

川内川河口部における塩水遡上について

Study on the Salinity Intrusion in the Sendai River

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*****

By Toshimitsu KOMATSU, Tatsuo UESUGI, Shuangke SUN, Takahiro ADACHI
, Hirofumi MATSUOKA, Norio OWA and Koji ASAI

In the Sendai river which is located in the southwest part of Kyusyu, Japan, the trouble that the salinity concentration of water drawn from the intake is more than the water quality standard of city tap water has sometimes occurred in recent years and it has called people's attention. In this paper, it is made apparent with the use of field data that all the trouble occurred in two or three days after the neap tide and that the fresh water discharge, the M.W.L. in the mouth of estuary and the pattern of tidal curve determine the situation of salinity intrusion and the mixing of salinity with the water taken. Evaluation of these dominant factors makes it possible for us to predict easily whether the trouble will occur or not in the future.

Keywords : salinity intrusion , mixing of salinity , tidal curve , water withdrawal

1. まえがき

川内川は九州西南部に位置し、幹川流路延長137kmに及ぶ九州地方で2番目に大きな河川であり、その流域面積は1600km²、流域人口は約20万人である(図-1)。川内川の河川水は上水、工業用水、農業用水として利用されているが、ここ数年河口より16.6km上流に位置する丸山共同取水口において、時折り上水道基準値である200mg/lを越える高濃度の塩水混入水が取水される(以下、塩水混入と呼ぶことにする)ことが報告されている。このような塩水混入が発生するのは、いずれも河口の潮汐が小潮から2、3日後の若潮時においてであることが分かっているが、若潮時に常に塩水混入が起こるわけではないことから、河口の潮位振幅の変化に加え、河川流量など他の

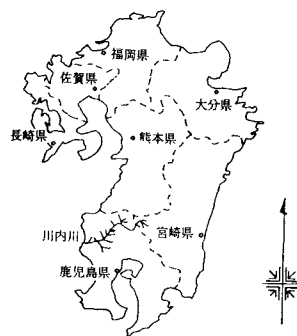


図-1 川内川

-
- * 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)
- ** 正会員 建設省九州地方建設局川内川工事事務所 所長 (〒895 鹿児島県川内市東大小路町1042)
- *** 学生員 工修 九州大学大学院 工学研究科博士課程水工土木学専攻
- **** 正会員 建設省九州地方建設局川内川工事事務所 調査課長
- ***** 正会員 (株)東京建設コンサルタント九州支店 技術第3部部長代理
(〒812 福岡市博多区網場町8-23)
- ***** 正会員 工博 九州大学助手 工学部建設都市工学科

要因が引き金になっているものと考えられる。そこで、この塩水混入の原因ならびに発生メカニズムを調べるための現地観測を行った。

本論文では、得られた実測データの解析から若潮時にのみ塩水混入が発生する原因を究明し、また将来に渡って効率的な利水を行うため、取水時における塩水混入の有無の予測を可能とすることを目的としている。

2. 川内川における現地観測とデータの解析

2-1 川内川における現地観測

川内川では、1992年に取水に塩水混入が初めて発生して以来、この問題に着目し、以下のような現地観測を行っている（図-2参照）。

- 1) 河口より16.6km上流に位置する丸山共同取水口における取水のCl濃度を毎正時計測。
- 2) 河口より12.6km上流に位置する天大橋の橋脚に自動測定装置を設置し、水位及び水深方向3点(上層・中層・下層)の水温とCl濃度を毎正時計測。（1994年6月より現在まで）
- 3) 河口より17.0km上流にある白浜橋の橋脚に自動測定装置を設置し、水位及び水深方向3点(上層・中層・下層)の水温とCl濃度を毎正時計測。（1994年6月より現在まで）

