

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法

The Method for Evaluation of Apparent Dispersion Flux in a Well-mixed Estuary

小松利光* 安達貴浩** 孫 双科** 柴田敏彦***

By Toshimitsu KOMATSU, Takahiro ADACHI, Shuangke SUN and Toshihiko SHIBATA

In numerical calculations of salinity intrusion in a well-mixed type estuary like the Chikugo river, 1-D numerical diffusion model is in general used. It is quite important to evaluate the local dispersion flux precisely in this model. We tried to make up the evaluation method for this salinity flux by using some experimental data.

As the result of this study, the facts that the local dispersion flux cannot be described by the first derivative of salinity concentration only and that because the maximum density of salinity in the estuary is limited by the boundary condition of that at the sea the additional expression of flux described by the second derivative is necessary are made clear. The use of new expression makes it possible for the 1-D model to perform the simulation well.

KEYWORDS: 1-D dispersion model, well-mixed type estuary, apparent diffusion coefficient, flux described by second derivative

1. はじめに

感潮河川における準定常状態の見掛けの拡散係数は、拡散数値シミュレーションに用いられるだけでなく、各混合形態の塩水侵入特性を比較する上でも重要な特性量となっており、また、非定常状態の見掛けの拡散係数を正確に評価するための手掛かりとしても役立つため、古くから多くの研究者により研究がなされてきた。

Fischer¹⁾はIppen・Harleman²⁾の室内実験より得られたデータを用いて、感潮河川の見掛けの拡散係数の評価法を提案しているが、Ippenらが拡散係数を求める際に用いた仮定は若干非現実的な面があったことから、得られた値は必ずしも正確なものとは言えず、従ってこれをもとに確立された見掛けの拡散係数の評価法で流下方向の全ての断面の拡散係数を正確に評価できるかどうかはいまだ明らかではない。

そこで、本研究では、室内感潮河川実験水路³⁾を用いた実験から得られた強混合型の塩水侵入のデータをもとに、フラックスのつり合い式より直接見掛けの拡散係数を求め、従来より一般的によく用いられている拡散フラックスの評価法について検討を行った。そして更に、強混合型の塩水遡上の拡散シミュレーションを行う際用いる定常1次元拡散方程式の拡散フラックスの項を正確に評価する新しい方法を提案している。

* 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科

(〒812-81 福岡市東区箱崎6-10-1)

** 学生員 工修 九州大学大学院博士課程 工学研究科水工土木学専攻

*** 正会員 九州大学技官 工学部建設都市工学科

2. 感潮河川強混合の実験

2-1. 実験装置

実験装置は、1/200の河床勾配をもつ0.25×0.25×20.0mの河川部と1.5×3.0×0.8mの海域部、ならびに潮汐発生装置より構成される。一般に室内実験水路においてせん断乱流で強混合形態を実現することは難しいとされているが、本実験では河川域を20mと長くし、入退潮量を大きくすることでせん断乱流による強混合形態の実現を可能とした。また、河川上流端より淡水を、そして、海域の底部より塩水を供給し、塩・淡混合水を余水吐から排水した。潮汐発生プログラムに従いフロートと余水吐を連動させて自動制御することにより準定常状態の混合形態を実現した。また、実河川の河床が凹凸の大きな粗面であることを考慮し、水路の河床に1.0×1.0×25.0cmの棧粗度を10cm間隔で配置した。

2-2. 測定方法及びデータ処理

座標系としては、海域と河川域の境界面上の河床中央に原点をとり、河床に沿って上流側へx軸、x軸と垂直上向きにz軸をもつ鉛直二次元座標を用いた(図-1)。

塩分濃度の測定には塩分濃度計を用い、表-1に示す断面において計測を行った。潮汐によって生じる平均的な変動と乱れとの間には明確なタイムスケールの違いがあるため、比較的高い精度で近似的に確率平均値を求めることが可能である。そこで、各点での時系列離散データを20秒間分のデータで重み付き移動平均操作を行って潮汐変動より十分周期の小さい乱れ成分を除去し、アンサンブル平均値を求めた。

