

気泡噴流を用いた河口部塩水侵入の人工制御

小松利光* ・安達貴浩** ・柴田敏彦***
松永英伸**** ・朝田 将***** ・室永武司*****

1. 緒 言

感潮河川河口部の塩水侵入の形態は、強混合、緩混合、弱混合と大きく3種類に分類されるが、この内、塩水が楔形状で河川上流側に侵入する弱混合形態は潮汐が比較的小さい河川において多く見られる。弱混合形態の塩水侵入の程度は、重い塩水が淡水の下に潜ろうとする内部重力の大きさに主に規定されており、緩混合から弱混合形態を示す河川においては、小潮時付近で成層が最も安定し塩水侵入が最大となることが観測されている（小松ら（1996 a））。

小松ら（1996 b）は、このような弱混合形態の塩水侵入特性に着目し、気泡噴流を塩水楔の底部より発生させて塩淡水を混合させることにより、局所的にでも内部重力の効果を低減できれば、塩水侵入を軽減できることを室内実験により明らかにした。気泡噴流を用いる手法は、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、実用的な手法として期待が寄せられている。

九州西南部に位置する川内川では、河口より16.6 km上流に位置する丸山取水口において、時折、上水道基準値を越える高濃度塩水が混入するという問題が生じている。小松ら（1996 d）は、室内実験で得られた知見に基づき、川内川河口より12 km上流の地点において実際に気泡を発生させ、現地での塩水侵入軽減効果を調べた。その結果、通常では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に侵入しているはずの若潮時に、気泡噴流の効果により塩水侵入が軽減され、塩水混入が阻止されるということが明らかとなった。しかしながら、取水口への塩水の混入は一応阻止できたものの、塩水侵入が最も長くなる長潮時や若潮時には大幅な塩水侵入軽減効果は見られず、気泡発生断面より上流側で塩・淡水混合水が再成層化し、比較的高濃度の塩水が丸山取水口付近まで侵入していたことが確認されている。このため、

渇水期等の塩水侵入がより深刻となるケースを想定すると、気泡噴流の塩水侵入軽減効果を一層高めるための何らかの方策が必要と思われる。

そこで、今回は、より効果的かつ効率的な気泡噴流の適用方法を明らかにするために、室内感潮河川水路を用いて、気泡噴流の発生断面数や発生時間間隔を変化させた実験を行い、それらの効果の基本特性について調べた。なお、既に本研究の知見を活かし、川内川において二断面における気泡噴流の発生が1996年10月以降実施されている。

2. 実験装置および実験方法

今回、図-1に示すように気泡噴流を河幅方向に一様に発生させた場合の基本的な効果を明らかにするため、表-1に示す条件の下で室内実験を行った。室内実験装置として、小松ら（1996 b）によって開発された長さ20 mの河道部をもつ感潮河川水路を用いた。また、実際の河川は弱混合形態の場合でも潮汐の影響を受けていることを考慮し、弱混合形態を維持する程度に、潮位振幅Aの潮汐を発生させて実験を行った。

実験方法としては、まず、気泡を発生させない場合の準定常状態の塩水侵入を実現した後に（以下、“気泡発生なし”と呼ぶことにする）、気泡の発生を開始した。その後、気泡発生の条件下での準定常状態が実現されるまで実験を継続した。

塩分濃度の測定は、温度補償内蔵型の塩分濃度計（ケネック社 MK-406）を用いて行い、更に、塩水をフルオレセインナトリウムで着色し、塩水楔の挙動の目視観測を行った。

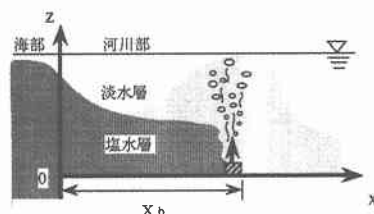


図-1 気泡噴流模式図及び座標の定義

* 正 会 員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科

** 学生会員 工修 九州大学大学院工学研究科博士後期課程
水工土木学専攻・日本学術振興会特別研究員

*** 正 会 員 九州大学技官 工学部建設都市工学科

**** 正 会 員 (株)西松建設

***** 学生会員 九州大学大学院工学研究科修士課程水工土木学専攻

表-1 実験条件

(河口平均水深 ($x=0$) と潮汐周期に関しては $H_0=133$ mm, $T=240$ s という共通の条件を用いている)

