

川内川における塩水遡上の人工的制御に関する研究

小松利光* ・上杉達雄** ・安達貴浩***・松岡弘文****
坂元浩二*****・大和則夫*****・朝田 将*****

1. 緒 言

川内川は九州西南部を流れ、20万人の流域人口を擁する九州地方で二番目に大きな河川である。この川内川の河口より16.6 km 上流に位置する丸山共同取水口において、ここ数年若潮時に時折り上水道基準値の200 mg/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）事態が発生している。川内川流域の住民生活や産業活動は水資源の多くを丸山共同取水口からの取水に依存しており、塩水混入は早急な対策が要求される問題となっている。

これまでに塩水侵入を軽減する方法として気泡噴流を用いる方法が提案されている（佐々木・浅枝（1993））が、小松ら（1996b）はこの方法が実際弱混合形態での塩水侵入を軽減するのに有効な手法であることを室内実験により明らかにした。気泡噴流を用いる方法は河川の流下能力を低下させることなく塩水侵入を軽減できるため、治水の面においても問題を抱える河川に対して有効な手法である。ところで、丸山共同取水口は塩水侵入ならびにその結果として生じる塩水混入に対し微妙な位置に存在しており、塩水侵入をわずかに軽減するだけで取水口への塩水混入を防ぐことが可能であると判断されたため、1995年11月、気泡噴流を用いた現地試験を川内川において行った。

本論文では、まず、1992年以来実施されている現地観測の結果より得られた通常時の川内川の塩水侵入特性について述べ、次に、気泡噴流を発生させた場合の現地の観測データから、気泡噴流による塩水侵入軽減法の実河川での有効性について検討を行う。

- * 正 会 員 工 博 九州大学教授 工学部建設都市工学科
- ** 正 会 員 建設省九州地方建設局河川情報管理官（前川内川工事事務所長）
- *** 学生会員 工 修 九州大学大学院工学研究科博士課程水工土木工学専攻
- **** 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 建設省九州地方建設局川内川工事事務所計画係長
- ***** 正 会 員 (株)東京建設コンサルタント九州支店技術第3部長代理
- ***** 学生会員 九州大学大学院工学研究科修士課程水工土木工学専攻

2. 川内川における塩水遡上の概況

川内川の現地観測及びその結果については、既に小松ら（1996a）により報告がなされているので、ここではその概要だけを記すことにする。

川内川工事事務所では1992年に取水に塩水混入が初めて発生して以来、この問題に注目し、図-1に示す地点及び測定項目について自動測定器を設置し、連続観測を行っている。更に、塩水侵入の詳しい状況を知るために、いくつかの補足的な現地観測を行っている。

1995年10月14日～10月20日（14～15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の状況を塩素濃度10000 mg/kg、1000 mg/kg、100 mg/kgの等濃度線を用いて図-2に示す（ただし、図中のx座標は距離標0/000を原点に、上流側を正とする）。潮汐の干満差が比較的还是大きい中潮時には緩混合形態を呈し、高濃度の塩水は丸山取水口付近まで到達していないが、干満差の小さい小潮に近くなると、高濃度の塩水が成層状態で取水口付近の下層部にまで遡上・到達していることが分かる。このように、川内川では潮汐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、これに対応して上流側への塩水侵入状況も大きく変化している。但し、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12 km 付近までしか遡上していなかったことを考慮すると、上流側

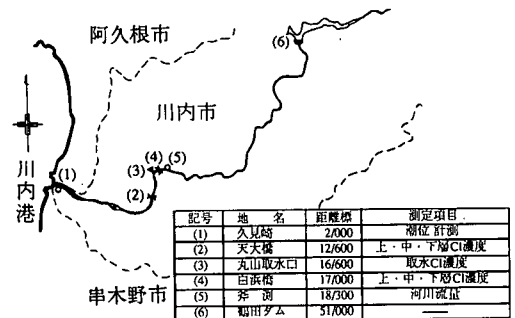


図-1 川内川河口付近

への塩水侵入の程度は干満差の大小だけでなく、他の要因によっても規定されていると考えられる。

3. 気泡噴流の現地実験

3.1 実験概要

現地観測より、川内川では小潮に向って潮汐の干満差が小さくなると、弱混合形態となって上流にまで塩水が遡上し、これに対応して取水濃度も変化することが分かった。従って塩水侵入が長ければ長いほど、高濃度の塩水が丸山取水口へ混入する可能性が高まることになる。