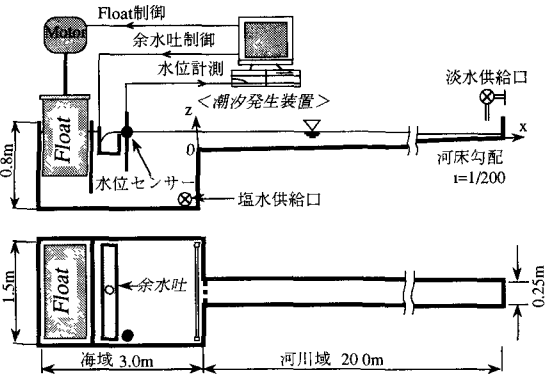


図-1 実験装置模式図

2-3. 測定結果の一例

測定結果の一例を図-2に示す。海域における塩分濃度 C_0 で無次元化して示されており、各断面の塩分濃度 C の鉛直分布である。水深方向に濃度が一様化しており、流下方向にのみ濃度勾配をもつ強混合形態になっていることが分かる。当然のことながら、干潮時に比べて満潮時のほうが塩分濃度は高く塩水侵入は大きい。

表-1 実験条件

海域塩分濃度 C_0	1 g/kg
淡水流入流量 Q_f	35 ml/s
塩水供給流量 Q_s	125 ml/s
河口部平均水深 $H(x=0)$	13.3 cm
潮汐の周期 T	240 sec
潮位振幅 A	1.5 cm
塩分濃度測定点 x	0.15, 3, 5, 7, 9 m

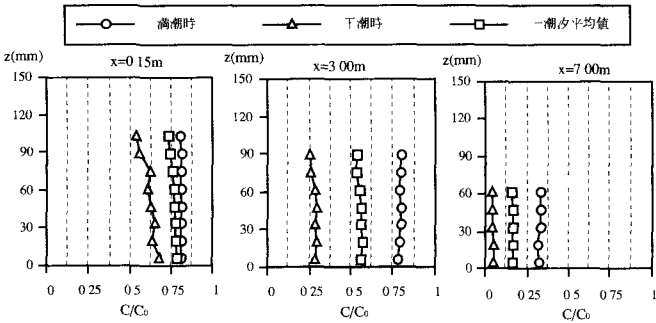


図-2 強混合形態の鉛直塩分濃度分布

3. 見掛けの拡散係数の評価と考察

3-1 強混合の場合の見掛けの拡散係数について

感潮河川河口部において断面内で現象が一様でかつ準定常の場合、下記の1次元分散方程式に用いられる定常見掛けの拡散係数 D は、主として往復流による拡散能(1潮汐をタイムスケールとする拡散能)と流速及び濃度分布の断面平均値からの偏差によって生じる分散能の2つに分離できる。

$$-q_f \overline{<C>} = HD \frac{d \overline{<C>}}{dx} \quad (1)$$

(ただし、 $\langle \bar{C} \rangle$; C_0 で無次元化された断面平均塩分濃度の一潮汐平均値、 H ; 一潮汐平均水深、 q_f ; 単位幅当たりの淡水流量)

室内実験で得られた強混合の断面平均塩分濃度の一潮汐平均値の流下方向分布の一例とそれらの値から(1)式を用いて算出した見掛けの拡散係数 D の流下方向分布を図-3に示す。見掛けの拡散係数は河口($x=0$)で最大値をとり、上流に向かうに従い次第に小さくなっていることが分かる。

鉛直方向にはば濃度が様な強混合の場合は、流速と濃度分布の断面平均値からの偏差の効果はほとんど無視できると思われるため、本研究では、往復流による拡散能の評価法について考察を行う。

一般に、拡散係数は代表長さ α と代表流速 V_M の積に比例するものとして評価される。従ってここでも見掛けの拡散係数を長さスケール L および代表流速 V_M を用いて次式

$$D= \alpha V_M L \tag{2}$$

で表す。ここで α は比例定数である。

代表流速には、潮流流速のR.M.S.を用いるのが妥当であると思われるが、長さスケール L としては、次の3つの量の内の1つを用いるのが一般的である。

- 1) local な一潮汐平均水深 H
- 2) Tidal excursion ($\propto V_M T$)
(ただし、 V_M ; 潮流流速のR.M.S., T ; 潮汐運動の周期)
- 3) 感潮域最上流端からの距離

それぞれの長さスケールについて、その最大値で規格化された無次元長さスケール L^* の流下方向分布を図-4に示す。いずれも上流側に行くに従って減少している。見掛けの拡散係数を(2)式で表したとき、3つの長さスケールの中で比例定数が一定値をとるときの長さスケールが最も妥当な代表長さであると思われる。実験データから(2)式を用いて各長さスケールについて α を逆算し、流下方向分布中の α の最大値で規格化した無次元比例定数 α^* を求めて図-5に示す。全ての長さスケールにおいて、 $x=4\sim7$ m程度の中流域で α^* はほぼ一定値をとる。しかし、それより下流側では α^* は大きくなり、一方上流側では α^* は減少している。ただし、流下方向分布には長さスケールの違いによる差はあまり見られない。従って本研究では、最も物理的意味があると思われるTidal excursionに比例する量 $V_M T$ を代表長さ α とすることにする。

