

エアカーテンによる塩水楔の遡上阻止 に関する実験的考察

EXPERIMENTAL CONSIDERATION ON PREVENTION OF SALINE WEDGE INTRUSION IN RIVERS USING AN AIR CURTAIN

中井正則¹・有田正光²・清水武広³・山内敏和⁴

Masanori NAKAI, Masamitsu ARITA, Takehiro SHIMIZU and Toshikazu YAMAUCHI

¹ 正会員 工博 東京電機大学助手 理工学部建設工学科(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町)

² 正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設工学科(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町)

³ 学生員 東京電機大学大学院 建設工学専攻(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町)

⁴ 東京電機大学学生 理工学部建設工学科(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町)

Efficiency of a prevention method on saline wedge intrusion in rivers using an air curtain (a two-dimensional bubble flow) was experimentally investigated from a viewpoint of a flow mechanism. The behavior of saline wedges in the presence of an air curtain is governed by the three external forces : the buoyancy of an air curtain A , the intrusion force of a saline wedge B and the inertial force of a fresh water flow R . It was found that the flow behavior could be classified into three types both by A/B dominating the rising discharge of salt water due to an air curtain, and by A/R dominating the strength (circulation) of a convection cell induced by an air curtain in its upstream side. In addition, the efficiency of this method was evaluated using the newly introduced parameter α through the discussion on the appearance conditions of the three flow types.

Key Words : *Saline wedge, Air curtain, Rising discharge of salt water, Strength of a upstream convection cell*

1. はじめに

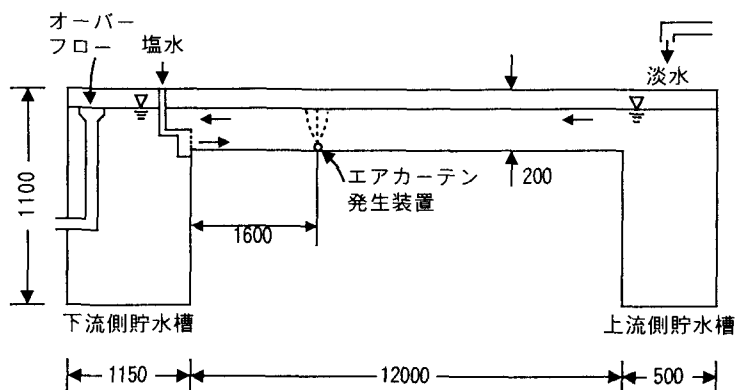
河道内を長く遡上する塩水楔による周辺流域の塩水害を防止するための最も効果的な手段は、塩水楔の遡上距離そのものを短くすることであり、従来より種々の手法が検討されている。それらの手法の中で、河口付近にエアカーテンを発生させて塩水楔の遡上を阻止する方法は河幅が狭い場合など、比較的管理しやすい河川では有効な手段となりうるものと考えられる。このことから、同方法についていくつかの研究が実施されてきており^{1)~6)}、潮汐運動を伴う場合など複雑な条件下の現象についても検討がなされている。しかしながら、最も単純な場合である定常塩水楔に対して、エアカーテンの有用性が流れの物理機構の観点から十分明らかにされているとは言い難い。

本研究は、エアカーテン周辺における定常塩水楔

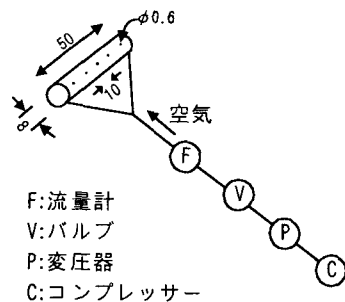
の挙動を従来の研究とは異なった視点を導入して、実験的に詳しく考察し、現象の物理機構を明らかにしようとするものである。さらに、実験結果よりエアカーテンが有効に機能するための水理条件について考察した。なお、ここで言うエアカーテンは底層より河道の横断方向に発生させる二次元気泡上昇流(気泡のみの流れであり、いわゆる気泡噴流とは異なる)のことである。

