

潮差の非定常変化が河口部塩水侵入に 及ぼす影響について

INFLUENCE OF THE UNSTEADY CHANGE OF TIDAL RANGE UPON THE SALINITY INTRUSION IN TIDAL ESTUARINE RIVERS

安達貴浩¹・小松利光²・橋本彰博³・久保幸範⁴・田吹泰孝⁵

Takahiro ADACHI, Toshimitsu KOMATSU, Akihiro Hashimoto, Yukinori Kubo and Yasutaka Tabuki

¹ 正会員 工博 九州大学工学研究院助教授 環境都市部門沿岸域環境学講座
(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

² フェロー 工博 九州大学工学研究院教授 同上(同上)

³ 学生員 工修 九州大学大学院 工学研究科海洋システム工学専攻(同上)

⁴ 学生員 九州大学大学院 工学研究科海洋システム工学専攻(同上)

⁵ 福岡県直方土木事務所 (〒822-0025 福岡県直方市日吉町9-10)

In this paper, the effects of the change in a tidal range on salinity intrusion in a tidal estuary were investigated with an experimental set-up which can realize an arbitrary change of tide and the transition of the mixing type. Then a vertically 2-dimensional numerical simulation of the above experimental results was carried out in order to verify its predictive ability. As a result, the following findings were obtained;

- 1) When the change in the salinity intrusion length due to the change in the tidal range spends a relatively long time for exchanging the fluid, salinity intrusion does not actually correspond to that of quasi-steady state and the change in salinity intrusion length has the phase shift compared with the tidal change.
- 2) It is confirmed that the vertically 2-dimensional numerical model developed can reproduce the experimental results of the unsteady change in the salinity intrusion with a good accuracy.

Key Words : *unsteady change of tidal range, salinity intrusion length, transition of estuarine systems, mixing type*

1. 本研究の目的

川内川河口域では、緩(もしくは強)混合形態が実現される大潮時から弱混合形態の実現される小潮時にかけて、河川上流側への塩水遡上は著しく増大し、潮差の変化に伴って塩水侵入状況はその様相を時々刻々と変化させている¹⁾。

このような塩分の挙動は、「他の条件は固定し、潮差のみを変化させた場合、緩混合から弱混合の範囲において、塩水侵入長は潮差が小さいほど長くなる」という規則的な潮汐を与えた場合の室内実験結果²⁾とほぼ一致したものと見なすことができる。しかしながら、川内川河口域において塩水侵入が最大となるのは、潮差が最小となる小潮時ではなく、それよりも更に1～2日後の長潮時や若潮時であることを踏まえると、塩水侵入状況は厳密にはその時の潮差と完全に対応し変化しているわけではないと言える。従って、このような塩水遡上のメカニズム

には潮差が非定常に変化する場特有の現象が含まれていると考えることができる。

川内川河口域と類似した塩分変動は長良川河口域や他の河川感潮域においても確認されているが³⁾、このような非定常現象は、河口部における塩水遡上の程度や物質輸送のメカニズムに少なからず影響を及ぼしているものと予想される。このため、従来のように潮差が一定の規則的な潮汐条件下で得られる準定常状態の塩水遡上を対象に検討を行うだけでなく、潮差が非定常に変化する場での独特な塩水遡上のメカニズムを詳細に議論することが必要と考えられる。

以上のような点を考慮して、著者らは潮差の時間的な変化に対する塩水遡上の応答特性に着目して研究を行った。特にこの種の研究を遂行する上で、室内実験は有効な手段と考えられたため、今回潮汐発生装置の制御プログラムの改良を行い、任意の波形の潮汐変動パターンを実現可能とした。そして室内実験において混合形態の遷

表-1 実験条件

実験名	実験 タイプ	海域の塩 分濃度 C_0 (g/kg)	潮差(mm)			潮差が一定の期間(周期)		
			A_1	A_2	A_3	T_1	T_2	T_3
Run1-1	Type1	3.00	15	5	-	-	-	-
Run1-2		4.00	15	5	-	-	-	-
Run2-1	Type2	3.00	5	8	15	15	15	20
Run2-2			5	10	15	15	15	20
Run2-3			5	12	15	15	15	20
Run3-1	Type3	4.00	式(1)参照		潮差の変動周期は50周期			
Run3-2			Run3-1の実験で $A=5\text{mm}$ になった後、潮位振幅を $A=5\text{mm}$ に固定する					