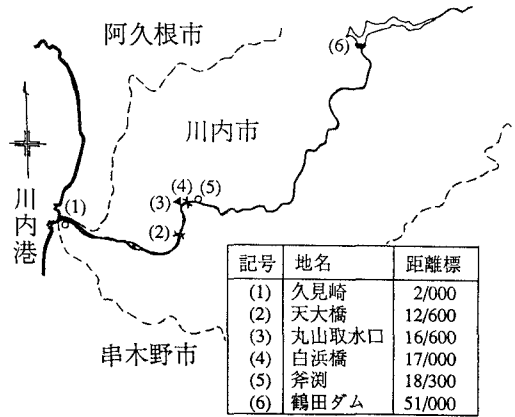


図-2 川内川河口付近

- 4) 若潮である1993年3月3日に、感潮域を対象として流下方向に1km毎にCl濃度水深方向分布（水深方向に5点）を毎正時計測した。
- 5) 1995年2月24日21時～2月25日23時(若潮時)及び1995年3月1日13時～3月2日15時(大潮時)に丸山取水口付近の数地点において、水深方向に0.25m間隔で毎正時のCl濃度の計測を行った。
- 6) 1995年10月12日～10月20日の満潮時及び干潮時に、感潮域を対象に流下方向に16断面のCl濃度水深方向分布(水深方向に10点前後)を計測した。

なお、潮位は河口より1km上流の久見崎検潮所において、河川流量は河口より18.3km上流の斧刈流量観測所において計測されている。

2-2 川内川における流れと塩水遡上の概況

川内川河口における潮位変動は大潮時は干満差が3m弱、小潮時は1m強程度である。若潮時（1995年2/24～2/25）と大潮時（1995年3/1～3/2）の実測より得られた16/700における満潮時と干潮時の塩素イオン濃度の鉛直分布を図-3（図中のz座標は、各測定点の水表面を原点とし、鉛直下向きにとる）に示す。若潮時には大潮時よりも高濃度の塩水が成層状態で侵入していることが分かる。また、水表面の塩分濃度と底面の塩分濃度の比が0.1以下が弱混合、0.5以上が強混合という指標に基づくと、大潮時にはこの比が0.6となり緩混合に近い強混合形態に、若潮時には0.03となり弱混合形態になっていることが明らかとなった。

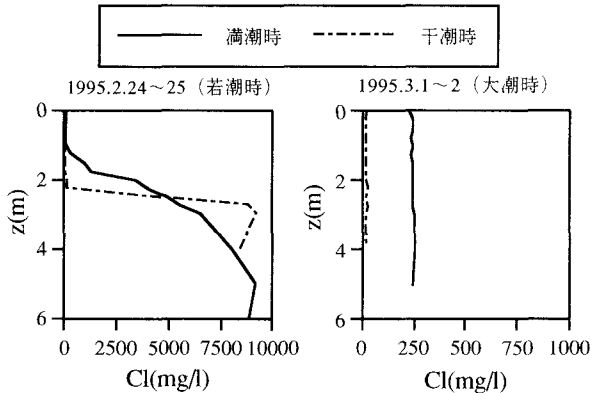


図-3 若潮時と大潮時のCl濃度鉛直分布
（河口より16.7km地点）

次に、1995年10月12日～10月20日(12～15日：中潮、16～18日：小潮、19日：長潮、20日：若潮)の満潮

時の塩水遡上縦断面図をCl濃度5000mg/kgの等濃度線を用いて図-4に示す(図中のx座標は距離標0/000を原点に、上流側を正とする)。中潮時には緩混合状態を示しているが、小潮に近づくに従い塩水は成層化して上流側に遡上しており、小潮から若潮時にかけては丸山共同取水口付近でも下層は濃い塩水で占められ、ほぼ2層状態となっていることが分かる。取水口では上層水が取水できるように選択取水のための工夫がなされているが、微妙なバランスの下で現在取水が行われているといえる。このように川内川では潮位の干満差の大小により、緩混合に近い強混合から弱混合までその様相を連続的に変化させており、その混合状態に応じて塩水の侵入長も決定されている。ただ、干満差以外の要因も効いており、現に1993年3月3日の観測では若潮時であったにもかかわらず緩混合状態が観測され、塩水も河口より12km付近までしか遡上していなかった。