3-2 河口付近の塩分フラックスに対する勾配型表現の限界

3-1節の結果より、1次元定常分散方程式の見掛けの拡散係数の代表長さに対し、一般的に用いられる3つの長さスケ

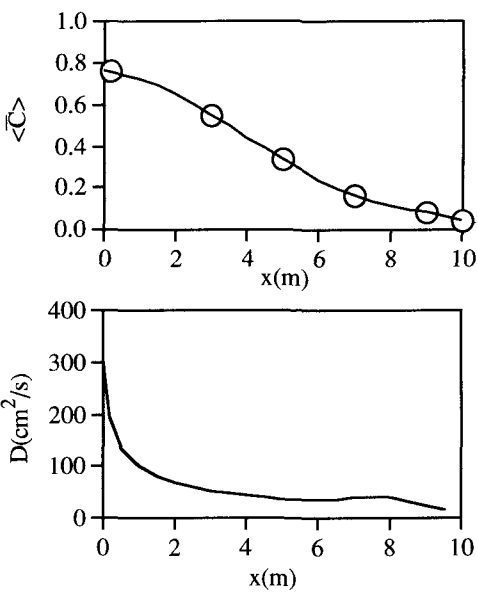


図-3 実験より得られた $\langle \bar{C} \rangle$ と D の流下方向分布

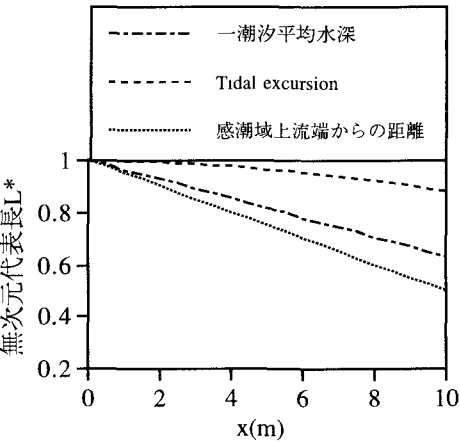


図-4 長さスケールの流下方向分布

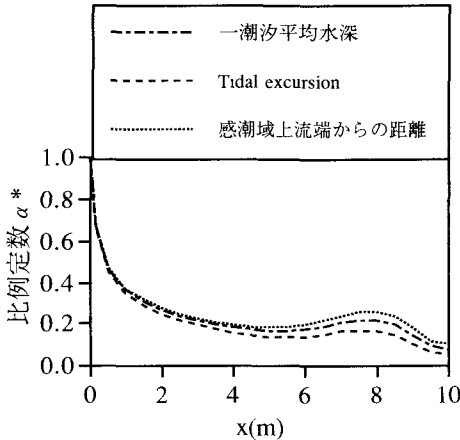


図-5 無次元比例定数 α^* の流下方向分布

ルのいずれを用いても、強混合に対し流下方向の全ての断面で適用できるような定常見掛けの拡散係数は評価できないことが分かった。

河口付近の塩水侵入は河口全域の塩分濃度の挙動に対し支配的であるので、河口付近で α が一定値をとらない理由を明らかにする必要がある。そこで、実験結果 $\langle \bar{C} \rangle$ の x に関する1階微分だけでなく、より高次である2階微分の流下方向の分布を求め図-6に示してみる。図-6と図-5を比較すると、濃度の2階微分が負の値をとる区間と、比例定数 α^* が一定でない区間とがほぼ一致していることが分かる。濃度の2次の導関数（式(1)は定常1次元移流・拡散方程式を一度 x に関して積分しており、元々の拡散方程式では3次の導関数）は濃度分布に非対称な歪みを生じさせる働きがあることや、また、河口付近は塩分濃度が海側で海水の濃度で頭打ちとなるため、非対称な濃度分布とならざるを得ないことなどを考え併せると、上述の結果は拡散フラックスをこの領域での確に表現するためには、高次である2階の濃度微分が必要であることを示唆しているものと思われる。