塩水供給流量 $Q_s=80\text{cm}^3/\text{s}$, 淡水供給流量 $Q_f=180\text{cm}^3/\text{s}$,
1潮汐周期 $T=240\text{s}$, 河口における平均水深 $h=140\text{mm}$

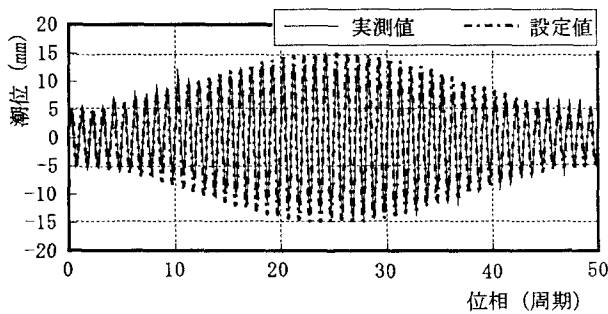


図-1 室内実験の潮位変動の一例

移を実現して,得られた結果について考察を行った.次に,鉛直2次元数値シミュレーションを行い,室内実験結果との比較から潮差が非定常に変化する場における数値シミュレーションの精度について検討を行った.

2. 室内実験の内容およびその結果

以下に本研究で行った室内実験について紹介する.室内実験には,小松ら⁴⁾によって開発された室内感潮河川水路を用いた.今回,潮汐発生装置の制御プログラムの改良を行い,上記の水路において任意の波形の潮汐変動パターンを実現可能とした.後述のType3の実験における潮位変動の実測値と設定潮位を図-1に示す.この結果を見ると,室内実験水路において設定通りの河口潮位変動が滑らかに実現されていることが確認できる.

ところで,川内川河口部では,大潮時に緩混合,小潮時に弱混合型の塩水侵入が実現されていることから,今回はこのような混合形態の遷移にターゲットを絞り,3つのタイプの潮差の変化を与えて室内実験を行った(表-1).なお,実験結果の整理に際して,海域と河川域の境界断面に原点をもち,水平上流側を正とする x 軸を用いた.また,河床から鉛直上方の高さを z と定義した.

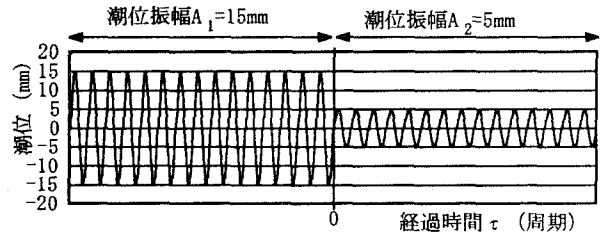


図-2 Type1の潮位変動

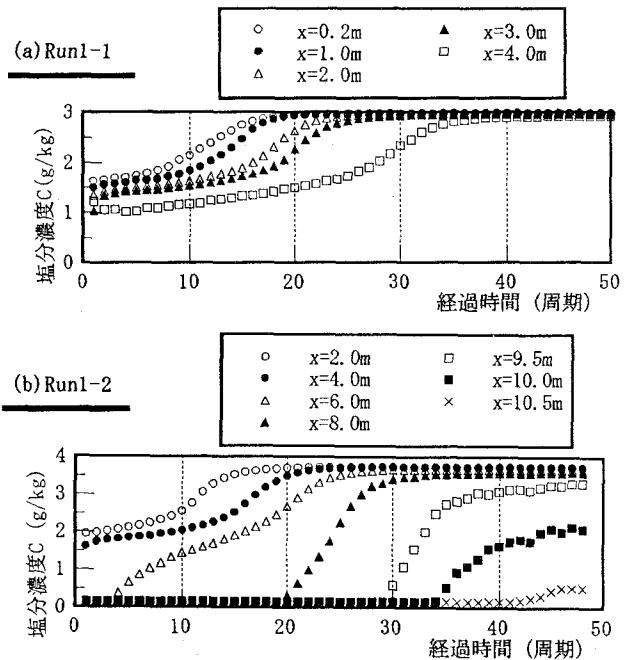


図-3 底層塩分濃度の経時変化

2-1. 潮差一定の条件下における塩水侵入の特性

まず,海域の塩分濃度が $C_0=3, 4\text{g/kg}$ と異なる場合それぞれについて,正弦的な潮汐の潮差を種々変化させて得られる準定常状態の塩水侵入状況を調べた.この結果,潮位振幅 $A=15\text{mm}$ の時には緩混合型, $A=5\text{mm}$ の時には弱混合型の準定常状態の塩水侵入が実現されること,今回行った実験の範囲内では,同一の海域の塩分濃度に対して潮差が小さい程,塩水侵入が長くなることが確認された.