2. 実験装置と実験方法

実験には、図-1に示すような長さ1200cm×幅5cm×高さ20cmの二次元直線水路を用いた。水路上流側の貯水槽より淡水を流し(河川流の模擬)、その水深は下流側貯水槽内に取り付けたオーバーフローにより一定に保った。また、水路下流端には海域からの海水の侵入を模擬するための塩水放出口を取り付け



(a)水路側面図



単位(mm)

単位(mm)

図-1 実験装置

表-1 実験ケースの一覧

ケース	淡水流量 q_f (cm^3/s)	淡水密度 ρ_f (g/cm^3)	塩水密度 ρ_s (g/cm^3)	全水深 H (cm)	空気流量 q_a (cm^3/s)	河川 レイノルズ数 Re_o	河川密度 フルード数 Fr_o
Case-1	40.6	0.9994	1.0032	15.9	0~2.05	4100	0.33
Case-2	50.6	0.9994	1.0073	16.0	0~3.33	5100	0.28
Case-3	60.2	0.9996	1.0102	16.1	0~4.15	6000	0.29
Case-4	80.0	0.9998	1.0103	16.2	0~2.49	8000	0.38
Case-5	20.2	0.9998	1.0034	15.7	0~3.32	2000	0.17
Case-6	20.5	1.0000	1.0070	15.8	1.25~4.17	2000	0.12
Case-7	19.8	0.9999	1.0106	15.8	2.09~3.35	2000	0.10
Case-8	20.0	0.9990	1.0044	15.7	0.82~4.10	2000	0.14
Case-9	30.6	0.9986	1.0036	15.8	1.22~2.86	3100	0.22
Case-10	30.9	0.9984	1.0019	15.8	0.81~4.06	3100	0.27
Case-11	11.6	0.9986	1.0037	15.6	1.23~2.05	1200	0.08

注) q_f, q_a は単位幅流量である。

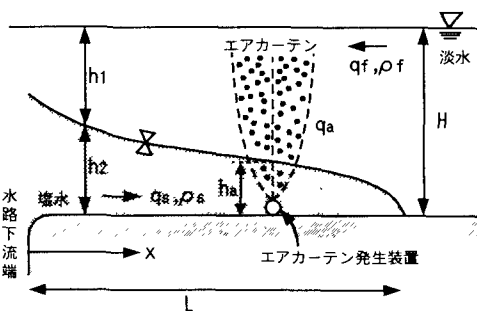


図-2 現象の概要と記号の定義

$$Fr_o = \frac{q_f}{(g'H^3)^{1/2}} \quad (2)$$

た．この塩水放出口から十分な流量の塩水を放出し、塩水楔を再現した(上流に向かって遡上する塩水の流量は淡水流の条件および淡水と塩水の密度差によって一意的に決まるものであり、その流量で塩水を放出する方法が最適である．しかし、ここで行ったようにそれ以上の流量で塩水を放出しても余剰分は下流側の貯水槽へ戻っていくため、塩水楔現象をほぼ正確に再現することができる)。

エアカーテン発生装置はアクリル製パイプ(長さ5cm、内径8mm)に直径0.6mmの孔を1cm間隔であけたものであり、これを水路下流端より160cmの位置に設置した．同装置への送気は低圧コンプレッサー(最大空気流量50(Ncc/s))によっており、両者は内径2mmのチューブにより接続されている．また、送気用チューブの途中には変圧器、流量計、流量調節用バルブが取り付けられている(図-1参照)。

実験は表-1に示すように、淡水流量(単位幅流量) q_f 、塩水密度 ρ_s 、空気流量(単位幅流量) q_a を変化させて11ケース行った．また、同表中の Re_o 、 Fr_o はそれぞれ次式で定義される河川レイノルズ数と河川密度フルード数である．

$$Re_o = \frac{q_f}{\nu} \quad (1)$$

ここに、 H は全水深、 $g' (= \Delta \rho g / \rho_f)$ は浮力加速度、 ρ_f は淡水密度、 $\Delta \rho (= \rho_s - \rho_f)$ は密度差、 g は重力加速度、 ν は動粘性係数である．実験では、現象が定常状態に達した後に、エアカーテン周辺の現象の観察・撮影、ならびに全域にわたる塩水楔形状の測定を行った。