これまでの研究により、河床にマウンドを設置すると塩水侵入を著しく軽減できることが明らかとなっている。しかしながら、川内川は元々流下能力が低く、利水のみならず治水の面でも問題を抱えているため、マウンドのように河川の流下能力を更に低下させる方法は好ましくない。

小松ら (1996b) は、川内川と同程度の内部フルード数の下で室内実験を行い、弱混合河川の下層底部より気泡噴流を発生させて塩・淡水を強制混合することにより、局所的にでも内部重力の効果を減少させれば塩水侵入を軽減できることを明らかにした。気泡噴流は河川流下能力を低下させる恐れがなく、川内川のような河川にも適した塩水侵入軽減法と考えられるため、1995年11月以降河口から12.4 km 上流に位置する天大橋付近の河床から河幅方向に渡り一様に気泡を発生させる現地実験を行った。

気泡の発生条件は、予備実験により最も成層が安定した場合にも気泡発生断面の塩・淡水を水深方向に十分混合できると判断された総気泡量 330 l/s、吐出圧力 12 kgf/cm² に固定した。気泡発生装置としては低水路の全川幅 (150 m) に渡って内径 50 mm の白ガス管が敷設されており、2.5 cm ピッチで設けられた直径 2 mm の透孔を通してコンプレッサーから供給された空気を噴出させている。図-3 は気泡噴流発生状況写真である。

現地実験に先立って、1995年10月13日の中潮から10月20日の若潮にかけて満・干潮時に流下方向16断面の塩素濃度の水深方向分布 (水深方向に10点前後) の計測を行っているが、この事前調査時と水温及び潮汐の変動のパターンがあまり変わらない1995年11月11日の中潮から11月18日の若潮までの8日間 (図-4) にわたり、気泡噴流を発生させて塩水侵入状況を観測した。なおこの現場実験のデータの解析から気泡噴流の効果が確認できたこと、またその後少雨傾向が続き川内川の河川流量が減少したため塩水の再度の混入が危惧されたことから、1995年の年末以降も気泡噴流を発生させて追加調査を行っている。

3.2 気泡発生断面の決定

これまで、準定常状態の室内実験により、気泡発生断面はその上流側の塩・淡水を十分混合できる範囲では、下流側であればある程効果的であるが、塩水侵入抑制効果が現れるまでに長い時間を要するという知見が得られている。大潮・小潮で干満差が大きく変化する実河川では非定常性が強いいため、速やかに現れる気泡噴流の効果

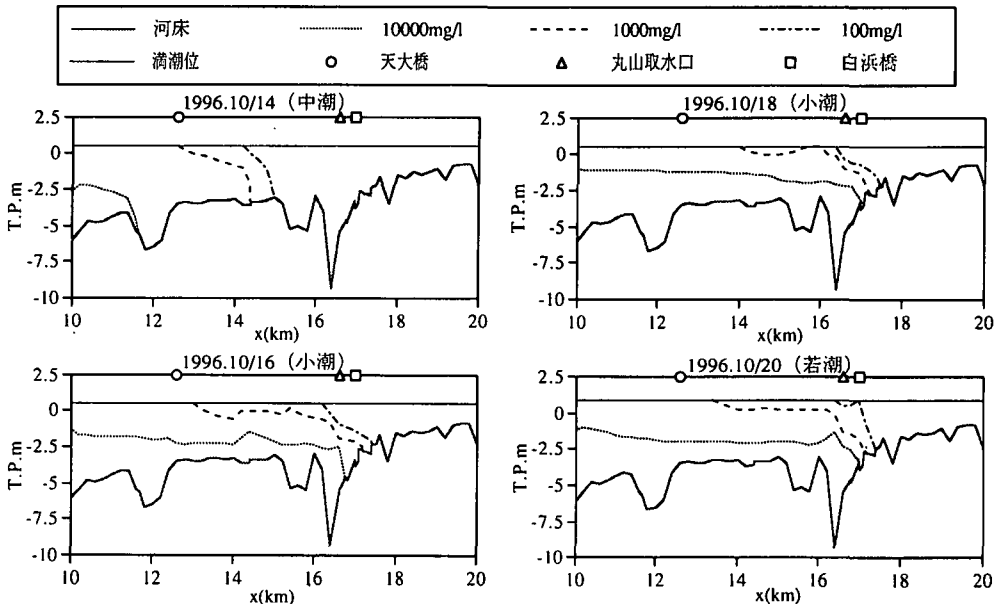


図-2 潮位の干満差の変化に対応した塩水遡上の変化



図-3 気泡噴流の現地実験の状況
(手前が天大橋)