2-2. 緩混合型から弱混合型への遷移過程

次に,潮位振幅 $A_1=15\text{mm}$ に対する準定常状態の塩水侵入(緩混合)を初期条件として, $A_2=5\text{mm}$ と変化させた後,その条件に対する弱混合型の新たな準定常状態が形成されるまでの塩水侵入状況の時間変化を調べた(Type1).なお,Type1ならびに後述のType2の実験では,各周期の潮位変動を規則的な正弦波によって与え,潮位の時間変化が連続となるように潮差を変化させる時刻を最大上げ潮時に固定した(図-2).図-3は $A_2=5\text{mm}$ となった時を初期時刻 $\tau=0$ とした場合の,経過時間 τ に対する底層塩分濃度の変化を示したものである.潮差の変化に対して塩・淡水の正味の交換が完了し,底層の塩分濃度が新

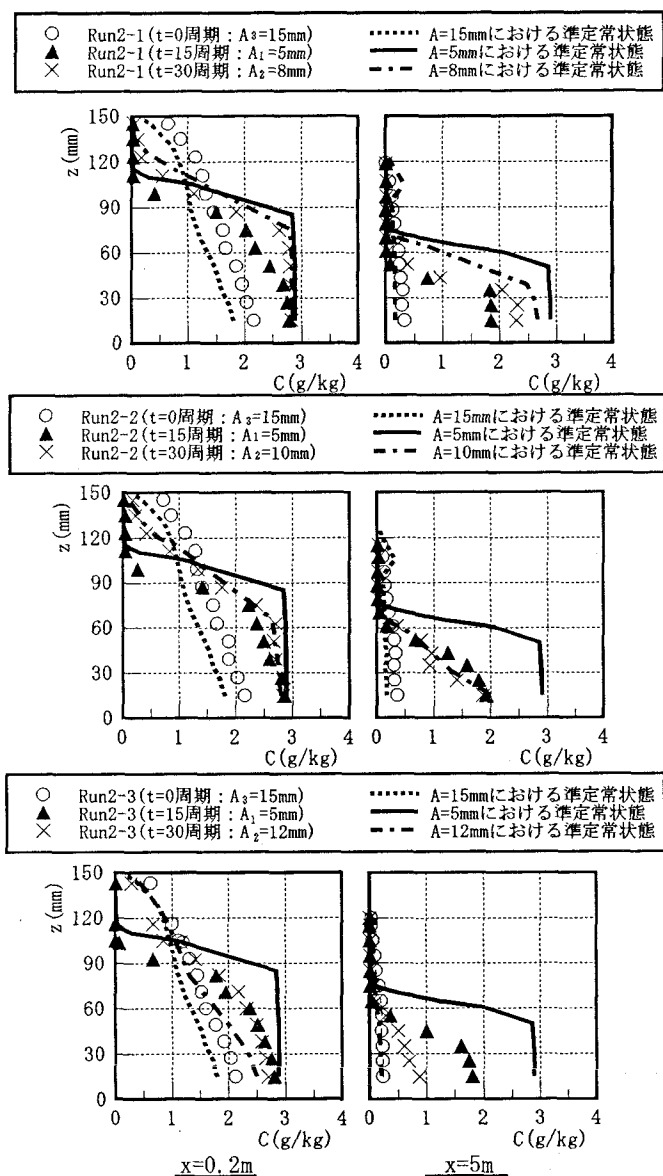


図-4 塩分濃度の鉛直分布 (Run2-1 ~ 2-3)

たな準定常状態に落ち着くまでの時間はRun1-1とRun1-2いずれについても潮汐周期(1周期=240s.)で約30~40周期である。上記のタイムスケールを、以後「遷移のタイムスケール」と呼ぶことにする。

2-3. 潮差の断続的な変化に対する塩水侵入の応答特性

次に、潮差の時間的変化のパターンが繰り返し与えられた時の塩水侵入の挙動について調べた。実河口域と同様の不規則な潮差の変動を与えても、現象の解釈が容易でないことが予想されたため、まず潮差が3段階に断続変化する比較的シンプルな条件下で室内実験を行った(Type2)。今回は最大、最小の潮位振幅をそれぞれ $A_3=15\text{mm}$, $A_1=5\text{mm}$ に固定し、中間の潮差を $A_2=8, 10, 12\text{mm}$ と3通り変化させた。

