

那珂川河口域における塩水侵入の現地観測 ならびに数値シミュレーション

THE FIELD MESUREMENTS AND THE NUMERICAL SIMULATION OF THE
SALINITY INTRUSION IN THE NAKA ESTUARY

安達貴浩¹・衛門久明²・橋本彰博³・高橋大吉⁴

Takahiro ADACHI, Hisaaki EMON, Akihiro HASHIMOTO
and Daikichi TAKAHASHI

¹ 正会員 工博 九州大学大学院 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 国土交通省関東地方整備局 常陸工事事務所 事務所長 (〒313-8555 茨城県常陸太田市木崎一町700-1)

³ 学生員 工修 九州大学大学院 工学研究科博士後期課程 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁴ 正会員 工修 福岡県庁(〒812-8577 福岡市博多区東公園7-7)

In the Naka River, which is located in the center part of Ibaraki prefecture, the increase of salinity intrusion at the dry season has become a serious social problem in recent years. In this study, in order to grasp the present situation of salinity intrusion, the velocity and the salinity were measured continuatively along the water-route from the river mouth to the tip of salinity intrusion. Furthermore, the 2-D numerical model was developed to investigate the influence of the geographical change upon the salinity intrusion. Then the accuracy of this model was examined.

As a result, the influence of the geographical change on the salinity intrusion was made clear. Furthermore, 2-D numerical model developed in this study can reproduce the salinity intrusion in the Naka River with a good accuracy.

Key Words : ADCP, the geographical change, 2-D numerical model

1. はじめに

本研究が対象とする那珂川(図-1)は、茨城県のほぼ中央部を流れ太平洋に注ぐ、流域面積3,270km²、流路延長150kmの一級河川であり、その河川淡水は農業用水や都市用水の貴重な水資源として地域住民に広く利用されている。しかしながら、観測史上最低の降水量を記録した昨年4月を始めとして、ここ最近、渇水期になると河川上流への塩水遡上が増大し、高濃度の塩水が水道水や農業用水に混入するといった被害が度々生じている(表-1)。その一方で、河川上流にはダム等がなく、下流部には無堤・弱小堤区間が多いことから洪水による被害も頻発している。このため、洪水対策として河川水の流下の妨げになる河床の浚渫や流水障害率の大きな橋脚の改築工事が進められているが、このような洪水対策により河口の塩水遡上がより一層深刻化することが懸念されている。

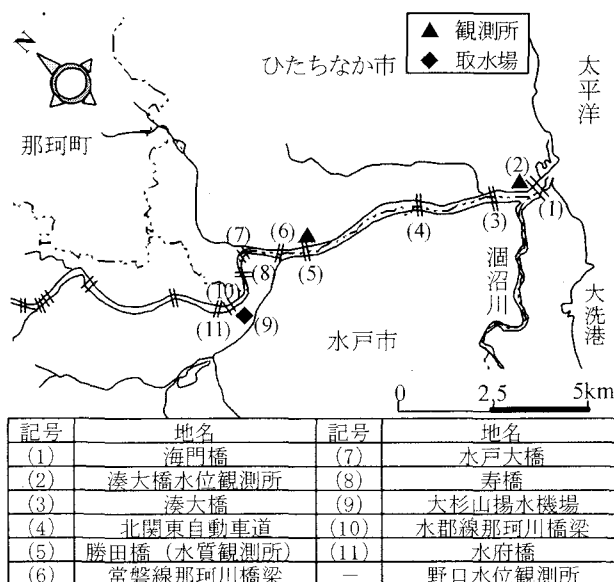


図-1 那珂川流域図

このような背景の下、著者らは那珂川河口域の塩水遡上特性を明らかにすることを目的として、2000年以降現地観測を実施してきた¹⁾。その結果、1)少なくとも著者らが観測を行った期間について、那珂川河口域では月齢に関係なく弱混合型の塩水遡上が実現されていた、2)塩水侵入長は河川流量の変動の履歴を考慮した直前3日間の平均流量によってほぼ規定されている、3)塩水侵入長は河川流量に対して線形的に増減するわけではなく、河床の凹凸の影響を強く受けて変化する、等の知見が得られた。3)の結果や河道浚渫の影響を把握する必要があること等を踏まえると、地形変化に対応した塩水の挙動をより詳細に明らかにする必要があると考えられた。このため、現在の那珂川の塩水侵入の時空間的な変化特性を詳細に把握すること、数値シミュレーションの検証データを収集すること、等を目的として、平成13年度にADCP、STD、音響測深機を用いた密度流の縦断構造の連続測定を行った。更に今後の河川改修による塩水遡上の変化を正確に予測するために、横断面形状を考慮した新たな鉛直次元数値モデルを開発し、その精度や実用性について検討を行った。