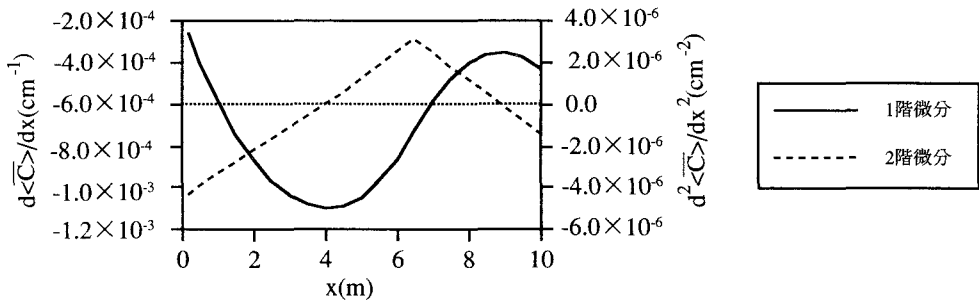


図-6 塩分濃度の1階微分と2階微分の流下方向分布

このことから、拡散フラックスは濃度の1階微分だけでなく、2階微分にも依存するものと考え、フラックスのつり合いを以下のように表す。

$$F_a = F_1 + F_2 \quad (3)$$

ここで、 $F_a = -q_1 \langle \bar{C} \rangle$ 、 $F_1 = HD_1 d\langle \bar{C} \rangle / dx$ 、 $F_2 = HD_2 d^2 \langle \bar{C} \rangle / dx^2$ である。

3-3 濃度の2階微分を用いたフラックスの評価

2階微分が局所的にでも零のときは式(3)において右辺第二項の寄与はないため、式(2)で定義された D_1 の定数 α を容易に計算することができる。そこで、濃度の2階微分が零となる $x \approx 4\text{m}$ 地点における D_1 に対し、同地点の V_M と $V_M T$ を用いて比例定数 α の値を求めた。この結果、 D_1 は次式のように表せることが分かった。

$$D_1 = 0.009 V_M^2 T \quad (4)$$

式(4)の D_1 の評価式ならびに式(3)のフラックスのつり合い式より2階微分で表示されるフラックス F_2 の大きさを求め図-7に示す。中流域では、 F_a と F_1 がほぼバランスしているが、河口付近では F_1 よりも F_2 の方が F_a とつりあっていることが分かる。この F_2 と濃度の2階微分の分布より、 F_2 が重要な意味をもつと思われる $x=0 \sim 3.5\text{m}$ 区間における D_2 を求め図-8に示す。 D_2 も D_1 と同じくlocalな V_M 及び $V_M T$ により構成されたと考え、次元的考察より次式が得られる。

$$D_2 = \beta V_M^3 T^2 \quad (5)$$

(5)式及び D_2 の値から比例定数 β が求められた。その結果、 F_2 が重要と思われる $x=0 \sim 3.5\text{m}$ 区間では、 β はほぼ一定値をとり、 $\beta \approx 0.002$ となる。

3-4 河口部付近の塩水遡上の構造

図-9に示すように強混合型の感潮河川の塩分濃度分布は近似的には干潮時の塩分濃度分布のパターンが潮流流速にのり周期的に移動すると考えられる。このため、各地点での塩分濃度は水面変動と同じく上げ潮時に上昇し、満潮時に最大となる正弦的な変動パターンを示す。しかし、河口付近の塩分濃度は、上げ潮時に

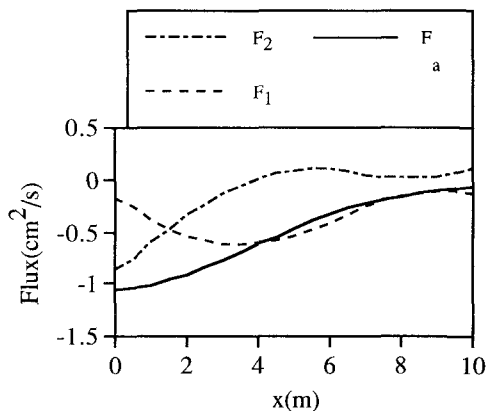


図-7 各フラックスの流下方向分布

海域の塩分濃度に達すると、それより高濃度の塩水は海域からは供給されないため、満潮時をはさんで頭打ちとなる。室内実験より得られた塩分濃度の時間変化(図-10)をみても、中流域では塩分濃度は比較的正弦曲線に近い経時変化を示すが、河口付近では頭打ちが見られ、満潮時付近で塩分濃度は一定値をとることが分かる。このように塩分濃度の時間変化のパターンは海域からの距離によって異なるため、一潮汐平均すると塩分濃度の流れ方向の分布に歪みが生じる。このことから塩分フラックスを勾配型のみで表現することが不可能になるものと思われる。また塩水侵入領域の上流端でも逆に淡水で塩分濃度の最低値が抑えられるため同様の現象が生じている。