潮差の変動周期(50潮汐周期)について塩水侵入が周期的な変化を示すようになった時の、各実験ケースにおける一潮汐平均塩分濃度 C の鉛直分布を図-4に、河口よ

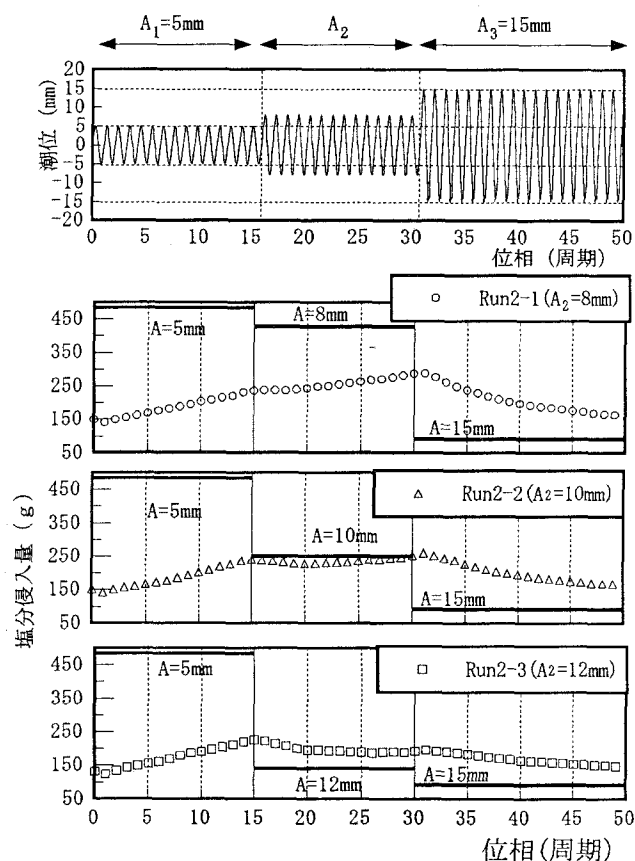


図-5 潮差および塩分侵入量の時間変化

り上流側への塩分侵入量 M の一潮汐平均値の経時変化を図-5に示す。なお、各物理量の一潮汐平均値は、最大上げ潮時において定義し、その時刻の直前1周期の平均値を図中にプロットした。更に比較のため、図-4には A_1, A_2, A_3 に対する準定常状態における塩分濃度の鉛直分布を、図-5には各周期の潮差に対する準定常状態での塩分侵入量を揭示している。

これらの結果を見ると、いずれのケースについても、最大の潮差 A_3 の混合効果の影響を最も長く受けた位相 $t=0$ において、塩・淡水は鉛直方向に最も混合しており、このため塩水侵入も最小となっていることが分かる。その後 $t=0 \sim 15$ 周期にかけて、潮差は最小 ($A=5\text{mm}$) となるため、混合形態は次第に弱混合型へと遷移し、 $A=5\text{mm}$ の準定常状態を指向して、塩分侵入量も時間とともに増加している。しかしながら、2-2節で示した「遷移のタイムスケール」が潮差の変動周期よりも長いことから、最も潮位振幅の小さい $t=0 \sim 15$ (周期) の間にはいずれのケースも $A=5\text{mm}$ に対する準定常状態には到達していない。

次に、 $t=15 \sim 30$ (周期) の期間に着目すると、潮差の違いに応じて、各ケースの塩分侵入量は異なった経時変化を示していることが見て取れる。このような挙動は以下のように説明できる。まず、Run2-1の結果では、潮位振幅が $A_1=5\text{mm}$ から $A_2=8\text{mm}$ に変化する直前において、塩分侵入量が $A_2=8\text{mm}$ の準定常状態での塩分侵入量 M_{A_2} より