2. 那珂川河口域における塩水遡上の概要

従来の観測¹⁾から、著者らが行った観測の範囲において、那珂川河口部では大潮、小潮いずれにおいても弱混合型の塩水侵入が実現されており、河川上流側への塩水侵入の程度は主に河川流量の大小によって規定されていることが明らかとなっている。しかし、塩水侵入長は河川流量の変化に対して単調に増減するわけではなく、河床の凹凸の影響も重要な役割を果たしているものと考えられる。特に、最深河床高がT.P-2.0m以上である12.1km上流地点の水郡線那珂川橋梁の根固めはマウンドの効果を有しており、塩水遡上阻止効果をもつことが指摘されている。また、12.1km上流地点より下流域では昭和61年の戦後最大の洪水によって河床地形が大きく変化し、それ以前と比較してほぼ全区間で河床が大幅に低下している(図-2)。長期的な観点から見るとこのような河床の地形変化は塩水遡上に大きな影響を及ぼしており、表-1に示すように昭和61年以降取水障害が頻発しているのは河川流量の低下だけでなく、河床の低下も大きな要因になっているものと推察される。

こうしたことから、今後の河川改修を行う上で現在の地形の凹凸が塩水遡上に及ぼす影響を明らかにすることは重要と考えられる。しかしながら多点移動観測のみでは空間的に離散的な情報しか得られないため、本研究ではADCPならびに音響測深機も駆使して河口から塩水遡上先端部までの流速や密度界面の連続観測を行った。

3. 塩水遡上の現地観測

表-1 那珂川的主要な渇水状況

年	期間	対応
昭和59年	5～6月	緊急暫定取水
昭和62年	4～5月	取水制限13日間、緊急暫定取水23日間
平成2年	8月	減圧給水2日間
平成5年	4～5月	取水制限11日間
平成6年	4～5月	取水制限8日間、振替取水3日間
平成8年	4～5月	取水制限5日間、振替取水7日間
平成9年	4～5月	振替取水20日間
平成13年	4～5月	取水制限13日間、振替取水14日間

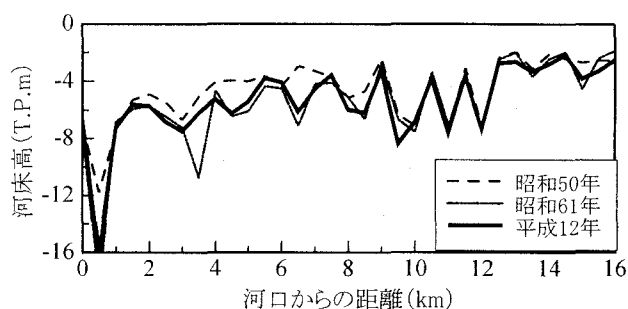


図-2 那珂川河口域における最深河床高の経年変化

(1) 現地観測の概要

現地観測は平成13年12月14日(大潮)から21日(小潮)までの期間において、河口から12km上流地点までの区間を対象に実施した。各観測の測定内容を表-2に示す。大潮時(14日)には、ADCP(RD社:ワークホース1200kHz)と音響測深機(カイジョー:PS-30R)を用い、湊筋に沿って流速と密度界面の縦断分布を観測し、これと並行して多項目水質計(アレック電子:AST-500)による塩分濃度と水温の鉛直分布の観測も行った。一方、小潮時(21日)には音響測深機と多項目水質計を用い、14日とほぼ同様の観測を行った。また、13日から21日までの期間には塩分・水温計(アレック電子:COMPACT-CT)と潮位計(アレック電子:COMPACT-TD)を1.7km、9.7km地点に係留し観測を行った。両地点とも水深は約6mであったが、密度界面近傍で塩分濃度の変動が大きいと思われる水深に塩分・水温計を5台ずつ集中的に配置した。更に17日から20日にかけては、多項目水質計を用い、河口から12km上流地点までの区間について塩分濃度と水温の鉛直分布を測定した。今回の観測期間において河川流量は60m³/s前後(ほぼ年平均流量と等しい)で安定していたが(図-3)、潮汐に関しては日潮不等の影響が比較的大きい潮汐条件であった。また、9.7km上流地点で測定した水深と1.7km上流の湊大橋水位観測所で測定されている水位を比べると、ほぼ同位相で変動していることが確認された。

