

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

小松利光* ・下田五郎** ・松岡弘文**
安達貴浩***・大和則夫****・室永武司*****

1. はじめに

川内川河口部の丸山共同取水口において, 1992 年に以降, 若潮時に時折り上水道基準値を越える高濃度の塩分混入水が取水されるという問題(以下, 塩水混入と呼ぶ)が発生している(小松ら, 1996a). この問題を解決するために, 1995 年 11 月, 河口から 12.6 km 上流地点の河床より河幅全体にわたって気泡噴流を発生させ, その時の塩水侵入軽減効果を調べる現地実験が実施された(小松ら, 1996b). それによると, 気泡噴流により局所的にでも塩・淡成層を破壊することができれば河川上流側への塩水侵入が軽減され, その結果, 塩水混入も阻止できることが明らかとなった. しかしながら, 塩水混入は一応阻止することができたものの, 塩水混入発生の可能性が最も高い長潮から若潮において, 気泡噴流発生断面で混合された塩水が再成層化して丸山取水口付近まで侵入していることが確認された. したがって, 塩水侵入がより深刻となる渇水期等を想定すると, このままの適用方法では塩水混入を阻止できなくなる可能性があり, 塩水侵入軽減効果を一段と高める工夫が必要となっている.

そこで, 1996 年になって気泡噴流を発生させる断面の数, 位置, 開始時刻を変化させ, より効果的な気泡噴流の適用方法を調べるための現地実験が開始された. 本研究では, これらの現地実験の結果を用いて, 気泡噴流の効率的な適用方法について検討を行った. また, 現地実験と並行して気泡噴流の水棲生物に対する影響を調べる現地調査も行ったので, この結果についても併せて報告する.

2. 塩水侵入の程度を規定する要因について

図一に川内川河口部周辺の模式図を示す. 川内川河口部では, 潮差によって混合形態が変化しており, 潮差

がおよそ 3 m となる大潮時には緩混合形態, 1 m 程度の小潮時には弱混合形態の塩水侵入が実現されている. このような混合形態の変遷に伴って, 塩水侵入長も著しく変化しており, 潮差が最小値を取ってから 1~2 日後に塩水侵入は最大となり, 更に 1 日遅れて取水塩素濃度が最大値を取っている. このように潮差の変化は川内川河口部の塩水侵入を規定する最も支配的な要因となっており, 塩水混入のほとんどは若潮時に集中して発生している. しかしながら, 若潮時にはいつも塩水混入が生じるというわけではないことから, 潮差以外にも塩水混入を規定する要因があると考えられた.

小松ら(1996b)は, 若潮時直前 3 日間の平均河川流量 Q_f (m^3/s), 若潮時における海域の 1 日平均潮位 H_0 (T.P.m) および日潮不等の程度を表すパラメーター β といった 3 つの条件が塩水混入を規定する主要因であることを見出し, 以下の関係式によって若潮時の塩水混入の有無を判別・予測できることを明らかにした.

$$\begin{cases} \phi < 0.044 \text{ のとき, 塩水混入なし} \\ \phi > 0.044 \text{ のとき, 塩水混入あり} \end{cases}$$

ここで, $\phi = \frac{H_0 + 0.1}{\beta(Q_f - 25)}$ である.

(ただし, $Q_f < 25 m^3/s$ 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)

ところで, 今回, 計 8 回実施された現地実験のそれぞれの水理条件は完全に一致しているわけではないので, 得られた塩水侵入状況をそのまま比較しても, 気泡噴流の適用方法の違いの影響を正確に評価することはできない. このため, 水理条件の違いが塩水侵入の程度に及ぼす影響を事前に評価しておく必要がある.