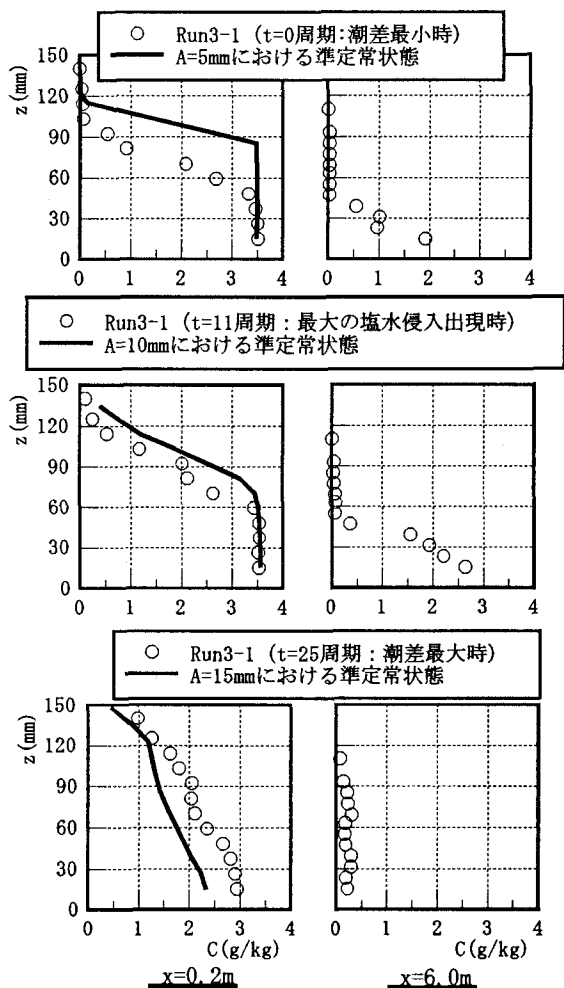


図-6 Run3-1の塩分濃度の鉛直分布の準定常状態と
の比較

も小さな値を示している。このため、 $t=15$ 周期を境に潮位振幅が $A_1=5\text{mm}$ から $A_2=8\text{mm}$ と大きくなるにもかかわらず、成層は安定したままで塩分侵入量は依然増加し続けている。反対にRun2-3では、 $A_2=12\text{mm}$ となった時に、 $A=12\text{mm}$ に対する準定常状態よりも塩分が過剰に侵入しているので、塩分侵入量は時間とともに減少している。一方、Run2-2では潮位振幅が $A_2=12\text{mm}$ に変化する直前の塩分侵入量が M_{A_2} とほぼ一致しているため、塩分侵入量はほぼ横這い状態で、図-4に示されるように混合形態のみが弱混合型から緩混合型へと遷移している。

更に $t=30\sim 50$ (周期) の期間では、全ケースとも共通して $A_3=15\text{mm}$ に対する準定常状態の塩分侵入量よりも過剰に塩分が侵入しており、いずれのケースについても塩分侵入量は減少している。

以上の結果より、「遷移のタイムスケール」が潮差変動のタイムスケール(ここでは15周期)よりも長い場合、塩水侵入は潮差の変動に追従できず、塩水侵入の時間的な増減は、その時の潮差に対応する準定常状態の塩水侵入の程度と実際に実現されている塩水侵入との相対的な関係によって規定されることが理解できる。このため

Run2-1の結果のように最大の塩水侵入は必ずしも潮差最小時に実現される訳ではないと言える。なお、潮差が A_3 に変化した直後にいずれのケースにおいても塩分侵入量の増加が見られたため、後述の鉛直2次元数値シミュレーションを用いてその原因を調べた。その結果、本実験の設定では $t=30$ (周期)における潮位の変化速度は不連続となるため、この時刻に大きな上げ潮流速が生じ、結果としてピークのずれが生じていることが確認された。

2-4 潮差が正弦的に変化する場合の塩水侵入の応答特性

上記の結果を踏まえて、実河口域と同じように、以下の式(1)によって記述される潮位変化を与えて室内実験を行った。

$$h(t) = h_0 + \left(\frac{A_{\max} + A_{\min}}{2} \cos \frac{2\pi t}{T'} + \frac{A_{\max} - A_{\min}}{2} \sin \frac{2\pi t}{T} \right) \quad (1)$$

ここで、 h_0 : 河口での一潮汐平均水深、 $h(t)$: 河口潮位、 T : 潮汐周期、 T' : 潮差の変動周期、 $A_{\max}$: 最大の潮位振幅、 $A_{\min}$: 最小の潮位振幅である。今回は $h_0=140\text{mm}$ 、 $A_{\max}=15\text{mm}$ 、 $A_{\min}=5\text{mm}$ 、 $T=240\text{s}$ 、 $T'=12000\text{s}$ (50潮汐周期に相当)とした(図-1)。

