

那珂川河口域における塩水遡上の 特性について

CHARACTERISTICS OF SALT INTRUSION IN THE NAKA RIVER ESTUARY

安達貴浩¹・稲寺隆²・小松利光³
北野真広⁴・橋本彰博⁵・高橋大吉⁶

Takahiro ADACHI, Takashi INADERA, Toshimitsu KOMATSU
Masahiro KITANO, 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 フェロー 工博 九州大学大学院 工学研究院教授 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁴ 正会員 八千代エンジニアリング株式会社 河川部河川課 (〒330-0801 埼玉県大宮市土手町2-15-1)

⁵ 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)

⁶ 学生員 九州大学大学院 工学研究科修士課程 (同上)

In the Naka river estuary located in the center part of Ibaraki prefecture, the intrusion of relatively dense salt water upstream, which is induced due to the decrease of the fresh water discharge or dredging the river bed for the flood control, has become a serious social problem. Therefore, it has been expected to make clear the mechanism of the salinity intrusion and to take some measures in the Naka river estuary. Therefore, the field measurements and numerical simulations were carried out in order to make clear the characteristics of the salinity intrusion there.

In this paper, the relation between the freshwater discharge and the salinity intrusion length was examined. As a result, the influence of the unsteady change of the river discharge on the salinity intrusion length was made clear.

Key Words : saline wedge, salinity intrusion length, river discharge

1. はじめに

河川河口域の周辺部には大都市が発達していることが多く、河口域で取水された河川水は農業用水、上水道、工業用水等の水資源として、地域住民や地場産業に広く利用されている。ところがここ最近、水資源の需要の増大や河道浚渫、異常気象などが原因となって、河川上流側への新たな塩水遡上が発生し、重大な問題となっている。

本研究が対象とする那珂川河口域(図-1)も、同様な問題を抱えた河川であり、河口から約11.8km上流にある大杉山揚水機場の取水口において、高濃度の塩分混入水が取水されることから、取水制限を余儀なくされるといった事態もしばしば発生している。このため、如何なる水理条件において取水障害が生じるのかを定量的に把握することの必要性が従来より指摘されている。

一方、水戸・ひたちなか市を中心とする那珂川沿岸の

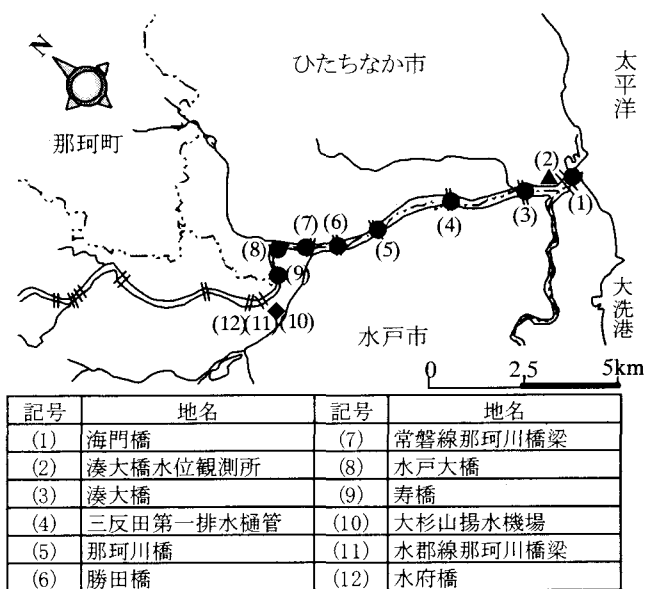


図-1 那珂川流域図

無堤・弱小堤区間では、1999年を含め過去数回にわたり、洪水による災害が頻発している。現在、災害対策として堤防設置、河川改修等の治水事業が急ピッチに進められているが、その一方で河積獲得のための河道浚渫や流水阻害率の大きい橋脚の改修によって、今後更に塩水侵入が増大することが懸念されている。このため、今後の洪水対策が塩水遡上に及ぼす影響を正確に予測し、適切な対策を講じることが不可欠と考えられている。