図-2に現象の概要と諸量の定義を示す．同図において、 h_1 、 h_2 はそれぞれ淡水流(河川流)の水深と塩水楔高さ、 h_a はエアカーテン発生装置の位置における塩水楔高さ(エアカーテンがない場合)、 q_s 、 L はそれぞれ塩水楔の流量と長さ、 x は水路下流端からの距離である(上記以外の図中の記号は既に定義されている)。

3. 実験結果と考察

(1) 塩水楔の形状と長さ

図-3はCase2における空気流量 q_a (単位幅流量)と塩水楔形状の関係を示している(図中のType I, IIなどは次節(2)で述べる流動形態を表している)．同図より、 $q_a = 0.83(\text{cm}^2/\text{s})$ では塩水楔の遡上距離 L が

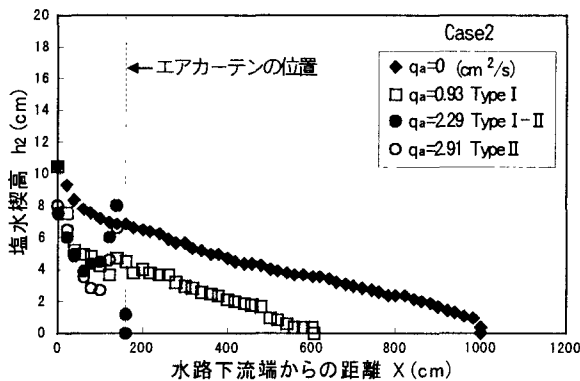


図-3 空気流量 q_a と塩水楔形状の関係

エアカーテンがない場合($q_a=0(\text{cm}^2/\text{s})$)に比べて大幅に短縮されていること、また、 $q_a \geq 2.29(\text{cm}^2/\text{s})$ ではエアカーテンの位置で塩水楔の遡上が完全に阻止されていることがわかる。

図-4は Case1, 2, 5, 6における空気流量 q_a と塩水楔長 L の関係を示したものである(図中の各プロットに付けた記号 I, II, IIIなどは次節(2)で述べる流動形態を表している)。同図より、Case1, 2, 5において、塩水楔の遡上をエアカーテンの位置で完全に阻止しうる最小空気流量が明らかである。一方、Case6ではエアカーテンの位置で塩水楔の遡上を完全には阻止できないものの、 $q_a=2.5(\text{cm}^2/\text{s})$ 程度の空気流量によって楔長を大幅に短縮できることがわかる。なお、 q_a が $2.5(\text{cm}^2/\text{s})$ より大きい場合には、 L が q_a の増加に伴って大きくなる傾向を示す。つまり、同ケースでは L を最小にする q_a が存在することになり、興味深い(この現象については本章の(3)で検討する)。

以上のように、条件によってはエアカーテンが塩水楔の遡上阻止に対して極めて有効に働くことがわかった。ここでは結果の例の紹介にとどめ、エアカーテンが有効に働く水理条件の検討は本章の(3)で行う。

(2) 流動メカニズムと流動形態分類

水路中の塩水楔はエアカーテンにより複雑な挙動を示し、その流動形態は図-5に示すように大きく3種に分類される。また、写真-1(a), (b), (c)はそれぞれ図-5の Type I, II, IIIに対応するケースの可視化写真であり、写真中の黒色の部分が染料によって着色された塩水塊である(写真の右側が水路上流側、左側が下流側である)。

Type I は水路を遡上する下層塩水がエアカーテンを突き抜けてさらに上流へ遡上するタイプである。同タイプはエアカーテンの持つ浮力が小さく、塩水塊を上昇させる能力が小さい場合に生じ、塩水楔はエアカーテンを越えて遡上する。Type II は下層塩水がエアカーテンによって上昇させられ、淡水流(