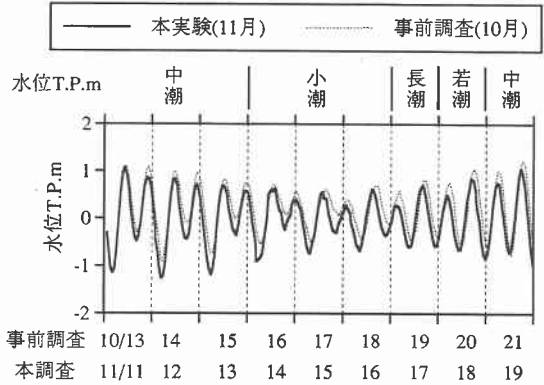


図-4 10月の事前調査時及び11月の気泡噴流発生時の久見崎における潮汐変動

しかしその実効は期待できない。その意味では気泡発生断面は上流側で取水口近くに位置する方が望ましいということになる。しかし、気泡発生断面があまり取水口に近くなりすぎると、気泡噴流の鉛直混合効果の影響が無視できなくなり、選択取水を行う上で新たに問題が出てくる。これらの問題を考え併せると、最適な気泡発生断面を特定することは容易ではない。

川内川では10000 mg/kgの等濃度線に代表されるような高濃度塩水塊が、下流から成層をなして丸山共同取水口付近まで侵入してくると、塩水混入が生じる可能性が高くなる。この高濃度塩水が侵入・成層化した後に気泡を発生させるよりも、高濃度塩水塊の先端部が侵入時

に気泡のカーテンを通過しなければならないように気泡噴流を設定して、上流側での成層化をできるだけ遅らせる方が塩水侵入の軽減により効果的であると考えられる。気泡発生を開始した11月11日にもし気泡の発生がなければ、10月13日とほぼ同様の塩水侵入状況を呈したと考えられる。この10月13日において、10000 mg/kgの高濃度塩水塊は、河口より12 km程度にまでしか到達していない。更に、気泡発生装置を構成する機器や燃料等を運搬する際、道路が近くにあると非常に好都合であることなどを考慮し、今回は天大橋付近の河口より12.4 kmの断面において気泡を発生させることにした。

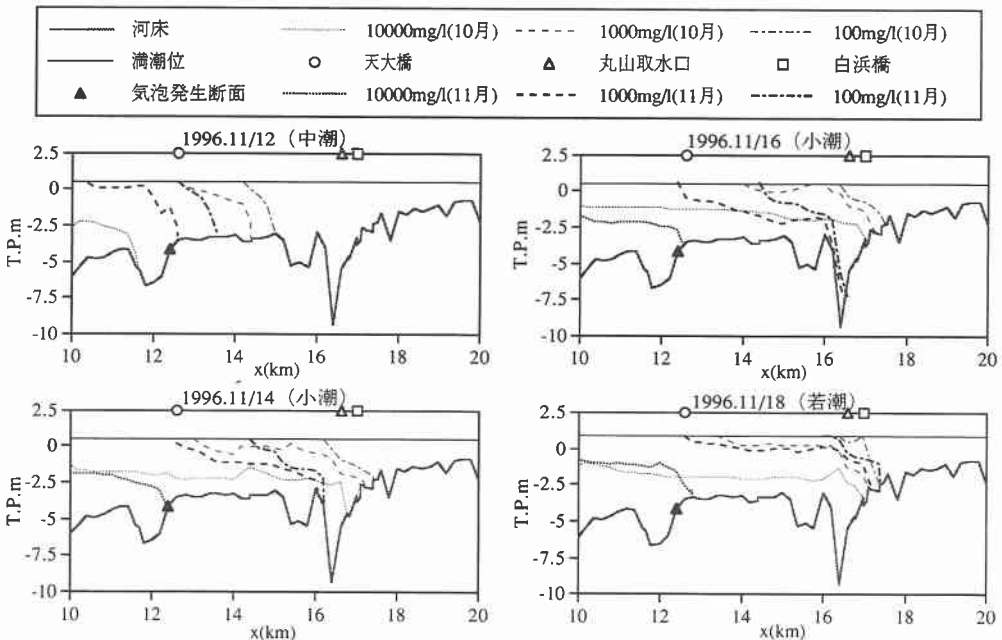


図-5 気泡発生による塩水侵入状況の変化

3.3 現地実験の結果

気泡発生の有無による塩水侵入状況の違いを明らかにするため、実測結果の一例として、図-5に小潮初日の前々日の中潮時、小潮1日目及び3日目ならびに若潮時の満潮時における10000 mg/l, 1000 mg/l, 100 mg/lの等塩素イオン濃度線の分布を示す。いずれも、気泡発生のある場合には気泡発生断面付近で塩素イオン濃度が急激に変化し、河川上流側への塩水侵入が軽減されていることが分かる。但し、気泡発生断面において塩・淡水を水深方向に十分混合しても、上流側にある程度塩水侵入長が長くなると再び成層化していることが認められる。