そこで上記のパラメータ ϕ が若潮時の塩水混入の有無をかなり正確に判別できることに着目し, 塩水混入の有無だけでなく取水塩素濃度の絶対値や塩水侵入の程度までも ϕ によって評価できるかどうかについて検討を行った. 1996 年の現地実験は全て $Q_f > 25 m^3/s$ の条件下のものであることを考慮して, この条件を満足する場合のみを対象に ϕ と若潮時の取水の日平均塩素濃度の関係を調べた(図一2). ϕ の増加と共に取水塩素濃度は上昇しており, 取水量の違いがあるにもかかわらず, 両者

* フェロー 工 博 九州大学大学院教授 工学研究科海洋システム工学専攻
** 正 会 員 建設省九州地方建設局川内工事事務所
*** 学生会員 博(工) 日本学術振興会特別研究員
**** 正 会 員 (株)東京建設コンサルタント九州支店技術第 3 部
***** 学生会員 九州大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻修士課程

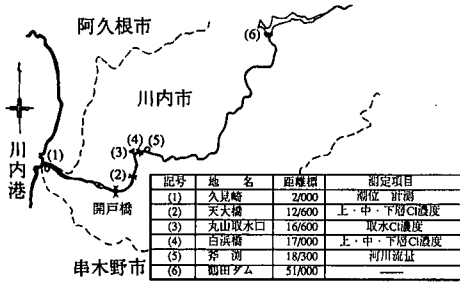


図-1 川内川河口付近の概要

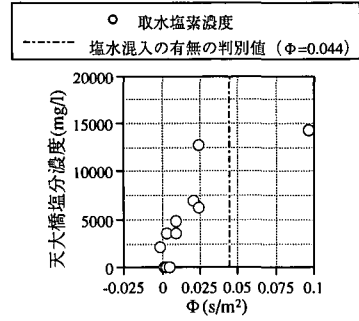


図-3 φと若潮時の天大橋下層塩素濃度の関係

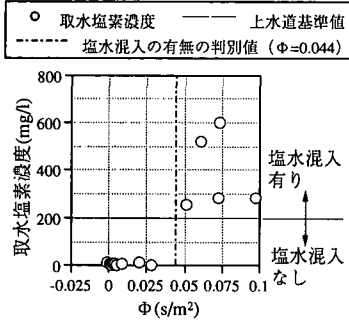


図-2 φと若潮時の日平均取水塩素濃度の関係

の間には強い相関関係が見られる。図-2には小松ら(1996b)の1995年までの観測結果に加え、1996年以降の結果も併せてプロットしているが、 $\phi=0.044$ を境に塩水侵入の有無が明確に分離されており、上述の判別式の妥当性が確認できる。次に、図-2と同様 $Q_f > 25 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合を対象に、天大橋地点の塩分濃度自動観測装置から得られた若潮時の最大下層塩素濃度と ϕ の関係を調べた(図-3)。塩水侵入の程度を代表する量と考えられる天大橋の塩素濃度も取水濃度と同様 ϕ との間に強い相

関関係があることが分かる。若干のばらつきは見られるものの、取水塩素濃度と天大橋下層塩分濃度は共にほぼ ϕ のみによって記述できることから、 ϕ は気泡噴流を発生しない場合の塩水侵入の程度を表すパラメータであると考えられる。従って、 ϕ の値を評価しておけば、現地実験の際に得られた塩水侵入状況の違いが、水理条件の違いによるものか、もしくは気泡噴流の適用方法の違いによるものかを判別することが可能となる。

3. 気泡噴流の効率的な適用方法を調べる現地実験

3.1 現地実験の概要

気泡噴流の効率的な適用方法を調べるために、表-1に示すような気泡噴流の適用方法と水理条件に対して現地実験を実施した。各断面に設置された気泡発生装置は、小松ら(1996b)と同一(2.5 cm ピッチで直径 2 mm の透孔が設けられた内径 50 mm の白ガス管)であり、各断面からの発生気泡量を 330 l/s に固定した。また、現地実験の各ケースにおいて、気泡噴流発生期間とほぼ同じ長さ

