

渇水時における河口部塩水侵入の制御法

Prevention of Salinity Intrusion Increased by a Drought in a Tidal Estuarine River

小 松 利 光 ・ 安 達 貴 浩

Toshimitsu Komatsu and Takahiro Adachi

1. はじめに

我国の河川は縦断勾配が大きく急峻であるため、流域に降った雨水が比較的短時間に流出してしまうという特性を有している。このような特有の地形的要因に加え、森林の保水能力の低下や流域下水道の整備、また昨今の異常気象による降水量そのものの大きな変動等が影響し（図-1 参照）、流量が不安定に大きく変動する河川が多く見られる（水資源白書(1998)）。このため、渇水流量が小さくなって塩水侵入による被害発生の可能性が高くなっているにもかかわらず、同時に洪水発生危険性も抱えている河川は我国ではそれ程珍しくはない。

塩水侵入の問題は、このような不安定な河川流量の変動に根ざしたものが多く、見た目以上に問題が複雑化している。河川管理の上では治水面での安全性確保が最優先されることから、塩水侵入による被害の恐れがあっても河積獲得のための浚渫が行われることがあり、その結果、河口部塩水侵入の増大に益々拍車がかかっている（図-2 参照）。以上のような理由から、川内川河口部のように河川上流側への新たな塩水の侵入が深刻な問題となっている事例が既にいくつか見られ、解決の困難な問題として取り上げられている。

今後も河積獲得のために河床の浚渫を余儀なくされるであろうこと、異常気象や水利用の増加により一層の河川流量の減少が予測されること、また地球温暖化による海面上昇が起こった場合には確実に塩水侵入が増大すること等を考え併せると、近い将来深刻な塩水侵入問題が全国津々浦々で発生することが容易に予想される（なお、ASCE Task Committee (1992)によって海面上昇が将来エスチャリーや内湾に与える影響が報告されているので興味のある方は参照下さい）。

このような状況の下、河川河口部における塩水侵入のメカニズムを明確に把握し、塩水侵入を軽減させる有効な手法を開発することには多くの期待が寄せられている。

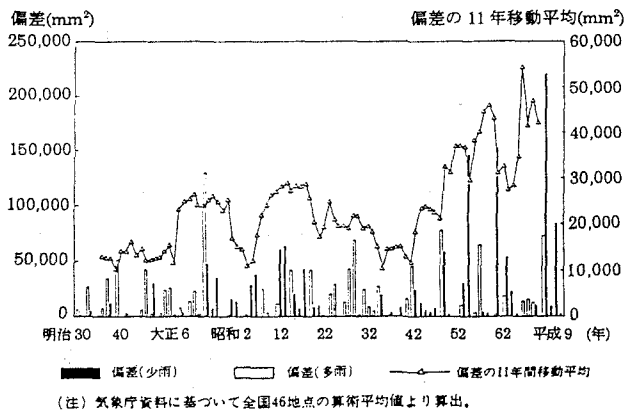


図-1 日本の年降水量の経年変化

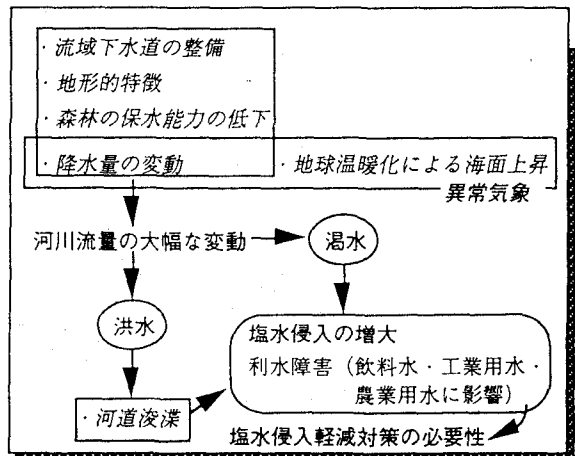


図-2 塩水侵入増加要因フロー図

本稿では、主として著者らがここ数年来行っている室内実験と現地観測から明らかとなった河口部塩水侵入の特性を概説し、更に、これまでに新たに開発された河口部塩水侵入の制御法について紹介する。

2. 室内感潮河川水路を用いた塩水侵入に関する実験研究

塩水侵入を規定する要因は河川流量、河口域の潮位変動、海域部の海水交換能力、風、河道形状等と数多く、その上各要因が時間的に変動することから、塩水侵入は複雑な密度流現象となるため、力学的側面においてですら未解決の部分が多く残されている。このような複雑な現象のメカニズムを一つ一つ系統的に解き明かしていくためには、支配的な要因だけをピック・アップできる室内実験は極めて有効な手段である。また、新たな塩水侵入の制御法を実河川に適用する前に、室内実験によりその効果を定性的に把握しておくことも非常に重要な意味をもつものと考えられる。しかしながら、河口域における多様な現象を再現するのは容易ではなく、弱混合・緩混合・強混合といった混合形態を全て実現できる実験水路は、これまでのところ世界的にも数例しか存在しない（例えば、Ippen (1968), Riger (1973), 加藤・三村 (1991), 小松ら (1996c)）。以下に小松ら (1996c) によって開発された全ての混合状態が実現できる室内感潮河川水路の概要とその水路実験から得られた計測結果を紹介する。

2-1. 室内実験装置の概要

実験装置は、1/200の河床勾配をもつ $0.25 \times 0.25 \times 20.0\text{m}$ の河川部と $1.5 \times 3.0 \times 0.8\text{m}$ の海域部、ならびに潮汐発生装置より構成されている（図-3）。河川部はアクリル製、海域部はステンレス・スチール製であり、2つの観察用の窓口が取り付けられている。また、実河川の河床は通常凹凸の大きな粗面であることから、水路の河床には $1.0 \times 1.0 \times 25.0\text{cm}$ の栈粗度が10cm間隔で配置されている。河川部水路の上流端には、表面波（潮汐波）の反射を防止する消波材ならびに淡水供給のためのヘッド・タンクが、また、海域部底部には、塩化ビニル製パイプで製作された塩水供給装置が設置されている。

潮汐発生装置はプランジャータイプであり、フロート、制御用のパーソナル・コンピュータ、排水用の余水吐ならびに水位センサー（KENEK社製 SW-301型）によって構成されている。必要な潮汐波の条件（潮差、周期、平均水深）を入力すると、潮汐発生プログラムに従ってフロートが上下するが、水位セン

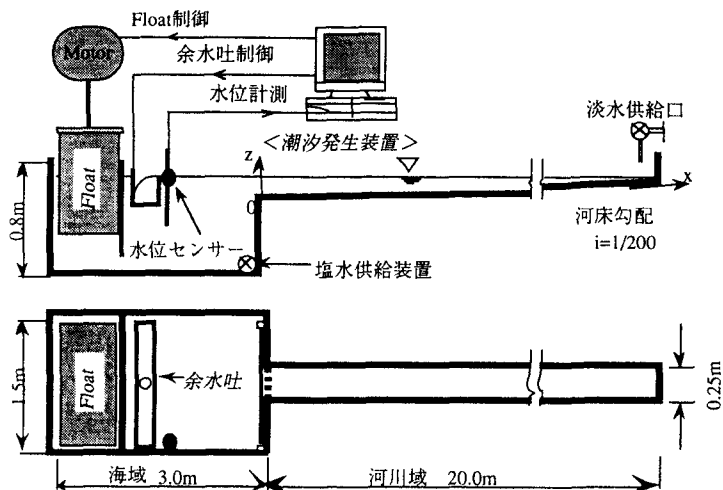


図-3 室内実験水路の概略図

サーにより計測される実際の水位が設定水位に従うように、余水吐の高さを微調節することで潮汐運動が自動制御される。これは、河川上流端から淡水を、海域の底部から塩水を供給しなければならないため、これらの入力に対する補正が必要となってくるからである。水位センサーによって感知された海域部の水位をパソコンにフィードバックさせて、余水吐の高さを微調節しながら海域部表層の塩・淡混合水を排水することで、予め設定した潮位変動を精度良く再現することが可能となっている。

一般に室内実験水路においてせん断乱流で強混合形態を実現することは難しいとされているが、小松ら(1996c)は河川域を20mと長くして、海域の水位変動で引き起こされる入退潮量を大きくし、更に河床に粗度を配列することによって、せん断乱流による強混合形態を実現することを可能としている(後述の図-4参照)。同一パターンの潮汐運動を繰り返し与え、河川上流端より淡水を、海域の底部より塩水を供給し、また余水吐から塩・淡混合水を排水することにより、準定常状態(潮汐運動および乱れによる流速や塩分濃度の変動のみで、潮汐周期以上のタイム・スケールの変動は見られない状態)の塩水侵入が実現される。

なお、本実験装置は正弦的な潮汐波形はもとより、大潮・小潮などといった潮差の非定常変化(久保・小松・安達・田吹(1999))や日潮不等などによる不規則な潮位変動、更には潮位変動に対応した河川流量変動(小松ら(1998))を設定通りに実現することも可能となっており、河口域における現象の多様性をできるだけ沢山組み込めるように工夫がなされている。