2-3 実測時系列データの解析

塩水混入が生じた1994年9月の久見崎潮位と丸山取水口において取水された水の塩素イオン濃度の1時間毎の時系列データを図-5に示す。干満差の大きい大潮時付近において取水される水の塩素イオン濃度は小さいが、干満差が小さくなるとかなり高濃度の塩水が取水されており、潮位振幅の変動と取水塩素濃度との間にはかなり強い相関があることが示唆される。

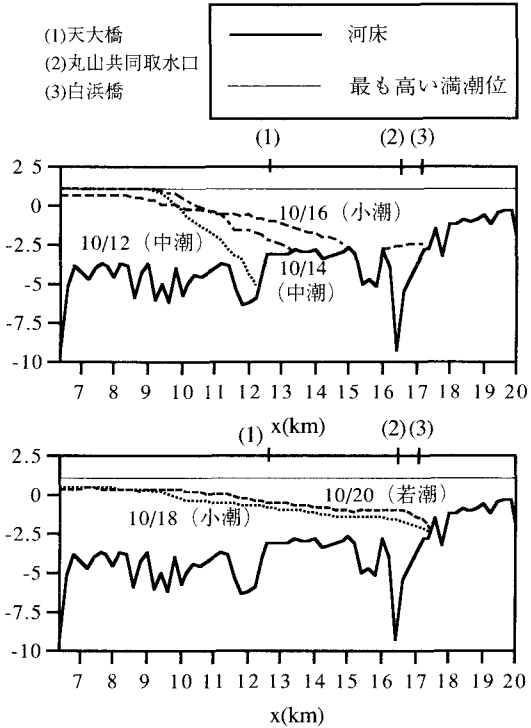


図4 潮位の干満差の変化に対する塩水遡上の変化
(Cl濃度5000mg/kgの等濃度線による)