表-1 1996年に実施された気泡噴流の効率的な適用法を調べるための現地実験の内容

ケース名	塩分濃度調査日	気泡発生位置	気泡発生期間												Q_f ($\text{m}^3/\text{sec.}$)	H_0 (T.P.m)	β	ϕ ($\text{sec.}/\text{m}^2$)
			潮候	中潮	中潮	中潮	中潮	小潮	小潮	小潮	長潮	若潮	中潮	中潮				
Case-1	9月4日～10日	気泡発生なし	日付	8/31	9/1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	32.88	0.189	0.502	0.073
Case-2	9月19日～26日	12.6 km						6:00						20:00	28.80	0.232	0.585	0.149
			日付	9/15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25				
Case-3	10月3日～10日	10.7 km 12.6 km					17:00							20:00	35.06	0.198	0.776	0.038
			日付	9/31	10/1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
Case-4	10月15日～24日	10.7 km 12.6 km		3:00										21:00	28.76	0.046	0.724	0.054
			日付	10/14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
Case-5	10月30日～ 11月11日	10.7 km		3:00									16:00		30.92	0.136	0.841	0.047
			日付	10/29	30	31	11/1	2	3	4	5	6	7	8				
Case-6	11月14日～27日	12.6 km 13.8 km		3:00											26.83	0.094	0.862	0.123
			日付	11/13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23				
Case-7	11月28日～ 12月9日	12.6 km		9:00								16:00			38.22	0.044	0.839	0.013
			日付	11/28	29	30	12/1	2	3	4	5	6	7	8				
Case-8	12月13日～24日	12.6 km		10:00										19:00	26.62	-0.019	0.638	0.078
			日付	12/13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23				

の期間を対象に干潮時と満潮時における塩素濃度の鉛直分布(水深方向に 50 cm 毎)を、河口より 7 km から 17.7 km までの 17 断面について計測した。

3.2 気泡噴流の発生位置の影響

気泡噴流の発生位置の影響を調べるために、発生断面が開戸橋(河口より 10.7 km 上流)と天大橋(河口より 12.6 km 上流)で発生断面が互いに異なる 2 つのケース(Case-5, Case-8)と気泡噴流の発生しない Case-1 について観測結果の比較を行った。まず、前述の ϕ を用いて気泡噴流を発生させない場合の塩水侵入の程度を推定すると、Case-1 では $\phi=0.073$, Case-5 では $\phi=0.047$, Case-8 では $\phi=0.078$ となり、Case-8 > Case-1 > Case-5 の順で塩水侵入長が長くなっていたと言える。次に、これら 3 ケースについて実際に観測された小潮 1 日目と若潮時の満潮時における塩水侵入状況の比較を行った。各ケースの塩水侵入状況を 10000 mg/l の等濃度線で表した結果を図-4 に示す。開戸橋から気泡噴流を発生させた Case-5 と比較して、天大橋から気泡噴流を発生させた Case-8 では若潮時において上流側への塩水侵入長が約 4 km も短くなっている様子が確認できる。気泡噴流の発生がなければ Case-8 において最大の塩水侵入長が出現していたことを加味すると、川内川においては気泡噴流発生断面を開戸橋から天大橋へ移動させることにより飛躍的に大きな塩水侵入軽減効果が得られることが分かった。

ところで、気泡噴流の発生位置の影響に関する考察において、気泡噴流発生断面より上流側で塩・淡水水の再成層化が生じる条件下では、より下流側から気泡噴流を発生させた方が塩水侵入軽減効果はより大きくなるという室内実験の結果が得られている(小松ら, 1997)。気泡発生断面の上流側では、Case-5, Case-8 のいずれについても再成層化が確認されていることから(図示省略)、現地実験より得られた上記の観測結果は、小松ら(1997)の結果と一見相反するものとなっている。室内実験と現地実験の間にはスケールにこそ違いが見られるものの、気泡噴流の発生条件や内部フルード数をほぼ一致させていることを考慮すると、現地でも準定常状態が実現され

れば下流側からの気泡噴流発生の方がより効果的であったと推測される。したがって、室内実験と最も大きな条件の違いである潮差の非定常変化の影響が、現地の気泡噴流の効果に作用したため上記のような結果が得られたものと考えられる。