2-2. 室内実験における各種混合形態の実現

感潮河川域の混合形態は同一河川においても、主として潮汐運動の強さと河川淡水流量の大きさの相対的な関係により変遷する。小松ら(1996b)は、室内実験で河川流量や密度差などの条件を固定して、潮差のみを変化させることによって、弱混合から強混合までの混合形態を実現した。具体例として、他の条件は同じで潮位振幅のみが $A=5, 8.5, 15\text{mm}$ と異なる場合の塩分濃度 C の鉛直分布、ならびに断面平均塩分濃度の一潮汐平均値 $\langle C \rangle$ の流下方向分布を図-4, 5に示す(このように、潮差のみを変えて比較を行うことは、同じ河川で大潮や小潮により潮汐運動の強さが変化した場合の塩水侵入状況を比べることに相当する)。

図-4において、 $A=5\text{mm}$ で干満差の小さいときは、淡・塩二層が明確な界面をもち、塩水が海域より楔形状で侵入する弱混合形態を呈している。また $A=8.5\text{mm}$ と潮差が大きくなると、塩水層と淡水層との間に混合が生じ、塩分濃度が水深方向にも流下方向にも変化する緩混合形態を示すようになる。更に、 $A=20\text{mm}$ のときには、水深方向に濃度がほぼ一様化し、流下方向にのみ濃度勾配をもつ強混合形態となっている。以上の結果から、潮位振幅のみを変えることにより、弱混合から強混合まで実験的にうまく再現されていることが確認できる。また、図-5から、 $A=5\text{mm}$ の弱混合の場合には、塩水侵入長が長いだけでなく、塩水侵入域全体に渡って高い断面平均塩分濃度を示していることが分かる。このように同一河川においても、海域の潮汐の干満差が変化すると塩水侵入特性は著しく変化することになる。

2-3. 混合形態の分類

一般に、感潮河川の混合形態は、浮力のInputと潮汐流によって生じるWall Turbulenceの混合能力の間の相対的な関係によって決定され、底壁面の粗さの違いを考慮した下記のModified Estuarine Richardson数 Ri_E^* に依存して変化すると考えられている(Fischer(1972)、Fischer(1979))。

$$Ri_E^* = \frac{\varepsilon g Q_r}{W U_*^3} \quad (1)$$

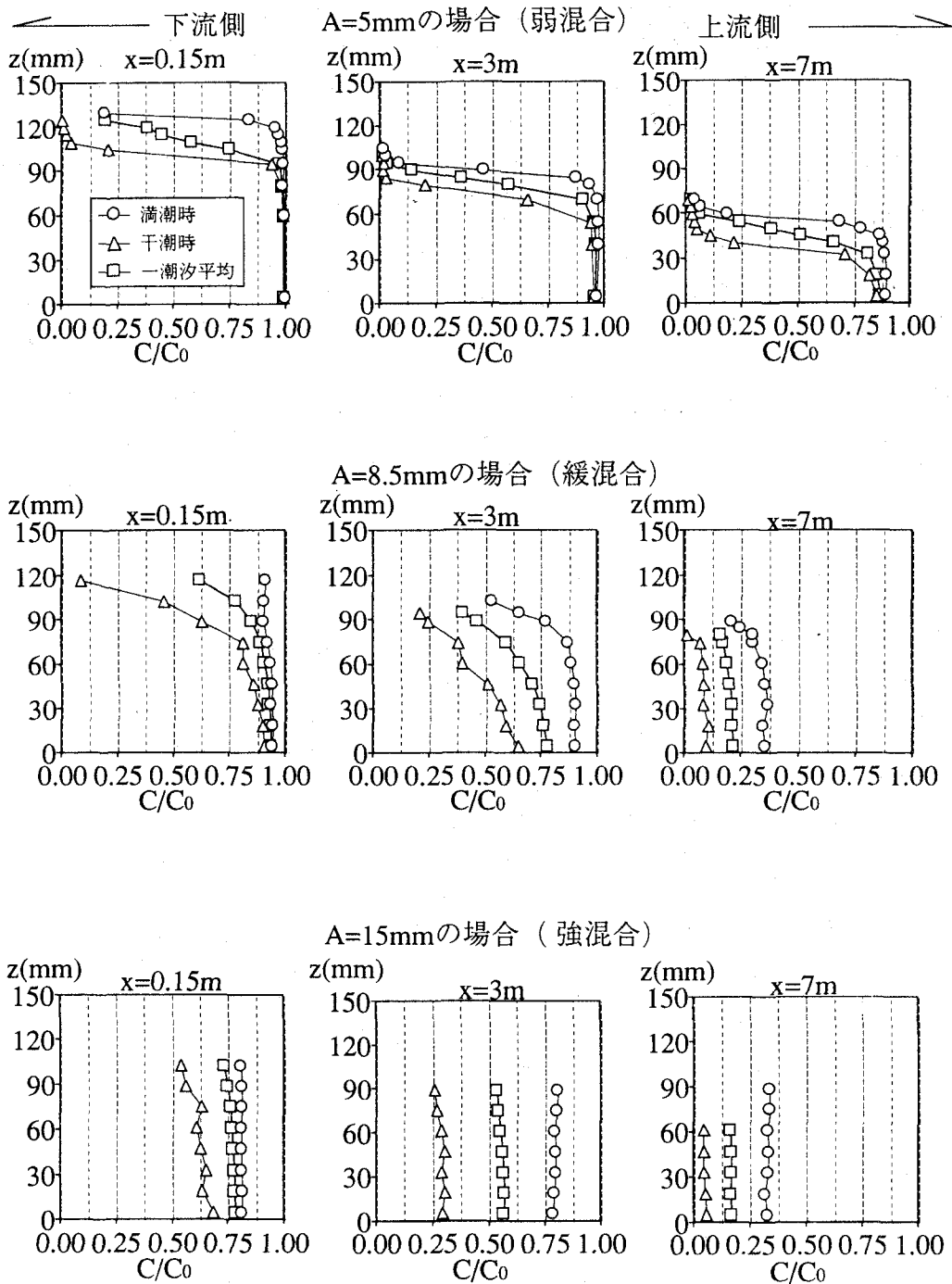


図-4 潮差の違いによる混合形態の変化

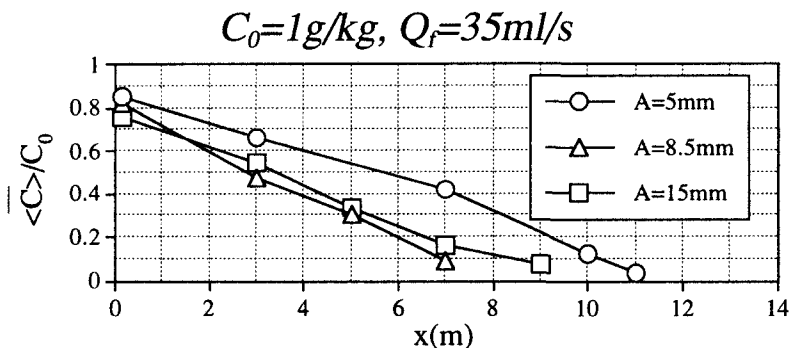


図-5 断面平均塩分濃度の一潮汐平均値分布の比較

(ここで、 ϵ は海水と河川水の相対密度差、 g は重力加速度、 W は川(水路)幅、 U^* は潮流流速による摩擦速度の r.m.s.)

Ri_E^* と成層度との関係について述べる前に、まずFischer(1979)がHansen & Rattray(1965)の理論を基に導出した $(\bar{C}_b - \bar{C}_s) / \langle C \rangle$ と Ri_E の関係を示す次の半経験式と小松ら(1996b)の実験結果の比較を図-6に示す。ここで、 $\bar{C}_s$ 、 $\bar{C}_b$ はそれぞれ一潮汐平均の表層平均塩分濃度と底層平均塩分濃度であり、 Fi は内部フルード数、また Ri_E は Ri_E^* の評価式の U^* を r.m.s.潮流流速に置き換えたもので、いずれも河口からの距離 x の関数である。ここでは、両者とも $x=0$ 地点での値を用いている)。

$$\frac{\bar{C}_b - \bar{C}_s}{\langle C \rangle} = Ri_E^{7/15} (2.5 Fi^{14/15} + Fi^{11/60}) \quad (2)$$

Fischerの評価式と実験結果は、Hansen & Rattray(1965)の理論の対象範囲である緩・強混合の範囲において特に良い一致を示している。

次に、 $x=0$ における Ri_E^* で河口部全域を代表させることにし、表層と底層の一潮汐平均塩分濃度の比 $\bar{C}_s / \bar{C}_b$ の流下方向の平均値と Ri_E^* の関係を調べた(図-7)。 $\bar{C}_s / \bar{C}_b$ を用いた混合形態の分類については様々な区分が用いられているが、Simmons(1968)に倣って、 $\bar{C}_s / \bar{C}_b$ が 0.1 以下を弱混合、0.5 以上を強混合と定義すると、潮位振幅以外の実験条件が等しい Run1-1 ~ Run1-7 において、 $A=0, 5\text{mm}$ のとき弱混合、 $A=6.5, 8.5\text{mm}$ のとき緩混合、そして $A=12, 15, 20\text{mm}$ のとき強混合形態を示し、更に、やはり潮位振幅のみを変化させた

