離が小さいという差がみられる。これは濃度分布よりみて、

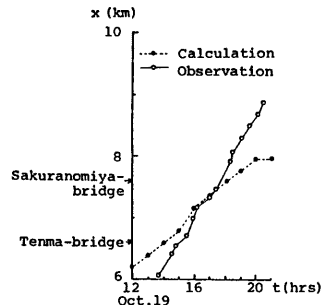


Fig. 5 Front of salinity intrusion on Oct. 19, 1984.

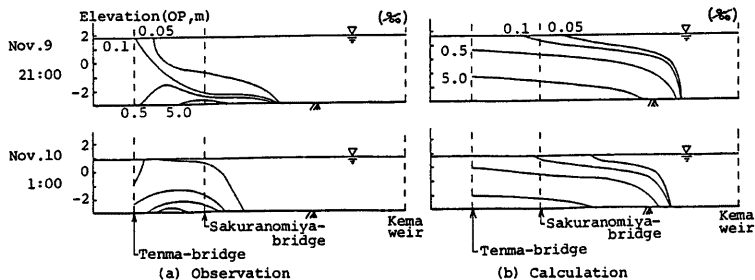


Fig. 6 Comparison of salinity intrusion on Nov. 9-10, 1984.

いずれの場合も計算の方が水深および縦断方向の塩分の拡散が大きく、その結果等濃度線が観測値よりも疎になったことに起因していると考えられる。すなわち、濃度差にもづく密度の水深および縦断方向のこう配が、流れに微妙に反映したことによると思われるが、さらに詳しい検討が必要であろう。しかし、塩分の遡上距離に関しては観測値と計算値の違いは $2 \sim 3 \Delta x$ 以内であり、また濃度分布に関しても5%程度以上の濃度に関しては観測値は計算によってほぼ再現されているとみられるので、ここでの計算法は、塩分の水深および鉛直方向の拡散の表現になお検討を要するが、塩分遡上現象に有効に適用されうものということができよう。

なお、小潮時 (Fig. 4 および 5) と大潮時 (Fig. 6 および 7) を比較すれば、ここに示した観測値では大潮時の方が塩分の侵入が大きいようである。しかし、上記の観測期間中、大阪臨海工水取水口から取水された水の塩分濃度の観測値では、むしろ小潮時の方が塩分侵入が大きいことをうかがわせる結果⁴⁵⁾ も得られているので、いずれの場合に塩分の侵入が大きくなるかについて、一般的な傾向を観測値から知ることができない。上のように固定点から取水される水の濃度が問題とされる場合、下層における塩分の縦断的な侵入だけでなく、取水口の位置での断面内の濃度分布が考えられなければならないが、このような点からみても Fig. 4 および Fig. 6 の観測値からは、小潮時あるいは大潮時のいずれの方が塩分の侵入が大きくなるかについて一般的な傾向を見出すことはできない。塩分の侵入には、河川の流量および河口の潮位とそれらの履歴の効果が重なるので、後にこれらを考慮したシミュレーションによって、小潮時および大潮時の塩分の侵入について検討する。

(2) 断面内の流速分布と濃度分布

Fig. 8(a) および (b) は、それぞれ10月19日19時および11月10日1時における桜宮橋の断面での流速分布および濃度分布の観測値および計算値を比較したものである。Fig. 8(a) では、上層には毛馬水門からの放流による下流向きの流れが現われているが、先に述べたようにこの時間では塩分は上流へ遡上中であり、下層にはそれを表わす上流向きの流速が生じている。観測値にみられる上流向きの流れは、濃度の観測値が急に大きくなる OP-1.5 m 附近より下層で顕著であって、これよりこのときの流れは、Fig. 4 に関して述べたように上下の二層に分れた弱混合型に近い流れであることが知られる。一方、この場合の計算値は、値そのものは観測値とそれほど一致していないが、下層で上流向きの流れが生ずることや OP-1.5 m 以下で濃度が大きくなるという観測値にみられる傾向はよく再現されているといえる。しかし、水深方向の流速お

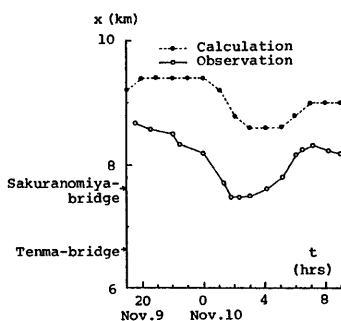


Fig. 7 Front of salinity intrusion on Nov. 9-10, 1984.