そこで次に、潮差の非定常変化に対する各ケースの塩水侵入軽減効果の現われ方の違いを調べた。10000 mg/l の等濃度線で記述される塩水侵入距離の経時変化を図-5 に示す。まず、Case-5 の結果については、気泡噴流の発生を開始した 10 月 14 日には既に 10000 mg/l の塩水が気泡噴流の発生断面である開戸橋付近にまで遡上していたことが分かる。その後の数日間は遡上を停止させているが、長潮以降になると上流側への急激な遡上が始まり、若潮の 1~2 日後には丸山共同取水口付近にまで高濃度塩水が侵入している。一方、Case-8 では、気泡噴流の発生開始時において 10000 mg/l の塩水は気泡噴流発生地点にはまだ到達しておらず、気泡噴流を発生させても比較的速い塩水の侵入が見られる。ところが、小潮 2 日目に高濃度塩水が気泡発生断面(天大橋)に到達すると、それ以降は潮差の増大に伴い塩水が後退し始めるまで 10000 mg/l の等濃度線は完全に気泡発生断面に滞まっていることが見て取れる。以上の結果より、気泡噴流は塩水侵入の先端部分が通過し始めて数日間は非常に大きな遮断効果を発揮するが、気泡噴流を突き抜けて塩水がある程度遡上してしまうと、成層の強化による侵入力の増加に伴って塩水侵入軽減効果が次第に弱まってくることが分かる。また、塩水侵入が潮差に応じて入退を繰り返す河川では、気泡発生断面が変わると塩水侵入の先端部が気泡噴流に到達する時刻も異なってくるため、準定常の場合とは全く別の非定常の効果が塩水侵入軽減効果を規定するようになる。これらの結果を踏まえると、天大橋から気泡噴流を発生させた場合に、比較的大きな塩水侵入の軽減効果が見られたのは塩水侵入軽減効果が最大となる期間がちょうど若潮付近に相当していたためと考えられる。