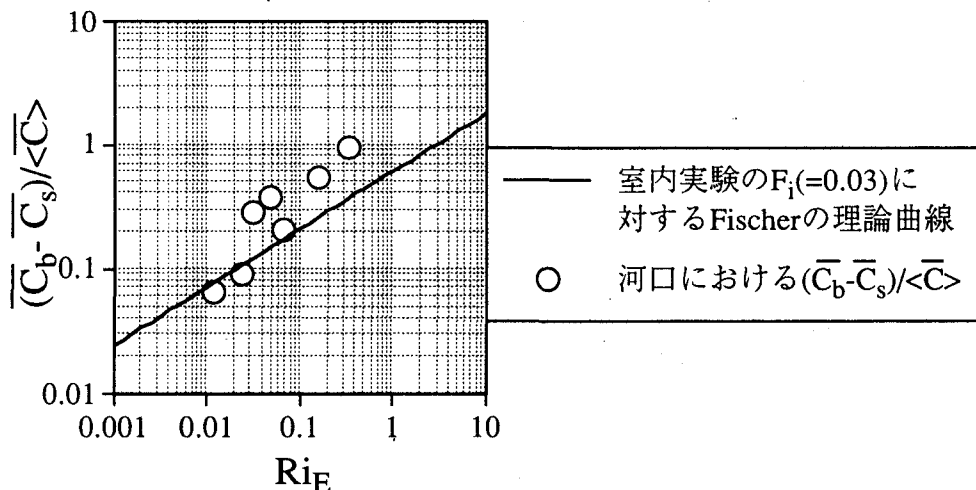


図-6 成層度についての理論式と実験結果の比較

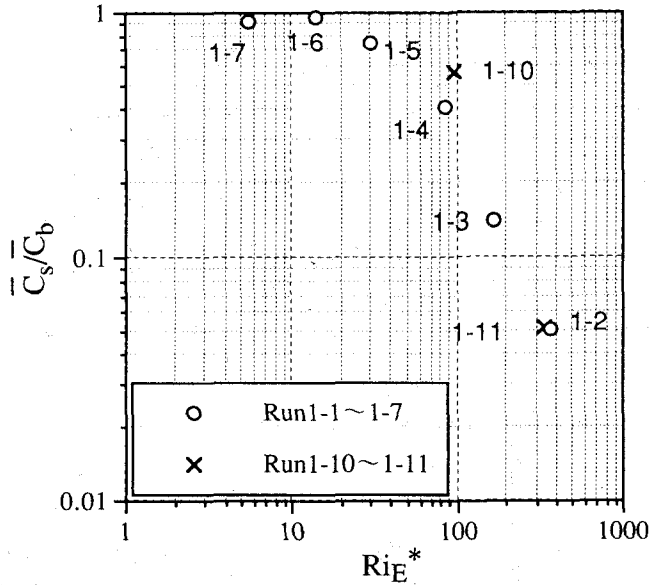


図-7 $\overline{C_s}/\overline{C_b}$ と Ri_E^* の関係

Run1-8～Run1-11においては、 $A=0, 10\text{mm}$ のときに弱混合、 $A=15\text{mm}$ のときに緩混合形態を示していたことになる。弱混合から強混合への遷移が $15 < Ri_E^* < 100$ の範囲で生じる加藤・三村(1991)の結果と比較すると、小松らの実験結果は若干大きな Ri_E^* において緩混合から強混合へ混合形態が遷移していると言える。いずれにせよ、図-7において異なる内部フルード数に対して得られた $\overline{C_s}/\overline{C_b}$ と Ri_E^* との関係がほぼ重なり合っていること、また内部フルード数にほとんど依存しないFischerの評価式がほぼ妥当なものであること等を考慮すると、やはり成層の程度は Ri_E^* のみに依存して変化すると結論づけることができる。

以上の結果から、潮汐と河川流量の条件が予め分っていれば図-7の結果を用いることによって、潮汐流による混合が支配的な河口部における塩水侵入の混合形態をおおよそ予測することが可能となる。

2-4. 混合形態と塩水侵入長の関係

次に、潮位振幅以外の実験条件が等しいRun1-1～Run1-7について、無次元断面平均塩分濃度の一潮汐平均値、および満潮時、干潮時のこれらの値の縦断分布をそれぞれ上流側に直線外挿することにより、塩水侵入長 $L_s, L_{\max}, L_{\min}$ が算出された。 Ri_E^* に対する塩水侵入長の変化を図-8に示す。潮汐運動がなくて密度差による内部重力の効果が最も卓越する定常塩水楔の場合に、塩水侵入長は最も長くなるが($L_s=13.2\text{m}$)、潮汐運動による混合が強くなるにつれて $L_s, L_{\max}$ いずれの塩水侵入長も急激に減少し、緩混合において最小値をとる。更に、干満差が大きくなって混合形態が緩混合から強混合になると、入退潮量が増加していくため $L_{\max}$ および L_s は逆に大きくなっていく。

潮汐運動が大きくなると、塩水楔の上・下層の運動がともにactiveになり、二層間の混合が促進されて内部重力の効果は低下する。一方、潮汐運動による塩水の入退潮量の大きさは、潮位差が大きくなる程増大する。従って、図-8の結果は、 $\overline{C_s}/\overline{C_b}$ の値が1に近づく $L_{\max}$ は入退潮量の大きさのみに、 $\overline{C_s}/\overline{C_b}$ の値が0に近づく L_s は密度差によって生じる内部重力効果のみに規定されることを示している。また、 Ri_E^* に対する塩水侵入長の変化のしかたを比較するために、Rigter(1973)の結果も図-8にスケールを変えてプロットされて

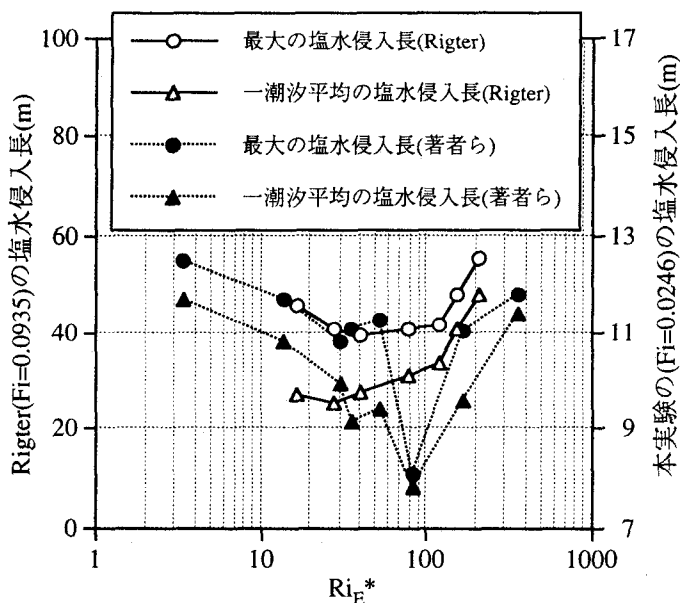


図-8 混合形態と塩水侵入長の関係

いるが、小松らの実験結果と同様の傾向を示している。

3. 実河川河口部における塩水侵入の現地観測

3-1. 塩分濃度の定点観測結果の有効利用

河川河口部への塩水侵入は河川流量、河口域の潮汐運動、海域部の海水交換能力、風、河道形状と数多くの要因によって支配されているが、各要因が時間的に変動するため、現象も時空間的に複雑に変化している。このため、局所的・短期的な現地観測からだけで塩水侵入の実態を明らかにすることは容易ではないことから、目的にかなった現地観測結果を得るためには多大な労力と時間が必要となっている。多様に变化する塩水侵入の特性を明らかにするためには、多点同時観測だけでなく、塩水侵入長を代表する地点に塩分濃度自動観測装置を設置し、そこから得られる塩分濃度ならびに他の諸量の時系列データから、塩水侵入長の決定要因について慎重に検討する必要がある。定点観測結果からは思った以上に多くの情報を読み取ることができる。具体的な検討例を以下に示す。

3-2. 筑後川河口部における塩水侵入の特性

筑後川は、我国を代表する強混合型河川である。従来の塩分濃度同時観測結果から、筑後川河口部の塩水侵入は緩混合を示す小潮時付近よりも、強混合形態を示す大潮時付近において大きくなる(図-9)という報告がなされていた。しかしながら、塩水侵入長を代表すると考えられる河口から15km上流地点の塩分濃度の自動観測データを調べたところ、年に数回、大潮時付近よりも小潮時付近で塩水侵入長が最大になることが見出された。このように最大の塩水侵入長の出現するパターンが異なってくる理由、ならび

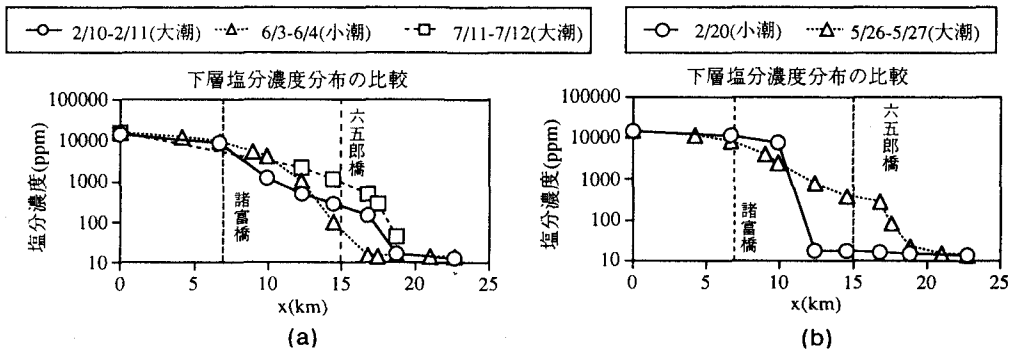


図-9 筑後川における大潮時と小潮時の満潮時における下層塩分濃度分布の比較
(河川流量がほぼ同程度の時の比較を行っている)