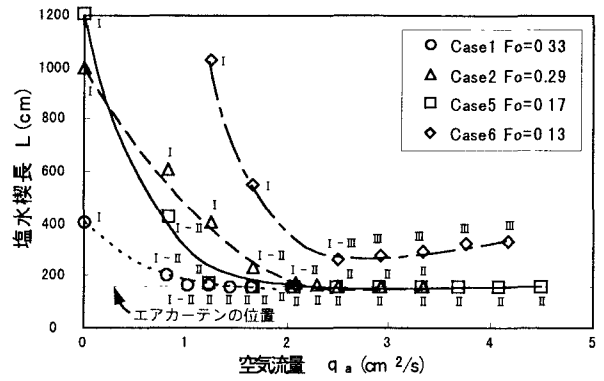


図-4 空気流量 q_a と塩水楔長 L の関係

河川流)によって反転させられて下流に戻るタイプである。同タイプでは、塩水楔の遡上がエアカーテンによってほぼ完全に阻止される。Type III は下層塩水がエアカーテンによって上昇するが、その一部がエアカーテンの上流側に形成される水深スケールの対流渦(循環流)に連行されるタイプである(この対流渦については、後ほど詳述する)。対流渦中に連行された塩水塊は同渦中を循環した後エアカーテン上流側の水路床に達し、再び上流へ遡上していく。つまり、同タイプでは塩水楔がエアカーテンの上流側に侵入する。

以下では、ここで導入した各種流動形態の流動メカニズムについて考察する。現象を支配する外力はエアカーテンの持つ浮力 A 、塩水塊の侵入力 B 、淡水流(河川流)の慣性力 R であり、ここではこの3つの外力を次式のように速度の次元で表すことにする。

$$A=(qag)^{1/3} \quad \text{エアカーテンの持つ浮力} \quad (3)$$

$$B=(g'ha)^{1/2} \quad \text{塩水塊の侵入力} \quad (4)$$

$$R=\frac{qf}{H} \quad \text{淡水流の慣性力} \quad (5)$$

ここに、 h_a はエアカーテンの位置における塩水楔高さ(エアカーテンがない場合; 図-2参照)である。 A , B , R のうち、 A と R はほぼ一意的に式(3), (5)のように決まるが、 B については $B=(qsg)^{1/3}$ とすることも可能である。ここで、式(4)を採用したのは、塩水楔の侵入力 B が密度差による過剰圧力に基づくと考えたからである。

まず、エアカーテンが誘起する流れについて考える。エアカーテンが持つ浮力により下層塩水が上昇し、上昇流中に塩水が混入するため(上昇水の密度は周囲の淡水のそれより大きい)、および水面が存在するために、エアカーテンによる流れは対流(水深スケールの循環流)を形成する。この対流の特性は A と R の大小関係によって決まる。 A/R が十分大きい場合にはエアカーテンの左右に一对の対流セルが形成されるが、 A/R が小さくなると上流側の対流セルは消失する(厳密には、上流側の対流セルの循

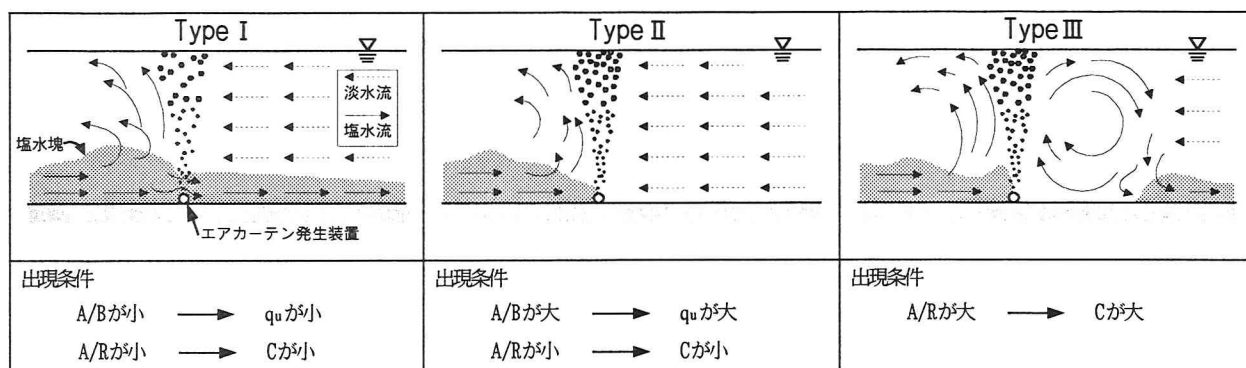
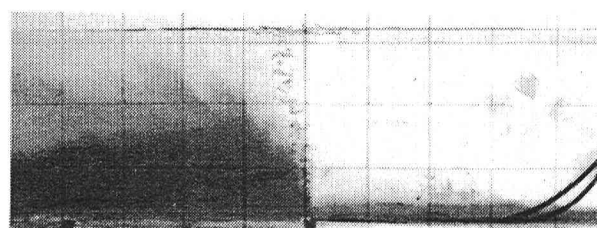
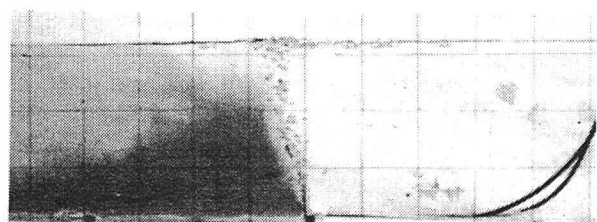