以上のような状況を踏まえて、著者らは2000年より、塩水侵入域全体について多点観測を行い、塩分の鉛直分布の詳細な測定を行っている。そして、これらの観測結果を検証データとして1次元2層流計算を行った。更に、1995年から1997年にかけて実施された塩水侵入の先端付近における多点観測結果も利用して、那珂川河口域における塩水侵入長の決定要因について調べた。

2. 多点移動観測の内容とその結果

表-1 現地観測の概要

現地観測実施日	潮汐	流量(m^3/s)	潮差(cm)
2000年2月4日	大潮	5	45
2000年2月14日	小潮	4	83
2000年8月23日	小潮	74	15
2000年8月29日	大潮	61	128
2000年11月27日	大潮	68	58
2000年12月4日	小潮	54	24
2001年2月15日	小潮	34	77

(1) 現地観測の概要

那珂川は茨城県のほぼ中央部を流れ、水戸市を経た後に、ひたちなか市と大洗町の境界において太平洋に注ぐ一級河川である(図-1)。流域面積は3,270 km^2 、流路延長は150kmであり、河口部付近の計画高水流量は6,700 m^3/s (確率年1/100, 1993年策定)、河床勾配は約1/3,300、平均年最大流量は約1,900 m^3/s である。

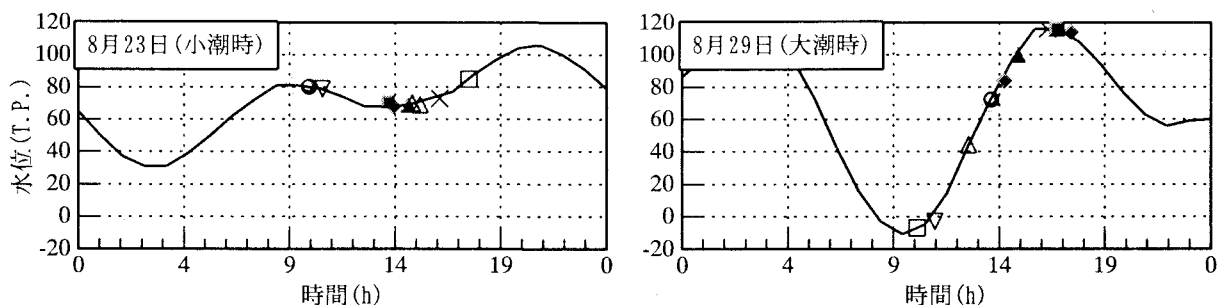


図-2 観測日の水位変化

(図中のプロットは図-3の各観測時刻を表している)