に大潮、小潮それぞれの場合における塩水侵入を規定する支配的要因を明らかにするために、潮汐運動や河川流量のデータから導出される種々の要因と塩水侵入長の相関を調べた(安達・小松ら(1998))。小潮代表日における塩水侵入長を規定すると思われる諸量間の関係を図-10 (a)-(c)に示す。小潮代表日の平均的な干満差 TR 、平均水位 H 、日潮不等の程度を表わすパラメータ β (図-11参照)ならびに代表日直前3日間の平均河川流量 Q_f が、塩水侵入長を規定する代表量として算出されている。小潮代表日における観測地点下層の最大塩分濃度をその大きさの程度に応じて4つの領域に区分して、各領域を異なる記号で表わしている。流量 Q_f を横軸に潮汐の干満差 TR を縦軸にとった図-10(a)からは、4種類のプロットが流量 Q_f によって分類されており、小潮時付近の塩分濃度はやはり Q_f に強く依存していることが分かる。 Q_f が小さく安定している範囲では、 TR が小さくなるほど高濃度の塩分濃度が出現する傾向がある。次に、横軸に Q_f を縦軸に β をとった図-10(b)では、 β の値が小さいほど高濃度の塩分濃度が出現している。一方、縦軸に H をとった図-10(c)からは、 H と小潮時付近の塩分濃度との間には明確な関係性は見られない。これらの結果から、筑後川河口部における小潮時付近の塩水侵入長を規定する主要な要因は、河川流量 Q_f の他に潮汐の干満差 TR と日潮不等の程度 β であることが分かる。

更に、河川流量 Q_f の違いの影響を排除するために、流量が比較的小さく($Q_f < 60 \text{ m}^3/\text{s}$)安定している場合のみを対象にし、横軸に β 、縦軸に干満差 TR をとって、小潮時最大塩分濃度の大きさとの関係を調べてみた(図-12)。小潮時付近で塩分濃度が大きな値を示すのは、 TR と β がいずれも比較的小さな値を示す

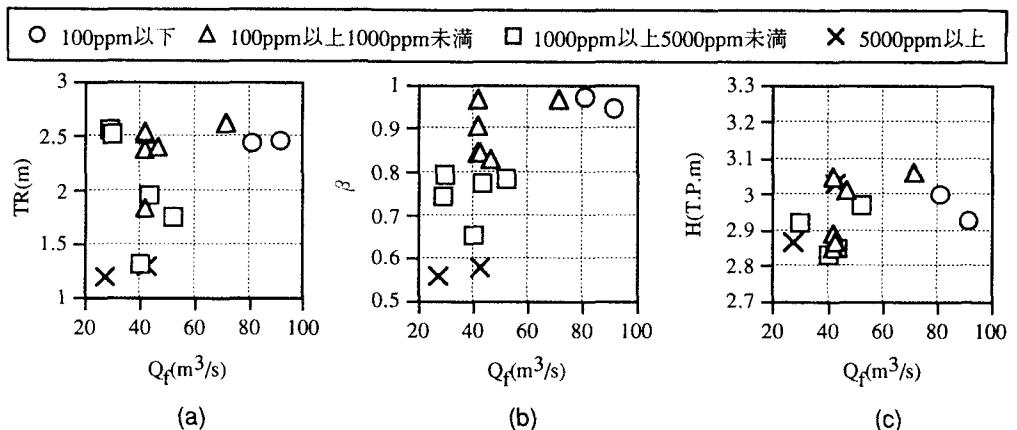


図-10 小潮時における筑後川河口部塩水侵入の決定要因についての検討

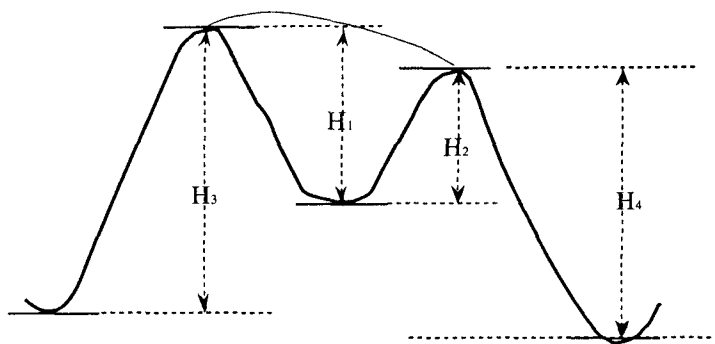


図-11 日潮不等模式図 ($\beta \equiv (H_1+H_2) / (H_3+H_4)$)

場合であり、このような潮汐条件の下では、大潮時よりも小潮時付近で最大の塩分濃度が出現していることが分かる。また、小潮時の塩分濃度はTRよりも β により強く依存して変化していることも結果から見て取れる。

以上の解析ならびに一連の現地観測結果から、筑後川河口部における塩水侵入の特性がいくつか明らかとなっているので簡単に紹介しておく。

- 1) 従来の現地観測の結果より、筑後川は大潮時に強混合形態を、小潮時に緩混合形態を示すことが報告されていたが、比較的大きな潮差をもつ筑後川でも、河川流量が比較的小さく日潮不等の程度が大きいい2月の小潮時に、弱混合形態の塩水侵入が実現されることがあるという新たな知見が得られた。
- 2) 筑後川では通常は潮汐の干満差が大きいほど満潮時の塩水侵入長が長くなるため、大潮時に最大の塩水侵入が生じることになる。しかしながら、比較的小流量で安定していて、小潮時の干満差が相対的に小さく日潮不等の程度が大きくなった場合に、1)で示したように塩・淡成層が生じて塩水が楔状に侵入する弱混合形態となるため、小潮時において最大の塩水侵入長が出現することになる。
- 3) 筑後川では大潮時から小潮時にかけての塩水侵入長の相対的な変化は河川流量の変動によっても影響を受けるが、ある程度小さな流量変動であれば、その影響は小さいと見なすことができる。

3-3. 川内川河口部における塩水侵入の特性

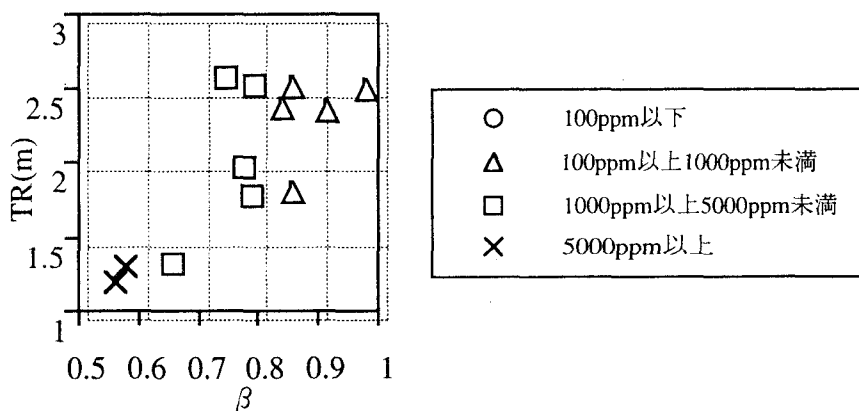


図-12 干満差、日潮不等と小潮時塩分濃度の関係

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。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(著者らは塩水混入と呼んでいる)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条件が小潮から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、若潮時に毎回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 Q_f など他の要因が引き金になっているものと考えられた。このため、小松ら(1996a)は丸山取水口での塩水混入の有無を決定する要因について、前節と同様の手法を用いて検討を行った。解析の対象となった要因は、前節と全く同じである。横軸を Q_f 、縦軸をTR、平均潮位H、日潮不等の程度 β として、若潮時付近における塩水混入の発生(取水濃度の1日平均値が200mg/l以上)の有無をプロットしたものを図-13に示す。潮汐の干満差と塩水混入の発生の間にはあまり顕著な関連はないことが分かる。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ということを示している。一方、 Q_f -H、 Q_f - 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、平均潮位H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。

Q_f -H 図上の境界線を式化すると、

$$H+0.1=0.0586(Q_f-25)^{0.6} \quad (3)$$

Q_f - β 図上の境界線は、

$$\beta=1.33(Q_f-25)^{-0.4} \quad (4)$$

で近似できることから、 H_0 、 β 、 Q_f という3つの水理パラメータの間には、式(3)、(4)より

$$(H+0.1)/\beta=0.044(Q_f-25) \quad (5)$$

の関係があることが分かる。

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

($H+0.1)/\beta$ と Q_f との関係を図-14に示す。H、 β 、 Q_f という3つの水理パラメータを用いると、若潮時の塩水混入の有無を精度良く判別できることになる。従って、調和解析により海域の平均水位ならびに潮汐

