

海域の海水交換機構が 河口部塩水侵入に及ぼす影響

EFFECTS OF SEAWATER EXCHANGE ON SALINITY INTRUSION IN A TIDAL ESTUARINE RIVER

安達貴浩¹・小松利光²・田吹泰孝³・橋本彰博⁴

Takahiro ADACHI, Toshimitsu KOMATSU, Yasutaka TABUKI and Akihiro HASHIMOTO

¹ 正会員 博(工) 九州大学大学院 工学研究科 日本学術振興会特別研究員
(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

² フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究科海洋システム工学専攻 (同上)

³ 学生員 九州大学大学院 工学研究科修士課程 (同上)

⁴ 学生員 工修 九州大学大学院 工学研究科博士後期課程 (同上)

In this study, 2-dimensional numerical simulations were carried out in order to make clear the mechanism of salinity intrusion in a well-mixed type estuary. As a result, the following findings were obtained;

- 1) It was made clear that there are twin tide-induced residual circulations in the sea area near the river mouth.
- 2) The substance transport mechanism in a model estuary was clarified by means of the particle tracking simulations.
- 3) The results of numerical simulation, which can correctly reproduce the salinity intrusion in the laboratory experiments, show that the tide-induced residual circulations contribute to not only the salt balance near the river mouth but also salinity intrusion length as a tidal pumping effect.

Key Words : sea-water exchange, salinity intrusion, tide-induced residual current, particle tracking simulation, 2-D plain model, tidal pumping, dispersion flux

1. 緒言

川と海とを結ぶ接点である河川河口域では、海水と河川水の密度差に起因した流れや潮汐によって独特の汽水域が形成されており、その自然形態は貴重種を含む数多くの生物にとってかけがえのない生態環境となっている。しかしながらここ最近、河道浚渫や異常気象による河川水の減少等に起因した塩水侵入の問題が年々深刻化しつつあり、環境保全や水資源確保の観点からそのメカニズムの究明には多くの期待が寄せられている。そのため、従来にも増して理論や現地観測等を駆使した研究が様々な角度から行われている。その結果いくつかの重要な知見も得られているが、未だ塩水侵入のメカニズムを完全に把握するまでには到っていない。

河川上流側への塩水侵入の特性は、基本的には海域の流況の影響を反映した境界条件と、それよりも上流側での質量輸送メカニズムによって決定されているが、既往の研究の大半が後者を取り扱ったものであり¹⁾、海域部の

流況の影響あるいは河口境界条件についての詳細な検討はほとんどなされていない。

ところが、河川感潮域では、潮汐の影響により流体塊が海域と河川域を行き来するため、境界条件だけでなく比較的上流の物質輸送過程も海域の流況の影響を少なからず受けていることが予想される。特にこのような影響は潮汐の大きい強混合型河川において顕著に現れるものと考えられる。更に、海域へ流出した河川淡水の挙動が沿岸海域に生息する海産生物の生息に重要な役割を果たしていること等を考慮すると、河川域のみに着目するのではなく、海域にまで視野を広げて現象を明らかにすることが今後益々重要になってくると思われる。

これらの点を踏まえ、本研究では、モデルエスチャリー域を対象に、海域と河川域との間の物質交換過程に着目した平面2次元数値シミュレーションを行った。なお、今回は特に海域の海水交換過程が強混合型塩水侵入に及ぼす影響について検討を行った。