3.3 気泡噴流の追加発生の効果

1995 年に実施された現地実験の結果や前節の結果に

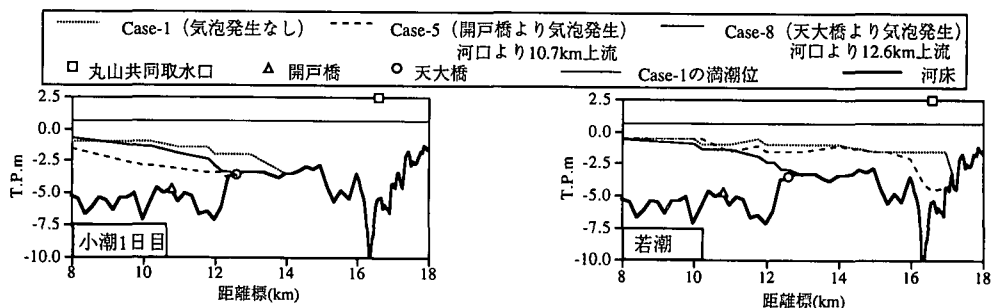


図-4 気泡噴流の発生位置を変化させた場合の 10000 mg/l 等濃度線による満潮時の塩水侵入状況の比較

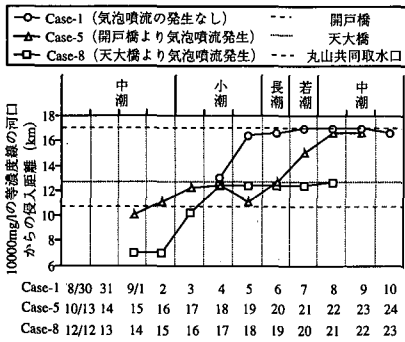


図-5 10000 mg/l 等塩素濃度線の侵入距離の経時変化

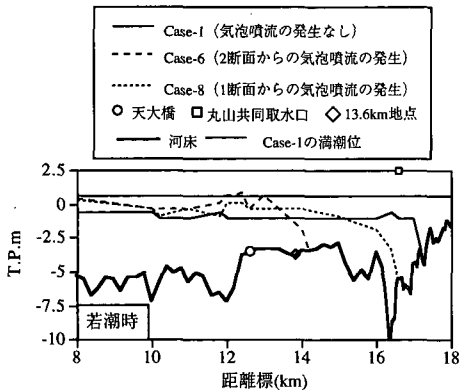


図-6 気泡噴流の追加発生による塩水侵入軽減効果

見られるように、気泡発生断面で塩・淡水層を完全に混合しても、混合塩水がその上流側で成層を再形成するために、それ程大きな塩水侵入軽減効果が見られない場合がある。このような場合には、再成層化している上流側のもう1つの断面より気泡噴流を追加発生させると、塩水侵入をより一層軽減できることが室内実験より明らかになっている(小松ら, 1997)。気泡噴流の追加発生の有効性を現地においても確認するために、気泡噴流発生断面が天大橋地点(12.6 km)と13.8 km 地点の2断面の場合 (Case-6) と天大橋のみの場合 (Case-8) の若潮時の満潮時における塩水侵入状況を比較してみた。その違いが最も顕著に現れた 5000 mg/l の等濃度線の分布を図-6 に示す。前節と同様に Φ の値を用いて気泡噴流を発生させない場合の塩水侵入の程度を推定すると、Case-8 の方が塩水侵入が短くなる条件であったのに対し (表-1 参照)、実際の塩水侵入は Case-6 において最も短くなっていることが分かる。1 断面からの発生でも天大橋から気泡噴流を発生させた場合にはある程度大きな塩水侵入軽減効果が得られることは前節で既に紹介済みであるが、Case-6 のように気泡噴流を追加発生させることにより再成層化が阻止され、室内実験の結果と同様に、更に大きな塩水侵入の軽減効果が得られることが明らかと

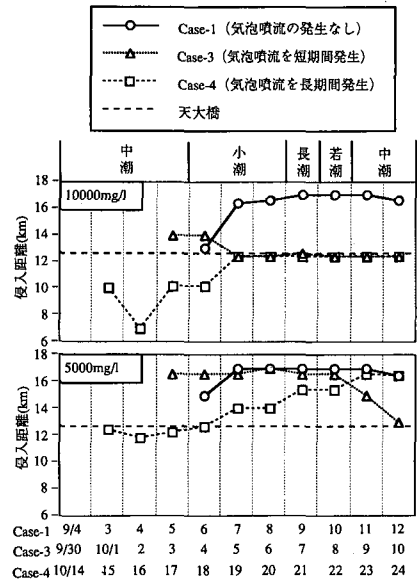


図-7 5000, 10000 mg/l 等濃度線の侵入距離の経時変化

なった。

3.4 気泡噴流の発生開始時間の効果

気泡噴流の発生開始時間の違いの影響を調べるために、気泡発生断面を天大橋に固定し、気泡発生の開始時刻のみを変化させた場合の比較を行った。図-7 に気泡発生開始時刻が異なる Case-3, 4 の2 ケースと気泡噴流の発生がない Case-1 について、5000, 10000 mg/l 等濃度線の侵入距離の経時変化を示す。Case-3, 4 のいずれも 10000 mg/l の等濃度線は気泡噴流の発生断面で侵入を完全に停止させていることが分かる。次に、5000 mg/l の等濃度線に着目すると、Case-3 では、気泡噴流の発生開始時において既に塩水が気泡噴流発生断面より上流側に侵入しており、このような塩水はその後の気泡噴流の発生に対しても全く変化を示さない。一方、Case-4 では気泡噴流の発生開始時において 5000 mg/l の塩水は気泡噴流発生断面にちょうど到達した状態であり、その後数日間侵入を停止させているが、小潮時になると遡上を開始し若潮を過ぎたあたりでは Case-3 とほぼ同程度の侵入距離を示すようになる。しかしながら Φ の値を考慮して塩分侵入量の低減効果を改めて評価してみると、Case-4 においてより大きな軽減効果が得られていることが分かった。このような結果が得られたのは Case-4 の方が気泡噴流の発生期間が長いからと考えることもできるが、上記の 5000 mg/l 塩水の挙動の相違や 3.1 節の結果等を考え併せると、むしろ塩水侵入長の短い時から気泡噴流を発生させることにより、Case-3 では気泡噴流より上流に既に侵入している比較的薄い先端付近の塩水を含めた多くの塩水が気泡噴流の洗礼を受けたことによ