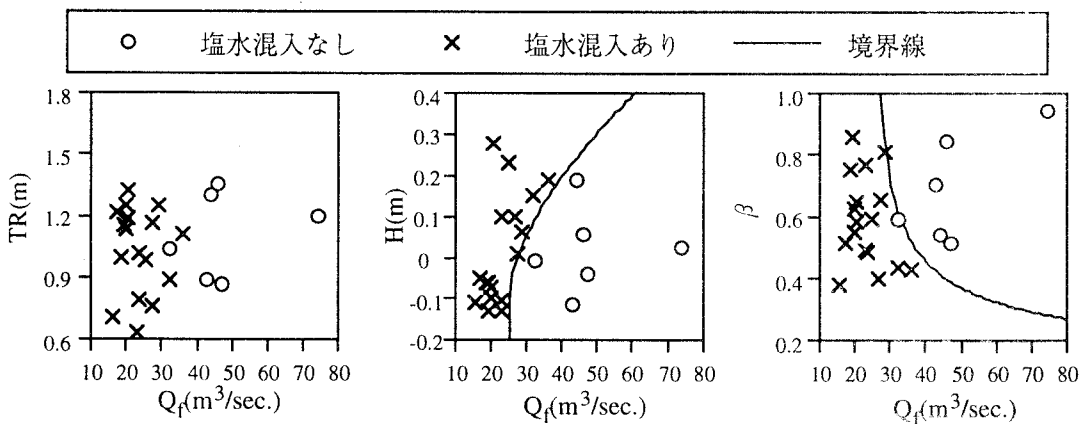


図-13 塩水混入の有無と Q_f 、TR、H、 β との関係

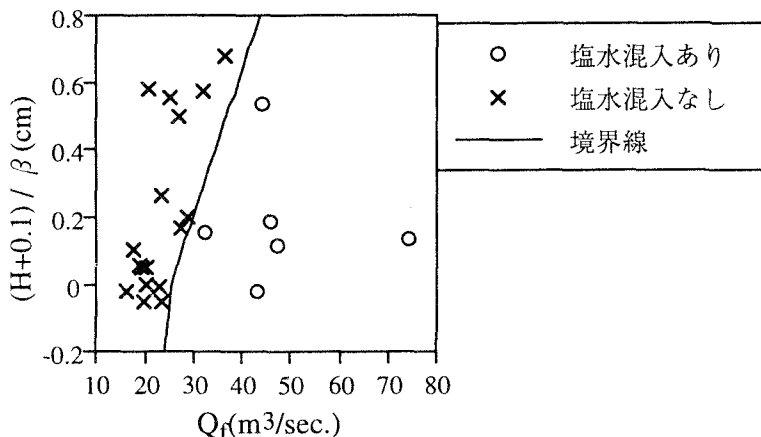


図-14 丸山共同取水口への塩水混入の有無の判定図

の変動パターンを、また水文学的方法で河川流量を予測できれば、図-14を用いることにより、将来の若潮時における丸山取水口での塩水混入の有無を推定することが可能となる。ただし、図-14の判定条件は、現地観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-14の判定条件もまた修正されなければならない。

なお、筑後川河口部と同様、川内川河口部における塩水侵入についても上記のような現地観測データの解析等により、その特性がおおよそ明らかになっているので以下に紹介する。

- 1) 川内川では干満差の変化にともない混合形態が小潮時の弱混合から大潮時の緩(もしくは強)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の塩水侵入は、対応する準定常状態の場合とは一致せず遅れて追隨する。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、内部界面が徐々に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) 若潮時の丸山共同取水口での取水濃度は、河川流量、海域の平均水位、日潮不等の程度に依存しており、これらのパラメータを用いた塩水混入の有無の予測が可能となった。筑後川河口部における小潮時の塩水侵入に対する平均水位の影響はそれ程大きくなかったのに対し、密度、気圧、風等の影響で平均水深が季節的に大きく変動している川内川河口部では(Nomitsu and Okamoto(1927))、平均水位の変化による塩水侵入状況の違いが比較的顕著に現れている。

4. 気泡噴流による弱混合型塩水侵入の制御

4-1. 塩水侵入制御法の開発に際しての留意点

これまでの研究により、河口部での塩水侵入を抑制する方法として、マウンド状横断構造物の設置の有

効性が既に明らかにされているが(Jirka・Arita(1987), 有田(1988), 古谷・有田(1995), 小松・孫・安達(1996))、この手法は生態系の連続性を遮断するだけでなく、河積を減少させるため洪水の恐れのある河川には不向きである等の欠点を有しており、その適用範囲は自ずと限られている。また、最近になって、潮止堰等の大型固定式構造物の築造に対する是非が厳しく問われるようになるなど、新しい社会情勢のもと治水や利水のみならず水環境にも十分に配慮の行き届いた技術開発が求められている。このことは単に環境問題の重要性を示すだけでなく、同時に時代とともに変化する社会ニーズに応じて、政策や土木技術も変革されるべきであることを示唆するものと考えられる。

以上を総合すると、河口部におけるこれからの塩水侵入対策は、治水・利水・環境・社会的ニーズに総合的に応え得るものでなくてはならない。そのためには、以下のことが具体的に実現されることが望まれる。

- (1) 河川のもつ通水能力を損なわない（治水面）。
- (2) 十分な塩水侵入軽減効果を有する（利水面）。また、ある種の生物にとっては汽水域がかけがえのない生存空間となっていることから、場合によってはこれまでの人為的な要因による塩水侵入の増大を最大限食い止める必要がある（環境面）。
- (3) 河川における生態系保全のため、河川環境の連続性を保つ（環境面）。
- (4) 潮止堰（河口堰）の場合のように、停滞水域を作らないようにする（停滞水域の下層水の貧酸素化が水質環境に悪影響を及ぼす：環境面）。
- (5) エネルギーの浪費や人為的な要因による環境変化を極力抑えるため、自然に加わる人の手は必要最小限に留めるべきである（環境面）。
- (6) 簡便で低コストで柔軟な手法であること（敏捷な対応が可能となる：社会ニーズ面）。
- (7) 効果の調節が可能であり、必要があれば後戻りできる技術であること（環境面、社会ニーズ面）。

気泡噴流を用いた塩水侵入の制御法は、上記の要請の大半を満たすことが可能なものであり、今後の大いなる活用が期待される。本技術の開発を行うに当たって、気泡噴流発生装置そのものは技術的にそれ程難しい問題ではないと考えられたため、工法そのものよりも、ソフト面に技術開発のターゲットが絞込まれた。具体的には以下のような目標を設定し研究開発が行われている。

- 1) 本技術の適用対象が自然環境であることから、現地実験を実施する前に十分な事前調査を行う（室内実験による塩水侵入軽減効果の確認、水槽実験による魚類や甲殻類に対する影響評価、主として川内川河口部を対象とした実河川の塩水侵入のメカニズムの解明）。
- 2) 本手法の汎用性を高めるために、室内実験と現地実験のいずれについてもできるだけ幅広い水理条件下で塩水侵入軽減効果の検討を行う。川内川でもし仮に所定の効果が得られたとしても、更により効果的な適用方法を明らかにするための現地実験を継続して行っていく。
- 3) 塩水侵入軽減効果のみならず、水棲生物への影響調査を精力的に行う。また、この問題については漁民を中心にアンケート調査も実施し、できるだけ客観的な評価を行うように注意する。

4-2. 気泡噴流の発生方法と有効な適用方法

(1) 気泡噴流発生装置の概要

以下に川内川河口部に適用された気泡発生装置の概要（図-15参照）、ならびに実用時に発生した問題を解決するために講じられた対策法の具体例を示す。

- a) 気泡発生装置は長さ22mの白ガス管（内径50mm、5.5 m × 4本）に2.5cm ピッチで穴（Φ=2mm）を空

けたものを8セット用い、河川横断方向河床上に敷設した。この際、各管の端部におけるエアレーション効率の低下を考慮し、ラップ長を4mとることとした。なお、本管単体毎に中央にコンプレッサーからの空気圧送取り入れ口を設ける。エア管は変動防止のためアンカーで河床に固定されている。

b) エアレーションの原動力となるコンプレッサーは、左右岸各々に2台ずつ計4台設置された。コンプレッサーの規模は空気圧=12kg/cm²、吐出量=20m³/min.で、1台のコンプレッサーに2セットのエア管を接続し、河床から空気を放出させた。

c) コンプレッサーについては、長期間の実験となるため周辺住家等に対する騒音対策を十分配慮するものとした。ここで、以下のような対策を講じた。

- ・騒音の発生が極力少ない機種を選定する。
- ・消音施設を設ける。

d) 白ガス管およびコンプレッサーからの圧気管の河床部への固定は、長期間の固定および移設を考慮してアンカー方式で行う。また、洪水時には施設が被災する可能性があるため対策が必要である。

- ・施設そのものを、洪水に耐えられる強度とする。
- ・施設を保護する施設を設ける。
- ・洪水時には、一時的に避難させられるような施設とする。

e) 川内川の共同取水口における塩水混入の発生の有無は、河道への塩水の侵入状況に大きく左右される。そこで迅速な対応を可能とするために、川内川河口部の数点に塩分濃度自動観測装置を設置することによりモニタリングシステムを構築した。

(2) 効率的な適用方法

気泡噴流による塩水侵入軽減効果のメカニズムを模式図にして図-16に示す。気泡噴流を侵入塩水底部より発生させると、塩・淡成層の混合により塩水が希釈され、河川上流側への侵入力が低下する。また潮汐の干満差の変化によって塩水侵入長が時間的に変動している場合には、塩水侵入を遅れさせる効果も生じるため、塩水侵入をより有効に抑制することが可能となる。なお、気泡発生断面より上流側でも塩・淡混合水が鉛直方向に十分混合している場合には、気泡発生断面付近で塩水の遡上は効果的に食い止められる。しかしながら、気泡発生断面より上流側で塩・淡混合水が再成層化する場合には、気泡発生断面を越えて比較的多くの塩水が遡上するため軽減効果は小さくなってしまふ。ただ、このような場合でも再成層