(2) 塩水遡上の時間変化の特性

まず、1.7kmならびに9.7km地点に係留した塩分・水温計の時系列データを用いて、塩水遡上の時間変化の特性について検討する(図-3)。データの大部分において、同

表-2 各観測の測定内容

	12/14(大潮)	12/17, 18, 19, 20(中潮)	12/21(小潮)	測定間隔
ADCP	河口から12km上流まで	-	-	8:00～16:00まで2 時間毎の計4回観測
音響測深機	河口から12km上流まで	-	河口から12km上流まで	
塩分濃度移動観測	0.2, 4.0, 6.0, 8.0, 8.8, 9.8, 12.0km地点	0.2, 1.7, 4.0, 8.0, 9.8, 12.0, 12.3km地点	0.2, 4.0, 6.0, 8.0, 9.8km 地点	12/13～12/21まで1 分毎に測定
係留計	河口から1.7km上流に塩分・水温計(水深1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0mの計5点) 河口から9.7km上流に塩分・水温計と潮位計(水深1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.5mの計5点)			

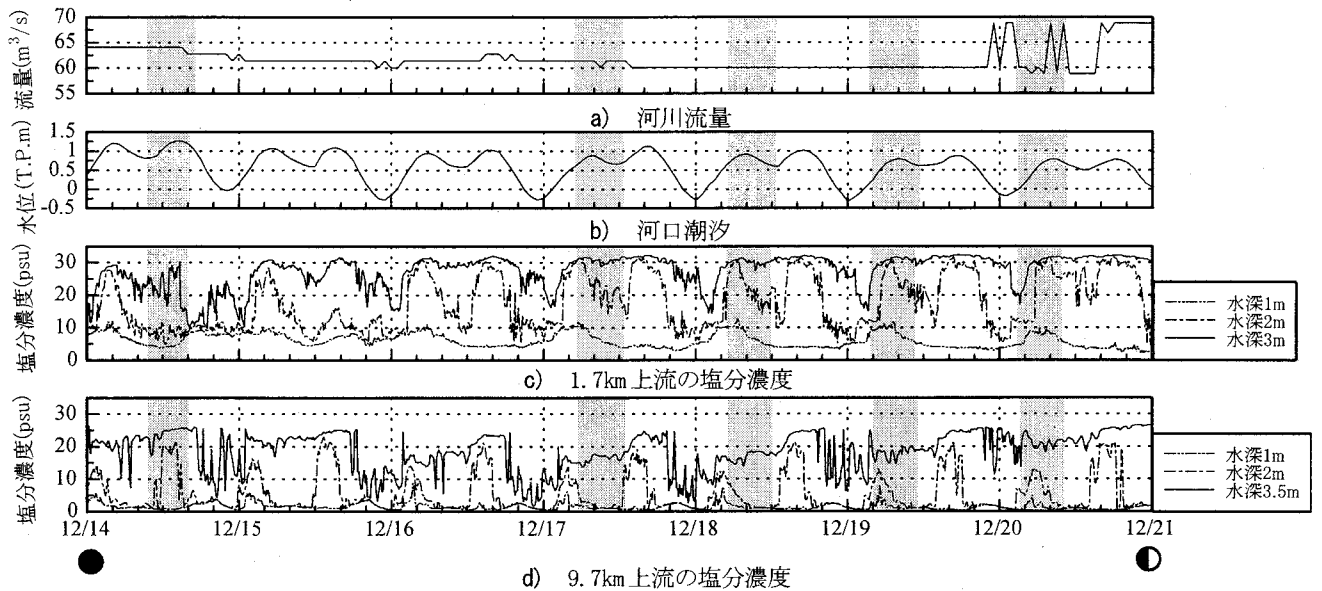


図-3 河川流量、河口潮汐、係留計で計測された塩分濃度の経時変化
(図中の影の部分は観測を実施した期間を表す)