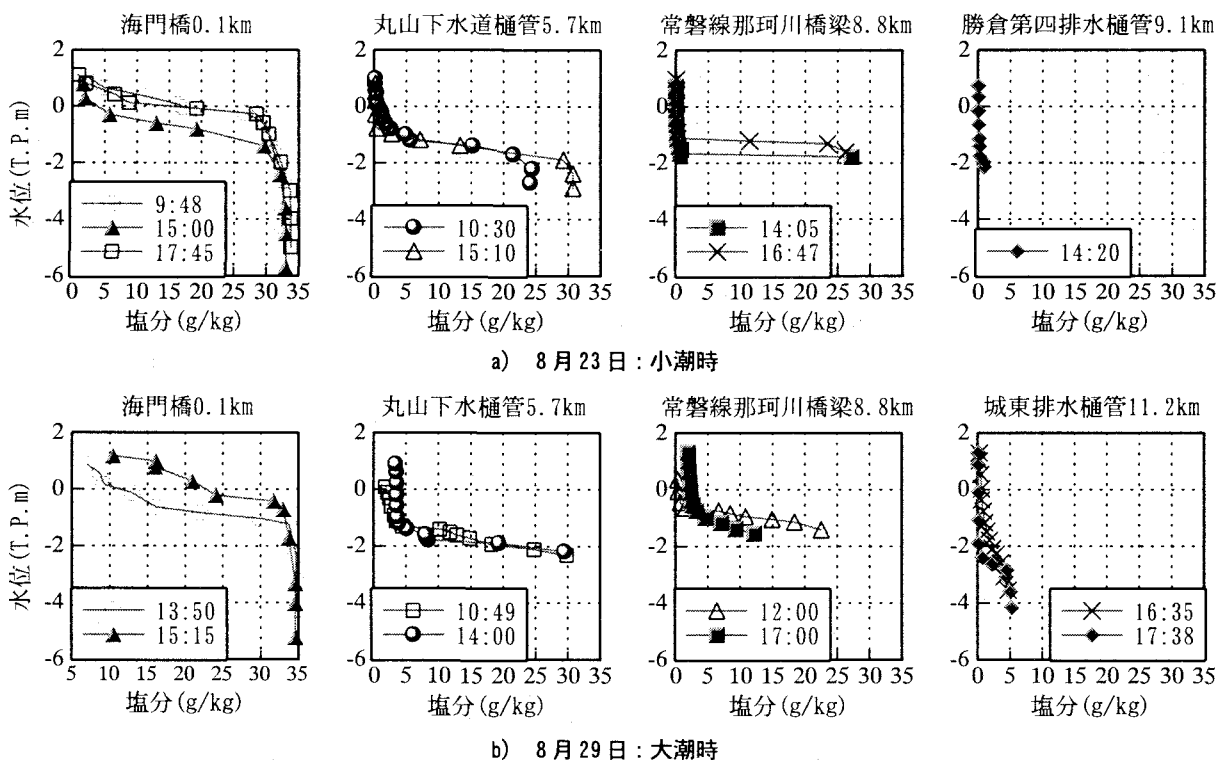


図-3 観測日の塩分濃度の鉛直分布

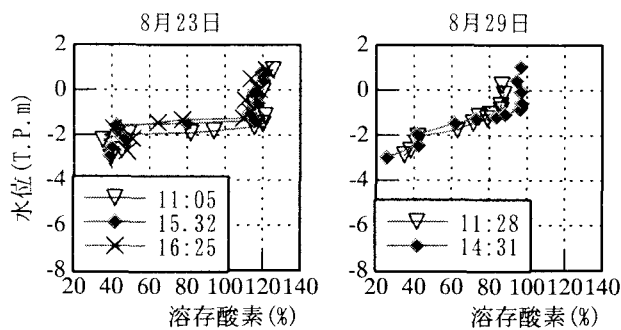


図-4 溶存酸素濃度の鉛直分布

那珂川河口域では、河口より8km上流地点の勝田橋において上層（水面から-0.5m）と下層（T.P.-2.6m）に塩分ならびに水質（溶存酸素、pH、水温、クロロフィル-a、濁度）の自動観測装置が設置されており、1999年の4月以降、連続的な定点観測が行われている。更に、1995年から1997年にかけては塩水侵入の先端部の位置（塩水侵入長）を調べるために、塩水侵入の先端部および先端から2～3km下流の区間数地点（流下方向に3～10点程度、鉛直方向に3点程度）について塩分濃度の多点観測が行われている¹⁾。しかし、これらの観測は観測区間が侵入塩水の一部に限られており、その上、水深方向の測点も少ないため、塩水楔の界面位置を把握し現象のメカニズムを明らかにするには情報量が不十分であった。そこで、2000年から2001年にかけて、大潮時もしくは小潮時を対象に計7回、塩分濃度の詳細な鉛直分布を調べるための多点移動観測を実施した（表-1）。観測には多項目水質調査計（HydroLab:DS4, Horiba:U-22）を用い、塩分濃度、溶存酸素、pH、電気伝導度、酸化還元電位、水温、水深について、河口より0.1kmの海門橋から塩水侵入先端部までの区間を2km間隔で測定した。なお河口より約1km上流の湊大橋水位観測所において潮位データが、河口より約38.3km上流の野口水位観測所での流量データが得られているため、これらを利用して結果の考察を行った。

