

川内川の塩水遡上対策について¹

下田五郎²・星田和彦³・松岡弘文⁴・小松利光⁵

By Goro SHIMODA, Kazuhiko HOSHIDA, Hirofumi MATSUOKA and Toshimitsu KOMATSU

1. はじめに

川内川は九州南部・鹿児島県の北西部に位置し、幹川流路延長137km に及ぶ九州地方で2番目に大きい一級河川であり、その流域面積は1600 km²、流域内人口は約20万人である（図－1）。

川内川の河川改修は、昭和6年より直轄事業として始められ、過去に幾たびもの豪雨災害を被りながら営々と進められてきている。平成8年度末までの完成堤防整備率は63%、確率降雨1/30に相当する洪水の流下可能な河道整備率は56%程度である。

現在は、第9次治水事業五箇年計画に基づき、川内市街部の大規模な引堤事業や上流部の浸水被害常習地域での捷水路事業及び無堤箇所解消、内水被害の軽減などの対策を鋭意進めているところである。

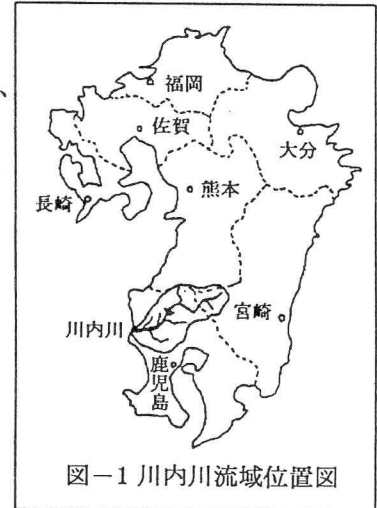
一方、利水面で河川水は上水・工業用水・農業用水に多く利用されており、社会の産業活動と生活に不可欠なものとなっている。しかし、近年、下流部の感潮区間内で河口より16.6km上流に位置する「丸山共同取水口」では、塩水の遡上によって、取水された河川水に上水道の基準値である200mg/ℓを上回る濃い塩水が混入するという取水障害が発生している。

この塩水混入は、丸山共同取水口が完成（昭和63年3月）した後の平成4年9月を始めとし、現在でも流況が悪化すると断続的に発生している。特に平成6年は全国的な異常渇水と相まって、河川水に依存している製紙会社の生産活動や市民の日常生活などに深刻な影響を及ぼしていた。

これらの状況より利水者の緊急的な対策はもとより、河川管理者としても、流水の正常な機能の維持・確保の面から塩水遡上対策を講じることが急務な課題となっていた。

そこで、塩水遡上のメカニズムの特異性に着目し、エアレーション（気泡噴流）で塩水楔を混合させ、人工的に塩水遡上を抑制する方策を考え現地河川にて実施し、初期の目的を果している（写真－1）。

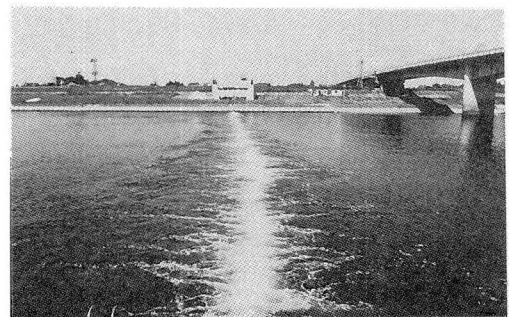
本論文では、エアレーション方式を採用するに到るまでの室内、現地実験結果及び抑制効果などについて述べるものである。



図－1 川内川流域位置図

2. 塩水遡上の背景

川内川の感潮域における塩水遡上は、河口部が寄洲でやや閉塞状態になっていた以前より発生していた。昭和40年代より、川内港湾整備計画に基づく右岸導流堤の新設や、左岸の防砂堤が昭和53年～54年に完成した後、河口の砂利採取により完全に河口閉塞は解消された。しかしながらこれに