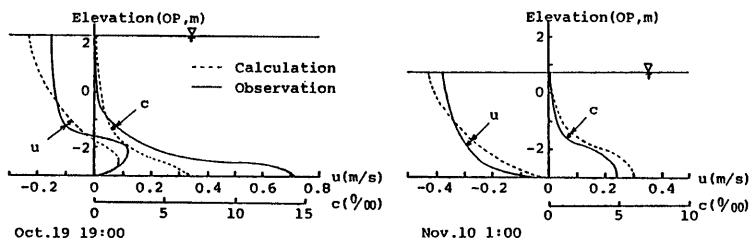


Fig. 8 Velocity and salinity distributions at Sakuranomiya-bridge (u : velocity, c : salinity).

よび濃度のこう配は、観測値より計算値の方がかなり緩やかであり、先に述べたように計算では水深方向の拡散が観測より大きくなっているようである。**Fig. 8(b)** は毛馬水門から大量の放流 ($80 \text{ m}^3/\text{s}$) が行われ、浸入した塩分が下流へ後退しつつあるときの結果であって、計算値は観測値にかなりよく適合している。この場合、大量の放流により、流速は全断面にわたって下流向きとなっており、また濃度も **Fig. 8(a)** より相当低下して、塩分が後退していることがみられる。ただ、この場合も流速分布にみられるように、計算値の方が水深方向の流速のこう配がやや緩やかであり、先に述べた計算上の問題がここでも現われているとみられよう。

3.4 毛馬水門の放流操作のシミュレーション

本節では本研究で構成された塩分遡上の解析法を用いて、境界条件である河口の潮汐や毛馬の放流流量およびその操作が塩分の遡上に及ぼす効果について、数値シミュレーションによって検討する。計算は、まず河口の潮汐に、小潮時として1984年10月18日の潮位、および大潮時として同25日の潮位の2通りを与え、また上流端の毛馬の日平均流量に、水門の放流操作として定められている $62.5 \text{ m}^3/\text{s}$ が確保できた場合と、さらに流量が低下して $34.6 \text{ m}^3/\text{s}$ (1984年10月25日の実績値) となった場合の2通りを与えて計4通りの場合について行った。さらに、それぞれの場合について放流流量の操作に、潮位にかかわらず一定の流量を放流する一定量放流、上げ潮時に集中的に放流する上げ潮放流および通常行われている下げ潮時に集中的に放流する下げ潮放流の3通りを想定した。小潮時および大潮時の河口の潮位は **Fig. 9** に示されるとおりである。図には放流操作が行われたときの毛馬水門からの流量の一例も示されている。シミュレーションはこれらの境界条件を上記のように組み合わせている。

Fig. 10(a) および **(b)** は、それぞれ小潮時および大潮時の結果から **Fig. 5** と同様に塩分遡上の先端の位置の変化を求めたものである。これらの図より、まず河口の潮汐（小潮か大潮か）および日平均流量の大小によって塩分の遡上の状態が全く異なることが分る。すなわち、小潮時で流量が大きい ($62.5 \text{ m}^3/\text{s}$) 場合、

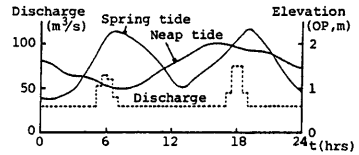


Fig. 9 Boundary conditions used in simulations.

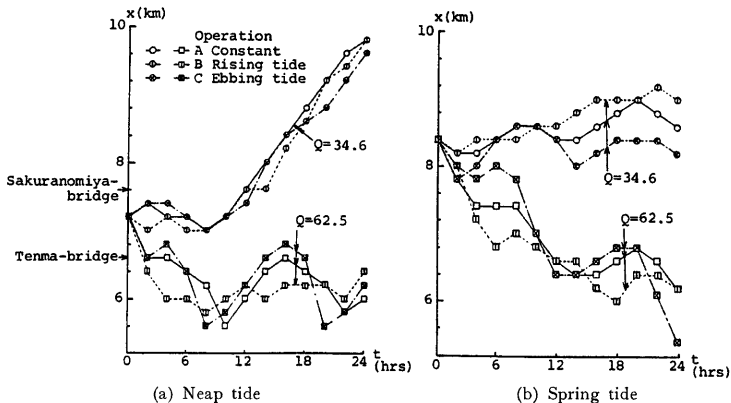


Fig. 10 Front of salinity intrusion in simulation. Operation A: constant release, Operation B: release in rising tide period, Operation C: release in ebbing tide period, Q : mean discharge (m^3/s).