図-6に、潮差の変動周期 T' に対して塩水侵入が周期的な変化を示すようになった後の一潮汐平均塩分濃度 C の鉛直分布を、図-7に塩分侵入量の経時変化を示す。これらの結果を見ると、潮差の最大時(以下、大潮時)付近では緩混合型、潮差の最小時(以下、小潮時)に弱混合型の塩水侵入が形成されており、塩分侵入量は大潮時($A=15\text{mm}$)と小潮時($A=5\text{mm}$)の潮差に対応する準定常状態の塩分侵入量の間でその値を変化させていることが分かる。また、大潮時から小潮時までの期間は25周期であり、2-2節で示された遷移のタイム・スケール(30~40周期)よりも短いことから、小潮時になっても塩水侵入は準定常状態には達していない。実際、小潮時($A=5\text{mm}$)になった後、潮位振幅を $A=5\text{mm}$ に固定すると、塩水侵入は更に増大し、約40周期かけてようやく $A=5\text{mm}$ に対する準定常状態が実現されることが確認されている。大潮時から小潮までの期間(25周期)を考慮すると、大潮時の塩水侵入から $A=5\text{mm}$ に対する準定常状態の塩水侵入に到達するまでに計65周期程度の時間を要したことになるが、これは2-2節(図3-(b))での遷移のタイム・スケール(50周期)よりも15周期ほど長い。2-2節の実験では初期時刻から直ちに潮位振幅が $A=5\text{mm}$ となるのに対して(図-2)、Run3-1の大潮時から小潮時にかけては $A=5\text{mm}$ よりも潮位振幅の大きい潮汐の混合効果を受けて、塩水の侵入力が抑制されていたことが原因となって、このような結果が得られたものと考えられる。

いずれにせよ、Run3-1(図-7)の塩水侵入は潮差の変動に追従することができず、潮位振幅が最小となる $t=0$ 周期において準定常状態よりもかなり短い塩水侵入が実

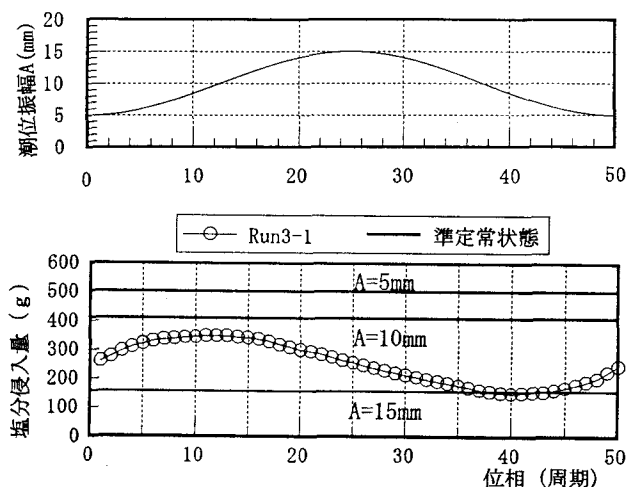


図-7 潮位振幅(上)及び塩分侵入量(下)の経時変化 (Run3-1)

現されていることが分かる。このため $t=0$ 以降は、潮位振幅が増加するにもかかわらず、塩分侵入量は増大し、塩水侵入がその時の潮差に対する準定常状態とほぼ一致 $t=10$ 周期になって塩水侵入は最大となっている。塩水侵入が最大となる時刻($t=10$ 周期)の潮位振幅にほぼ等しい $A=10\text{mm}$ に対する準定常状態の塩分濃度も図-6に示しているが、この結果から、最大の塩水侵入が $A=10\text{mm}$ に対する準定常状態とほぼ一致していることが確認できる。このように、Run3-1の塩水の挙動も、前節の結果と同様、その時の潮差に対する準定常状態の塩水侵入との兼ね合いによって規定されているため、最大の塩水侵入は潮差最小時には出現せず、塩水侵入長の変化は結果的に潮差の挙動に対して位相の遅れをもつことが分かる。なお、最大ならびに最小の塩水侵入が実現される時刻の潮差がほぼ同程度になるのは、準定常状態の塩水侵入が $A=10\text{mm}$ に境に急激に変化することによるものと推察される。

3. 潮差が非定常に変化する場合の塩水侵入の鉛直2次元数値シミュレーション

3-1 数値シミュレーションの概要

次に、鉛直2次元数値シミュレーションを行い、室内実験との比較により潮差が非定常に変化する場における数値シミュレーションの精度について検討を行った。数値シミュレーションにおいては水位変動や河床変化の数値的取り扱いを容易にするため、 σ 座標系により記述された鉛直2次元数値モデルを用いた。基礎方程式は幅方向に平均された運動方程式、連続の式、塩分の質量保存式、状態方程式の4つであり、 $z(\sigma)$ 方向の運動方程式には静水圧近似が適用されている。また、乱流モデルとして $k-\varepsilon$ 乱流モデルを、乱流シュミット数の評価式としてUedaら⁹⁾のモデルを採用した。