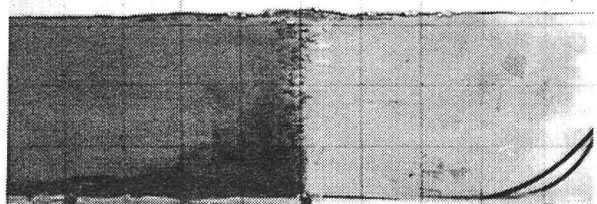
図-5 流動形態の分類（エアカーテンが存在する場合）



(a) Type I (Case2, $q_a=1.25(\text{cm}^2/\text{s})$)



(b) Type II (Case2, $q_a=2.91(\text{cm}^2/\text{s})$)



(c) Type III (Case6, $q_a=3.33(\text{cm}^2/\text{s})$)

写真-1 各種流動形態の例

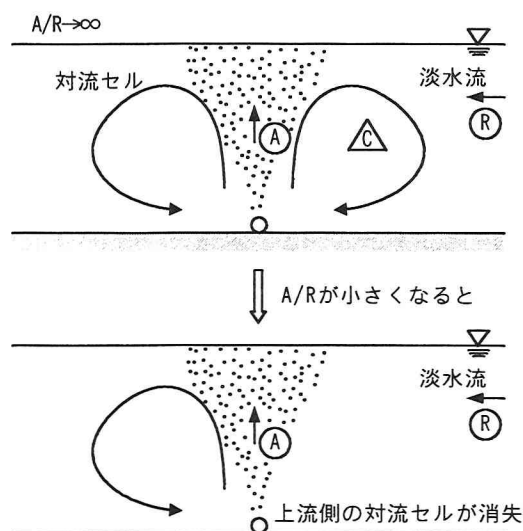


図-6 エアカーテンにより生じる対流の模式図

環 C が非常に小さいことを意味する；図-6参照)⁷⁾。

つぎに、この流れに伴う下層塩水の挙動について考察する。エアカーテンの持つ浮力 A が塩水塊の侵入力 B に比較して相対的に大きい（つまり、 A/B が大きい）場合には、遡上してきた塩水塊のほぼすべてがエアカーテンによって水面付近まで持ち上げられる（つまり、上昇塩水流量 q_u が大きい）。また、その後の塩水塊の挙動は A/R の大きさに依存する。 A/R が小さい場合にはエアカーテンの上流側に対流セルは出現せず（上流側対流セルの循環 C が小さい）、上昇した塩水塊のほぼすべてが下流側に形成される対流セルと淡水流（河川流）によって下流へ戻され、流動形態は Type II となる。逆に、 A/R が大きい場合には上流側対流セルの循環 C が大きく、塩水塊の一部が同セルに連行されてエアカーテンの上流側

へ侵入するため、Type III が出現する。この場合、上流側対流セルに連行された塩水塊は既述のようにエアカーテン上流側の水路床に達し、さらに上流へ遡上していく。