(2) 現地観測結果の一例

現地観測の結果の一例として、8月23日（小潮）と29日（大潮）の塩分の鉛直分布（図-3）ならびに河口から約8km上流の地点の勝田橋での溶存酸素の鉛直分布（図-4）を示す。なお、8月23日、8月29日の潮差はそれぞれ15cm、128cmであった（図-2）。また、今回観測を行った8月は目立った出水はなく、河川流量は70m³/s前後と夏季としては比較的安定した流量であった。

まず、塩分濃度の鉛直分布を見ると、大潮時の河口付近において、水表面付近の塩分濃度に比較的大きな値が見られるものの、大潮時、小潮時いずれにおいても濃度が急変する明瞭な密度界面が存在していることが分かる。また、水位の変化に応じて界面の高さが昇降し、比較

的厚い中間層も確認できるが、中間層における濃度勾配は時間的にほとんど変化していないことが見て取れる。下層の塩分濃度も流下方向にあまり変化しないことから、潮汐による混合の影響はそれほど大きくないと考えられる。以上の結果から、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、潮差の大小は下層塩水の入退に対して支配的に寄与することが分かる。

次に溶存酸素濃度の鉛直分布を見ると、水深が比較的浅いにもかかわらず、塩・淡水の強い安定成層のため底層の溶存酸素濃度は40%と低い値を示しており、貧酸素水塊が底層近傍に形成されていることが分かる。夏季以外の観測結果では底層においても溶存酸素濃度は80%近い値を示していたことから、水質は比較的良好であると言われている那珂川においても、やはり夏季には他の河口域と同様に下層の塩水層において水質の悪化が生じていることが確認できる。

3. 1次元二層流数値シミュレーションの概要

(1) 基礎式ならびに境界条件

以上のような那珂川河口域の塩水遡上の観測結果を、より正確に考察するために、次に、定常1次元二層流数値シミュレーションを行った。なお、河道横断データには、1998年度に行われた測量結果を利用した。

ところで、上記の那珂川河口域の塩水侵入の現地観測結果を見ると、大潮時においてさえ、上層には下層の塩水の混入がほとんどなく、下層もほとんど希釈されていない塩水楔が形成されているため、今回は、上・下層間の連行は考慮せず計算を行った。また、弱混合型塩水侵入の界面形状を考える上で、水面勾配は現象に対して相対密度差の2乗のオーダーでしか寄与しないため、水表面は水平であると考えた。この場合の基礎式は以下のようになる。

$$\frac{dh_1}{dx} = \frac{\frac{\varepsilon g h_1^2}{W} \frac{Q_1^2}{\varepsilon g h_1^3 W^2} - \frac{h}{h-h_1} \frac{\tau_i}{\rho_1}}{\left\{ \varepsilon g h_1 \left(1 - \frac{Q_1^2}{\varepsilon g h_1^3 W^2} \right) \right\}} \quad (1)$$

$$\tau_i = \rho_1 \frac{f_i}{2} U_1 |U_1| \quad (2)$$

ただし、xは河道に沿った河川上流側を正とする座標であり、Wは代表幅、 h_1 は幅平均の上層厚、 Q_1 は上層流量、 ρ_1 は上層密度、 τ_i は界面のせん断応力、 ε は相対密度差、 g は重力加速度、 f_i は内部抵抗係数、 U_1 は上層の平均流速である。上式は、未知数 h_1 に関する1階常微分方程式なので、下流端の h_1 の値を境界条件として与える