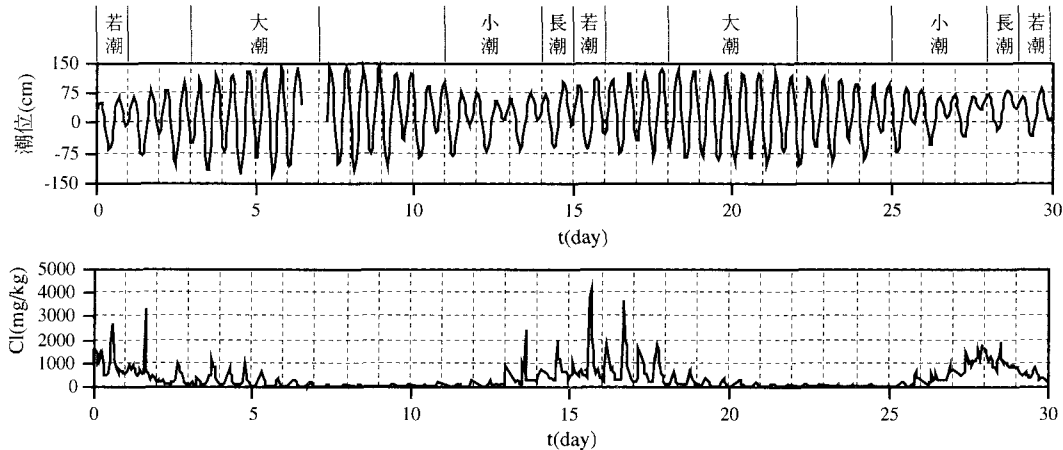


図-5 1994年9月の久見崎潮位と丸山取水口の取水塩素濃度の経時変化

このような干満差と取水塩素濃度の間の関係を定量的に評価するために、大潮から次の大潮までの間で1日の平均的な干満差が最小になる日と取水塩素濃度の1日の平均値が最も大きくなる日を読みとって調べると、取水塩素濃度の大きさにはあまり関係なく、小潮時の干満差が最も小さくなる日から2～3日遅れて取水塩素濃度が最大になることが確認された。そこで、1時間毎の久見崎の潮位データの変動値を2乗し、24時間の時間幅で移動平均して得られた値の平方根Wを干満差の大きさを代表する量とみなし、更に、取水塩素濃度の変動値を同じく24時間の時間幅で移動平均して得られた値CをWに対応する取水塩素濃度として、この

2つの代表量の相互相関係数を求めた(図-6)。遅れ時間 τ がは2～3日のところで相互相関係数 $R_{wc}(\tau)$ は-1に近い負のピーク値をもっており、取水濃度は干満差の変化に対し2～3日程度の遅れをもって逆相関で変化していることが分かる。このことは、図-4の塩水遡上縦断面図の実測結果において10月18日(小潮)よりも10月20日(若潮)のほうが塩水侵入長が長くなっていることから確かめられる。

次に、河口より12.6km上流に位置する天大橋の下層(T.P. -2.58m)と上層(T.P. 0.90m)で測定された塩素濃度の変動値の24時間幅の移動平均値をCb,Csとする。干満差の代表量WとCb,Csの間の相互相関係数 $R_{wCb}(\tau)$, $R_{wCs}(\tau)$ を求め図-7に示す。天大橋の下層の塩素濃度も丸山取水口での取水の塩素濃度と同じく干満差の変化に対し遅れをもつが、その遅れは1～2日程度であり、丸山取水口の塩分濃度の遅れより1日程度短いことが分かった。また河口から17km上流の白浜橋地点下層の塩素濃度と干満差の関連についても解析を行ったが、天大橋と同様の結果が得られ、その遅れは1～2日程度であった。一方、 $R_{wCs}(\tau)$ は遅れ時間 τ が -0.5日程度で1に近い正のピーク値をもつことから、天大橋付近の上層の塩素濃度は潮位振幅の変化とはほぼ同位相で変化していることが分かる。潮位振幅が大きくなって入退潮による混合が強くなると(大潮時)、緩もしくは強混合状態に移行し塩水侵入長は短くなるが、河口より12.6kmで丸山に較べるとずっと河口寄りの天大橋付近では大潮時でも十分塩水の到達域に入っているため、混合により底層塩水が巻き上げられて上層の塩素濃度は高くなる。逆に、潮位振幅が小さくなると(小潮時)、弱混合となって成層化が進み、上層水は淡水化するため塩素濃度は低下することになる。