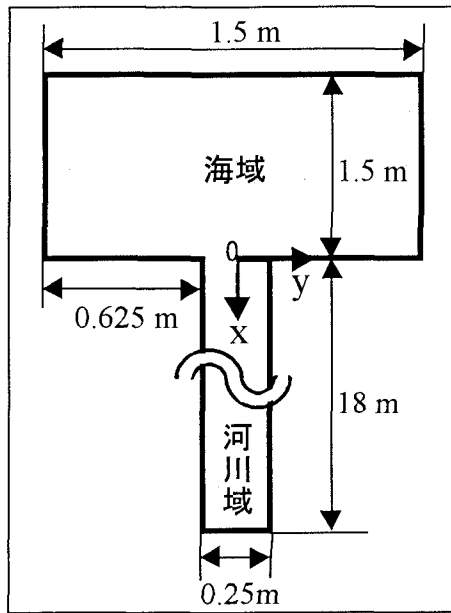


図-1 計算領域と座標系の定義

2. 平面2次元数値シミュレーション

(1) 数値シミュレーションの概要

本研究では、室内感潮河川水路²⁾における緩混合から強混合までの塩水侵入を対象に、流れ・塩分拡散・粒子追跡といった3種類の平面2次元数値シミュレーションを行った。計算領域ならびに座標系の定義を図-1に、基礎式ならびに記号の定義を表-1に示す。数値シミュレーションにおいて、空間格子間隔は $\Delta x=25\text{cm}$ 、 $\Delta y=2.5\text{cm}$ とし、流れの計算にはADI法を、粒子追跡計算にはEuler-Lagrange法³⁾(表-1の式(5)、(6))を適用した。また、残差流の物質輸送能力のみに着目するといった立場から、乱れや分散による移動は考慮せず、初期投入時の水柱体積を保持する粒子の追跡計算を行った。

後述のように河口沖に形成され、物質交換に決定的な役割を果たす残差環流は、 ν_t の値によってそのスケールや強さを変化させるため、 ν_t をできるだけ正確に評価する必要がある。従って、運動方程式中の K ならびに ν_t の評価には、比較的多くの平面2次元場に対してその妥当性が実証されているSDS-2DHモデル⁴⁾を適用した。

各時刻において x 方向の潮流が卓越すること、強混合型の塩水侵入は密度成層の効果をほとんど受けないこと、等を考慮して、拡散方程式(式(4))中の D_L 、 D_t の評価には以下の関係式を用いた⁵⁾。

$$D_L = \alpha HU_*, D_t = 0.23HU_*$$

(ただし、 U_* は摩擦速度の絶対値、 α は無次元分散係数である。本論文では断りがなにかぎり $\alpha=5.93$ としている⁵⁾。)

なお、実験水路の河床には棧粗度が等間隔に設置されているが、その効果は棧粗度の相当砂粒粗度⁶⁾と

表-1 基礎式ならびに各物理量

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q' \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(UM)}{\partial x} + \frac{\partial(VM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[H \left(2\nu_t \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{3} K \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[H \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] - \tau_{bx} / \rho_0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(UN)}{\partial x} + \frac{\partial(VN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[H \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[H \left(2\nu_t \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{2}{3} K \right) \right] - \tau_{by} / \rho_0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial(MC)}{\partial x} + \frac{\partial(NC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_L \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_t \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$X(t+\Delta t) = X(t) + \Delta t \cdot U + \frac{(\Delta t)^2}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (5)$$

$$Y(t+\Delta t) = Y(t) + \Delta t \cdot V + \frac{(\Delta t)^2}{2} \left(\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (6)$$

ただし、 M, N : x, y 方向の線流量、 ζ : 潮位、 H : 水深、 U, V : x, y 方向の水深平均流速、 q' : 単位面積当たりの横流入量、 ρ_0 : 基準密度、 g : 重力加速度、 ν_t : 平面2次元モデルのための渦動粘性係数、 K : 乱れエネルギーの水深平均値、 τ_{bx}, τ_{by} : x, y 方向の底面せん断応力、 C : 塩分濃度、 D_L : 流下方向の見かけの拡散係数、 D_t : 横方向の見かけの拡散係数、 $X(t), Y(t)$: 時刻 t における粒子の位置

表-2 計算ケース

ケース名	潮位振幅 A(cm)	淡水流入流量 $Q_f(\text{cm}^3/\text{s})$	残差環流 の取扱い
Case1	1.5	35	
Case2	1.5	0	
Case3	1.5	0	(*)
Case4-1	0.85	0	(*)
Case4-2	1.2	0	(*)
Case4-3	0.65	0	(*)
Case5	1.5	35	(*)