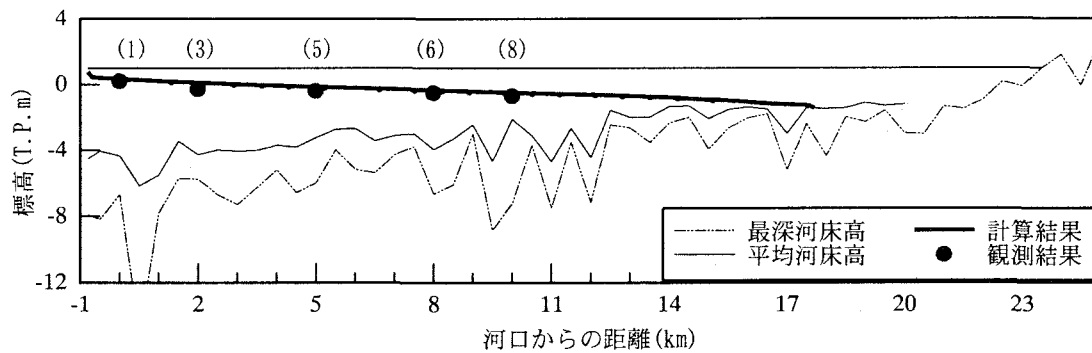


図-5 数値計算結果と現地観測結果

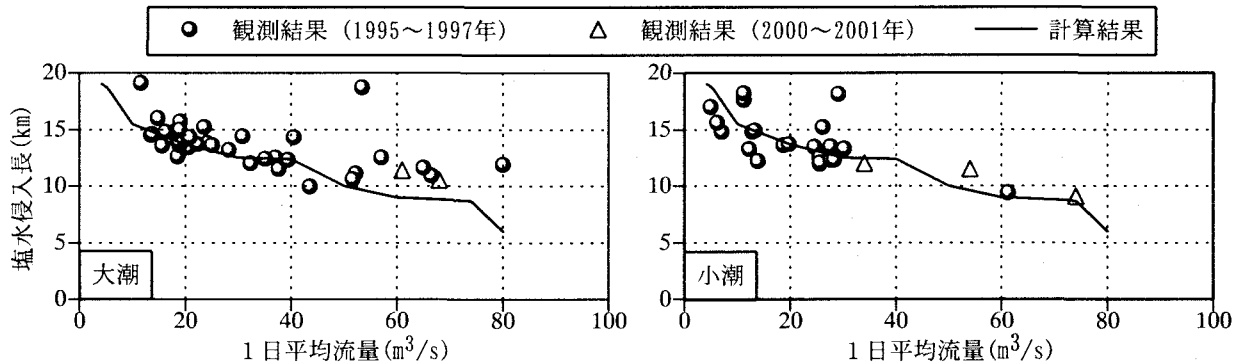


図-6 一日平均流量と塩分遡上距離の関係

ことにより解を求めることが可能である。そのため、実測の h_1 の値を境界条件として与え、4次のルンゲ・クッタ法を用いて数値解析を行った。空間格子間隔を $\Delta x = 100\text{m}$ とし、計算の際に必要な各格子点の水深と幅の値は、500m間隔の実測値を線型補間により与えた。

(3) 二層流数値シミュレーションの結果

1次元二層流計算を行う際に、界面抵抗係数を正確に評価する必要がある。界面抵抗係数の評価について、いくつかの理論的なアプローチが試みられているが、実用的な公式としてクーリガン数 Θ の関数である以下の関係式が提案されている。

$$f_i = a \Theta^{-n} = a \left[\frac{(g \varepsilon \nu)(h_1 W)^3}{|Q_1|^3} \right]^n \quad (3)$$

ただし、 $\Theta = \text{Re}_1 F_{11}^2$ 、 $\text{Re}_1 = U_1 h_1 / \nu$ 、 $F_{11} = U_1 / \sqrt{g h_1}$ 、 ν ：動粘性係数である。定数 n 、 a について多くの提案があるため、那珂川での α 、 n の最適値をフィッティングにより求めたところ、 $\alpha = 0.18$ 、 $n = 0.5$ という組み合わせに対して、実測結果に最も近い計算結果が得られることが分かった。200年2月4日の塩水遡上を対象にした場合の計算結果ならびに比重差が0.015となる点で定義される密度界面の現地観測結果を図-5に示す。各地点の測定時刻は厳密には異なっていること、河床の突起部

では計算上では無視した連行が生じ実際にはその影響が局所的に異なっていること、等の影響は考慮されていないが、 α 、 n をフィッティングにより求めて与えることで二層流計算は、観測により得られた密度界面形状を比較的良好に再現できることが分かる。