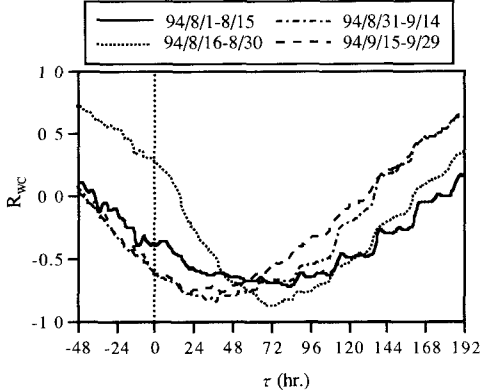


図-6 干満差の代表量Wと取水塩素濃度の代表量Cの間の相互相関係数 R_{wc}

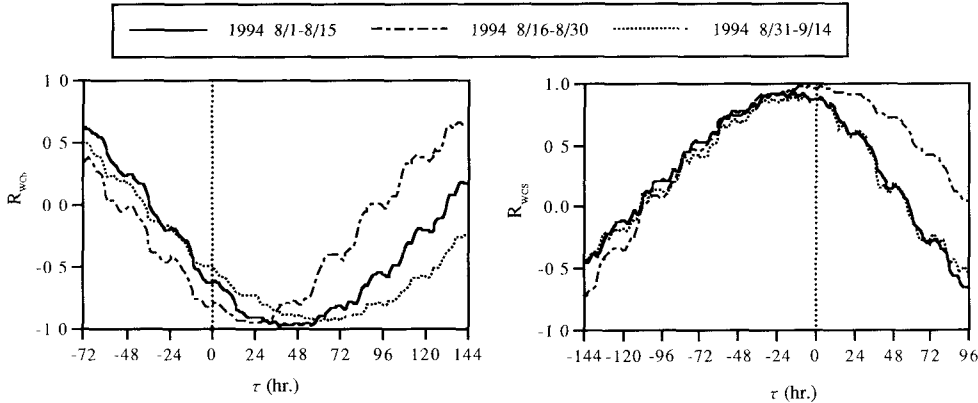


図-7 干満差の代表量Wと天大橋(12.6km)の底層、上層の塩素濃度変動の間の相互相関係数 R_{wCb} , R_{wCs}

2-4 干満差の変化よりも塩水侵入長の変化が遅れる理由に関する考察

他の条件は同一で海域の潮汐の干満差のみを種々変化・固定させて感潮河川河口部の実験を行い、準定常状態になったときの塩水侵入長を比較すると、弱混合から緩混合の範囲では干満差が小さいほど塩水侵入長は長くなる²⁾。しかし、現実には潮汐の干満差は日々変化しているため、実際の塩水侵入は必ずしもそのときの干満差に対応した準定常状態の塩水の侵入状態とは一致しない。干満差が変化した後の侵入長の変化に対しては、流体の実質部分が変化に応じて入れ替わらなければならないため、実際の塩水侵入長は遅れて追隨することになる。従って、小潮時になっても準定常状態では既に侵入しているはずの地点までは塩水はまだ遡上しておらず、小潮時を過ぎて潮汐の干満差が大きくなり始めても、依然として、塩水は上流側に遡上し続けることになる。その後、準定常状態で実現されるべき塩水侵入長が減少し始めるため、小潮時より1～2

日遅れて両者は一致し、ほぼその時点で塩水侵入長は最大となる(図-8参照)。同様のことが弱混合から緩・強混合へと変わっていく大潮時付近についても生じ、結局、干満差の変化に対し塩水侵入長は1～2日遅れて変動することになる。

2-5 塩水混入の発生要因と判定条件

以上の考察により川内川では小潮時より1～2日遅れて塩水が最も上流まで侵入し、更に、1日程度遅れた時点で塩水が取水口に最も混入しやすいということが明らかになった。塩水の最大侵入時から1日程経過すると侵入下層塩水は後退を始めて、内部境界面が不安定となってくる。その結果、下層の塩水が巻きあがり易くなるため、上層の選択取水にもかかわらず下層からの混入が生じることになるものと思われる。しかし、塩水混入は若潮時に常に発生するというわけではなく、何の問題も起こらない若潮の場合も多い。従って塩水混入の発生は、潮汐だけでなく他の要因の影響も受けていると思われる。これまでの実測結果より塩水混入の発生には季節的な偏りはあまり見られないことから、水温の影響はほとんどないと考えられる。やはり、河川水流量と海域における平均水位ならびに潮汐変動のパターンが川内川の塩水侵入ならびに取水口への塩水混入を規定する支配的な要因と思われる。河川水流量の代表値として、若潮の日直前3日間の河川水流量の平均値 $Q_f(m^3/s)$ を用いる。また、海域の若潮時の潮位変動については図-5の観測値に見られるように双子山(谷)となることが多く、この変動パターンが塩水混入に大きく影響すると思われる。例えば図-9の模式図において、 H_1, H_2 が H_3, H_4 に較べて小さければ、一点鎖線で示されるような周期2倍の潮汐変動に近づくことになり、高潮位の継続期間が長くなるため塩水侵入を大きく助長することになる。そこで、潮汐変動パターンの日潮不等の程度を表すパラメータとして $\beta \equiv (H_1+H_2)/(H_3+H_4)$ を導入する。 $\beta \rightarrow 1$ で通常の正弦波に近い波形、 $\beta \rightarrow 0$ で合体した倍周期の変動を表す。更に、潮汐変動の干満差の1日の平均値を $A(cm)$ 、海面の1日の平均水位を $H_0(T.P.cm)$ とする。