ところで、乱流シュミット数 σ_t にUedaらの評価式を

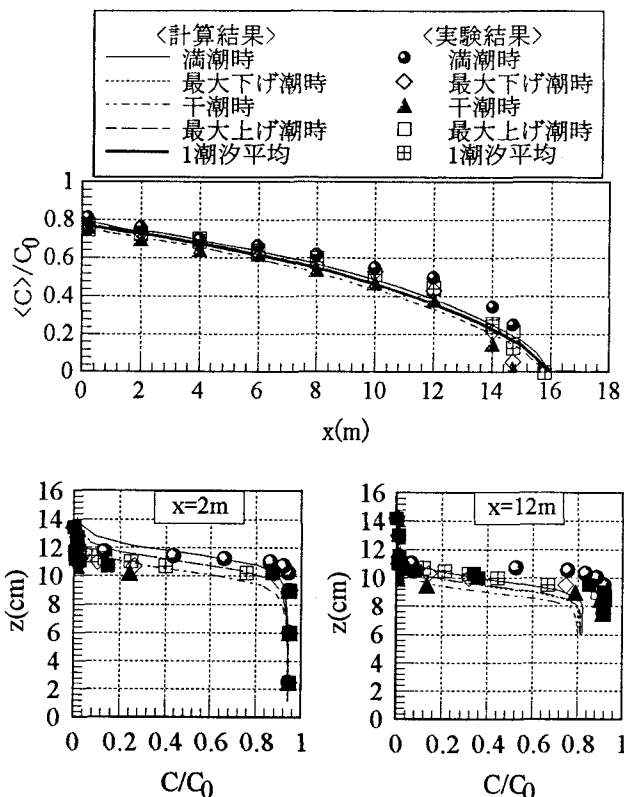


図-8 フィッティングの結果

(弱混合, 上: 断面平均塩分濃度の流下方向分布, 下: 塩分濃度の鉛直分布)

適用した場合、準定常状態の緩・強混合型の塩水侵入はかなり精度良く再現されるのに対し、弱混合型の塩水侵入に関しては実際よりも鉛直混合が促進され、塩水侵入長が過小評価されることが確認されている⁹⁾。そこで、次式で与えられるUedaらの評価式の比例定数 α 、 β を適宜変化させて、準定常状態の塩水侵入に対する実験結果との比較を行った。

$$\sigma_t = (1 + \alpha Ri)^\beta \quad (2)$$

ここで、 Ri : 局所勾配型リチャードソン数である。

この結果、 $\alpha=4.5$ 、 $\beta=0.98$ とした時に全ての混合形態の塩水侵入を最も精度良く再現できることが確認された(図-8)。このため、潮差が非定常に変化する場合の塩水侵入に対しても、これらの係数の値を用いて計算を行った。なお、河口における塩分の境界条件には室内実験により得られた実測値を与えた。

3-2 計算結果の検討

計算結果の一例として、潮差が正弦的に変化するType3の大潮時および小潮時における塩分濃度 C の鉛直分布を図-9に示す。また、Run3-1の塩分侵入量の経時変化と、大潮時($A=15\text{mm}$)、小潮時($A=5\text{mm}$)および塩水侵入長が最大となる時($A=10\text{mm}$)の各潮差に対する準定常状態の塩分侵入量の結果を図-10に示す。これらの結果に見

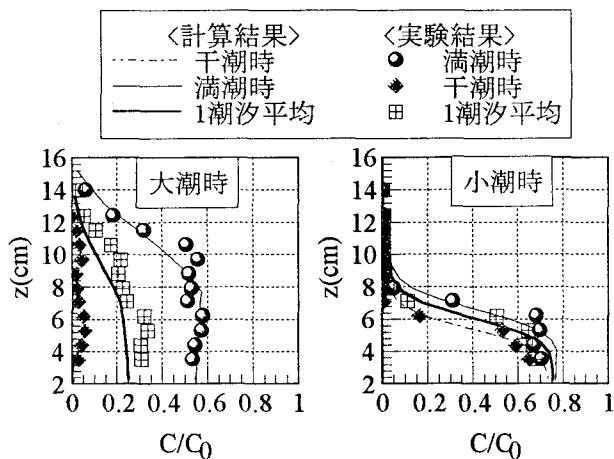


図-9 塩分濃度の鉛直分布 ($x=4m$; Type3)