(*) $Q_f=0$ とした時の残差環流を除去した流速場
潮汐の周期: 240 s, 河床勾配: 1/200, 河口水深
の一潮汐平均値: 13.3 cm

Manning-Stricklerの式から算出されるManningの粗度係数 n として与え、以下の関係より底面せん断応力に組み込んだ。

$$\tau_{bx} / \rho_0 = \frac{gn^2}{H^{1/3}} \sqrt{U^2 + V^2} U$$

$$\tau_{by} / \rho_0 = \frac{gn^2}{H^{1/3}} \sqrt{U^2 + V^2} V$$

一方滑面である側壁にはslip条件を境界条件として与えた。

本研究で行った数値シミュレーションの計算ケースをまとめて表-2に示す。

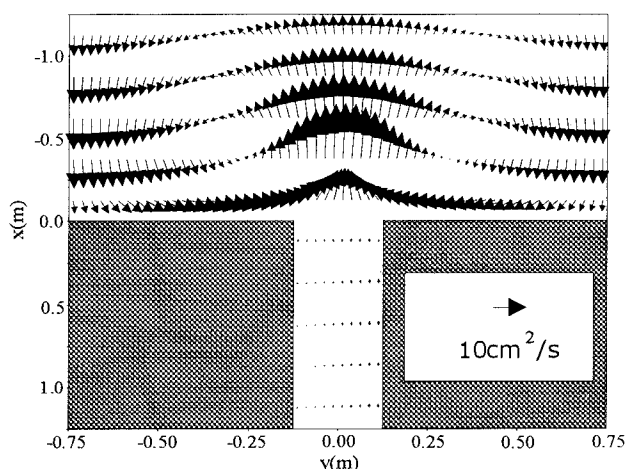


図-2 線流量ベクトルの一潮汐平均値の平面分布

(2) 流況シミュレーションの結果

流れの計算結果として、Case1における一潮汐平均した線流量ベクトルの平面分布を示す(図-2)。下げ潮時において、河川と海域の間の断面変化は流れに対して急拡として作用するため、河口から海域へと流出する流れは噴流状に拡がり、この結果、河口沖において強い渦が形成される。一方、上げ潮時には下げ潮時と反対方向のトルクが作用するが、断面変化が急縮となるために下げ潮時の渦を相殺するほどの強い渦は生成されない。このため一潮汐平均的に見ると、海域部に双子の水平循環流が残存していることが分かる。上述の地形性残差環流は、浮標を用いた室内実験においてもその存在が確認されているが(結果省略)、この流況が海域はもとより河川域での物質交換過程にも何らかの影響を及ぼしていると予想された。そこで次に、粒子追跡計算を行い、海域と河川域での海水交換メカニズムを調べた。

(3) 粒子追跡計算による海水交換メカニズムについての検討

前節で得られた一潮汐平均の線流量は、河川淡水の流入流量 Q_r による成分と地形性の潮汐残差流成分から構成されている。ところが図-2を見ると、河川流量による成分に比べて地形性残差環流が卓越することから、両者の相互作用は比較的小さいものと考えられる。

従って、地形性残差環流の物質輸送能力のみを抽出するために、河川流量を $Q_r=0$ とした場合の流れに対して粒子追跡計算を行った。なお、粒子追跡計算の結果に若干の左右非対称性が見られたため、その影響が問題とされない範囲を考慮して検討を行った。

まず、満潮時において河道内($x>0$)に投入された粒子の挙動を調べた(Case2)。図-3の結果を見ると、下げ潮時に海域部へ流出した粒子は、上述の水平循環流の影響を受けて、中心軸($y=0$)から脇に拡がっていることが分かる。その後、上げ潮から満潮時にかけて、中心軸付近に滞っていた粒子は上げ潮に乗って再び河道内に戻ってくる。一方、海域で脇に拡がった粒子は海域に残留したままで、