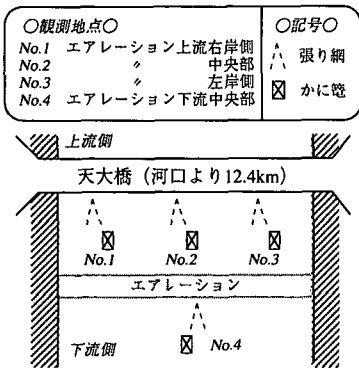


図-8 現地調査時の捕獲具の配置

ると言える。

4. 魚類・甲殻類に対する気泡幕の影響について

塩水遡上対策のために気泡噴流を適用すると、水中に形成される気泡幕（エアーカーテン）や新たな流れ場が、魚類や甲殻類等の遡上や降下に対し何らかの悪影響を与えるのではないかと懸念された。このため、川内川において実際に気泡噴流を発生させた場合の水棲生物の忌避行動を調べるために現地調査が行われた。図-8のように、気泡噴流発生断面（天大橋）の上下流にシラスウナギ・稚アユ等の魚類を捕獲するための張り網およびモクズガニ等の甲殻類を捕捉するためのかに籠を設置し、捕獲調査を実施した。

モクズガニは、通常10月から翌年の4月にかけて成体が降下し、11月から12月、3月から4月にかけて稚ガニが遡上すると言われている。そこで、1996年11月から翌年1月までの期間を対象に2昼夜にわたって気泡噴流の有無による捕獲量の変化を調査した。シラスウナギ、アユに対しても遡上期を考慮して、同様の調査が行われた。得られた結果を図-9に示す。いずれの結果を見ても、気泡噴流の付近で生体数そのものが大幅に減少したり、気泡噴流の上・下流で生体数の分布が極端にばらつく傾向は見られない。また、シラスウナギ、アユ、ハゼを対象に行った水槽実験から水路幅半分だけ気泡噴流を発生させると、種によっては気泡噴流のない所を好んで通過する傾向が見られるが、幅いっぱいに気泡噴流を発生させると、いずれも難なく気泡噴流を通過する様子が観察された。以上の調査結果から判断すると少なくとも川内川の優占種に対しては気泡噴流が水棲生物に悪影響を及ぼすことは全くないと考えられる。

5. 結 論

1) 丸山共同取水口における塩水混入の有無を予測す

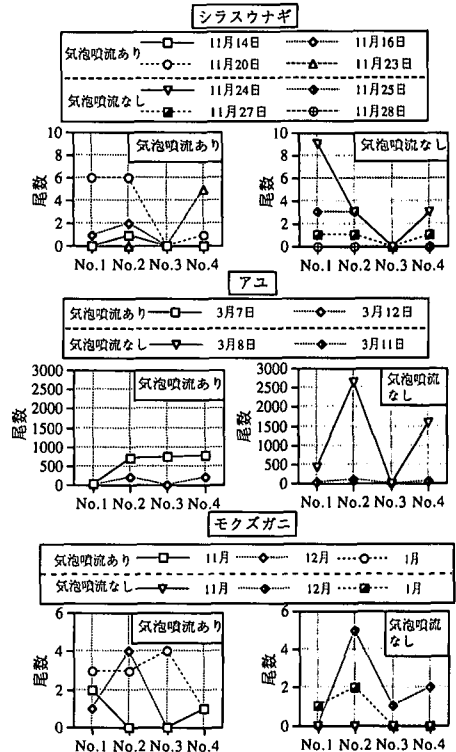


図-9 捕獲調査の結果

るために導入されたパラメータによって、若潮時における取水濃度の大きさだけでなく、塩水侵入の程度も評価することができる。

2) 現地実験により得られた気泡噴流の効果は潮差が日々変化することの影響を強く受けている。このため準定常状態の下に得られた室内実験の結果とは異なり、気泡噴流発生断面より上流で塩・淡水混合水の再成層化が生じる条件下においても、上流側からの気泡噴流発生の方が効果的な場合もあり得るという知見が得られた。

3) 気泡発生断面より上流側で塩・淡水混合水が再成層化する場合、更に上流に気泡発生断面を増設し混合水を再混合させることでより大きい塩水侵入軽減効果を得ることができる。

4) 気泡幕や気泡管の存在によってシラスウナギ、稚アユ、モクズガニの遡上や降下が阻害されることはない。ということが分かった。

参 考 文 献

- 小松光ら (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.
- 小松光ら (1996b): 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.
- 小松光ら (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44巻, pp. 446-450.