4. 塩水侵入長の決定要因についての検討

(1) 日平均流量と塩水侵入長の関係

河川河口域の塩水遡上の程度を規定する主要な要因として一般に河川流量の大きさや河口潮汐の影響が挙げられるが、上述の観測結果から、那珂川河口域の塩水遡上に対して、潮汐変動の影響はそれほど大きくないことが明らかとなった。そこで次に、数値シミュレーションならびに現地観測の結果を用いて、那珂川河口部における塩水侵入を規定する最も支配的な要因と考えられる河川流量と塩水侵入長の関係について調べた。

数値計算において、内部抵抗係数を評価するための係数を $\alpha = 0.18$ 、 $n = 0.5$ と固定し、河川流量を種々変化させて、各河川流量に対する塩水侵入長を算出した。この際、河口における淡水層厚 h_1 は、境界での内部フルード数が2000年の現地観測結果($F_{10} = 0.9$)と同一の値となるように決定した。ちなみに、河口における内部フルード数の値が限界条件である1に近づくと、河口近傍で界面が急激に変化するため、河口における内部フルード数がある程度大きければ、塩水侵入長の計算結果に大

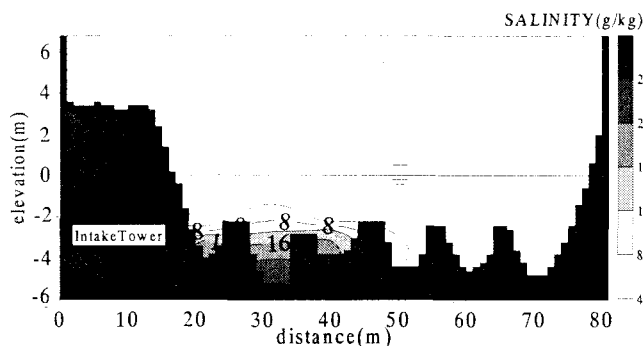


図-7 11.8km上流地点での等塩分濃度線の横断面分布

きな違いは生じないことが確認されている。

塩水侵入長はいずれも満潮時における値であり、著者らによって得られた2000年から2001年までの結果と、1995年から1997年にかけて常陸工事事務所によって得られた観測結果を併せて用いた。また、河川流量には野口観測所の日平均流量を用いた。観測と数値シミュレーションの結果の比較を図-6に示す。

今回適用した数値シミュレーションには、潮汐変動や河川流量の非定常変化の影響が考慮されていないため、図-6の計算結果と実測結果の間には若干ばらつきが見られるが、大まかな傾向性はほぼ一致している。この結果から数値シミュレーションがほぼ妥当なものであることが確認できる。

そこで、数値計算の結果に着目して河川流量に対する塩水侵入長の変化を調べてみると、塩水侵入長は日平均流量の変化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受けた変化を示していることが分かる。特に、河口から9,12km上流地点に存在する比較的大きな河床凸部に塩水侵入の先端が到達すると、河川流量の変化に対して塩水侵入長はかなり緩やか変化しており、河床凸部が有する塩水遡上阻止効果を認めることができる。

(2) 大杉山取水口近傍の塩水侵入状況

前節の結果から、河口12km上流地点に存在する河床凸部が塩水遡上阻止効果を有している可能性が示唆された。2001年2月15日の現地観測では、大杉山取水口近傍の

詳細な塩水侵入状況の観測も同時に行っているため、次にその結果を用いて河床凸部の影響について検討をおこなった。まず、図-7に取水口の存在する河口から11.8km上流地点での等塩分濃度線の横断面分布を示す。この断面では、横断方向に水深は複雑に変化しているが、塩分の分布も横断方向に一律な訳ではなく、最も水深の深い滞筋部を通して塩水が遡上している様子が見て取れる。

一方、図-8は取水口の存在する断面近傍の滞筋に沿った5断面における塩分の鉛直分布の流下方向の変化を示したものである。大杉山取水口のある河口から11.8km上流地点には、海水濃度とほぼ同程度の塩水がかなり厚い層をなして侵入しているのにも拘らず、前節の検討によって示唆されたように、それよりも0.2km上流地点(水郡線の橋脚部)での河床の急激な増加によって、塩水の侵入は完全に阻止されている様子が伺える。また、11.8kmよりも更に下流における河床の突出部において、下層塩水がかなり希釈されていることから、この時、11.8km上流地点に侵入している塩水層は、それ以前に侵入した塩分が取水口近傍の窪みにおいて残存したものであると解釈される。