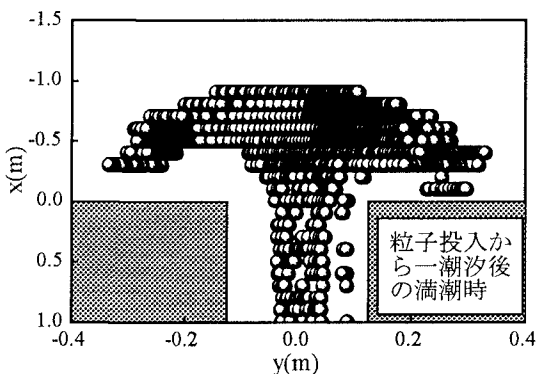
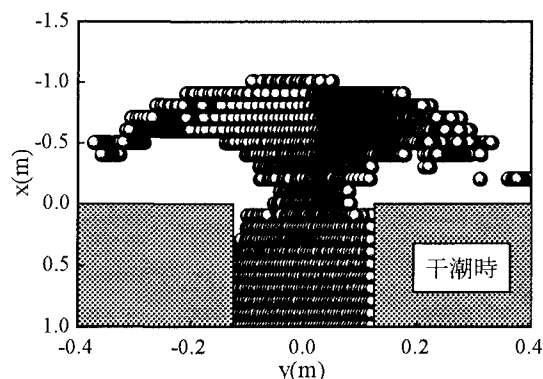


図-3 Case2の流れに対する粒子追跡計算結果(満潮時に河道内($x>0$)に粒子投入：残差流有り)

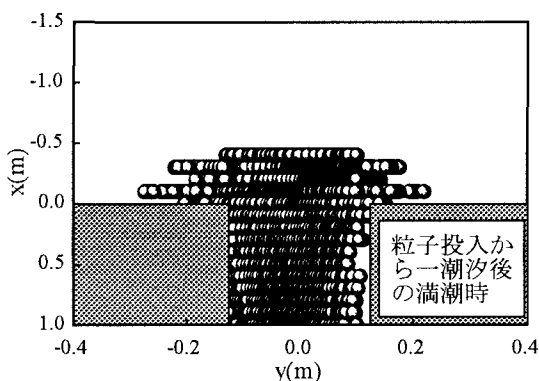


図-4 Case3の流れに対する粒子追跡計算結果(満潮時に河道内($x>0$)に粒子投入：残差流なし)

代わりに新たな流体(河道内の白い部分に相当する)が河道内へ流入している様子が伺える。

次に残差流の影響を除去するために、Case2の残差流成分を各時刻の流速成分から差し引いた流況に対して、粒子の挙動を調べた(Case3)。この結果を見ると、残差流が全く存在しない場合においても一潮汐後に粒子は必ずしも元の場所に戻ってくる訳ではないことが分かる(図-2)。これは、一潮汐平均するとキャンセルされるような、非定常に変動する渦によって生じるdriftを意味すると考えられる。しかしながら残差流の影響がなくなったため、driftの影響があってもCase3の海水交換率 re はCase2と比べ大幅に減少することが確認された(re : 下げ潮による流出量の内、次の上げ潮で河川域に流入せずに海域に残留するものの割合)。

次に、海域に存在する流体の挙動を調べるために、干潮時において粒子を海域に投入し、Case2とは反対の意味

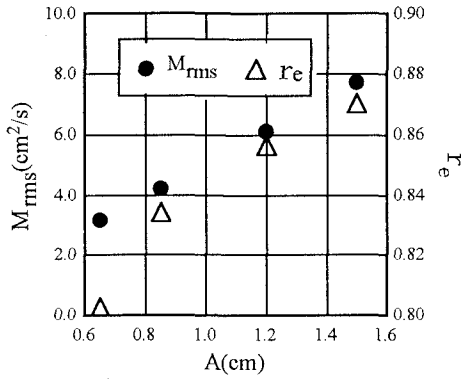


図-5 AとM_{rms}, r_eとの関係

での海水交換を調べた(Case3). この結果, 上げ潮に乗って河道内に侵入した粒子は, そのまま海域部に流出するため, この場合の海水交換率r_eは0となることが確認された(結果省略).

(4) 潮差と海水交換率の関係

前述の地形性残差環流の強さならびに海水交換能力は潮汐の大きさによって変化するものと考えられる. そこで潮位振幅をA = 0.65, 0.85, 1.2cmと変化させ, 残差環流の強さと海水交換率r_eの関係を調べた(Case4-1, 4-2, 4-3). なお, 渦の強さを定量評価するために, 海域における線流量のR. M. S. (=M_{rms})を算出した. 図-5の結果を見ると, Aの増加に伴い海域部の残差流が強化され, この結果, 海水交換能も増大していることが分かる. 潮差の違いのみによって生じる上記のような残差流の海水交換能の変化が河口部の塩水侵入のメカニズム(特に, 潮差のみを変化させた場合の河川上流側への塩水侵入状況の変化)に与える影響を考察するために, 次に塩分拡散の数値シミュレーションを行った.