ケース名	実験名	河口潮汐の振幅 A (mm)	淡水流量 Q_0 (cm ³ /s)	海域の塩分濃度 C_0 (g/kg)	気泡発生断面 X_0 (m)	気泡の発生条件
Case-1	Run 1-1	2.5	56	3	—	気泡発生なし*
	Run 1-2				2	気泡連続発生*
	Run 1-3				4	
	Run 1-4				5	
	Run 1-5				8	
	Run 1-6				9	
	Run 1-7				11	
	Run 1-8				12	
Case-2	Run 2-1	6	56	3	—	気泡発生なし*
	Run 2-2				2	気泡連続発生*
	Run 2-3				5	
	Run 2-4				8	
Case-3	Run 3-1	6	30	3	—	気泡発生なし*
	Run 3-2				2	気泡連続発生*
	Run 3-3				6	
	Run 3-4				10	
Case-4	Run 4-1	7	50			気泡発生なし*
	Run 4-2					気泡連続発生*
	Run 4-3					最大上げ潮周り $T/2$ *
	Run 4-4					最大下げ潮周り $T/2$ *
	Run 4-5					満潮周り $T/2$ *
	Run 4-6					干潮周り $T/2$ *
Case-5	Run 5-1	2.5	30	1	5	気泡発生なし*
	Run 5-2					気泡連続発生*
	Run 5-3					最大上げ潮周り $T/2$ *
	Run 5-4					最大上げ潮周り $T/3$ *
	Run 5-5					最大上げ潮周り $T/4$ *
	Run 5-6					
Case-6	Run 6-1	2.5	56	3	2.5	気泡発生なし*
	Run 6-2				2	気泡連続発生**
	Run 6-3				5	
Case-7	Run 7-1				5.7	気泡連続発生*
	Run 7-2				6.7	
	Run 7-3				7.8	
	Run 7-4				8.9	
	Run 7-5				7.8	
	Run 7-6					最大上げ潮周り $T/2$ *

*) 各断面からの気泡発生量 $Q_b = Q_{ec}$

**) 各断面からの気泡発生量 $Q_b = 2Q_{ec}$

(Q_{ec} : 気泡発生地点の塩・淡水を鉛直方向に全水深に渡って混合できる最小気泡量)

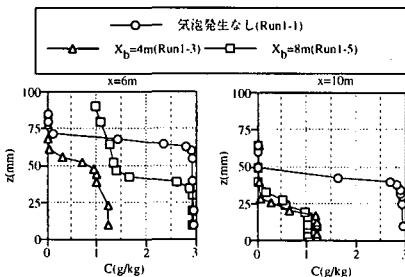


図-2 気泡発生断面が異なる場合の塩分濃度鉛直分布の比較

データの処理に際して、各点での数周期間の時系列塩分濃度データを移動平均し、潮汐成分よりも周期が十分小さい乱れ成分を除去することにより、塩分濃度の確率的平均値を算出した。この平均塩分濃度の結果を用いて気泡発生時と気泡発生なしの場合を比較して塩水侵入軽

減効果の程度を評価した。

なお、座標系としては、図-1に示すように、海域と河川部の境界面上の河床中央に原点をとり、河床に沿って上流側へ x 軸を、 x 軸と垂直上向きに z 軸をもつ鉛直 2 次元座標系を用いている。

3. 気泡発生位置の影響

3.1 気泡発生位置の影響を調べるための実験

川内川での現地実験の際に、塩水侵入長が最も長くなる若潮時において、塩・淡混合水が再成層化していることが確認されている。以前行われた室内実験では気泡発生断面は比較的狭い範囲に限られていたため、今回は、特に再成層化が生じる場合について、気泡発生位置を広範囲に変えて実験を行い、その影響をより詳細に検討した。

まず、海域の塩分濃度 $C_0=3$ g/kg、潮位振幅 $A=2.5$ mm、河川流量 $Q_0=56$ cm³/s と固定し、気泡発生位置 X_0 のみを変化させる実験を行った (Run 1-1~1-8)。図-2に Run 1-3、1-5 の 2 つの実験から得られた満潮時における 2 地点の塩分濃度の鉛直分布を示す。本シリーズでは、気泡発生なしの場合に実現される 15 m 程度の塩水侵入長に対して、気泡発生位置を $x=2$ m から 12 m までの範囲で変化させている。いずれの場合も気泡発生断面上流側で図-2に示されているような塩・淡混合水の再成層化が確認された。また、満潮時の断面平均塩分濃度 $\langle C \rangle$ の流下方向分布を比較すると、下流側で気泡を発生させればさせるほど塩水侵入軽減効果が大きくなっていることが分かる (図-3)。