写真－1 エアレーションによる塩水遡上対策中

1 キーワード：河川、塩水侵入、環境

2 建設省九州地方建設局 川内川工事事務所長

3 建設省九州地方建設局 川内川工事事務所技術副所長

4 建設省九州地方建設局 川内川工事事務所調査課長（〒895 川内市東大小路町1042）

5 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科

よって、塩水の遡上はかなり助長されている。

一方、川内市街部の河川改修は、昭和62年度より計画高水流量 $Q=7,000\text{ m}^3/\text{S}$ に対して、第Ⅰ期事業目標流量 $Q=5,000\text{ m}^3/\text{S}$ を安全に流下させるために、河床掘削や低水路の拡幅などを本格的に実施し、平成6年度に完了している。河床掘削は計画河床高+1.0m止まりで、下流から上流へと浚渫した。河床の掘削深さは1~3m程度であった。この河床掘削も塩水遡上を助長した要因の一つであると考えている。

3. 塩水遡上の要因とメカニズム

3.1 塩水遡上の要因

川内川河口部の潮位変動は、大潮時には干満差が約3m、小潮時には約1m程度で月齢によりほぼ15日間を1周期として変化しており、この潮汐と塩水遡上には密接な関係がある。海域からの塩水は、潟水期で河口から約17km地点の右支川樋渡川の合流点付近まで遡上している。但し、潮汐によって遡上距離は異なってくるが、特に小潮後の若潮時（陰暦の11日、26日に当たる。）に最も上流まで遡上している。その上流端は、東郷橋付近まで（約18km²）及んでいる。

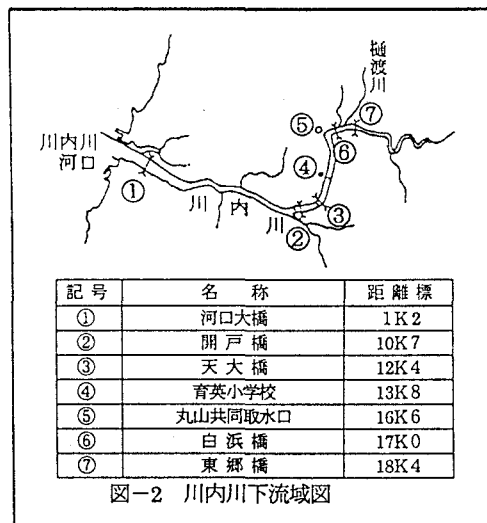
川内川での塩水遡上の要因（形態）には、次のような特徴がある。

- ①混合形態は、小潮時に「弱混合型」を呈し、大潮時に向かって「緩混合型」から「強混合型」に変化していく。
- ②中潮時から小潮時へと潮汐差が小さくなっていくと、『塩水楔』が形成（成層化）され徐々に塩水の遡上距離が伸びていく。
- ③若潮時頃（最小潮から2~3日後）に潮位の振幅の増加にともなって、塩水楔上流域の流体の混合が促進され、塩水楔の界面が不安定な状態になる。この時、川内川右岸16km6にある「丸山共同取水口」前面の表層部の塩水濃度が最大となり、かつ、塩水遡上距離も最大となる。
- ④更に、大潮に向かって潮汐運動が大きくなると、塩水塊フロント部からの鉛直混合が促進され「緩混合型」に移行し、塩水遡上はしだいに低減していくこととなる。
- ⑤表面の塩水濃度と底面の塩水濃度の比が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で緩混合に近い強混合形態になる。若潮時には0.03となり弱混合形態になっている。

又、塩水遡上の強弱を支配する要因としては、潮汐のパターンと潮位の程度、それと河道の形状と河川の固有流量の多少に支配されている。丸山共同取水口地点は、塩水楔の上流端部に位置しており、塩水の影響を微妙に受けるところにある。

3.2 「塩水楔」の発生のメカニズム

「塩水楔」の発生を考える上で、図-3に示す水路を隔壁で2分し、一方に淡水を他方に海水を同一水深に満たしておき、隔壁を取り除いた場合を考える。この場合、密度差により海水は淡水の下に潜り込むように侵入していく、これが「塩水楔」と言われるものであり、密度差が大きければ大きいほどその現象は顕著に現れる。又、更に淡水を供給して到達したある定常状態を想定すると、海水と淡水の境界面は、その面に働くせん断力の作用によって一定の傾