丸山共同取水口における取水塩分濃度の経時変化を事前調査と本実験と比較して図-6に示す。11月の本実験では気泡噴流の効果により取水中の塩分濃度の上昇は10月に較べると大幅に遅れ、その値も低く抑えられている。

以上の結果から、気泡噴流の発生が塩水侵入に抑制効果を与えていることが分かる。しかしながら、図-4の潮汐変動や図-7の河川流量は共に全般的には事前調査時と気泡発生時でほぼ等しいが、完全に一致している訳ではないため、単純な比較からは気泡噴流の効果のみを正確に抽出することはできない。小松ら(1996a)は、若潮時における丸山共同取水口の取水濃度が若潮の日の直前3日間の河川流量の平均値 Q_f (m³/s)、海域の1日平均水位 H_0 (T.P.m)、図-8で定義される潮汐変動パターンの日潮不等の程度を表す無次元パラメータ β に規定されていることを見出し、以下の式を用いて塩水混入の有無を予測することを可能とした。

$$\begin{cases} \frac{H_0+10}{\beta(Q_f-25)} < 4.4 & \text{のとき、塩水混入なし} \\ \frac{H_0+10}{\beta(Q_f-25)} > 4.4 & \text{のとき、塩水混入あり} \end{cases}$$

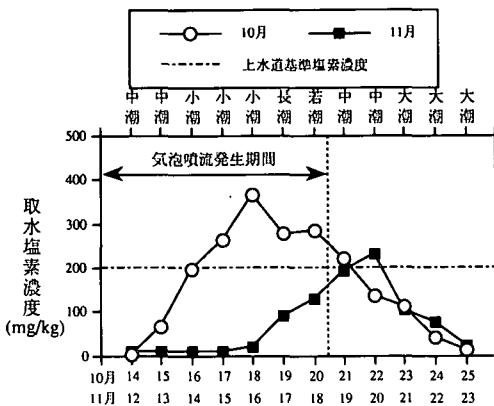


図-6 事前調査と本調査の丸山取水口における取水塩素濃度の経時変化

(ただし、 $Q_f < 25$ (m³/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。)

この判定基準を適用すると、10月20日及び11月18日はいずれも塩水混入が起ると予測された(図-9)。気泡を発生させなかった10月20日は実際に塩水混入が起って判定通りであったのに対し、気泡を発生させた