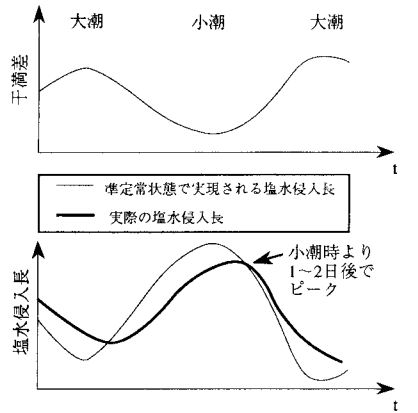


図-8 干満差の変化に伴う塩水侵入長の変化の模式図

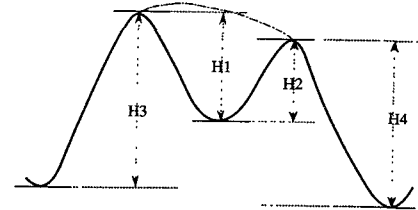


図-9 日潮不等の模式図
($\beta \equiv (H_1+H_2)/(H_3+H_4)$)

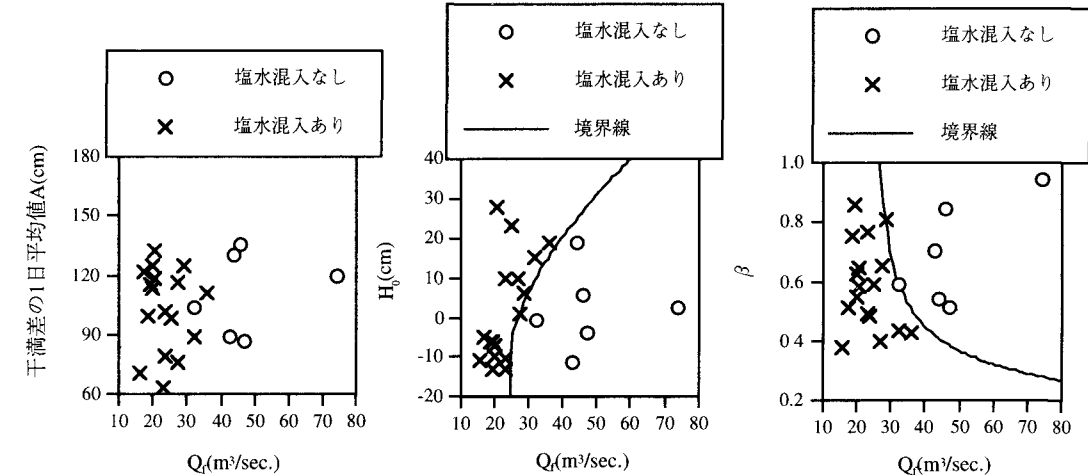


図-10 塩水混入の有無と Q_f, A, H_0, β との関係

まず、横軸を Q_f 、縦軸を A, H_0, β として、若潮時付近における塩水混入の発生(取水塩素濃度の1日平均値が200mg/l以上)の有無をそれぞれplotして図-10に示す。潮位の干満差と塩水混入の発生の間にはあまり顕著な関係性はないということが分かる。このことは若潮時に干満差に若干の違いがあっても、塩水侵入の状