きをもって安定する。

しかしながら、実際の河川では潮汐運動、河川流量、河道の形状等が複雑に作用し合って、場所及び時間的に力の釣り合いが保たれる状態を取りながら、変動していくものと考えられるが、川内川の場合においては、3.1で示した特徴のとおり小潮時等の潮汐運動が小さい場合は、退潮時においても塩水塊のフロント部に対する上下流方向の変動が小さいため「塩水楔」を維持した形で伸長していくこととなる。

4. 塩水遡上抑制対策

4.1 抜本的な対策について

塩水障害を完全に回避するためには、取水口を感潮区域外の上流に移設することが必要である。しかし、この対策事業は、取水施設の新設や現在の第一揚水機場までの送水管の布設など、多大な費用と時間を要する。又、取水口を移設しない場合には、①取水堰 ②河口堰(防潮堰) ③抜本的な対策にはならないが潜り堰(床固め兼用)などの新設が対策として考えられる。このような対策では、治水上安全な施設であること、河川環境への影響や保全など、諸問題の解決を図ることは当然のことながら、取水口の移設と同様に、実現するまでには永い年月と多大な事業費が必要である。そこで、比較的早く対応が可能で塩水遡上を抑制できる対策を講ずることが急務な課題であった。

4.2 塩水遡上の抑制対策の目標

- ①丸山共同取水口前面まで塩水楔を遡上させないこと。
- ②遡上してきても、上水道基準値である 200mg/l 以下の低塩分濃度の河川水の表層からの取水が可能であること。

この目標を達成させる抑制対策を考案するには、塩水遡上のメカニズムの究明が必要であった。そこで塩水観測所を新設し、毎正時水深方向3点の塩水濃度と水位及び水温を計測した。

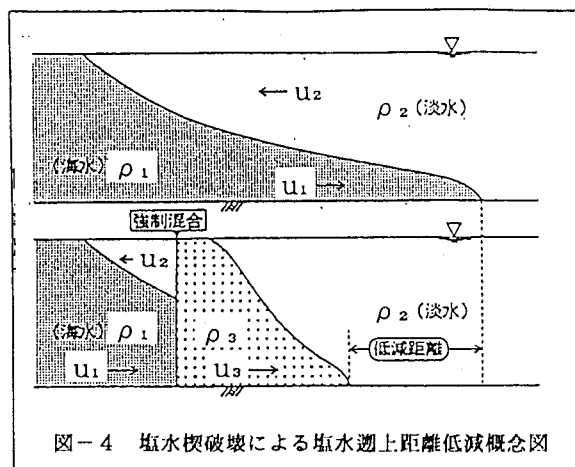
その結果、大潮時には強混合型で取水口まで塩水は遡上しない。反面、弱混合型の小潮頃から塩水と河川水が2層化し、川底を楔状に塩水が遡上し、取水口まで到達することが判った。この相反する遡上形態の違いに着目すると、小潮時に形成された塩水楔の中間地点で弱混合を人為的及び強制的に強混合型に変える(塩水楔の破壊)と、塩水の侵入長が低減(抑制)する可能性のあることが判った。

4.2.1 塩水楔を強制混合するメカニズムと期待される効果

塩水楔の発生から伸長、そして、不安定となり減退に到る間において、楔の形成を主に支配する要因は、①流水によって乱される力(掃流力で入退潮量や河川の固有流量及び河道形状によって支配される。)②海水と淡水の密度差によって層をつくろうとする力、である。

強制混合は、この②である2層を作ろうとする力を弱めることである。その結果、楔を形成する上下2層の水塊の密度差が小さくなることで、楔を弱体化(再成層化の力が弱まる。)させることになる。

例えば、強制混合しなかった場合、図-4に示すように、海水と河川水との密度差と掃流力のバランスのもとで「塩水楔」が形成される。しかし、途中において、強制混合を行うことにより、 ρ_3 ($\rho_1 > \rho_3 > \rho_2$) の密度の混合水を新たな初期値として作り出すことにより、この地点より上流では ρ_2 と ρ_3 の密度差及び各々の流体の流れのバランスのもとで、力の弱い新し