一方、 A/B が小さい場合には、エアカーテンの浮力が弱く上昇塩水流量 q_u が小さいので、塩水塊はエアカーテンを突き抜けて上流へ侵入することになる。したがって、 A/R が小さければ流動形態は Type I となる。ところが、 A/R が大きい場合にはエアカーテンによって持ち上げられたわずかな量の塩水塊の一部が上流側対流セルに連行されるため、Type III の流動形態が出現する（ここでは、塩水塊がエアカーテンを突き抜ける場合を含めて、塩水塊の一部が上流側対流セルに連行される場合を Type III としている）。

以上の考察を模式的に示したものが図-7である。要するに、流動形態は A/R と A/B の2つのパラメータによって決定される（ A/R から上流側対流セルの循環 C が、 A/B から上昇塩水流量 q_u が決定される）。なお、本項で導入した流動形態分類はエアカーテン上流側の対流セルの存在に注目している点において、

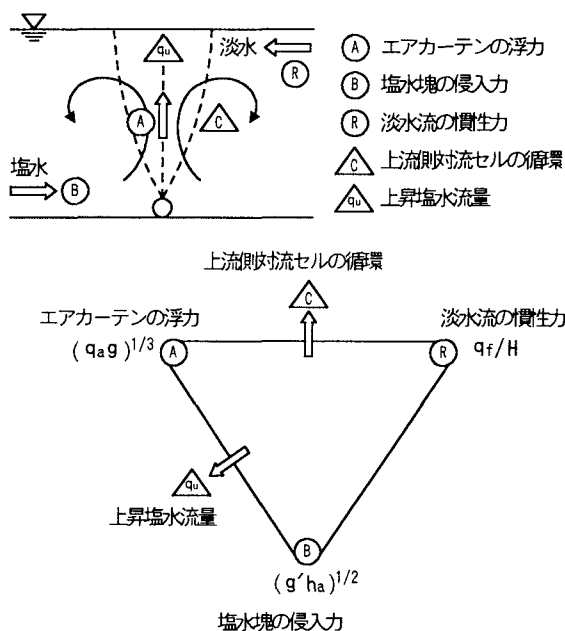


図-7 流動形態を支配する要因とその相互関係

浅枝・有田・Pham⁵⁾が行ったものと異なっている。

(3) 各種流動形態の出現領域と本方法の有効性

図-8に Type I～IIIの出現状況を次式で定義される F_a , Z をパラメータにして示す。

$$F_a = \frac{(q_a g)^{1/3}}{(g' h_a)^{1/2}} = \frac{A}{B} \quad (6)$$

$$Z = \frac{q_s}{q_f} \quad (7)$$

なお、図中の Type I-II, Type I-IIIはそれぞれ Type I と Type II, Type I と Type IIIの境界付近の現象であることを示している。同図は浅枝ら⁵⁾に倣ったものであり、各種流動形態の出現状況をエアカーテンの持つ浮力と遡上塩水流量との関係において整理し、無次元表示したものである。一方、図-9は清水・有田・中井⁸⁾に倣い、 F_o , F_a をパラメータとして各種流動形態の出現状況を整理したものである。なお、 F_o によって Z はほぼ一意に決まるので⁹⁾、同図の整理方法は基本的に図-8と同一である。

図-8, 9よりわかるように、これらのパラメータでは Type I～IIIの流動形態を明確に分類できない。これは、エアカーテンによって発生する上流側対流セルの効果(循環 C の大きさ)を評価するためのパラメータ導入の必要性を示唆している。ここでは、このために A/R をパラメータとして導入する。

図-10は A/R と A/B の2つをパラメータにして各種流動形態の出現状況を示したものである。図中の実線(原点を通る直線 a, b)および一点鎖線の傾き α は次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{A/B}{A/R} = \frac{R}{B} = F_o \left(\frac{H}{h_a} \right)^{1/2} \quad (8)$$