次に、海域の塩分濃度を $C_0=3$ g/kg と固定したまま、潮位振幅を $A=6.0$ mm に大きくした場合、更に河川流量を $Q_0=30, 56$ cm³/s に減少させた場合の 2 種類について実験を行った (Case-2, 3)。この 2 ケースに関しては、気泡をどの断面より発生させてもその上流側で塩・淡混合水の再成層化は見られなかった。この場合も、Case-1 と同様、気泡発生位置が下流側であればあるほど塩水侵入軽減効果は大きくなっていた。

3.2 実験結果の考察

次に、気泡を発生させる位置の塩水侵入軽減効果に及ぼす影響を評価するために、気泡発生位置 X_0 と満潮時における塩分の侵入量 M との関係調べた。 X_0 と M をそれぞれ気泡発生なしの場合の満潮時における塩分侵入量 M_0 及び塩水侵入長 L_{50} で無次元化して表わし、小松ら (1996 c) の実験結果も併せて図-4 にプロットした。なお、気泡発生断面より上流側で再成層化が生じる場合を黒塗の記号で、再成層化が生じない場合を白抜きの記号で表示した。その結果、気泡発生断面を流下方向に変化させた場合、その効果の現われ方は、気泡発生断面上流

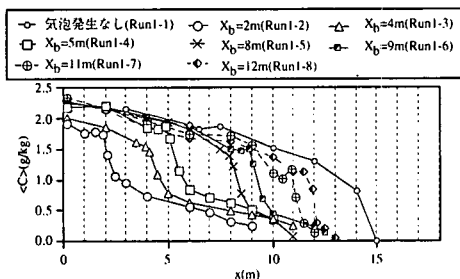


図-3 気泡発生断面が異なる場合の塩水侵入状況の比較 (Case-1)

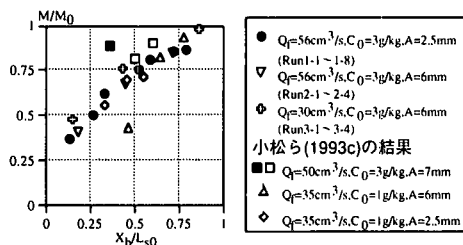


図-4 気泡発生断面が異なる場合の塩分侵入量の比較

側へ侵入した塩水の混合形態により以下の3つに大きく分類されることが明らかとなった。

1) 気泡発生断面より上流で塩・淡水混合水が鉛直方向に混合されながら強混合的に侵入する場合、発生断面が下流側に位置すればするほど塩水侵入軽減効果は大きくなる。

2) 弱混合型の場合河口に近づくほど、淡水層と塩水層の厚さの比は小さくなっていく。このため、気泡を下流側で発生させればさせる程、淡・塩水層が十分混合しても混合水濃度は高くなり、内部重力の効果も大きくなるため再成層化が起りやすくなってくる。したがって、上流側の上・下層の厚さの比が大きい断面より気泡を発生させると、1)のタイプの強混合的な混合水の侵入が見られるが、気泡発生断面を下流側に移動させていくと、塩・淡水混合水の再成層化が生じるような場合が起り得る。混合水が再成層化するようになると、塩水侵入軽減効果は著しく低下するため、下流側で気泡を発生させても、塩水侵入軽減効果は大きくはならない。このような場合には下流端でも上流端でもない途中の断面において最適な発生断面が存在することになる(図-4中の□, ■を参照)。

3) 塩水楔中のいずれの断面より気泡を発生させても、塩・淡水混合水が気泡発生断面上流側で再成層化する場合、1)と同様、下流側で気泡を発生させる程、塩水侵入軽減効果は大きくなる。