3. 塩分拡散シミュレーションによる検討

(1) 平面2次元拡散シミュレーションによる数値実験

河口沖に存在する残差環流の海水交換機構が, 一潮汐平均的な塩水侵入状況に与える影響を把握するために, まず平面2次元拡散シミュレーションによる数値実験を行った. 対象領域の海域部最下流端において, 一定の塩分濃度1g/kgを境界条件として与え, 更に河川上流からは淡水を流入させた. このような境界条件の下, Case1(残差流有り)とCase5(残差流なし)の流れに対して準定常状態の濃度場を拡散シミュレーションにより実現した. 更に, 残差環流の影響が塩水侵入の定常的なバランスに対して如何にして反映されているかを調べるために, 一潮汐平均的な意味での移流・分散フラックスFの成分(表-3 参照)を算出した. Case1, 5の流況に対応したフラックス成分の流下方向分布をそれぞれ図-6, 7に示す. この結果を見ると, 残差環流の有無に拘わらず, 河川流量による移流フラックスF₁と分散フラックスF₂₁が他の成分より大きな値を示しており, 両者がほぼ釣り合うこと

表-3 フラックスの各成分

F (一潮汐平均的な移流・分散フラックス)

$$= F_1 + F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{31} + F_{32} + F_{33} + F_{34} + F_4$$

ただし,

$$F_1 = -Q_f \langle \bar{C} \rangle \quad \left. \begin{array}{l} \text{河川流量による下流側への} \\ \text{移流フラックス} \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} F_{21} = B \langle \bar{H} \rangle \langle \bar{U} \rangle \langle \bar{C} \rangle' \\ F_{22} = B \langle \bar{U} \rangle \langle \bar{H} \rangle \langle \bar{C} \rangle' \\ F_{23} = B \langle \bar{H} \rangle \langle \bar{U} \rangle \langle \bar{C} \rangle' \end{array} \right\} \text{Tidal Pumping}^{\text{7)} \text{ 効果による分散フラックス}}$$

$$\left. \begin{array}{l} F_{31} = B \langle \bar{H} \rangle \langle \hat{U} \hat{C} \rangle \\ F_{32} = B \langle \bar{U} \rangle \langle \hat{H} \hat{C} \rangle \\ F_{33} = B \langle \bar{C} \rangle \langle \hat{H} \hat{U} \rangle \\ F_{34} = B \langle \hat{C} \hat{H} \hat{U} \rangle \end{array} \right\} \text{幅方向のシアによる分散フラックス}$$

$$F_4 = -B \langle \bar{H} D_L \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \rangle \quad \left. \begin{array}{l} \text{水深方向のシア} \\ \text{による分散フラックス} \end{array} \right\}$$

ここで, U, C: 流速, 濃度の水深平均値, B: 幅, H: 水深, D_L: 水深方向のシアによる移流分散係数, また, <>は幅平均, ^は幅平均からの偏差であり, -は一潮汐平均, ^は一潮汐平均からの偏差を意味する.

で塩分の平衡状態が実現されていることが分かる. F₁はQ_fと断面平均塩分濃度<C>の積によって表されているが, <C>の分布は分散フラックスの大きさによって変化するため, F₁はF₂₁に対して受動的に決定されていると解釈できる. したがって, 図-7の結果において河口(x = 0)の塩分濃度や河川上流側への塩分侵入量が図-6に比べて飛躍的に増加するのは, 海域の残差環流の存在によってF₂₁が増加したことによるものと考えられる(なお, F₁と<C>は比例関係にあるため, <C>の分布そのものは掲載していない). 次にF₂₁の大きさが決定されるメカニズムを明らかにするために, F₂₁を構成する<C>', <U>'の経時変化を調べた. この結果, 残差環流の存在により上げ潮時と下げ潮時との間で<C>'の時間変動に大きな非対称性が生じていることが分かった(図-8).