い「塩水楔」が形成されることになる。この時、 ρ_2 と ρ_3 の密度差は ρ_1 と ρ_2 に比べて小さくなり、結果として、「くさび」が形成されにくくなる。よって次の効果が期待できる。

①楔が侵入してくる速度を遅らせる。②楔の侵入長が短くなる。③楔そのものの濃度が小さくなり、遡上する流体の塩水濃度も低下する。

これによって、丸山共同取水口での、取水障害が軽減されることとなる。

4.3 強制混合方式の決定と実験

4.3.1 強制混合方式を決定するための現地簡易実験

塩水楔を強制的に混合させる方式として、次の3つの方法を考えた。

①エアレーション混合方式

コンプレッサーで圧縮空気を河床に布設したガス管に送り、管に開けた小さな穴より、空気を放出し「空気連行」で塩水楔を攪拌させる方式。

②ジェットポンプ混合方式 ③渦流攪拌方式

この3手法の簡易的な実験施設を造り、平成7年9月中旬の小潮から若潮の期間に、川内川12K4付近（天大橋下流）で現地実験を行った。

強制混合方式を決定する判断基準は実用化を前提にして、次の条件と基準を設定した。

①混合能力が十分であること。

低水路幅約150m、満潮時水深約4～5mの河道内全幅で、強混合型の指標である表面と河底の塩水濃度比=0.5以上に攪拌する能力を備えた混合方式であること。

②事業費、維持管理費が妥当なものであること。 ③河川環境へ及ぼす影響が軽微であること。

これらの各々について、現地実験の結果と条件及び基準を総合的に検討して、エアレーション方式を採用することに決定した。

4.3.2 エアレーション混合方式の室内実験

現地での本格的な実験に先立ち、室内実験を九州大学工学部建設都市工学科に依頼した。

実験の目的は、①エアレーションで塩水遡上を抑制し、塩水濃度の低減を図ることができるか確認することである。②エアレーションを発生させる位置を決定すること。

実験装置は、河川域に相当する長さ $X=20m$ の短形水路と海域に相当する水槽とを接続したものであり、カウンターの上下（振幅）作用をパソコンで制御する潮汐発生装置が接続されている。

又、反対側の実験水路上流端には河川水の流入装置が付けられている。

ある一定の潮位差の潮汐をカウンターで発生させ、塩水楔が形成された後に、塩水楔の底層底部より気泡を噴出させる実験を行った。

図-5の実験結果のように、気泡の混合効果を受けて、塩水濃度が低下していることが分かった。

又、図-6に示すように、エアレーション

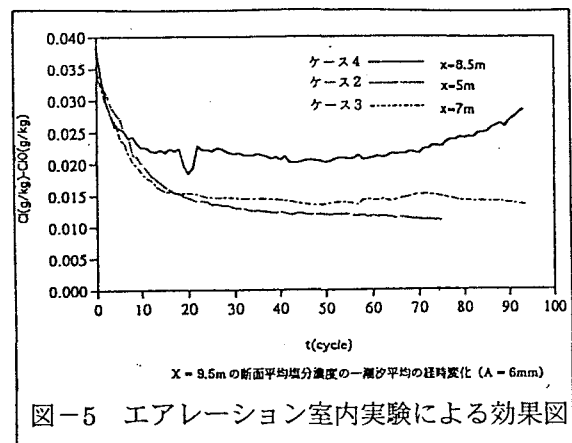


図-5 エアレーション室内実験による効果図

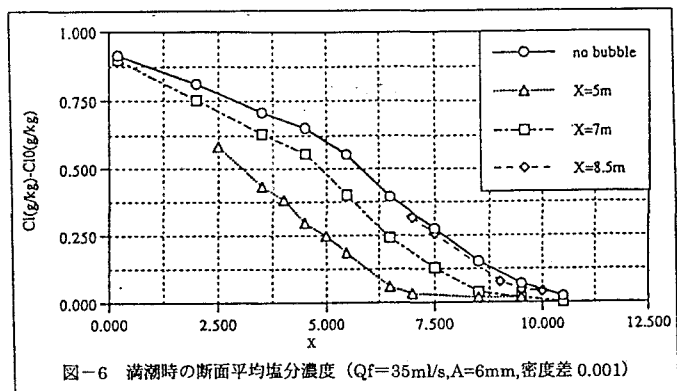


図-6 満潮時の断面平均塩分濃度 (Qf=35ml/s, A=6mm, 密度差 0.001)