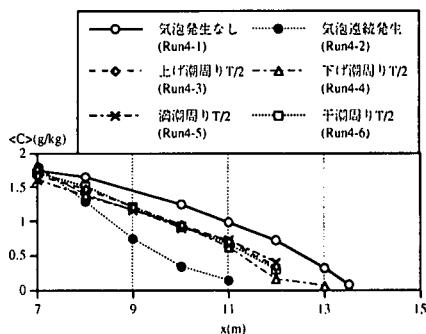


図-5 気泡断続発生タイミングが異なる場合の満潮時における塩水侵入状況の比較

4. 断続的な気泡発生についての検討

4.1 気泡発生最適時間帯を調べる実験

河口部の塩水侵入を軽減させるために気泡噴流を適用する場合、気泡を長時間連続的に発生させると、魚類の往来が遮断される恐れがあることから、気泡を断続的に発生させた方が、実用上好ましい場合も考えられる。また、潮汐の影響を受ける場合、上げ潮時に海水が河道内に侵入し、満潮付近において塩水侵入長が最も長くなることから、上げ潮時のみに気泡を発生させても連続発生と同程度の効果が現れることが予想される。

そこで、海域の塩分濃度 $C_0 = 3 \text{ g/kg}$ 、気泡発生位置 $X_b = 7 \text{ m}$ 、一潮汐間の気泡発生時間を半周期に固定し、河口の潮位の変動に連動させて気泡の発生を断続的に繰返す実験を行った。気泡の発生の時間帯は、最大上げ潮時周り、最大下げ潮時周り、満潮周り、干潮周りの4通りである。なお、気泡の発生流量 Q_b は、発生地点の塩・淡水を鉛直方向に全水深に渡って十分混合できる量の内の最小量 Q_{bc} に固定している。

4通りのタイミングで気泡を断続発生させた場合の満潮時における断面平均塩分濃度 $\langle C \rangle$ の流下方向分布を図-5に示す。この結果から、一潮汐間のうちの気泡発生時間が一定であれば、断続的な発生のタイミングに違いがあっても、満潮時の塩水侵入状況にはほとんど差がないことが分かる。次に、河道内に侵入している総塩分量 M の経時変化を調べた。 M を気泡の発生がない場合の満潮時の塩分の侵入量 M_0 で無次元化して表わし図-6に示す。潮汐変動に伴い塩水が河道に入退潮する量 M の変動の振幅は、気泡の発生の有無や発生時間のタイミングには依存せずほぼ一定である。また、断続的に気泡を発生させても、気泡発生時だけで塩水の侵入が抑えられるわけではなく、一潮汐を通して平均的に塩水侵入が抑制されていることが分かる。なお、図-6の結果と同様 M にも発生のタイミングによる有意な差は見られず、半周期

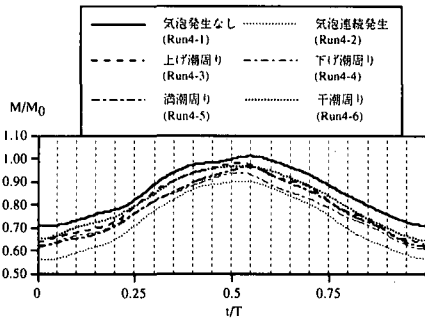


図-6 気泡の断続発生時の塩水侵入量の経時変化 (ただし、 $t=0$ は干潮時を意味する。)

毎の断続的な気泡発生で、どのタイミングの時間帯の場合にも、連続的な気泡発生時と気泡発生なしの場合のほぼ中間量の塩分量が侵入している。

4.2 気泡発生の時間幅の効果についての検討

次に、気泡の断続的な発生の場合の時間幅の効果について調べた。 $C_0=1\text{ g/kg}$, $A=2.5\text{ mm}$, $Q_f=30\text{ cm}^3/\text{s}$ とし、気泡の断続発生の時間帯の中心を最大上げ潮時に固定し、時間幅 T_b を $1/2$ 周期, $1/3$ 周期, $1/4$ 周期と3通りに変化させて実験を行った。得られた塩分濃度の測定結果より気泡を断続的に発生させた場合と気泡を連続的に発生させた場合との塩分侵入の低減量の比 $(M_0-M)/(M_0-M_c)$ を算出し、その値を気泡発生時間幅 T_b/T に対してプロットしたものが図-7である(ただし、添え字0, cはそれぞれ気泡発生なしの場合と気泡を連続的に発生させた場合を意味する)。 T_b/T と $(M_0-M)/(M_0-M_c)$ とはほぼ線形の関係にあり、一潮汐の間の気泡による鉛直混合促進効果を受ける時間の長さに比例して、塩水侵入軽減効果も増加している。また、図-7にはCase-4の結果も併せてプロットしているが、 C_0 等の実験条件が異なるにもかかわらず、Case-5の結果と同様に、 T_b/T に比例して塩水侵入軽減効果 $(M_0-M)/(M_0-M_c)$ は増加していることが分かった。以上の結果より、十分時間が経過した後の準定常状態では、塩水侵入軽減効果は予想に反し一潮汐の間の気泡発生の時間の長さのみによって決定されてしまうため、断続的な気泡発生を行っても、連続的な場合ほどの効果は得られないということが明らか

