

(49) エアカーテンによる河道内塩水進入制御の機構

AIR CURTAIN FOR PREVENTING THE SALT WATER INTRUSION IN ESTUARIES

佐々木 威之*・浅枝 隆**

Takeshi SASAKI*, Takashi ASaeda**

ABSTRACT; Salt water intrusion in estuaries is very harmful for the estuarine environment. Air curtain system is effectively to prevent it. Experiments were carried out to obtain the relation between the river flow rate and the required gas flow rate under certain discharge of intrusion. The results indicated that, if the bubble plume intensity is strong enough, the salt intrusion is successfully prevented. A two-dimensional numerical model was made by solving the mass and the momentum and the buoyancy conservation equations. The numerical results agree well with the results of the experiments.

KEYWORDS; Salt Water Wedge, Salt Water Density, Buoyancy, Fresh Water Flow

1. はじめに

河口付近において、海水は河川水よりも重いため、河道に沿ってくさび状に進入する。これを塩水くさびと呼ぶ。ところが淡水、塩水の混ざった特有な環境であるため、その付近の生態系は極めて壊れ易く、一度壊れると回復が非常に困難になる。また、こうした流域では農業、工業用水のために河川水の取水が行われており、河川流域における水資源の確保という点でも重要な意味を持っている。塩水くさびを環境にやさしい方法によって制御することは、重要な課題である。しかも、近年、地球温暖化が原因となり海面が数10cm上昇するといわれており、このことによって塩水くさびが河道内により大きく進入することが予測されている。そのため、河道内への塩水くさび進入を防止するさらなる必要性が生じることにもなる。ところで、この塩水くさびの制御においては、河川の環境を損なわず、更に洪水時における河川の流水能力も維持するという条件が必要となる。こうした条件を満たす方法として、河道を横切る方向にエアカーテンを発生させるパイプを設置し、エアカーテンの流れによって塩水進入を制御することが可能である。本研究は、こうした環境にやさしい塩水遡上防止法として、エアカーテンを用いた方法を考え、水槽実験およびモデル解析を行ったものである。

2. 実験

実験では、図1に示す実験水路を用いた。長さ12m、幅50cm、高さ50cmの水路の中間付近の底に、流れに直角に水路幅いっぱいにエアカーテンを発生させるパイプを設置した。次に、水路内の一方の端にゲートを取り付け、その外側を塩水で満たし、水路側は淡水で満たした。水位を一定に保つために、下流となる塩水側の端に越流して流出する排水口を設けた。実験では、水路のゲートと反対側に取り付けられた放出口から

* 学生員 埼玉大学大学院

Graduate Student Saitama Univ.

** 正 員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設工学科

Assoc. Prof. Saitama Univ.

(〒338 浦和市下大久保255)

(255 Shimo-Okubo Urawa 338)

河川水に見立てた淡水を流し、またゲート側からはゲートを開くことで塩水くさびを発生させた。この塩水くさびの先端は、エアーカーテンの向きに進行することになる。また塩水くさび、河川流の流量を一定に保つように、塩水、淡水を供給し続けた。このような設定のもとで、エアーカーテンの塩水側、淡水側の塩水密度を測定するとともに、塩水側の水面付近での水平流速を測定した。併せて、シャドウグラフ法で塩水、淡水の挙動を可視化し、連続写真撮影を行った。またそれらをもとに、塩水くさびの形状、流速、層厚さらに塩水くさびがエアーカーテンに到達した後の挙動を測定した。河川水の流量、気泡流量、塩水密度をそれぞれ変化させて実験を行った。

3. 現象

塩水くさび進入の挙動は次のようになる。塩水の密度、流量、河川流量、エアーカーテンの空気量の相互の関係によって、塩水くさびがエアーカーテンによって止められる場合と、通過してしまう場合が存在する。まず、エアーカーテンによって塩水くさびの進入が止まる場合を図2に示す。河道底を遡上してきた塩水くさびはエアーカーテンの位置にさしかかると、気泡の持つ浮力によって持ち上げられ、水面に達した塩水は水面に沿って上下流の側へ広がって行く。ところが、上層には塩水くさびとは逆の向きの、淡水側から塩水側へ向かう河川流が存在する。そのために、水面に衝突後、淡水側へ広がっていった塩水は河川流とぶつかり押し戻され、再びエアーカーテンによって形成される気泡噴流によって取り込まれる。このため、塩水くさびが淡水側へそれ以上進入することは阻止される。次に、塩水くさびがエアーカーテンを突破する場合を図3に示す。まず、気泡の浮力と比較して塩水の密度や流量が大きすぎると、それだけの気泡の浮力では塩水を十分持ち上げることができなくなり、塩水は河川上流側へ進入し続けることになる。また、十分な気泡流量が存在する場合でも、河川流量が少なすぎた場合、気泡によって持ち上げられ、水面に沿って広がった塩水をエアーカーテンの向きに押し戻すことができなくなり、やはり河川上流向きに塩水遡上が生ずることになる。従って、エアーカーテンを用いた塩水くさび進入制御を可能にするためには、エアーカーテンの空気量、河川流量が塩水くさびの密度、流量に対して十分であることが必要である。