ヨンの位置はできるだけ下流である方が塩分濃度の低減効果があることも分かった。

実河川でのエアレーション発生位置は、上記の実験結果と以下のことを考慮して決定した。

①大潮後の中潮時で、しかも干潮の時に、塩水楔の先端がエアレーション発生箇所より下流まで後退する位置であること。

②河床変化の少ない箇所であること。

以上のことにより、実験ケース3. X=7mの位置に近い、川内川12km4（天大橋下流）をエアレーション発生箇所と決定した。

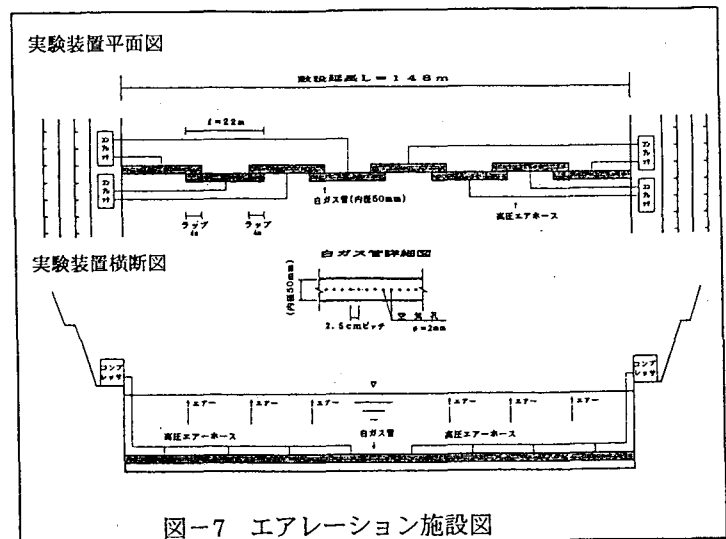
4.4 エアレーション混合方式の現地実験の概要

4.4.1 実験の期間

平成7年11月に実施した実験期間は、「塩水楔」が形成される小潮時を含む中潮から中潮に至るまでの期間であった。この間、連続してエアレーションを発生させ実験を行った。

4.4.2 現地実験施設

実験施設は図-7のとおり、延長L=22mの白ガス管(内径50mm, L=5.5m*4本)に25mm間隔で空気口(φ=2mm)を開けて作られたエアー管を8セット河川横断方向全幅約150m間の河床に布設した。8セットのエアー管それぞれは、エアレーション効率を考慮しラップ長を4mとっている。又、1セットのエアー管中央部にコンプレッサーからの圧縮空気取り入れのエアホースを接続させている。更にエアー管は変動防止のためアンカーで河床に固定させている。



エアレーションの原動機となるコンプレッサーは左右両岸に2台ずつ合計4台設置した。コンプレッサーの規模は空気圧=12kg/cm²、吐出量=20m³/分 で1台のコンプレッサーに2セットのエアー管を接続し、河床から空気を放出させた。

その他の施設として、騒音防止のためコンプレッサーの周囲を防音シートで囲って対策を講じた。

4.5 現地実験結果の概要

本現地実験結果を検証するため、10月中旬にエアレーションを行わない自然状態の塩水濃度を事前に観測しておいた。そのデータと本実験結果について比較検討と考察を行った。

4.5.1 事前調査と現地実験との外力の評価

まず、塩水遡上現象において、遡上の程度を決定する支配的な要因である潮位条件及び河川流量の条件について比較検討を行った。

①潮位条件について

10月の事前調査と11月の本実験期間の中潮～小潮～中潮について、潮汐を比較検討すると、潮位はほとんど差がなく潮位条件は、ほぼ同等であるということが分かった。

②流量条件について

低水路河道内の塩水濃度は、観測時の流量より、ある一定期間内の総流入量に最も支配されることが明らかとなっている。このことを考慮し、河川流量の期間内平均値を比べてみると、本実験期間の内流量が事前調査期間内の値より、わずかに0.8m³/sほど下回っているだけであり、双方の流量条件は、ほぼ同程度であると言える。以上①、②の結果より、事前調査と比較可能であると判断さ