一地点でも塩分濃度は鉛直方向に大きく異なった値を示しており、しかも河口から9.7km上流地点の下層においても海水の塩分濃度に近い塩水が侵入していることから、ほぼ全観測期間において弱混合型に近い塩水遡上が形成されていたことが理解できる。特に、高低潮の後の満潮時においては、比較的深い水深3mや3.5mの位置において塩分濃度が比較的大きな値を示していることが分かる。一方、干満差が大きい期間の上げ潮時には、底層近傍での塩分濃度が低下し、鉛直方向に分布がほぼ一様化する期間も見られる。この結果から判断すると、従来弱混合型の塩水侵入のみが観測されている那珂川河口域においても、潮汐条件によっては緩あるいは強混合型の塩水遡上が実現されている可能性があると言える。以上のような潮汐の影響を定量的に把握するために、次に9.7km上流地点の水深3.5mにおける満潮時の塩分濃度とその直前の干満差の関係を調べたところ、両者の関係はほぼ一意的であり、干満差が小さい程、下層の塩分濃度は高くなっていることが確認された(図-4)。なお、干満差0.8m付近を境にしてプロットが左右に大きく分離しているが、これは観測期間を通じて日潮不等の影響が常に大きかったことを意味する。

(3) 塩水遡上の空間分布の特性

図-5に12月14日の12:10から14:00までの上げ

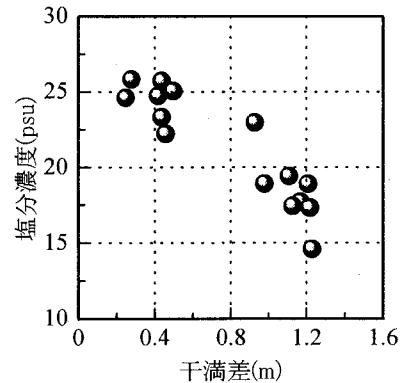


図-4 干満差と塩分濃度の関係

潮時から満潮時における、ADCPによって得られた流速の主流方向成分の縦断分布を示す。縦軸は水深であり、水面から約0.5mまではADCPの不感領域に相当する。横軸は河口からの曳航距離であり、その値は河口からの距離標と概ね一致している。図-5の結果を見ると、下層では河口から上流側への流動が、表層では上流側から河口へ向かう流動が見られ、弱混合型塩水侵入特有の、いわゆるexchange flowが形成されていることが分かる。また、同図には流速が0となる地点を結んだ曲線(以下、ゼロ流速面)も描かれているが、地形の凹凸に対応してゼロ流速面も縦断方向に複雑な分布を示していることが見て取れる。特に河口より7km

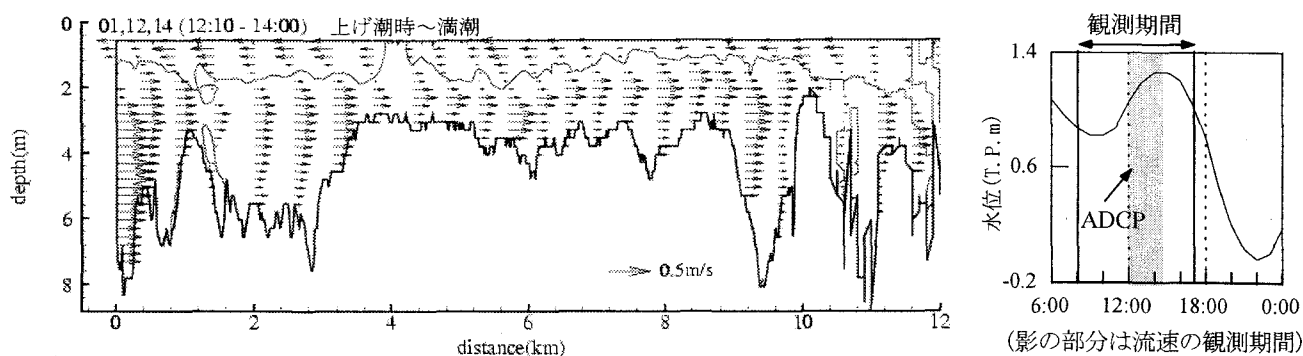


図-5 上げ潮時における流速の縦断分布(左;12月14日, 12:10-14:00)と観測日の水位変化(右)