強混合型河川河口部においては、塩分濃度の時間変化の歪みの程度は塩水の入退潮の大きさに依存するため、 D_2 は上記のように V_M 及び V_{MT} と比例定数 β を用いて表すことが妥当であると思われる。

例えば筑後川のように内湾（有明海）を挟んで外海と繋がる河川では、海域の塩分濃度が内湾において既にかなり希釈されているため、河口部における塩分濃度の時間変化の頭打ちの効果は外海に直接注ぎ込む河川と比較するとそれほど強くない。このような海域部における塩水希釈の程度の違いは(5)式の比例定数 β に反映されるものと思われる。従って、 β は普遍定数とはならず、海域部の条件によって河川毎に、また水理実験では実験条件毎に異なる定数となるものと思われるが、今のところその詳細は明らかではなく、今後の課題となっている。

3-5 数値シミュレーションによる塩水遡上の再現計算

前節までの考察により拡散フラックスは濃度の1階微分と2階微分の項で表現されることが明らかとなった。そこで、2階微分の項を組み込んだ基礎式を用い、実験水路での塩水遡上を数値計算により再現した。拡散フラックスは、式(4)及び式(5)で $\beta=0.002$ を用いて評価した。基礎式と境界条件を式(6)～(10)に、計算条件を表-2に示す。

$$\langle \text{基礎式} \rangle \quad \frac{\partial H \langle C \rangle}{\partial t} + \frac{\partial q \langle C \rangle}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_1 \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial x} + HD_2 \frac{\partial^2 \langle C \rangle}{\partial x^2} \right) \quad (6)$$

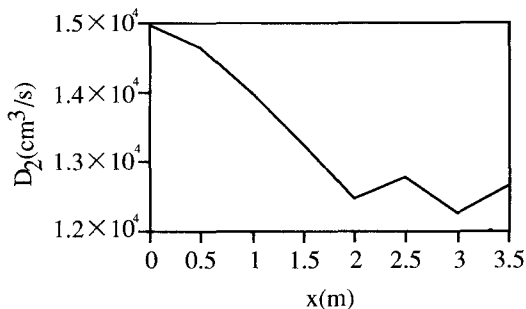


図-8 D_2 の流下方向分布

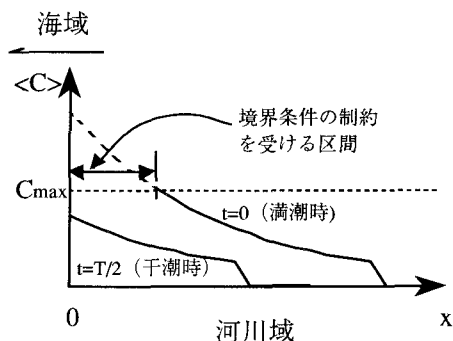


図-9 移流による濃度分布の輸送と海域の塩分濃度の境界条件の影響を表す模式図

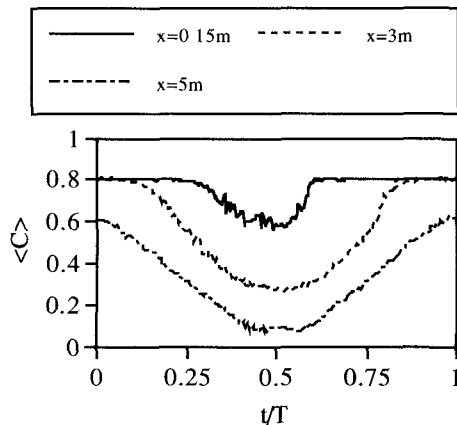


図-10 断面平均塩分濃度の経時変化
(ただし、 $t/T=0,1$ は満潮時、 $t/T=0.5$ は干潮時)

<初期条件> $\bar{C} = 0 \quad (0 \leq x \leq x_0) \quad (7)$

<境界条件> $\frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \bigg|_{x=x_0} = 0 \quad (8)$