れる。

4.5.2 現地実験結果と事前調査との塩水遡上距離の比較

現地実験と事前調査時に各地点で鉛直方向の塩素濃度を測定した結果を基に、河道内塩素濃度縦断分布図（濃度コンター）の図-8を各々作成した。これから表層と下層部での塩水遡上状況と遡上距離の変化をみると、下記のような特徴が確認され、遡上の抑制効果が見うけられた。

①表層部の特徴＝河川縦断方向の塩水遡上低減距離が、エアレーション実験地点より

上流部において、特に500mg/ℓ以下の低濃度分布で、最大で約4km低減されている効果が確認された。

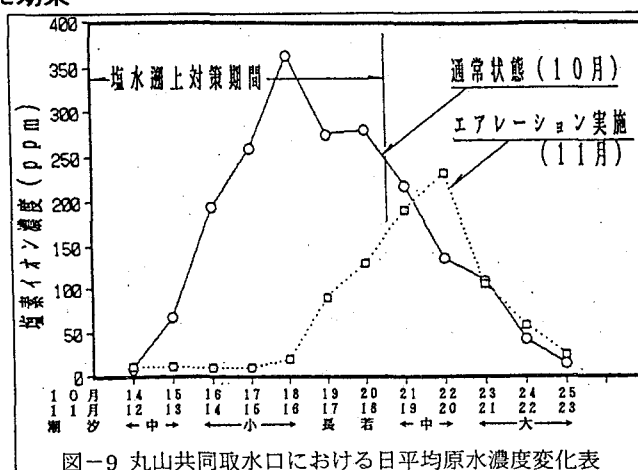
②下層部の特徴＝表層部と同様に、特に10,000mg/ℓ以上の高濃度分布帯で、最大で約5kmもの低減効果が確認された。

③塩水楔の特徴＝塩水楔の本体を形成している高濃度コンター10,000mg/ℓ～15,000mg/ℓの先端がエアレーション箇所で止められており、強制的な混合の効果がみられた。

又、エアレーション実験を終了した平成7年11月19日（中潮）11時以降では、10,000mg/ℓの塩水楔が19時頃、エアレーション地点より上流の14km地点まで遡上して最大となっている。このことから抑制の効果が確認できた。

4.5.3 丸山共同取水口からの取水原水濃度からみた効果

事前調査と現地実験において、丸山共同取水口から取られた取水原水の塩水濃度の変化は、図-9に示すとおりであり、本実験期間中においては、水道基準である200mg/ℓ以上の塩水の取水は無く、また、取水塩素濃度の経時変化についても3日から4日間の遅れが生じていることから、エアレーションによる効果がみうけられた。



5. 現在までの抑制対策

平成7年11月に現地実験を実施して以来、エアレーション方式による抑制対策を出水期を除き継続している。平成8年度は対策と実験を兼ねて、複数箇所でのエアレーションを行った。対策は月2回で、1回につき若潮を含む前後10日間について、連続のエアレーションを行っている。なお、平成9年1月からはコンプレッサー出力をフル運転でなく、70%出力で圧縮空気を吐出している。これも、現地実験を数ケース行なって混合率と出力の概略の相関を求め、効果減少がないことを確認してから実施している。これによって燃料消費量が30数%節約できて、コストの縮減にもつながっている。

実 施 期 間	エアレーション対策位置	条 件
平成7年12月 ～ 8年 6月	12km4 (天大橋下流)	シングル:24時間連続:100%出力
平成8年 9月 ～ 8年12月	①10km4 (開戸橋下流)	① + ②ダブル:24時間連続:100%出力
	②12km4 (天大橋下流)	② + ③ダブル:24時間連続:100%出力
	③13km8 (育英小前)	①, ②, ③各々シングル:24時間連続:100%出力
平成9年 1月 ～ 9年 3月	12km4 (天大橋下流)	シングル:24時間連続:70%出力
平成9年 5月 ～ 9年 6月	13km8 (育英小前)	シングル:24時間連続:70%出力