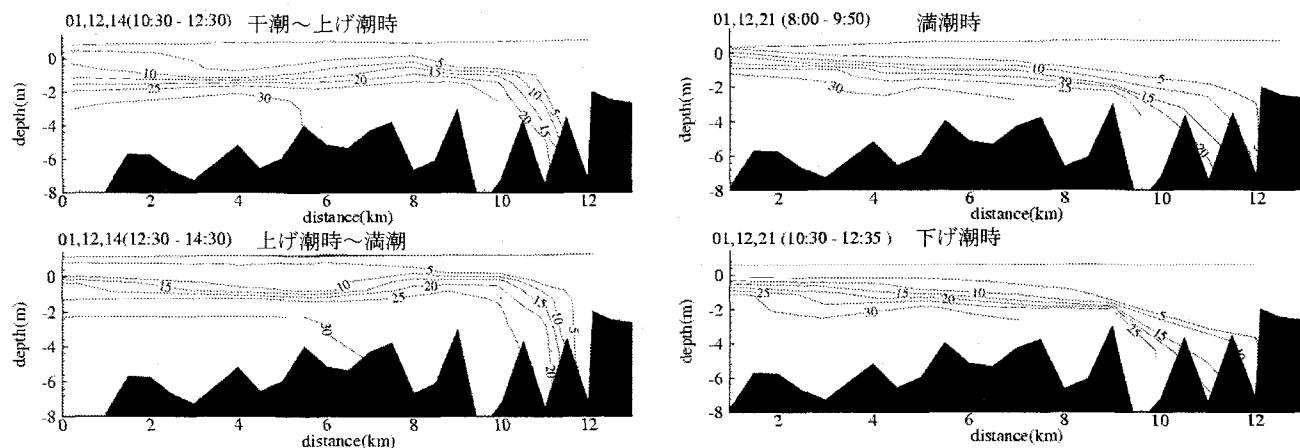


図-6 塩分濃度の縦断分布(左:大潮, 右:小潮), 単位;psu(コンター間隔は5psu)

から10kmの区間においてゼロ流速面が上流に行くに従い上昇しており、この区間において塩水層が厚くなっていることが推察される。また、この様なゼロ流速面の挙動は後述する密度界面の挙動とほぼ対応していること等からも、上記の結果は妥当な結果と判断される。以上の結果より比較的潮流の小さな弱混合型河川においてもADCPは有効であることが示された。

次に大潮(12月14日;上げ潮期間)および小潮(12月21日;満潮および下げ潮時)の塩分の縦断分布を図-6に示す。この結果では、大潮、小潮いずれにおいても弱混合型の塩水侵入が実現されており、塩水遡上距離は14日は11.5km、21日は12.0kmとなっていることが分かる。また、両日とも河床の凸部が障害物となって、塩水の上流への遡上が阻止されている様子も確認できる。更に、12月14日における上げ潮から満潮の期間(12:30-14:30)においては、界面近傍の等濃度線の間隔が疎になっており、6km地点より上流の区間において図-5のゼロ流速面の挙動と対応して上流に行くにつれ等濃度線が上昇していることが確認できる。他の観測期間では上流に行くにつれて等濃度線が低下していることから、このような現象は上げ潮時に比較的河床の高い区間を下層塩水が通過する際に、上・下層間相互の連行が特に活発となることを意味するものと考えられる。このことから、この区間において河道掘削等が行われると塩水が鉛直方向に混合せず、成層したままで上流

側に侵入するので、塩水遡上は更に増大するものと推察される。ところで、本観測では密度界面の空間的な連続データを収集するために音響測深機も使用したが、測定の際、塩水・淡水境界面が良好に出力される感度の調整が難しく結果の精度が不十分であったため、その結果の掲載は今回割愛した。

4. σ 座標系を用いた新たな数値モデルの開発

(1) 数値モデルの概要

那珂川河口域では近年洪水による被害が頻発しており、その対策として現在、河床の浚渫工事が計画されている。このような対策に伴う河床地形の変化が塩水遡上に及ぼす影響を評価するためには、数値シミュレーションによる検討が不可欠である。そこで次に、実河口域の塩水遡上を再現できる新たな数値モデルの開発を行った。