塩分の遡上距離は一日の間で変動はするものの比較的一定の位置にとどまるのに対し、流量が小さい ($34.6 \text{ m}^3/\text{s}$) 場合は放流の操作の如何にかかわらず、塩分は上流へかなり速く浸入している。また一方、大潮時で流量が大きい場合、塩分はかなり下流へ後退するのに対し、流量が小さい場合は比較的一定の位置にとどまっている。これから、塩分の遡上を抑制するのに、大潮時は小潮時よりも小さい流量で効果が現われることが示唆され、また同時に小潮時の方が塩分は浸入しやすいことがうかがわれる。

放流の操作別に塩分の遡上をみると、小潮時の流量が小さいときのように操作法にほとんど無関係とみなされる場合もあるが、一般的には下げ潮放流では一日のうちの遡上距離の変動が一番大きく、逆に上げ潮放流では一番小さくなる傾向が知られ、一定量放流では両者の中間であることが分る。また、小潮時の流量が大きい場合や大潮時の流量が小さい場合の上げ潮放流では、遡上距離は一日の間ほとんど変化せず、ほぼ同じ位置に停止することが注目される。

下げ潮放流では塩分の遡上距離の変動幅が大きい。したがって、この放流方法をとるとき、取水にあたって時間的な制限を設けることが必要になるかも知れない。つまり、放流流量が増加し塩分が相当後退しているときに取水を行い、放流流量が減少し塩分が上流まで遡上したときには一時取水を停止する方法が可能であれば、塩分濃度の低い水の取水が期待できるといえよう。

4. 結 言

本研究は、流量が少ないときの大川（旧淀川）における塩分遡上を解析するための数値モデルを開発し、計算結果と観測値とを比較・検討するとともに、さらに毛馬水門の放流操作について考察しようとしたものである。

まず、塩分遡上の変遷が流れの安定性によって渦動粘性係数および渦動拡散係数が変化することによって生ずると仮定し、この考えを含む数値解析モデルを開発した。現地への適用性を考慮して、横断方向には水量は一様であるとし、この方向に基礎式を積分することにより河川の幅を取り入れ、縦断方向および水深方向の流速および塩分濃度などの変化を求めるモデルとした。つぎに、これを大川に適用し観測値と比較した結果、計算において縦断方向および水深方向の塩分の拡散がやや大き過ぎる問題点が見出されたものの、全体としてみれば観測値と計算値は少なくとも定性的に一致する結果が得られ、本研究のモデルが河口感潮域の塩分遡上に有効に適用されることが分った。さらに、河口の潮汐および毛馬水門の放流流量を適宜想定したシミュレーションを実施し、大潮時より小潮時に塩分が遡上しやすい傾向があることや下げ潮時に集中的に放流する操作では塩分の遡上距離の変動が大きいことなどが知られ、塩分遡上の制御方法についての示唆が得られた。比較的限られた場合についてのシミュレーションであるので、より実際に近い境界条件および取水方式のもとでさらに検討することが必要であろう。

最後に、観測資料の収集などに便宜を図っていただいた建設省近畿地方建設局および水資源開発公団関西支社の各位ならびに計算・作図に御協力いただいた大学院学生溝口宏樹氏に、記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 岩佐義朗・井上和也・田中 靖：河口感潮域の流れと拡散の数値シミュレーション，京都大学防災研究所年報，第25号 B-2，1982，pp. 585-596.
- 2) 吉村義朗：分合流部を有する河口感潮域の流れと塩分遡上の数値解析とその適用に関する基礎的研究，京都大学修士論文，1986.
- 3) Leendertse, J. J. and S. K. Liu: A Three-dimensional Model for Estuaries and Coastal Seas, Vol. II, Aspect of Computation, Dept. of Interior, RAND, Santa Monica, 1975, pp. 1-29.
- 4) 水資源開発公団：昭和59年度正蓮寺関連水域渇水現況調査解析業務報告書（解析編），1985.
- 5) 水資源開発公団：昭和59年度大川渇水現況調査報告書，1984.