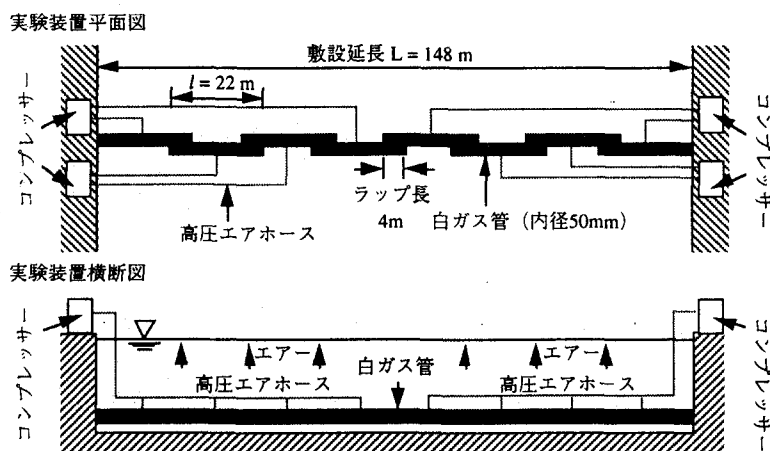


図-15 気泡発生装置概略図

化の生じている上流側断面で新たに気泡噴流を追加して発生させることにより大きな塩水侵入軽減効果を得ることができる。

4-3. 研究のプロセス

1) 室内実験水路の開発

川内川河口部の塩水侵入問題を早急に解決するためには、まず河口部の塩水侵入のメカニズムを正確に把握する必要があった。現時点では数値シミュレーションによる正確な予測が不可能であると判断されたため、河口部の塩水侵入状況を忠実に再現できる室内実験水路の開発が是非とも必要と考えられた。そこで、2章で紹介した実験水路の開発を行い、室内実験で弱混合から強混合までの全ての混合形態を実現することが可能となった。更に、実河川・室内実験水路の違いがあるにも関わらず、混合形態や塩水侵入長の変化が Estuarine Richardson 数という同一の無次元パラメータでは説明可能であることから（2章参照）、この室内実験装置が実河川の塩水侵入のメカニズムをほぼ忠実に再現できることが確認された。

2) 軽減効果の確認ならびに効果的な適用方法の解明

上記の実験水路を用いた室内実験により、まず気泡噴流の塩水侵入軽減効果の確認が行われた（小松ら(1996b)）。この結果、水理条件によって効果に多少の違いが見られるものの、幅広い条件下において気泡噴流の有効性が確認された。更に、最適な気泡発生位置や気泡発生断面数、気泡噴流発生タイミングなどといったより効率的・効果的な適用方法が調べられた。例えば、流下方向に気泡発生断面数を増やすことで、更なる塩水侵入軽減効果が得られる等の知見が得られた（小松ら(1997)）。

3) 魚類・甲殻類等への影響評価

現地実験に先立ち、水槽実験により魚類・甲殻類の気泡噴流への反応等が調べられた。この結果、最初は多少のとまどいを見せるものの一度エア・カーテンを通過して経験してしまえば、その後は難なくエア・カーテンを通過できる等の重要な知見が得られた。

4) 川内川河口部における塩水侵入のメカニズムの解明

川内川河口部において通常時の塩水侵入状況を詳細に現地観測し、塩水侵入の実態（河口の潮汐運動や河川

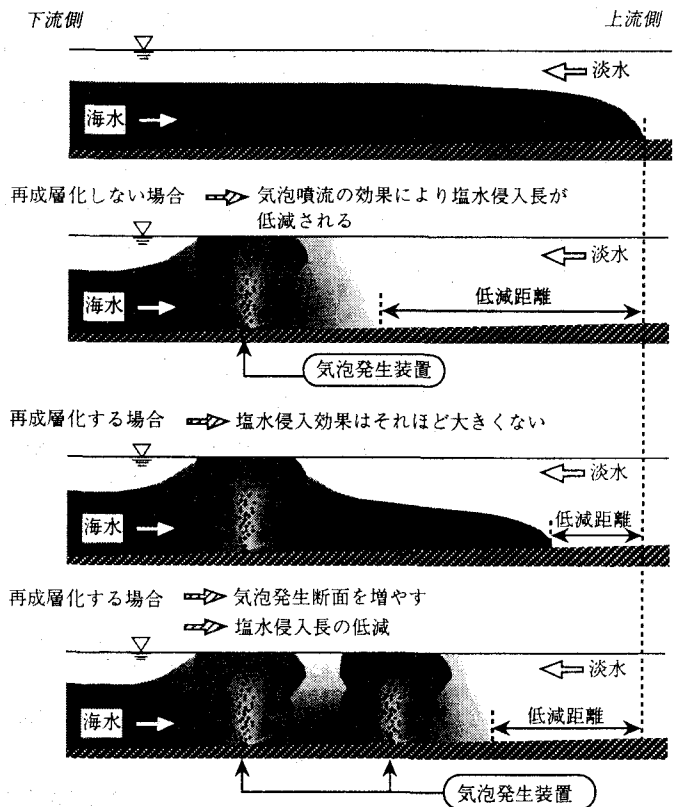


図-16 気泡噴流による塩水侵入軽減効果

流量の変化に対応した塩水侵入状況の変化の定量評価)、丸山取水口において高濃度の塩水が取水される原因やメカニズムが明らかにされた(小松ら(1996a))。

以上のような事前調査の結果から、気泡噴流は塩水侵入を有効に軽減できる手法であり、かつ水棲生物の生態に全く悪影響を及ぼさないと判断されたため、現地実験が行われ、気泡噴流の実河川での効果がより詳細に検討された(なお、気泡噴流以外にも、船外機やポンプを用いた塩・淡水の強制混合による塩水侵入制御法についても検討が行われたが、いずれも気泡噴流に比べて小さな効果しか得られないことが現地実験により明らかになっている)。その内容は以下のである。

5) 現地実験による気泡噴流の効果の観測

川内川河口部の天大橋地点から気泡噴流を発生させて、その効果を調べる現地実験が行われた(写真-1)。事前観測と本実験時の塩水侵入状況の比較を行った結果、気泡噴流の発生により実河川である川内川においても塩水侵入が大幅に軽減され、丸山共同取水口への塩分の混入も有効に阻止されていることが確認された。更に、室内実験より得られた知見を基にして、気泡噴流の適用方法を種々変化させる現地実験を行い、気泡噴流のより効率的・効果的な適用方法の有用性が実河川においても確認された(小

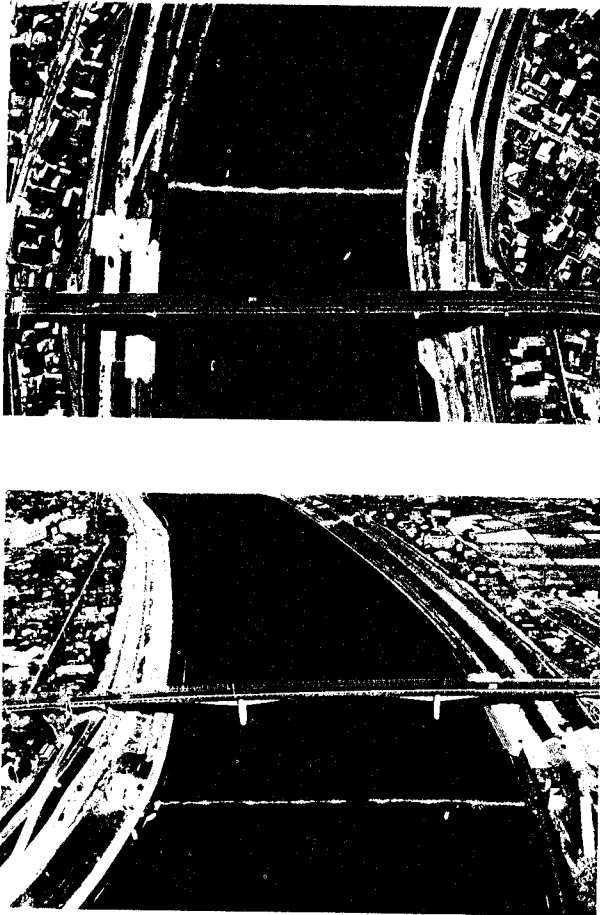


写真-1 川内川河口部での気泡噴流の発生状況

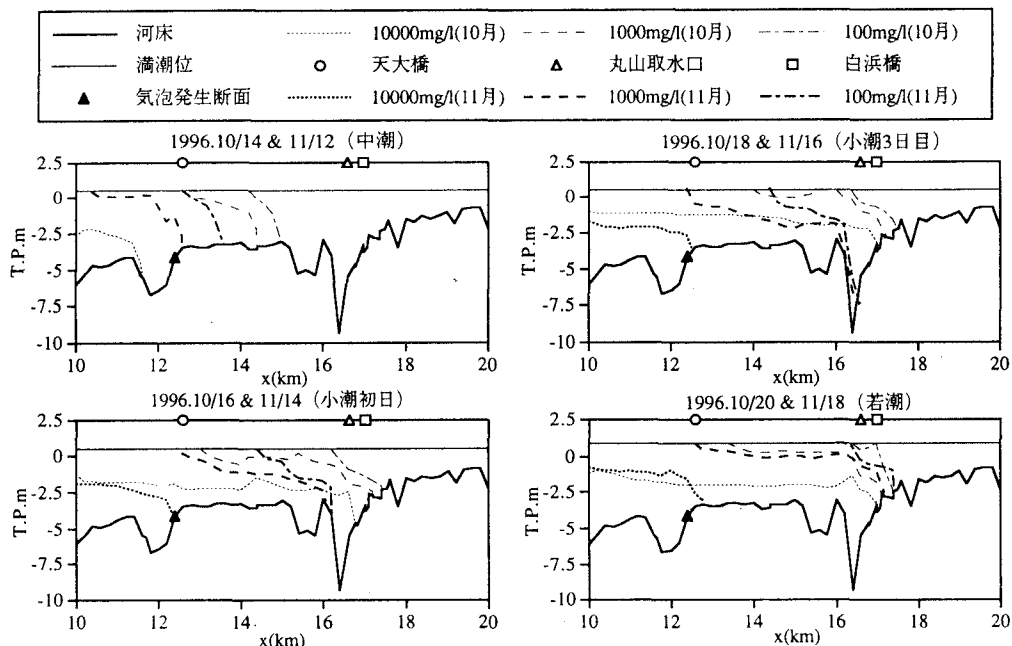


図-17 気泡噴流発生による塩水侵入状況の変化 (10月; 気泡噴流発生なし、11月; 気泡噴流発生あり)