潮汐運動により非定常に変化する実河口域の弱混合型の塩水遡上を対象として数値シミュレーションを行う場合、鉛直方向の現象スケールが非常に小さく、しかも鉛直方向の現象の変化が卓越するため、経済性や精度の観点から鉛直2次元数値モデルを適用する必要があると言える。その際、河道幾何の影響をモデルの中に取り入れる必要があるが、塩水は河床の滞筋に沿って上流に侵入すること、塩水遡上を規定する入退潮量を正確に評価する必要があること、等の点を考慮すると、特

表-3 基礎方程式の各項の説明

	運動方程式	塩分の質量保存式
P_ϕ	$-g(1+R\sigma)\frac{\partial H}{\partial x} - g\frac{\partial}{\partial x}\left(H\int_\sigma^1 R d\sigma\right) - g(1+R)\frac{dz_b}{dx}$	0
F_H	$\frac{\partial}{\partial x}\left((v+v_{rx})B\frac{\partial U}{\partial x}\right)$	$\frac{\partial}{\partial x}\left((D_m+D_{rx}+D_L)B\frac{\partial S}{\partial x}\right) - 2\frac{\partial}{\partial x}\left((D_m+D_{rx}+D_L)\frac{B}{H}\frac{\partial S}{\partial \sigma}\left[\sigma\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{dz_b}{dx}\right]\right)$ $+ (D_m+D_{rx}+D_L)\left[\sigma\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{dz_b}{dx}\right]^2\frac{B}{H}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{1}{H}\frac{\partial S}{\partial \sigma}\right)$
F_s	$U_*H\left U_*H\right - U_*V\left U_*V\right \frac{1}{H}\frac{\partial B}{\partial \sigma}$	0

*) g : 重力加速度, $R(=(\rho-\rho_0)/\rho_0)$: 基準水との比重差, ρ : 密度, v : 動粘性係数, v_{rx} ならびに D_{rx} : x 方向の渦動粘性係数と乱流拡散係数, D_L : 幅方向の移流分散係数, D_m : 分子拡散係数, S : 塩分濃度, U_*H および U_*V : 側壁における摩擦速度の水平および鉛直方向成分

に水表面近傍の水路幅、滞筋部の水深、流水面積という3つの量をモデルの中に正確に組み込む必要があると考えられる。また、水深に対して潮差が比較的大きな河口域を対象とする場合、デカルト座標系を用いるよりも水位変動に応じて格子間隔が変化する σ 座標系を用いた方が、自由水面や河床等の取り扱いが各段に容易になる。以上の点を考慮して、本研究では σ 座標によって記述される横断面形状の影響を組み込んだ新たな鉛直2次元モデルの構築を行った。(なお、デカルト座標系を用いる場合については水路幅を考慮したモデルが既に構築されている²⁾。

基礎方程式(連続の式、運動方程式、塩分の質量保存式、状態方程式)は、デカルト座標系における3次元の基礎式を横断方向に積分した後、 σ 座標系に変換することによって導出した。 $z(\sigma)$ 方向の運動方程式には静水圧近似を適用した。また河床の凹凸が大きい場合、 σ 座標系を適用したモデルでは水平拡散項の座標変換によって生じる高次項を省略すると、鉛直方向に人工的な拡散が生じるため、高次項を残したままで塩分の質量保存式を解いた³⁾。

本研究で用いた基礎式は以下の様に記述される。

$$HB\varpi = \frac{B}{B_{\sigma=1}} \sigma \int_0^1 \frac{\partial}{\partial x}(HB U) d\sigma - \int_0^\sigma \frac{\partial}{\partial x}(HB U) d\sigma \quad (1)$$

$$\frac{\partial HB\phi}{\partial t} + \frac{\partial(HB\phi U)}{\partial x} + \frac{\partial(HB\phi\varpi)}{\partial \sigma} = HBP_\phi + HF_H + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(K_z \frac{B}{H} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma}\right) - HF_s \quad (2)$$