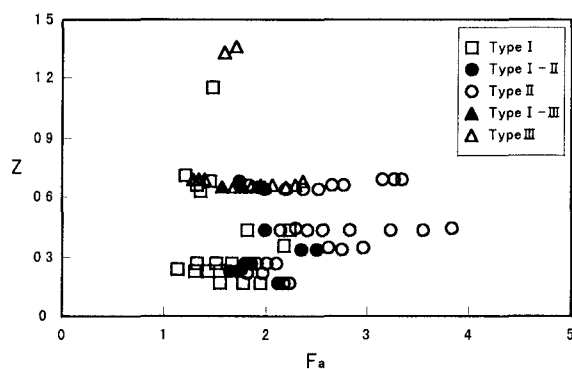


図-8 F_a と Z をパラメータにして示した Type I～IIIの出現状況

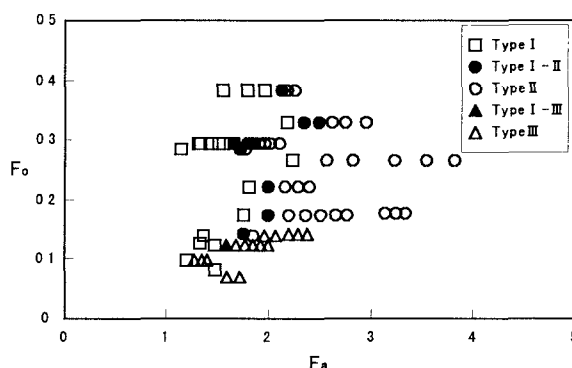


図-9 F_a と F_o をパラメータにして示した Type I～IIIの出現状況

同図のように、Type I～IIIの出現状況が精度良く分類されており、 A/R , A/B がともに小さい領域では Type I が出現すること、および Type II と Type IIIは $\alpha=0.21$ の一点鎖線で分離できることがわかる。

図中の直線 a, bは同一の塩水楔に対して、エアカーテンの位置を固定して空気流量 q_a のみを変化させた場合の流動形態の遷移を示している。つまり、直線 a($\alpha > 0.21$)は q_a の増加に伴って流動形態が Type I から Type IIへ遷移することを、直線 b($\alpha < 0.21$)は同様に流動形態が Type I から Type IIIへ遷移することを表している。このことを念頭において図-4を見ると、Case 1, 2, 5は前者の場合に、Case 6は後者の場合に対応していることがわかる。さらに、上流側対流セルの循環 C が Type I, IIでは小さく、Type IIIでは大きいことより、概ね「 $A/R > 10$ かつ $\alpha (=R/B) < 0.21$ の場合に C が大きい」という定量的評価が同図より得られる。

ここで、図-10の結果をもとにして、塩水楔の遡上阻止に対するエアカーテンの有効性について考える。エアカーテンを最も効果的に利用する(Type IIの流動形態を得る)ためには、図-10に示すように $\alpha > 0.21$ の条件下において q_a を一定値以上とすればよい。つまり、 $\alpha > 0.21$ を満足する場合には、エアカーテンによって塩水楔の遡上を完全に阻止するこ