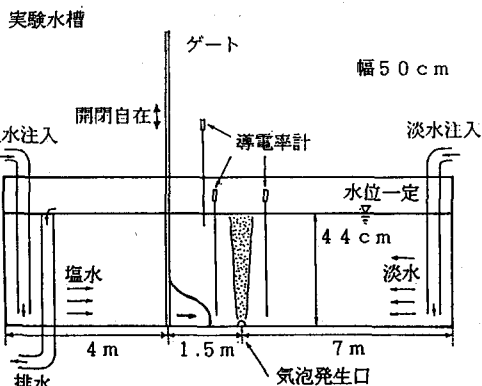


図1

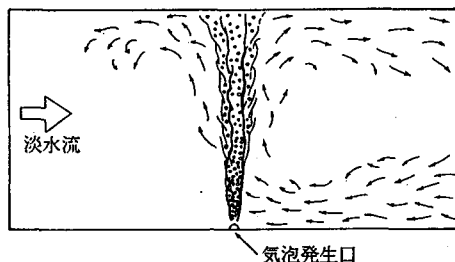


図2

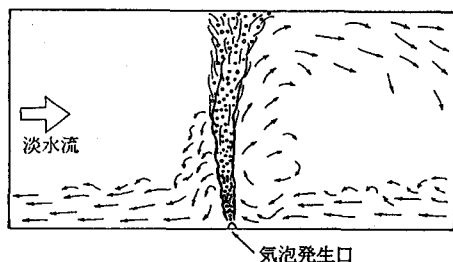


図3

4. 解析

解析では、まず気泡の浮力（流量）とそれによって連行される塩水流量との関係を得るために、成層中におけるモデルを作成した（Asaeda and Imberger:1993）。気泡噴流内において、流体の上昇速度を v 、噴流の有効半径を b 、密度の不足分（浮力）を g' とする。ここでは二次元気泡噴流の積分モデルを用い、上昇速度、不足密度はガウス分布とする。鉛直方向を z 軸、塩水くさびの流れを正とする水平方向を y 軸とおい

て、三つの保存方程式をたてると次のようになる。

質量保存方程式

$$\frac{d}{dz} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} v \exp\left(-\frac{y^2}{b^2}\right) dy \right\} = 2\alpha v \quad (1)$$

運動量保存方程式

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \rho_p v^2 \exp\left(-\frac{2y^2}{b^2}\right) dy \right\} &= k \int_0^{\infty} \rho_r g_1' \exp\left(-\frac{y^2}{\lambda^2 b^2}\right) dy \\ &+ (1-k) \int_{-\infty}^0 \rho_r g_2' \exp\left(-\frac{y^2}{\lambda^2 b^2}\right) dy \quad (2) \end{aligned}$$

浮力保存方程式

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} (\rho_2 - \rho_p) v \exp\left(-\frac{y^2}{b^2}\right) dy \right\} &= \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} v \exp\left(-\frac{y^2}{b^2}\right) dy \right\} \frac{d\rho_2}{dz} \\ g_1' &= \frac{g}{\rho_r} (\rho_1 - \rho_p), \quad g_2' = \frac{g}{\rho_r} (\rho_2 - \rho_p) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_p はそれぞれ塩水側、淡水側、気泡噴流内部の密度、 α 、 λ はそれぞれ噴流の周囲水の連行係数、気泡噴流の断面内の広がり幅と流速分布の広がり幅の比であり、0.16、0.8という定数とした。噴流内部と外部の密度差によって、噴流に働く重力に影響を与える。これには、噴流の上流側、下流側双方に対する重力分が影響すると考えられる。 k はこのうちの塩水側の投与分を表している。しかし観察によると、進入する塩水くさびが、気泡噴流外部でも塩水連行高さまでまき上げられることが確認されたことから、 $k=0$ とおいた。

これらの3式を解くと、次のようになる。なお浮力保存方程式については、水深により個々の気泡の体積が変化するので、右辺に圧縮項を加わる。すなわち、(1)、(2)、(3)式は以下の様になる

$$\frac{d}{dz} (bv) = \frac{2\alpha}{\sqrt{\pi}} v \quad (4)$$

$$\frac{d}{dz} (bv^2) = \frac{\sqrt{2}}{2} \lambda b g_2' \quad (5)$$

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{\sqrt{\pi} \lambda b v g_2'}{\sqrt{1+\lambda^2}} \right) = \sqrt{\pi} b v (-N^2) + \frac{d}{dz} \left\{ \frac{q_a P_a v}{(H-z) \rho_r \left(v + \frac{U_B}{\sqrt{1+\lambda^2}} \right)} \right\} \quad (6)$$

$$-N^2 = \frac{g}{\rho_r} \frac{d\rho_2}{dz}$$

ここで、 N^2 は淡水側の密度成層、 q_a は気泡噴流の単位幅流量、 P_a は大気圧水頭、 U_B は実験で得られた個々の気泡の上昇速度を示す。

さらに、 b 、 v 、 g' についての無次元化を次の様に行った。

$$\begin{aligned} b &= \frac{2\alpha H}{\sqrt{\pi}} B & v &= \frac{U_B M^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{1+\lambda^2}} V & g_2' &= \frac{\sqrt{2} U_B^2 M^{\frac{2}{3}}}{\lambda (1+\lambda^2) H} G \\ Z &= Hx & M &= \frac{q_a P_a (1+\lambda^2)^2}{2\sqrt{2} \alpha H \rho_r U_B^3} & C &= \frac{(1+\lambda^2)^{\frac{3}{2}} H^2 N^2}{\sqrt{2} U_B^2 M^{\frac{2}{3}}} \end{aligned}$$