ここで、 $\sigma=(z-z_b)/(\zeta-z_b)$ であり、 ζ : 水位、 z_b : 水平基準面からの河床高さ、 ϕ : 輸送される物理量(U, S)、 H : 水深、 B : 各水深における河道幅、 U, W, ϖ : それぞれ x, z, σ 方向の平均流速成分、 K_z : z 方向の渦動粘性係数 v_{rz} あるいは乱流拡散係数 D_{rz} である。また、 F_s は側壁におけるせん断応力で、壁面の摩擦の効果はマンニングの粗度係数からマンニング・ストリクラーの式を用いて相当砂粒粗度 k_s を算出し、 k_s と壁法則を用いて評価した。また、乱流モデルには混合距離モデルを用いた。その際、減衰関数ならびに乱流シュミット数 σ_t の評価式には

Munk & Anderson 型のモデル式を適用し、モデル中の無次元パラメーターをフィッティングにより決定した。

$$v_{rz} = v_{rx} = \left[\kappa\sigma H\right]^2 \frac{1}{H} \left|\frac{\partial U}{\partial \sigma}\right| (1 + \beta Ri)^{-\alpha} \quad (3)$$

$$D_{rz} = D_{rx} = \frac{v_{rz}}{\sigma_t} \quad (4)$$

$$Ri = -gH \frac{\partial R / \partial \sigma}{(\partial U / \partial \sigma)^2} \quad (5)$$

ここで α, β : 減衰関数のモデル定数、 κ : カルマン定数、 Ri : 局所勾配型リチャードソン数である。

(2) 境界条件

計算の対象領域としては感潮域全域を考慮する必要があるため、河口より1kmから23km上流地点までとした。塩分の境界条件は河口では係留計により得られた実測値を、上流端では塩分濃度ゼロの条件を与えた。また河口の水位は湊大橋における実測値、上流端では野口流量観測点(河口より38.3km上流地点)における河川流量をそれぞれ与えた。 $\angle x=500m$, $\angle \sigma=0.025$ として平成13年12月14日の塩水遡上の再現計算を行った。

(3) 数値シミュレーションの結果

図-7に12月14日の最大上げ潮時および満潮時における流速と塩分分布の計算結果を示す。この結果を見ると、計算結果においても現地観測と同様に弱混合型の塩水侵入が実現されていることが確認できる。更に河口より11.5km上流地点の河床の凸部において塩水の遡上が阻止されている状況も良く再現できている。次に観測結果と比較する。その際、観測地点によって測定時刻が異なるため、計算結果においても観測と対応するようにデータをつなぎ合わせて図を作成した(図-8)。計算結果では6kmより上流の比較的水深の浅い区間において塩・淡水の鉛直混合効果が過大に評価されて観測結果に比べて中間層が厚く、観測結果に見られるような等濃度線の上昇は再現出来ていない。以上の結果から、本モデルによって観測で見られた特徴的な現象は再現できなかったが、混合形態や塩水侵入長は良好に再現されていると言える。ところで、上記の計算ではフィッティング

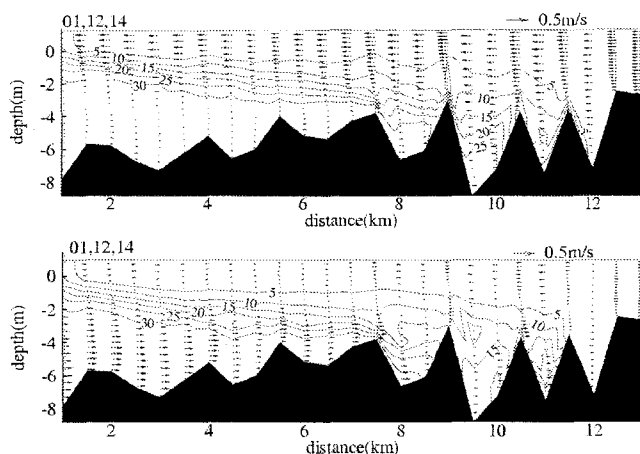


図-7 数値シミュレーション結果
(12月14日, 上: 上げ潮時, 下: 満潮時)