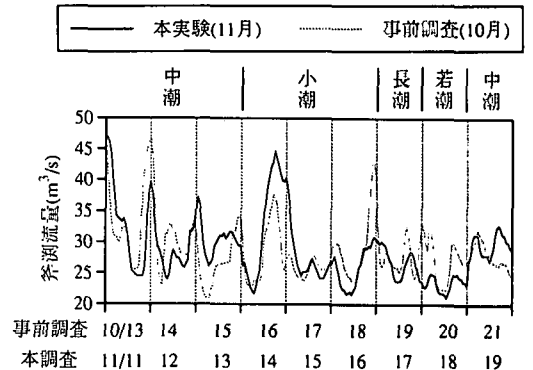


図-7 事前調査時と本調査時の斧刈における河川流量の比較

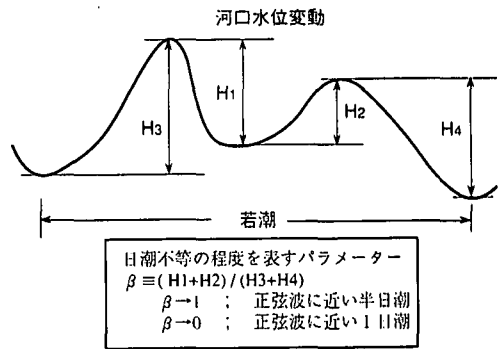


図-8 日潮不等の程度を表す β

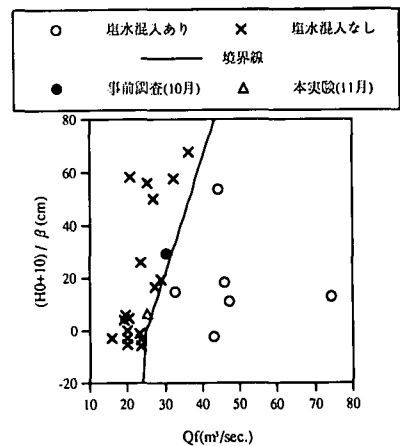
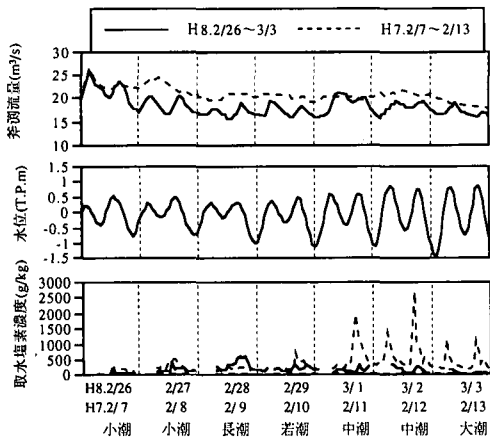


図-9 塩水混入の有無と $(H_0+10)/\beta, Q_f$ の関係



図一10 1995年及び1996年2月の川内川河川流量、河口潮汐変動、丸山取水口取水塩分濃度の経時変化

11月18日の調査では塩分混入はほとんど認められなかった。このことは、11月18日の若潮時において、気泡噴流がなければ、丸山取水口に塩水が混入する程度に高濃度の塩水が上流側へ侵入しているはずであったが、気泡噴流の効果により塩水侵入長が軽減され、その結果丸山取水口への塩水混入が阻止されたということを示している。

また、若潮を過ぎた11月19日に気泡発生を停止させたが、これと同時に比較的濃い塩水が上流側へ侵入しはじめたことが観測されている。通常は、若潮を過ぎる頃は塩水侵入長はしだいに短くなる時期に当たることを考慮すると、気泡噴流により塩水侵入が軽減されていたことが分かる。

ところで、図一5の塩水侵入状況の比較では潮汐変動、河川流量共に事前調査時と本実験時で完全に一致している訳ではなかったために正確な比較ができなかったが、潮汐変動に関しては1年余り(384日)前の潮汐変動ときれいに一致することが分かった。そこで気泡を発生させている1996年2月26日～3月3日の川内川河川流量、河口潮汐変動、丸山取水口取水塩分濃度を1995年2月7日～2月13日のデータと併せて図一10に示す。この期間中の斧淵における河川流量は気泡を発生させている1996年の方が全般的に少ないにもかかわらず、取水中の塩分濃度は1995年と較べると低く抑えられており、気泡噴流の塩水侵入抑制効果が再度確認できる。

4. 結 語

本現地観測の結果、川内川の塩水侵入状況ならびに塩

水遡上に対する気泡噴流の抑制効果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大潮時の緩(強)混合から小潮時の弱混合へと変化し、それに応じて塩水侵入長も著しく伸びてくる。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にすぐ到達する訳ではなく遅れて追隨する。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いくため、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) 川内川において気泡噴流の現地実験を行った結果、室内実験と同様に気泡噴流が塩水楔を破壊して淡水と混合させ密度差を減少させるため、塩水の上流側への侵入を軽減する効果があることが明らかとなった。

4) 塩水侵入長がある程度長くなると、気泡発生位置で水深方向にほぼ一様に混合された塩・淡混合水が、その後上流側において再び下層に潜り込んで成層化することが確認されている。このことから、長潮時から若潮時にかけて特に塩水侵入長が長くなる時期に、上流側のもう1断面で気泡を発生させれば塩水侵入長の更なる減少が期待できる。

最後に、本研究を遂行するに当たり、多大なご協力を頂いた建設省九州地方建設局川内川工事事務所の方々、(株)東京建設コンサルタント九州支店鶴田芳昭氏、鹿児島建設コンサルタント(株)新満恵氏、西松建設(株)松永英伸氏、九州大学大学院小橋乃子氏に深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 佐々木威之・浅枝 隆 (1993): エアーカーテンによる河道内塩水進入制御の機構, 環境システム研究, Vol. 21, pp. 335-339.
- 小松利光・上杉達雄・孫 双科・安達貴浩・松岡弘文・大和則夫・朝佐孝二 (1996a): 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, pp. 493-498.
- 小松利光・孫 双科・安達貴浩・川上義幸・米須清彦 (1996b): 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, pp. 517-524.