表-1 エアレーション対策実施状況

6. 塩水遡上の予測

塩水遡上を予測する手法として、水理的な解析に基づく数値計算法による予測シミュレーションがある。

川内川のような弱混合型から強混合型を繰り返す現象を表現するためには、密度効果を組み込んだ定常鉛直二次元のモデルを用いる必要があるが、現在のところ、経済的であり、かつ、精度の良い数値シミュレーションの手法は開発されていない。

そこで、流れを一次元非定常モデルで取り扱い、鉛直方向に4層に区分し、求められた各層の流速分布を仮定して鉛直方向の移項流を設定する。そして、実測値をもとに内部循環に基づく恒流の流れを二次元の拡散方程式で表現する、簡易的な鉛直二次元非定常4層モデルを開発した。このモデルは、次のような特徴を持っている。

- ①河道断面諸元が変わっても塩水遡上を予測することができる。
- ②河川の流入量（固有流量）をパラメータとして、塩水遡上を予測できる。

現在このモデルを使って、取水口移設位置の検討を行っている。

7. 塩水遡上監視システムの構築

川内川の感潮区域内での塩水遡上状況を常時監視する目的で、塩分濃度観測所を9ヶ所設置している。

下流端は河口大橋、上流端は斧刈の水質自動監視所である。各地点のデータをNTT回線で収集し、事務所のパソコンでビジュアルな形式で常に状況を把握できるシステムを構築している。

このシステムで得られる情報（データ等）は、単に状況を知るだけでなく、利水者への情報提供と次の目的のために活用している。

- ①塩水遡上予測モデルの精度向上を図るための検証データに利用する。
- ②エアレーション抑制対策の開始と終了を見極めるために使用している。

8. 河川環境に配慮した抑制対策の検討

エアレーション方式による河川水の混合が、河川全体の生態系や魚類等の生育環境にどのような影響を及ぼすかなど不明な点が多くあった。そこで、水産資源を代表する「稚アユ」、「シラス鰻」を対象にして、室内実験及びエアレーション箇所での現地捕獲調査を実施した。

その結果、「稚アユ」は①エアレーションを認知する能力がある。②遡上する動機があればエアレーションは何ら障害にはならない。③本来、真水の流れてくる「ミオ筋」に向う傾向があるが、捕獲調査の結果では河川横断方向に分散して獲れていた。一方「シラス鰻」は①泳力が弱いのでエアレーション上を自力で遡上するのは難しい。②上げ潮時に浮上し、押し寄せてくる潮の流れを利用して遡上するようである。この時、遡上する動機が同時におきれば、相乗効果でもって、エアレーションを通過しやすくなる。③捕獲調査の結果では、エアレーションの上下流とも、かたよることなく捕獲された。

以上の調査結果から、エアレーションの横断方向の配列は「千鳥型」ではなく「連続直線型」とし、対策を継続することとした。

9. おわりに

現在の丸山共同取水口の位置は、感潮区域内で「塩水楔」の遡上する末端部付近にあり、潮汐と河川流量及び河道特性が作用しあって、塩水が混入することによって取水障害を生ずる微妙な所にある。この問題に対し、「塩水楔」の破壊という人為的な外力で、遡上を抑制する対策を見出し、多少なりとも取水障害の軽減効果を確認することができた。このエアレーション混合方式による塩水遡上対策は、抜本的な対策となる丸山共同取水口の上流側への移設までの、応急的対策として継続しなければならない。しかし、近年も、少雨傾向が続いており流況が極端に悪化する渇水期には、エアレーション対策も限界が生じてきている。又、対策期間も長くなることにより実施費用の増加にもつながっている。今後は、更に効果的な抑制対策とコスト縮減について検討を続けていきたい。

最後に、本対策を遂行するに当たり、多大なご支援と協力を頂いた九州大学・大学院生安達貴浩氏や関係者の方々に深甚なる謝意を表します。

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(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，PP493-498
- 2) 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，PP517-524
- 3) 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(1996)：川内川における塩水遡上の人工的制御に関する研究，海岸工学論文集，第43巻，PP341-345