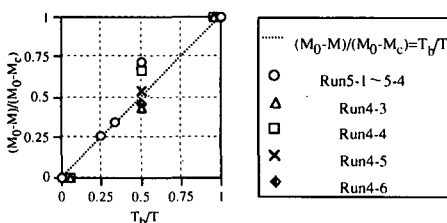


図-7 気泡を断続時に発生させた場合の時間幅の効果

となった。

5. 気泡量及び気泡発生断面数の効果

5.1 再成層化する場合の気泡の追加発生

$C_0=3\text{ g/kg}$, $A=2.5\text{ mm}$, $Q_f=56\text{ cm}^3/\text{s}$ という比較的内部重力の効果が大きい場合を対象に、気泡量及び気泡発生断面数の効果を調べた。 $X_b=2.0\text{ m}$ もしくは 5.0 m において鉛直方向に十分混合できる最小の気泡量 Q_{bc} を発生させた場合、気泡量を Q_{bc} の2倍にした場合、更に、気泡発生断面を $X_b=2.0\text{ m}$ 及び 5.0 m の2点に増やし、各断面より Q_{bc} の気泡を発生させた場合の5つのケースについて実験を行った。

1断面より気泡を発生させた場合、気泡発生断面では塩・淡水が鉛直方向に完全に混合されても、この実験条件では入退潮の混合能力に対して内部重力の効果が比較的大きいため、その上流側で再び成層化していることが確認された。また、満潮時における断面平均塩分濃度 $\langle C \rangle$ の流下方向分布(図-8)から、同一地点で Q_{bc} より気泡量を増やしても、塩水侵入状況にはほとんど変化が見られないが、塩・淡水層が再形成されている上流側の他の断面から気泡を追加して発生させると、1断面で気泡を発生させた場合よりも塩水侵入を更に軽減できることが明らかとなった。

5.2 再成層化しない場合の気泡の追加発生

次に、潮位振幅をやや大きくして、 $C_0=3\text{ g/kg}$, $A=3.5\text{ mm}$, $Q_f=50\text{ cm}^3/\text{s}$ として実験を行った。この条件下では、 $X_b=7.0\text{ m}$ より気泡発生を行っても、気泡発生断面より上流側での塩・淡混合水の再成層化は見られなかった。気泡発生断面を $X_b=7.0\text{ m}$ 及び 8.0 m の2点に増やし、気泡を連続的に発生させた場合と、各周期毎に上げ潮周りの半周期間だけ断続的に気泡を発生させた場合について、それぞれの準定常状態を実現した。