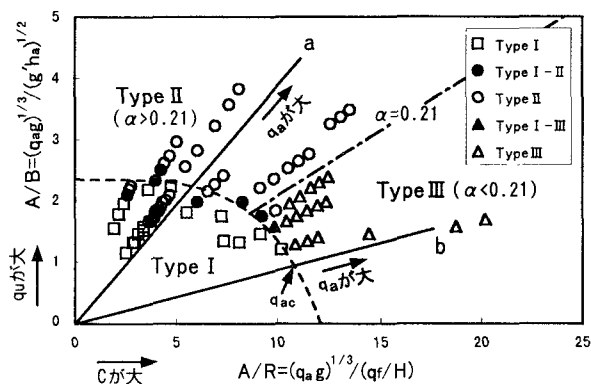


図-10 A/R と A/B をパラメータにして示した Type I ~ III の出現状況

とが可能であり、エアカーテンの有効性は高いものになる。

一方、 $\alpha < 0.21$ の場合には、出現する流動形態は Type I, III であり、Type II が出現する場合に比較するとエアカーテンの効果は小さいが、塩水楔長 L を大幅に短くすることが可能であり、工学的には一定の効果は期待できる。ただし、以下の点に注意を要する。 $\alpha < 0.21$ の条件下で q_a を徐々に増加させると(流動形態は Type I から Type III へと遷移する；図-10の直線 b 参照)、流動形態が Type I の範囲では q_a が大きいほど塩水楔長 L は短くなる。ところが、流動形態が Type III へ遷移した後は、逆に q_a の増加に伴って L が長くなっていく。これは、 q_a が大きいほどエアカーテン上流側の対流セルが強くなり(循環 C が大きくなる)、上流側に侵入する塩水流量が増加するためである。つまり、 $\alpha < 0.21$ の場合には L を最小にする空気流量の最適値 q_{ac} が存在し、その値は Type I から Type III への遷移点(図-10中の破線)における空気流量 q_{ac} に一致する。なお、図-4の Case6 にこの特徴が現れていることを付記しておく。

本研究の結果によれば、塩水楔の遡上阻止に対するエアカーテンの有効性を判定するためには α を求める必要がある。実河川において F_0 , H を知ることは比較的容易であり、また、 h_a の値は(実河川より得ることが困難な場合でも)例えば Arita and Jirka⁹⁾ の理論解によって代用できる。つまり、実河川の α の値を推定することは十分可能であり、本研究成果に実用性を認めることができる。

ところで、 α には河川レイノルズ数 Re_o の効果が含まれるべきであるが、その効果は h_a/H に表れている(h_a/H が Re_o によって変化する)。しかし、本実験では Re_o が $1.2 \times 10^3 \leq Re_o \leq 8.0 \times 10^3$ (表-1 参照) という狭い範囲に限定されており、図-10 に Re_o の効果が十分に反映されているとは言い難い。実河川では Re_o が本実験の場合より大幅に大きくなることを考えると、実用に供するためには広範囲の Re_o に

対しての追加検討が必要と言える。

4. 結論

本研究では、エアカーテンによる塩水楔の遡上阻止について実験的に考察した。本研究より得られた結論を以下に列挙する。

- (1) エアカーテン周辺の流動を支配する外力は、エアカーテンの持つ浮力 A 、塩水塊の侵入力 B 、淡水流(河川流)の慣性力 R の3つである。塩水楔の流動形態は A/R と A/B の2つのパラメータによって決定され、Type I, II, III の3つに大別される。
- (2) エアカーテンは Type II が出現する場合に最も有効に働くが、この流動形態は $\alpha > 0.21$ の条件下で空気流量を一定値以上にした場合に出現する。また、Type I, III の流動形態においても、エアカーテンによって塩水楔長 L を大幅に短くでき、工学的には一定の効果は期待できる。

参考文献

- 1) Abraham, G. and Burge, P. V. D.: Reduction of salt water intrusion through locks by pneumatic barriers., Delft Hydraulic Laboratory Publication, No. 28, 1962.
- 2) 佐々木威之, 浅枝隆: エアカーテンによる河道内塩水侵入制御の機構, 環境システム研究, 第21巻, pp. 335-339, 1993.
- 3) 小松利光, 孫双科, 安達貴浩, 川上義幸, 米須清彦: 感潮河川における塩水遡上の人工制御法についての研究, 水工学論文集, 第40巻, pp. 517-525, 1996.
- 4) 小松利光, 上杉達雄, 安達貴浩, 松岡弘文, 坂元浩司二, 大和則夫, 朝田将: 川内川における塩水遡上の人工制御法の研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 341-345, 1996.
- 5) 浅枝隆, 有田正光, Pham Hong Son: エアカーテンによる塩水楔遡上阻止法に関する研究, 土木学会論文集, No. 572/II-40, pp. 23-31, 1997.
- 6) 小松利光, 安達貴浩, 柴田敏彦, 松永英伸, 朝田将, 室永武司: 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, 1997.
- 7) 中井正則: 安定成層流中に発生する Plume の挙動特性に関する実験的研究, ながれ, 第9巻, 第4号, pp. 262-271, 1990.
- 8) 清水武広, 有田正光, 中井正則: エアカーテンによる塩水楔の遡上阻止に関する研究, 土木学会第53回年次学術講演会概要集(第II部), pp. 794-795, 1998.
- 9) Arita, M. and Jirka, G. H.: Two-layer model of saline wedge., I & II, J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 113, No. 10, pp. 1229-1263, 1987.

(1998.9.30受付)