(3) 河川流量の非定常変化が塩水侵入長に及ぼす影響

4(1)において、日平均の河川流量に対して塩水侵入長の実測結果はかなりばらついてプロットされることが示された。同一の日平均河川流量であっても、最大で8km程度のばらつきが確認できるが、大潮、小潮時の現地観測結果の比較から判断すると、このような差異は潮汐変動の違いというよりも、むしろ河川流量の非定常変化の影響を強く受けたものであると推測できる。そこで、次に河川流量の非定常変化に対する塩水侵入長の応答特性について調べた。図-9は、1996年4月16日から5月2日ならびに1997年4月19日から5月19日にかけての日平均河川流量と塩水侵入量の経時変化を示したものである。

図-9(a)の結果を見ると、4月27日において日平均の河川流量は最小となっているにも拘らず、最大の塩水侵入長はそれ以降の若干流量の大きな4月30日において最大値を取っている。また、比較的短いタイム・スケールで流量が変動している図-9(b)の結果においても、河川流

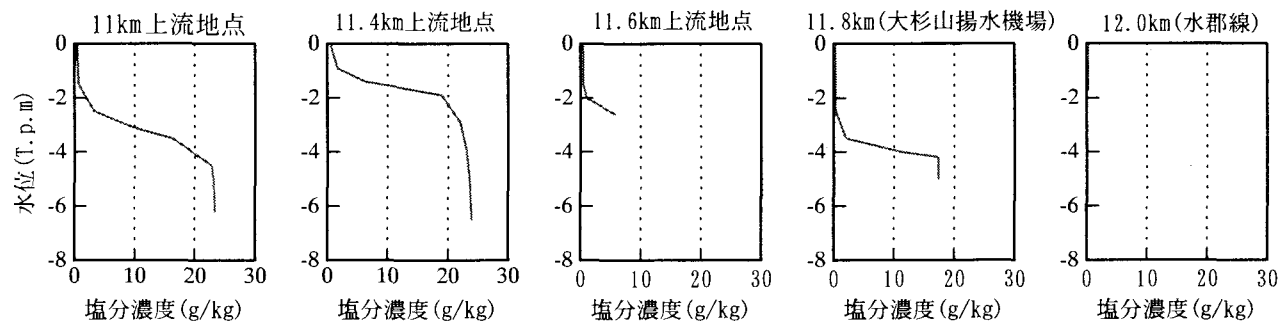
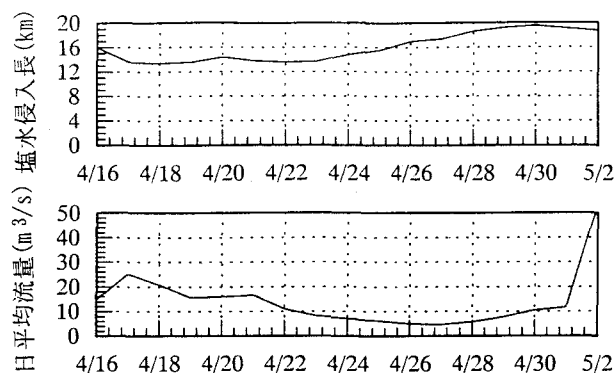
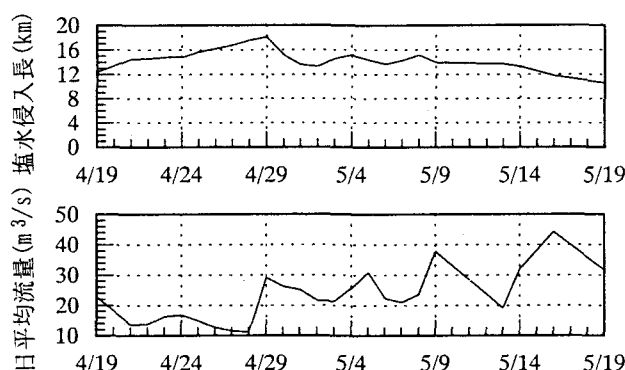