を施しているため、水理条件が異なる場合の塩水侵入を対象に結果の妥当性を検証する必要がある。前述したように、那珂川河口域の塩水侵入の程度は主に河川流量によって規定されていることから、今回は河川流量と塩水侵入長の関係についての既存の観測結果を用い、モデル定数の妥当性を検証した(図-9)。塩水侵入長に1km程度の差が生じるケースがあるものの、流量に対して計算結果は観測結果と同様の变化傾向を示していることが確認できる。計算では平均潮差のみを一致させており日潮不等の影響は考慮していないこと、空間分解能の不足から12.1km地点の根固めが正確に表現できていないこと、等がこのような差異の原因と考えられるが、今後の洪水対策事業等の影響を予測する上では本モデルは十分な精度を有しており、有効なツールとなり得るものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、河床の凹凸に対応した塩水侵入の時空間的な変化を詳細に把握するために、那珂川河口域においてADCP等を用いた密度流の縦断構造の連続観測を行った。更に塩水遡上を再現するための数値モデルを新たに開発した。その結果以下の様な知見が得られた。

- 1) 那珂川河口域の塩水侵入状況は、流量の安定している期間では潮汐条件に応じて変化し、日潮不等の程度が大きい日の内では高低潮後の満潮時に塩水遡上が最大となっている。
- 2) 河口から7km～10kmまでの比較的水深の浅い区間は、淡水と下層塩水を活発に混合させる効果を有している。このため、この区間の河道浚渫が行われると、塩水が混合せずにそのまま侵入するため、塩水遡上が更に増大する可能性がある。
- 3) 今回開発した数値モデルは、上げ潮時に塩分の等濃度線が上昇するという現地観測で得られた特徴的な現象を再現することはできなかった。しかしながら混合形

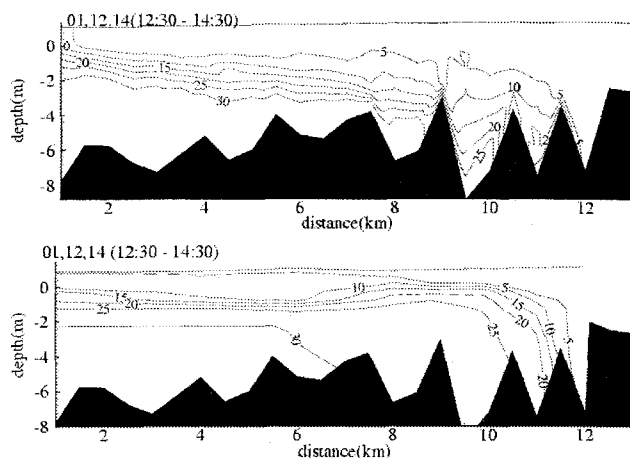


図-8 12月14日上げ潮時の塩分分布の比較
(上: 計算結果, 下: 観測結果)

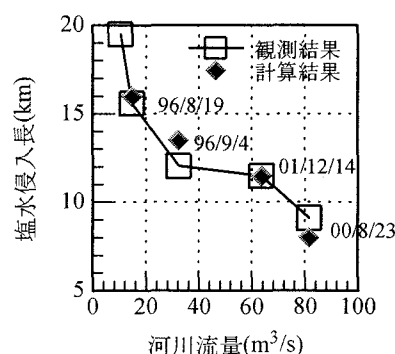


図-9 河川流量と塩水侵入長の関係

態や塩水侵入長は比較的良好に再現出来ることが確認され、今後、河道掘削等の洪水対策による影響を予測する上での有効なツールとなり得ることが示された。

謝辞: 本研究は水理委員会河川懇談会の土木学会・建設省(現・国土交通省)共同研究(平成11～13年度)「河口域の水理特性(那珂川)」の一環として実施されたものである。また、竹内秀二課長、秋元賢一係長をはじめとする国土交通省関東地方整備局・常陸工事事務所・利水調査課の方々ならびに九州大学大学院環境流体力学研究室の学生には資料提供、現地観測等の面において多大な協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 安達貴浩・稲寺隆・小松利光・北野真広・橋本彰博・高橋大吉: 那珂川河口域における塩水遡上の特性について, 河川技術論文集第7巻, pp. 197-202, 2001.
- 2) 鈴木伴征・石川忠晴: 利根川河口堰下流部における貧酸素水塊の発達・流動に関する現地観測と数値実験, 水工学論文集第43巻, pp. 881-886, 1999.
- 3) 佐々木淳: 3次元密度流としての内湾の流れのモデリング, 第34回水工学に関する夏期講習会講義集, pp. B-3-1-20, 1998.

(2002. 4. 15 受付)