ところで, 2章においてQ_f=0の条件下での粒子の挙動が明らかとなっているが, F₂₁を構成する<C>', <U>'には河川流量の影響が含まれていないので, 上述の<C>', <U>'の変化はQ_f=0とした時の粒子の挙動(図-3)を反映したものと解釈することができる. このことを念頭に, 改めて結果の考察を行う. 下げ潮時に河川域から海域に流出した流体塊は海域での海水交換メカニズムの影響によって周囲の高濃度塩水と混合しながら再び河道内に侵入してくる. このため, 上げ潮に河道を通過する流体の平均的な塩分濃度は下げ潮よりも高くなり, この結果, 塩分濃度の経時変化は非対称性を帯びてくる. F₂₁は<C>', <U>'による一潮汐間での正味の輸送を意味することから, このような<C>'の非対称性に起因してtidal pumpingによる上流向きの塩分輸送が生じることになる(tidal pumping⁷⁾と呼ばれるF₂₁~F₂₃の中でF₂₁が卓越することか

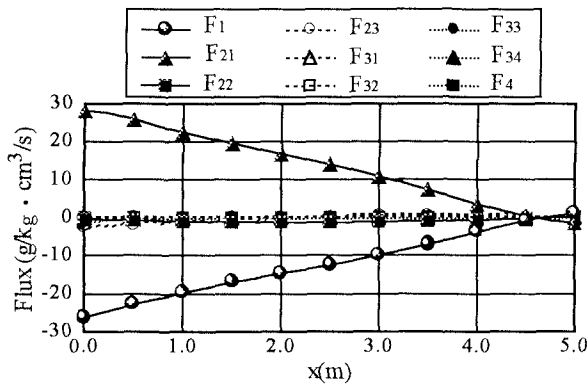


図-6 フラックスの流下方向分布 (Case1: 残差流有り)

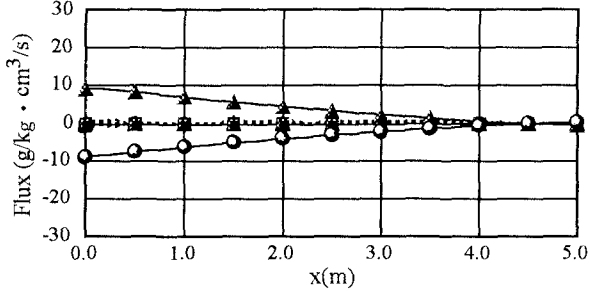


図-7 フラックスの流下方向分布 (Case5: 残差流なし)

ら、これ以降 F_{21} に対してその名称を用いることにする。また河口から上流側へ離れていくにつれ、流体塊が残差流の影響を受ける時間は短くなるため、 F_{21} は河口での tidal excursion に相当する地点で 0 となるように x に対して単調減少な分布となっている。

なお、残差流が存在しない場合においても、若干 $\langle C \rangle'$ に非対称性が見られ、 F_{21} も 0 とはならず値をもっているが、これらは 2 章で述べた粒子の drift に対応した結果と見なすことができる。

(2) 室内実験における強混合型塩水侵入のメカニズム

前節では、塩分濃度の境界条件として下流端で一定の濃度を与えて数値実験を行った。ところが実際の室内実験²⁾では、海域底層からの塩水供給と余水吐からの塩・淡水混合水の排水によって海域の濃度場が決定されているため、数値実験の塩水侵入は実験結果とは異なっている。したがって、実測塩分濃度を境界条件として与え、1次元シミュレーションにより検討を行った。

非定常の 1 次元拡散シミュレーションを行う際には、非定常移流分散係数 D_L を正確に評価する必要があるが、対象とする塩水侵入が強混合型でしかも鉛直 2 次元的事実であることから、無次元分散係数を $\alpha = 5.93$ ⁵⁾ としてもそれなりに妥当な解が得られると考えられる。しかしながら実際は、強混合型の塩水侵入であっても多少なりとも密度成層の影響を受けており、また幅方向のシアの効果もあるため、室内実験の塩水侵入を厳密に説明する無次元分散係数は上記の 5.93 とは若干異なった値を取ることが予想された。