気泡発生断面付近の断面平均塩分濃度の流下方向分布(図-9)を見ると、1断面もしくは2断面より気泡を連

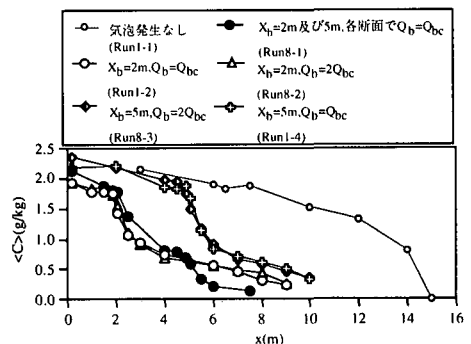


図-8 気泡量及び気泡発生断面を変えた場合の塩水侵入状況の比較

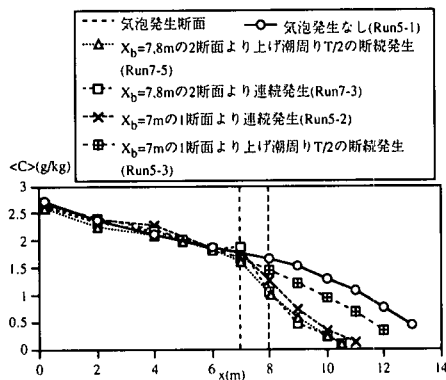


図-9 再成層化しない場合で2断面から連続的もしくは断続的に気泡を発生させた場合の塩水侵入状況の比較

断続的に発生させた場合の塩水侵入状況はほぼ一致しており、一断面の気泡発生時に上流側で再成層化が生じないような場合には、上流側の他の断面で気泡を追加発生させても更なる塩水侵入軽減効果は得られないということが分かった。また、気泡を半周期毎に断続的に発生させても発生断面を2ヶ所に増やせば、1断面で連続的に気泡を発生させた場合と同等かそれ以上に塩水侵入を軽減できることが明らかになった。更に、発生断面が2断面の場合、気泡を連続的に発生させても断続的に発生させても、塩分濃度の鉛直分布や塩水侵入軽減効果にあまり差が見られなかった(図-10)。以上の結果より、一潮汐間の気泡発生時間が長ければ、それだけ弱混合の塩水と淡水との混合が促進され、上流側への塩水侵入軽減効果も増大するが、気泡発生断面より上流側の塩・淡水が水深方向に十分混合されて再成層化しない状態になってしまえば、それ以上気泡発生断面を増やしたり気泡量を増やしたりしても更なる塩水侵入軽減効果は得られないことが明かとなった。

6. 結 論

本研究の結果、以下のような知見が得られた。

1) ある限られた下流側の区間で気泡を発生させる時だけ、気泡噴流発生断面上流側で塩・淡混合水の再成層化が生じるような場合、中流断面で効果が最大となるような最適気泡発生断面が存在する。

2) いずれの断面より気泡を発生させても、その上流側で再成層化もしくは混合といった同一の形態で塩・淡混合水が侵入する場合、下流側で気泡を発生させればさけるほど塩水侵入軽減効果は大きくなる。

3) 潮汐の影響を受ける河川において、断続的に気泡を発生させた場合、気泡発生のタイミングが変わっても潮汐に伴い変動する塩分侵入量はほとんど変わらず、一潮汐

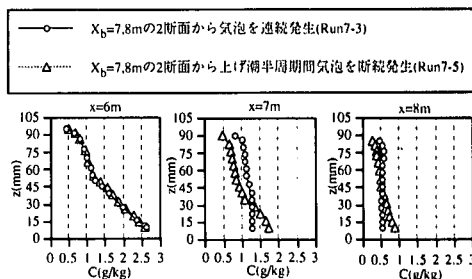


図-10 2断面より気泡を連続的・断続的に発生させた場合の塩分濃度鉛直分布の比較

の間で平均的に塩水侵入が低減される。この低減の程度は一潮汐間の気泡発生の時間の長さのみによって決定される。

4) 気泡発生断面において鉛直方向に塩・淡成層が十分混合されても、その上・下流で混合水が再成層化している場合、気泡発生断面を新たに設け、気泡噴流を発生させることにより、更なる塩水侵入軽減効果が得られる。一方、上流側で再成層化が見られない場合には、気泡発生断面において塩・淡成層が鉛直方向に十分混合されていれば、別の断面でそれ以上気泡量を追加しても、更なる塩水侵入軽減効果は得られない。

5) 気泡発生地点2ヶ所で、気泡発生を半周期毎に断続的に発生させても、1断面より連続的に発生させた場合と同様の効果が得られることが明らかとなった。したがって、気泡発生断面において魚類の往来が遮断される恐れがある場合でも、複数の断面から断続的に交互に気泡を発生させることにより塩水侵入軽減効果を損なわずに魚類の通過が確保できることが期待される。

最後に、本研究を遂行するに当たり、貴重な資料を提供して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大和則夫、鶴田芳昭両氏、また、室内実験において多大な御協力を頂いた九州大学工学部建設都市工学科 藤田和夫技官に深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 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.
- 小松利光・安達貴浩・孫 双科・柴田敏彦 (1996b): 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.
- 小松利光・孫 双科・安達貴浩・川上義幸・米須清彦 (1996c): 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.
- 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 (1996d): 川内川における塩水遡上の人工制御に関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 341-345.