$\bar{C}|_{x=0} = 0.754 \quad (9)$

$\bar{C}|_{x=x_0} = 0 \quad (10)$

ここで x_0 は感潮域最上流端の x 座標である。数値計算に際しては、非定常項にはオイラー前進差分法を、移流項には2次精度風上差分法を、拡散項には中心差分法を適用した。また、格子系にはスタッガード格子を用い、定常状態になるまで計算を行った。計算結果と実験結果の比較を図-11に示す。勾配型でのみ表現した場合の計算結果と比較して2階微分によるフラックスを組み込むことにより、河口付近の塩分濃度分布だけでなく、上流側の塩分濃度分布も精度良く再現されていることが分かる。特に、実際の塩水は電信方程式的な挙動により、上流側には有限領域しか遡上しないが、2階微分のフラックスを導入することにより、この挙動も精度良く再現することができた。また、 x 方向の微分の階数が増えたことに伴い、上流側の境界条件(8)式を新たに付加したが、これも境界条件として妥当であったことが確認できた。

次に、実河川の筑後川におけるS41.8.18の強混合塩水遡上の数値シミュレーションを行った。筑後川は、直接外海に面しておらず、河口部沖合の有明海の塩水はかなり希釈されているため、河口部の塩分濃度の変動は海域の塩分濃度からは直接的な制約を受けない。従って、 β の値は小さくなる。筑後川に関しては式(4)及び $\beta \approx 0$ の値を用いて計算を行った。得られた計算結果を図-12に示す。実験結果を良く再現するシミュレーション結果が得られているといえよう。

4. 結論

本研究により、以下のような知見が得られた。

1) 強混合型感潮河川においては上げ潮時の水位の上昇に伴い塩分濃度は増加するが、塩分濃度が海域の塩分濃度に達すると頭打ちとなる。したがって、河口付近の塩分濃度の時間変化は満潮時付近で緩やかな変化になる。この時間変化の歪みの程度は河口からの距離に依存するため、拡散フラックスは濃度の勾配型のフラックスだけでなく、2階微分で表示されるフラックスも含むことになる。

2) 2階微分のフラックスを組み込むことにより、感潮河川の強混合現象をシミュレーションにより良く再現できることが分かった。なお、新たにこの項を基礎式に組み込むことによる数値解析上の問題はない。

参考文献

- 1) Fischer, H.B. : J.Fluid Mech.4,671-687. 1972
- 2) Ippen, A.T. & Harleman, D.R.F. : One-dimensional analysis of salinity intrusion in estuaries. Corpsengrs., U.S.Army Waterways Experiment Station Vicksburg, Miss. Tech. Bull. no.5, 1961.
- 3) 安達貴浩・柴田敏彦・藤田和夫・孫双科・小松利光：感潮河川河口部の塩水侵入に関する実験的研究、土木学会第50回年次学術講演会第2部, pp512～513, 1995.

表-2 計算条件

計算格子間隔	$\Delta x = 50\text{cm}$
時間格子間隔	$\Delta t = 1\text{sec}$
河川域長さ	$x_0 = 2000\text{cm}$
単位幅当たりの流量	$q - q_f = -1.4\text{cm}^3/\text{s}$
V_M, H	実測データを与える
海域の塩分濃度	$C_0 = 1\text{g/kg}$

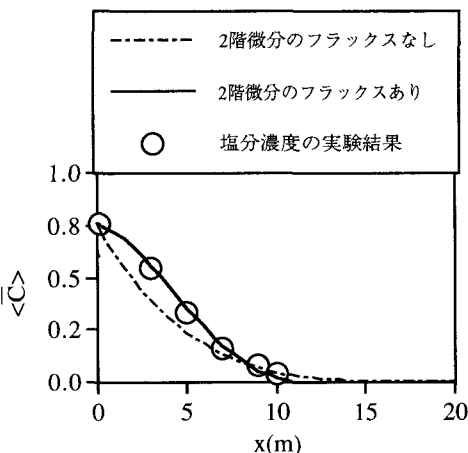


図-11 実験水路塩水遡上数値シミュレーション結果

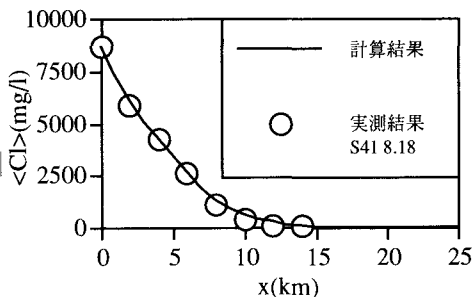


図-12 筑後川塩水遡上数値シミュレーション結果
(ただし、 $\langle C \rangle$ は断面平均塩素濃度の一潮汐平均値)