そこで、無次元分散係数の値を適宜変化させて塩水侵入の実測結果と比較を行うと、予想通り 5.93 よりも少し

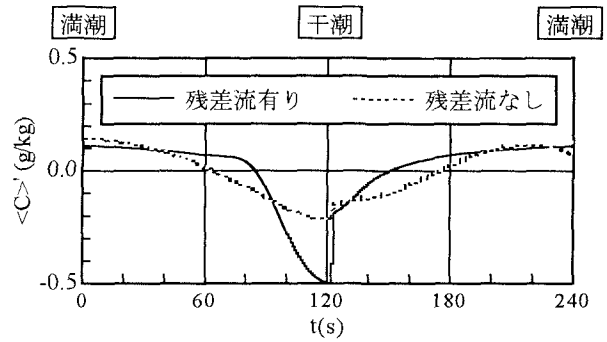


図-8 $\langle C \rangle'$ の経時変化

大きめの 10 を無次元分散係数として与えた場合に、一潮汐平均の塩水侵入を正確に再現できることが確認された (図-9)。そこで、この時の結果から前節と同様にフラックスの各成分を算出した。なお、1次元計算では幅方向と水深方向のシアを区別できないため、ここでは両者をまとめて F_3 と記述した。

図-10 の結果を見ると、 F_{21} は前節の数値実験の結果 (図-6) とほぼ一致した分布を示すことから、室内実験における塩水侵入も前節の結果と同程度に河口沖の残差流の影響を受けていることが分かる。また河口付近において F_{21} が卓越することから、室内実験における塩分分布も河口付近ではシア効果よりもむしろ tidal pumping によって規定されていると言える。その効果は河口での tidal excursion に相当する上流断面 ($x \approx 4\text{m}$) までしか影響力をもたないが、ある程度高濃度が維持されていれば、 $x \approx 4\text{m}$ を超えた地点でも比較的大きなシアが作用し、結果的に塩水は河口よりほぼ 11m 上流の地点まで侵入している。

以上の結果から、海域における海水交換メカニズムは、河口近傍の塩分濃度を高濃度に保つ働きをもち、結果的に河川上流への塩分侵入量や塩水侵入長にも多大な影響を及ぼしていることが分かる。

しかしながら、本研究で得られた結果はあくまでも海域が閉境界という特殊な条件を持つモデルエスチャリーを対象にしたものである。このため、そのメカニズムが実河口域においてどの程度の影響力をもっているかは不明である。そこで、比較的混合の強いエスチャリーでの現地観測結果⁶⁾を調べてみると、tidal pumping の効果は意外と大きいことが確認された。また、塩水侵入のメカニズムを直接指摘した結果ではないが、筑後川の河口付近に存在する干潟と滞筋の水深差によって地形性渦流や水平循環流が形成されており、これらが陸水の分散過程を支配しているという結果が報告されている⁶⁾。この結果は、海域が開境界であったり、あるいは河川域に比べて海域が大きなスケールをもっていたとしても、干潟と滞筋のような地形変化があれば、河口沖に残差流が形成され得るということを示唆している。また、陸水が海域に分散することは塩水が河川域に取り込まれることを意味するため、筑後川河口域においても河口沖の残差流が河川上流側への塩水侵入に多かれ少なかれ影響を与えていることが推測される。