松ら(1998b))。

6) 環境に対する評価

河口部に生息する魚類や甲殻類に対する気泡噴流の影響を把握するために、気泡噴流発生前後のそれらの生息数を調べる現地調査が行われた。この結果、気泡噴流が水棲生物に与えるマイナスの影響はないことが室内実験と同様実河川でも確認された (小松ら(1998b))。むしろ、侵入塩水の先端付近では溶存酸素が欠乏して貧酸素状態となることから、気泡噴流の発生は溶存酸素の供給の面からも水域の環境改善に有効な手法であることが期待される。

4-4. 川内川河口部での現地実験結果

上述の技術開発の一連の成功を参考にして現在塩水侵入の問題が深刻化している宮崎県の五ヶ瀬川支流北川の河口部においても気泡噴流の適用が検討されているが、現時点で気泡噴流が実際に実施されて成功が確認された例は川内川河口部のみである。そこで、川内川河口部での施工実績を現地実験結果を基に具体的に紹介することにする。

図-17は気泡噴流の発生のない1996年10月の塩水侵入状況と、気泡噴流を発生させた

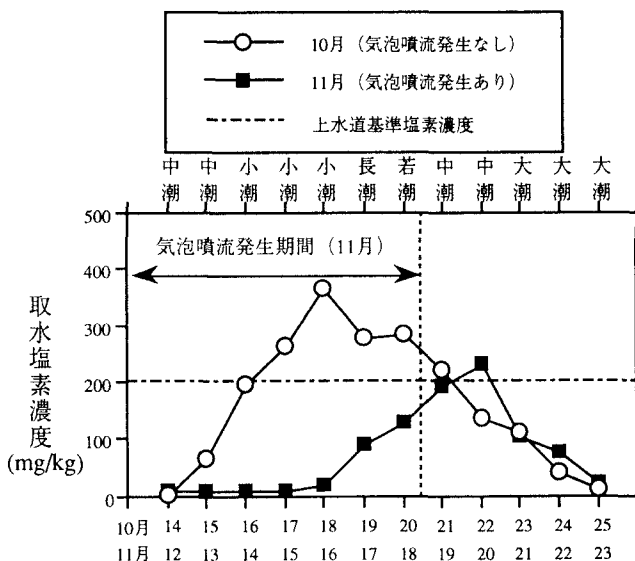


図-18 事前調査と本調査の丸山取水口における取水塩素濃度の経時変化 (10月; 気泡噴流発生なし、11月; 気泡噴流発生あり)

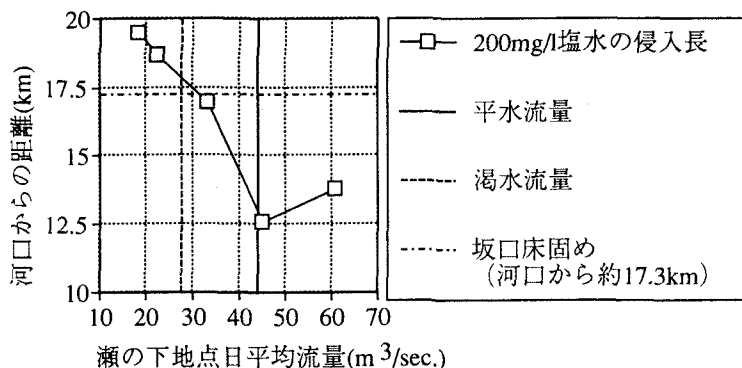


図-19 筑後川における河川流量と塩水侵入長の関係（大潮満潮時）

11月の塩水侵入状況を比較したものである（なお、川内川の塩水侵入を規定する主要な要因である河川流量と河口の潮位変動は両期間ではほぼ一致していた）。各図は小潮初日の前々日の中潮（10月14日と11月12日）、小潮1日目（10月16日と11月14日）そして3日目（10月18日と11月16日）、ならびに若潮時（10月18日と11月16日）の満潮時における10000mg/l, 1000mg/l, 100mg/lの等塩素イオン濃度線を示したものである。気泡発生のある場合にはいずれも、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。次に、丸山共同取水口における両者の取水塩分濃度の経時変化を潮汐期間を揃えて図-18に示す。11月に気泡を発生させた場合には、気泡噴流の効果により取水中の塩分濃度の上昇は10月に比べ大幅に遅れ、その値も低く抑えられていることが分かる。これらの結果から、気泡噴流の発生により塩水侵入が軽減され、そのため、丸山共同取水口への高濃度塩分の混入も阻止されたことが容易に見て取れる。

4-5. 今後の展開

気泡噴流の発生は、弱混合型河川の塩水侵入を軽減するのに有効である。我が国では有明海流入河川以外のほとんどの河川が、小潮時に弱混合となって塩水侵入が大きくなっている。しかも、河道浚渫を行うと相対的に弱い混合形態に移行するという河口の混合特性を考慮すると、この手法へのニーズは今後益々高まっていくものと考えられる。一方、塩水侵入制御法として潮止堰（河口堰）が設置されることもあるが、満潮時には堰を締め切るため堰近傍上流側の停滞水域の底層が貧酸素化し、水質悪化を招くという問題が生じている。このような場合、堰の開放が貧酸素化の防止につながるが、堰の開放によりその上流側に多くの塩水が侵入するため、同時に気泡噴流を発生させて塩水の侵入を阻止しようという試みが利根川等でも検討されている。この例に見られるように、今後の塩水侵入の問題はその形態をさまざまに変化させて現れて来ることが予想されるが、気泡噴流による塩水侵入の制御法は治水、利水、水環境の全てに配慮した汎用性が高く柔軟な技術である

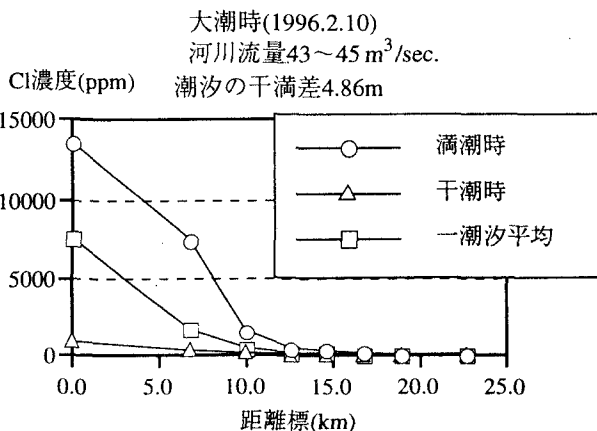


図-20 筑後川における大潮時の断面平均塩分濃度分布

ことから、多くのケースに対してその有効性が発揮されることが期待される。

5. 河川水の間断放流による強混合型塩水侵入の制御

5-1. 強混合型塩水侵入の特性と間断放流による塩水侵入の制御

一般に、感潮河川河口部の塩水侵入は各河川固有の水理条件の下に実現されているため、同一の混合形態を示す塩水侵入でも河川毎にその特性が大きく異なっていることも少なくない。しかしながら、潮汐運動の大きな強混合型河川では、密度差に起因した流れや風などの影響は比較的小さい

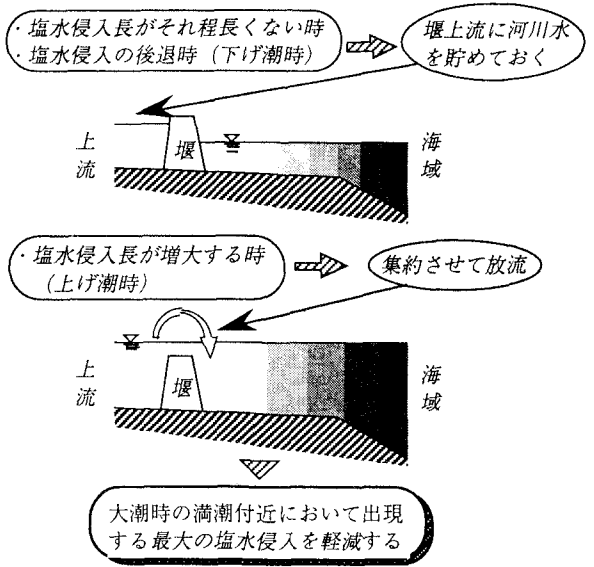


図-21 河川水の間断放流の原理模式図

ことから、河道形状の特性や履歴の効果に極端な違いがなければ、代表的な河川の塩水侵入状況を調べることにより、一般的な特性を明らかにできるものと思われる。そこで、我国の代表的な強混合型河川であり観測データも豊富な筑後川の塩水侵入特性を用いて、強混合型河川特有の塩水侵入の概要を紹介することにする。