図-8 大杉山取水口(11.8km上流)近傍の5断面の滞筋における塩分濃度鉛直分布



(a) 1996年



(b) 1997年

図-9 日平均流量と塩水侵入長の経時変化

量の極小(大)値と塩水侵入長の極大(小)値とが、必ずしも同時に出現していない様子が見て取れる。以上の結果から、那珂川河口域の塩水侵入長は数日程度の流量変動に完全に追従して変化している訳ではないことが明らかとなった。より定量的な議論を行うために、7~20日程度の区間幅をもつ5サンプルの時系列データについて、25時間移動平均動作を施して潮汐の影響を取り除いた後、河川流量と塩水侵入長の相互相関係数を求めた。その結果、相互相関が負のピーク値を取る遅れ時間が1日から4日程度の範囲で変化すること、すなわち、日平均流量が仮に同一であったとしても、それよりも1日から4日程度前日の河川流量の大小の影響を受けて塩水侵入長は変化していることが確認された。

以上の結果を念頭に、図-6の横軸の河川流量を、日平均流量だけでなく、直前3日から7日間までの平均流量に変化させたと、直前3日間の平均流量を用いた場合に、数値計算の結果を最も良好に対応し、プロットのばらつきも少なくなることが分かった(図-10)。このような結果から判断すると、塩水侵入の程度がほぼ河川流量のみによって規定されているような河口域においても、河川流量の変化に塩水侵入が追従できない場合には、その応答の遅れ時間の影響を加味した上で、取水障害の発生予測を行う必要があると言える。

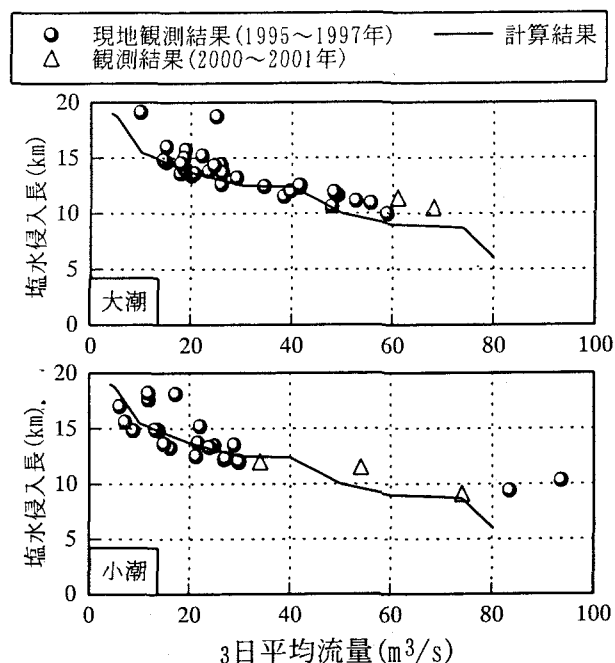


図-10 3日平均流量と塩水侵入長の関係

6. まとめ

本研究では、那珂川河口域の塩水侵入の特性を調べるため、現地観測データと数値シミュレーションにより河川流量と塩水侵入長の関係について考察を行った。この結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 塩水侵入の多点観測の結果、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、潮差の大小は下層塩水の入退に対して支配的に寄与することが分かった。
- 2) 塩水侵入の程度がほぼ河川流量のみによって規定されているような河口域においても、河川流量の変化に塩水侵入が追従できない場合には、その応答の遅れ時間の影響を加味した上で、取水障害の発生予測を行う必要がある。

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、城田健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、金納聡志君には資料提供、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) 福岡捷二・嶋村春夫・鍛冶屋義信・高橋晃・岡田和郎：那珂川における塩水遡上の現地観測，第32回水理講演会論文集，pp. 203-208, 1988。

(2001. 4. 16 受付)