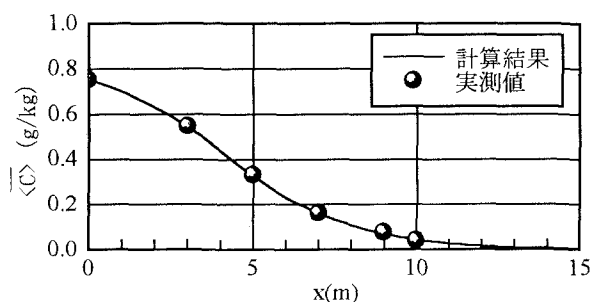


図-9 計算結果と実測値の比較

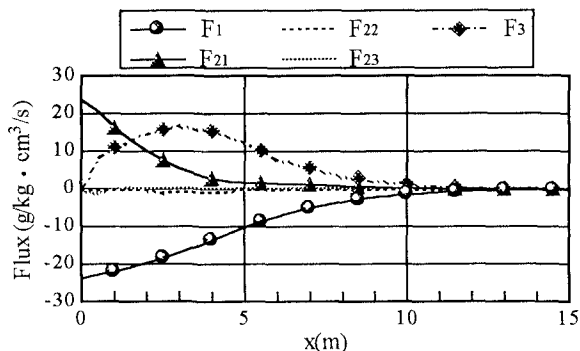


図-10 フラックスの流下方向分布

(3) 緩混合から強混合へかけての塩水侵入のメカニズム

比較的混合の強い河川において満潮時付近に出現する最大の塩水侵入長(河川上流側への塩分の侵入スケール)は入潮量の大きさによって規定されている。そのため、満潮時付近に出現する最大の塩水侵入長は、緩混合よりもむしろ潮汐の大きい強混合型河川において長くなることが知られている。ところが、「最大の塩水侵入長だけでなく一潮汐平均的な塩水侵入長も強混合において長くなる」という結果が室内実験や筑後川における現地観測から共通して得られている。緩混合型の塩水侵入に対して無次元分散係数を一定とすることには無理があるため、今回、強混合型の塩水侵入を支配するメカニズムについてのみ定量的な議論を行なった。しかしながら tidal pumping は河口沖の渦の強さによって決定されているため、その効果は潮差の減少に伴って低減すると考えられる。更に、潮差が減少すると tidal excursion が減少し tidal pumping の作用する領域も狭くなることから、混合形態が強混合から緩混合へと移行するにつれて tidal pumping の寄与は小さくなることが推測できる。このことから判断すると、筑後川や室内実験の緩混合から強混合の塩水侵入の挙動を説明する上で tidal pumping の効果が重要な役割を果たしている可能性は高いと思われる。いずれにせよ、今後現地観測結果に基づいたより詳細な検討ならびに確認が必要と言える。

4. 結語

本研究では、室内感潮河川水路を対象に平面2次元数値シミュレーションを行い、海域における海水交換メカニズムが河口部塩水侵入に及ぼす影響について調べた。

その結果、以下のような知見が得られた。

- 1) まず、流れの数値シミュレーションを行ったところ、河口沖に強い地形性残差環流が生成されていることが明らかとなった。
- 2) 粒子追跡計算を行い、1) に示される地形性残差環流の河口近傍における物質輸送メカニズムを明らかにした。
- 3) 室内実験結果を正確に再現する塩分拡散の数値シミュレーションを行い、河口沖の残差環流が一潮汐平均的な塩水侵入に及ぼすメカニズムを調べた。この結果、何らかの原因で河口沖に残差環流が形成されていると、その流況は tidal pumping として河道内の塩分濃度のバランスに寄与し、塩分侵入量や塩水侵入長にも多大な影響力をもつことが明らかとなった。

参考文献

- 1) 例えば、Fischer, H.B.: Mass Transport Mechanism in Partially Stratified Estuaries, *J. Fluid Mech.*, vol. 53, part 4, pp. 671-687, 1972.
- 2) 小松利光・安達貴浩・孫双科・柴田敏彦: 強混合型感潮河川における見掛けの拡散フラックスの評価, 水工学論文集, 第40巻, pp. 505-510, 1996.
- 3) 今里哲久: 海水交換の概念と交換率, 沿岸海洋研究ノート, 30周年記念特別号, pp. 111-123, 1993.
- 4) 灘岡和夫・八木宏: 浅い海域の乱流場に関する数値計算モデルの開発と沿岸流場への適用, 土木学会論文集, No. 473, pp. 25-34, 1993.
- 5) Elder, J.W.: The Dispersion of Marked Fluid in Turbulent Shear Flow, *J. Fluid Mech.* Vol 5, pp. 544-560, 1959.
- 6) 足立昭平: 人工粗度の実験的研究, 土木学会論文集, 第104号, pp. 33-44, 1964.
- 7) J. R. West, R. S. UNCLES and K. Shiono: Longitudinal Dispersion Processes in the Upper Tamar Estuary, *Estuaries*, vol. 13, No. 2, pp. 118-124, 1990.
- 8) Dyer, K. R.: The Salt Balance in Stratified Estuaries, *Estuarine and Coastal Marine Science*, 2, pp. 161-181, 1974.
- 9) 杉本隆成: 内湾における陸水の分散流出過程, 沿岸海洋研究ノート, 第12巻, 第1号, pp. 47-55, 1974.