られるように、本数値モデルにより潮差の変化に伴う混合形態の遷移の様子、各地点の塩分濃度、更には潮差の変化に伴う塩分侵入量の増減の様子が計算により比較的良好に再現されることが確認された。なお、潮差がステップ状に変化するType2に対しても同様の計算を行ったところ、いずれのケースに関しても計算結果は実験結果を忠実に再現できることが確認された。

ところで、本数値モデルは静水圧近似を適用しているために、特に潮差が非定常に変化する場合の計算結果にその影響が現れる可能性も考えられた。しかしながら、本数値シミュレーションの結果から判断すると、その影響はそれほど大きくないことが分かる。以上の結果から、準定常状態の塩水侵入に対して経験定数 α 、 β をフィッティングにより求めて与えることで、潮差が非定常に変化する場合の塩水侵入の時空間の変化を良好に再現できることが確認された。

4. 結論

本研究は、潮差の時間的な変化に対する塩水遡上の応答特性に着目して研究を行った。この結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 今回、室内実験装置の潮汐発生装置の制御プログラムの改良を行い、良好な精度で任意の波形の潮汐変動パターンを実現可能とした。その結果、室内実験において混合形態の遷移を実現することが可能となった。
- 2) 大潮時から小潮時にかけて塩水侵入が遷移を完了するタイムスケールが潮差の変動周期よりも長い場合、塩水侵入は潮差の変動に追従できず、塩水侵入の時間的な増減は、その時の潮差に対する準定常状態の塩水侵入の程度と実際に実現されている塩水侵入との相対的な関係によって規定されることが明らかとなった。このため、最大の塩水侵入は必ずしも潮差最小時に出現する訳ではなく、結果的に塩水侵入長の変化は潮差の

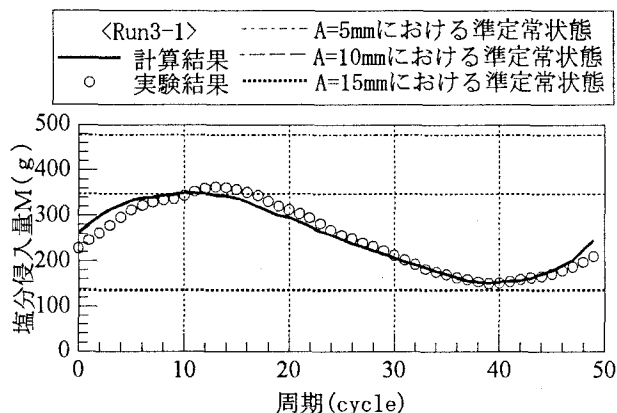


図-10 塩分侵入量Mの経時変化 (Type3)

挙動に対して位相の遅れをもつことが分かった。

- 3) 静水圧近似を適用した数値モデルでも、乱流シュミット数を評価するための定数 α 、 β をフィッティングにより求めて与えることで、準定常状態の塩水侵入だけでなく、潮差が非定常に変化する場合の塩水侵入もかなり良い精度で再現できることが確認された。

参考文献

- 1) 小松利光・上杉達雄・孫双科・安達貴浩・松岡弘文・大和則夫・朝位孝二：川内川河口部における塩水遡上について，水工学論文集，第40巻，pp493-498，1996.
- 2) 小松利光・孫双科・安達貴浩・川上義幸・米須清彦：感潮河川における塩水遡上の人工的制御法についての研究，水工学論文集，第40巻，pp517-534，1996.
- 3) 須賀堯三：感潮河川域における塩水くさびの水理に関する基礎的研究，土木研究所資料，1537号，1979.
- 4) 小松利光・孫双科・安達貴浩・柴田俊彦：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法，水工学論文集，第40巻，pp505-510，1996.
- 5) 安達貴浩・小松利光・橋本彰博：河川河口域における塩水遡上の鉛直2次元数値シミュレーション，海岸工学論文集，第47巻，pp.411-415，2000.
- 6) Ueda, H., S. Mitsumoto and S. Komori: Bouyancy effects on the turbulent transport processes in the lower atmosphere, Quart. J. R. Met. Soc., 107, pp. 561-578, 1981.

(2000. 10. 2 受付)