筑後川において、河口から約17.5km地点に位置する坂口床固めの上流域は、床固めの塩水遡上阻止効果もあって通常は塩水がほとんど入り込まない淡水域となっており、エツの産卵域として格好の場を提供している。大潮時の瀬の下地点日平均流量と満潮時における200ppmの塩水の到達地点との関係を調べてみると、河川流量の減少に伴い、上流側への塩水侵入は増大しており、1年に10日の確率で出現する渇水と大潮時とが重なると、現在でも200ppm以上の塩水が坂口床固めを越えて侵入していることが分かる（図-19；ただし、図中の平水および渇水流量は平成7年の値を用いている）。

ところで、筑後川河口部に面した有明海は、その閉鎖的な形状により生じるセイシュのため潮位変動が大きく、河口部の混合形態は干満差が4～5mの大潮時には強混合形態を、1.5～2.5mの小潮時には緩混合形態（時折り弱混合形態）を示している。塩水侵入状況も混合形態の遷移とともに大きく変化しており、通常、緩混合形態を示す小潮時の塩水侵入長はそれほど小さくなく、強混合形態を示す大潮時の満潮付近で塩水侵入長は最大となっている。また、大潮時には潮位の変動に伴う海域からの塩水の入退量が大きいため、大潮の干潮時には河道内に塩水はほとんど残っていない状況となっている（図-20）。

以上のような筑後川の塩水侵入状況は、比較的多くの強混合型河川に共通の性質を示していると考えられる。そこで、塩水侵入長がそれ程長くない干潮時や小潮時に、河川淡水を河口堰やダム群に貯水しておき、大潮の上げ潮時の大量の塩水侵入に対抗させて河川水を集約して放流するという手法を適用することにより、大潮の満潮時付近に出現する最大の塩水侵入長を軽減できることが期待される（図-21）。なお、強混合型河川では潮汐やそれに伴って生じる流れが元々非常に大きいことから、間断放流による流況の変化が環境へ与えるインパクトはほとんどないものと考えられる。

5-2. 室内実験による効果の検討

小松ら(1997)は、河川水のトータルの流量は同じであるが、強弱を付けた間断放流により強混合型の塩水侵入を軽減する方法について実験的に検討した。得られた結果を以下に要約しておく。

- 1) 潮汐運動に比べ、河川流量の影響が小さい強混合型河川においても、一潮汐間に流入する河川淡水の volume がある程度大きくなれば、上げ潮時に集約して河川淡水を流下させることにより塩水侵入軽減効果を得ることができる。
- 2) 間断放流を行う時間帯を上げ潮時に固定した場合、間断放流の効果は一潮汐間に流入する淡水の体積と tidal prism との比によって決定され、河川流量の供給パターンには依存しない。これは強混合型河川の満潮時の侵入塩分濃度分布が、河道部に流入して占める塩水の volume と上げ潮時に流下する河川水の volume によって基本的に決定されるからである。
- 3) 間断放流の効果は、放流開始時から数潮汐周期のうちに速やかに現れることが分かった。現地での適用を考える場合、塩水の侵入が最も大きくなる数潮汐周期間のみ効果が現れるような短期間の適用も十分に可能である。

6. まとめ

前章までに、室内実験結果、ならびに実河川での現場観測結果を中心に河口からの塩水侵入のメカニズムとその制御法について述べてきた。現象が非定常でかつ複雑なこともあって、数値シミュレーションの精度が実験や現場実測の精度に追いついていないことから、本稿では数値シミュレーションについては触れなかった。強混合・緩混合・弱混合それぞれの混合形態だけであれば数値シミュレーションでもある程度扱えるが、例えば緩混合から弱混合に遷移する場合は、シミュレーションでのアプローチは極めて困難となる。シャープな密度勾配をもつ内部境界面の存在がネックとなっている。

本稿では室内実験の結果を多く用いて話を進めてきたが、勿論室内実験にも限界がある。その理由として、Froude 数と内部 Froude 数を同時に実河川の値と一致させることが容易ではないこと、室内実験では潮汐流や河川流の Reynolds 数が小さすぎてそのままでは混合力のある乱流状態を再現しにくいこと、また準定常状態を実現するためには河川水だけでなく海域部での塩水の補給も必要となってくるが、その適切な方法がいまだ明かでないこと等が挙げられる。ただ、現場観測と比べると水理条件のコントロールが、格段に容易であることなどから、複雑な河口密度流現象を解明するには室内実験はやはり最有力な手法となっている。

将来の海面上昇の可能性や他の種々の要因も全て、河口からの塩水侵入の問題を近い将来一段と深刻化する方向に作用しているように著者には思われる。早急に有効な対策を講じる必要性を感じているが、塩水の密度差により生じる侵入力は結構大きなもので、これを防ぐのは容易ではなく、まともに対抗しようとすればやはり大きなエネルギーが必要となる。創意工夫を凝らした賢明な対処が望まれる。

本稿で述べたマウンド、気泡噴流、河川水の間断放流などの対策の他にも、下水処理水や工場廃水等そのまま捨てられている淡水を、弱混合状態の底層の塩水楔の中に噴出させて楔を破壊する方法も有望ではないかと著者は考えている。今のところ室内実験では十分な結果は得られていないが、今後研究を続けて可能性を探ってみる予定である。

なお、他の流れの場と同様、河口の問題でも近い将来数値シミュレーションが有力な手法となってくるものと思われる。その際、数値シミュレーションをフルに活用するためにも河川域と海域との相互作用、あるいは河口における流れや物質濃度の境界条件を明らかにしておく必要があるが、これらに関する知見は少なく不明な部分がまだ多く残されている。官をも巻き込んでこの分野のこれからの活発な研究を期待したい。

参考文献

- 1) 安達貴浩・小松利光・三島勇一・黒目剛(1998)：筑後川河口部における塩水侵入の変動特性、水工学論文集 第42巻、pp.793-798.
- 2) 有田正光(1988)：塩水楔の制御法とその効果、水理講演会論文集 第32巻、pp.179-184.
- 3) 加藤始・三村信男(1991)：河口密度流の流速・密度場の非定常特性と混合形態の分類、海岸工学論文集 第38巻、pp.181-185.
- 4) 久保幸範・小松利光・安達貴浩・田吹泰孝(1999)：潮差が非定常に変化する河口部の塩水侵入についての実験的研究、土木学会西部支部研究発表会 講演概要集、pp.276-277.
- 5) 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、pp.493-498.
- 6) 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.
- 7) 小松利光・安達貴浩・孫双科・柴田敏彦(1996c)：強混合型感潮河川における見掛けの拡散フラックスの評価法、水工学論文集 第40巻、pp.505-510.
- 8) 小松利光・安達貴浩・柴田敏彦・松永英伸・朝田将・室長武司(1997)：気泡噴流を用いた河口部塩水侵入の人工制御、海岸工学論文集 第43巻、pp.341-345.
- 9) 小松利光・安達貴浩・朝田将・室永武司(1998a)：河川水の間断放流による河口部塩水侵入の人工的制御、水工学論文集 第42巻、pp.787-792.
- 10) 小松利光・下田五郎・松岡弘文・安達貴浩・大和則夫・室永武司(1998b)：気泡噴流による河口部塩水侵入の制御に関する現地実験、海岸工学論文集 第45巻、pp.446-450.
- 11) 須賀堯三(1979)：感潮河川における塩水くさびの水理に関する基礎的研究、土木研究所資料 1537号、pp.144-199.
- 12) 古谷智史・有田正光(1996)：塩水遡上防止工に関する研究、水工学論文集 第40巻、pp.511-516.
- 13) 水資源白書(1998)：国土庁長官官房水資源部編.
- 14) The ASCE Task Committee (1992)：Effects of Sea-Level Rise on Bays and Estuaries, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE., Vol.118, No.1, pp.1-10.
- 15) Fischer, H.B. (1972)：Mass Transport Mechanism in Partially Stratified Estuaries, J.Fluid Mech.,Vol.53, part4,pp.671-687.
- 16) Fischer, H.B. , List, E.J., Koh, R.C.Y. Imberger, J. & Brooks, N.H. (1979)：Mixing Inland and Coastal Waters, Academic Press, pp.229-314.
- 17) Hansen, D.V. & Rattray, M. (1965)：Gravitational Circulation in Straits and Estuaries, J. Mar. Res., 23, pp.104-122.
- 18) Hansen, D.V. & Rattray, M. (1966)：New Dimensions in Estuary Classification, Limnol.Oceanogr., 11, pp.319-325.
- 19) Ippen, T. (1968)：Salinity Intrusion in Estuaries, Estuary and Coastline Hydrodynamics (Ippen, ed.), McGraw-Hill Book Company, Inc., pp.598-629.
- 20) Jirka, G.H. & Arita. M. (1987)：Density Currents or Density Wedges：Boundary-Layer Influence and Control Methods, J. Fluid Mech., 117, pp.187-206.
- 21) Nomitsu,T. and M.Okamoto(1927)：The Causes of the Annual Variation of the Mean Sea Level along the Japanese Coast, Mem.Coll.Sci.Kyoto. Imp.Univ., Vol.10, pp.125-161.
- 22) Riger, B. P. (1973)：Minimum length of salt intrusion in estuaries. Journal of the Hydraulics Division , ASCE, Vol.99, No.HY9, pp.1475-1497.
- 23) Simmons, H.B. (1968)：Field Experience in Estuaries, Estuary and Coastline Hydrodynamics (Ippen ,ed.), McGraw-Hill Book Company, Inc., pp.673-690.