態を大幅に変えるほどの効果はないことを示している。
一方、 Q_t - H_0 、 Q_t - β の図では塩水混入の発生の有無の間に明瞭な境界が存在していることが認められ、平均水位 H_0 が高い程、また β の値が低い程塩水混入が起こりやすいことが分かる。式化すると、 Q_t - H_0 図上の境界線は、

$$H_0+10=5.86(Q_t-25)^{0.6} \quad (1)$$

Q_t - β 図上の境界線は、

$$\beta=1.33(Q_t-25)^{0.4} \quad (2)$$

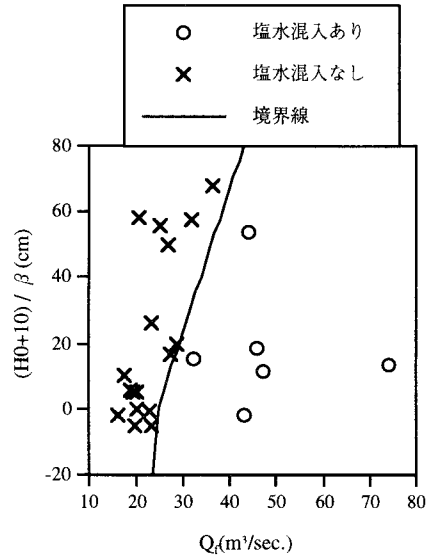
で近似できることから、 H_0 、 β 、 Q_t という3つの水理条件の間には、式(1),(2)より

$$(H_0+10)/\beta=4.4(Q_t-25) \quad (3)$$

なる関係があることが分かる。

(ただし、 $Q_t < 25(\text{m}^3/\text{sec.})$ のときは、いかなる H_0 、 β に対しても塩水混入が発生する可能性が高い)

($H_0+10)/\beta$ と Q_t との関係を図-11に示す。 H_0 、 β 、 Q_t という3つの水理条件を用いると、若潮時の塩水混入の有無を精度良く判別できることが分かる。従って、調和解析で海域の平均水位ならびに潮汐の変動パターンを、また、水文学的方法で河川流量を予測すれば、図-11を用いることにより、今後の若潮時における塩水混入の有無を推定することが可能となる。



3. 結論

本研究の結果、川内川の塩水遡上ならびに取水の塩水混入に関し以下のことが明らかとなった。

1) 干満差の変化にともない川内川では混合形態が小潮時の弱混合から大潮時の緩(強)混合へと変化し、それに応じて塩水侵入長も著しく変化する。干満差一定の準定常状態では成層度が強く混合の程度が弱い程塩水侵入長は大きくなるが、干満差が1日1日変化する非定常の場合は対応する準定常状態の場合の塩水侵入長とは一致せず遅れて追従する。従って、川内川においては、潮汐の干満差の最も小さい小潮時よりも1~2日遅れて塩水侵入長は最大となる。

2) 小潮時からの時間の経過による干満差の増加に伴って、内部界面が不安定となり鉛直混合が大きくなってくため、丸山取水口付近の比較的上層の塩分濃度は、塩水侵入長が最大となる時よりも1日程度遅れて最大値をとる。このため、丸山取水口への塩水混入は小潮時から2~3日遅れた若潮時に最も可能性が高くなる。

3) 若潮時の丸山共同取水口での取水濃度は、河川水流量、海域の平均水位、潮汐変動のパターンに依存しており、これらの量を用いた塩水混入の有無の予測が可能となった。ただし、図-11の判定条件は実測時と同じ状態の取水設備に対してのみ適用可能であり、取水設備の改良等により上層選択取水の効率が向上すれば、図-11の判定条件もまた修正されなければならない。

最後に、本研究の遂行にあたり多大な援助をお願いした建設省川内川工事事務所、坂元浩二係長、(株)東京建設コンサルタント九州支店、鶴田芳昭氏、九州大学工学部建設都市工学科藤田和夫、柴田敏彦両技官に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 川内川塩分遡上関連資料：川内川工事事務所調査課。
- 2) 安達貴浩・小松利光・孫双科・柴田敏彦・藤田和夫：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。