ここで、 H は大気圧水頭+水深、 C は密度成層の強度と、気泡による浮力（それによって生ずる流れの運動エネルギー）の比を表す（Asaeda and Imberger:1993）。

これらの無次元数を(4)、(5)、(6)に代入して、以下の式を得る。

$$\frac{d}{dx}(BV)=V \quad (7)$$

$$\frac{d}{dx}(BV^2)=BG \quad (8)$$

$$\frac{d}{dx}(BVG)=-CBV+\frac{d}{dx}\left\{\frac{V}{(1-x)(V+M)^{-\frac{1}{3}}}\right\} \quad (9)$$

以上、(7)、(8)、(9)の方程式をルンゲ=クッタ法により数値積分し、気泡噴流による塩水の連行流量を求めた。初期値は $x=0.001$ と設定し、 b 、 v 、 g_z' の初期値はTekeli and Maxwell(1980)の実験式より求めた。

次に、流れ全体の挙動を考慮して、気泡噴流の塩水側、淡水側について、河川流の運動量、塩水流の運動量を含めた運動量保存方程式、および質量保存方程式、連続式がそれぞれ次のように求まる。

運動量保存方程式

$$\frac{1}{2} \frac{\rho_R}{\rho_r} g h^2 + \frac{1}{2} \frac{\rho_L - \rho_R}{\rho_r} g h_L^2 - \frac{1}{2} g h^2 - \frac{1}{2} \frac{\rho_S - \rho_r}{\rho_r} g h_S^2 - \frac{Q^2}{h - h_S} + \frac{q_S^2}{h_S} - \frac{q_R^2}{h - h_L} - \frac{q_L^2}{h_L} \quad (10)$$

質量保存方程式

$$\rho_R q_R + \rho_L q_L = \rho_r Q + \rho_S q_S \quad (11)$$

連続式

$$q_R + q_L = Q + q_S \quad (12)$$

ここで、 h は水深、 Q は単位幅河川流量、添字の L 、 R 、 S はそれぞれ塩水側下層、上層、淡水側下層を示す。

最後に、塩水くさびの流量と気泡噴流によって連行される塩水流量、エアーカーテンを突破する流量の関係を次のようにおいた。

$$\begin{aligned} &\text{塩水側連行量 (塩水くさびの流量) + 淡水側連行量} \\ &= \text{気泡噴流による連行量 + 噴流通過量 (進入防止ができない流量)} \end{aligned} \quad (13)$$

以上、(10)、(11)、(12)、(13)を連立させ、塩水くさび流量 q_L と通過流量 q_S の関係を求めた。なお、塩水くさびがエアーカーテンによって止められる場合の流量は、この連立式において $h_S \rightarrow 0$ の値として求まる。

5. 考察

図4、図5、図6は、気泡流量を一定として計算結果と実験結果を比較したものである。実験から得られた通過流量が計算結果より低い値となっているが、初期塩水密度がエアーカーテンに達するまでに幾分薄められたためと考えられる。塩水と淡水の密度差が大きい程、エアーカーテンの突破前と突破後の塩水の流量の差が小さくなる、すなわち、エアーカーテン通過する流量の割合が大きくなることを示している。これは、密度差によって気泡噴流の連行能力が低下することによる。

図7、図8は、気泡流量による塩水流量の変化を表したものである。いずれも空気量が多くなるほど塩水進入を制御することがわかるが、空気量の増加による進入制御効果はそれ程大きくない。従って図4、図5、図6の結果を考慮すると、密度の高い塩水くさびをくい止めるには、極めて多量の気泡流量が必要になるといえる。

図9は、河川流量を変えたものであるが、河川流量が大きいほど制御効果があることがわかる。しかし、

河川流量の効果は、気泡噴流によってまき上げられた塩水を押し戻すという、二次的な作用によるものであることから、十分な気泡流量により塩水が水面にまで持ち上げられる、という条件が必要である。

以上、実験と計算により塩水くさび流量、気泡流量、河川流量、塩水密度の関係を確かめることができた。なお本研究では、鹿島學術振興財団の援助を受けたことを付記し、感謝の意を表します。

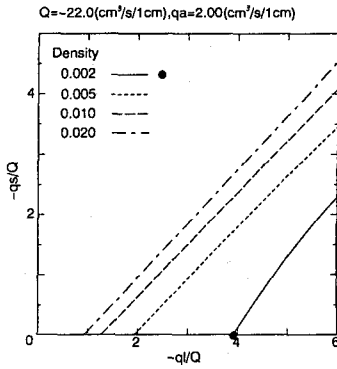


図 4

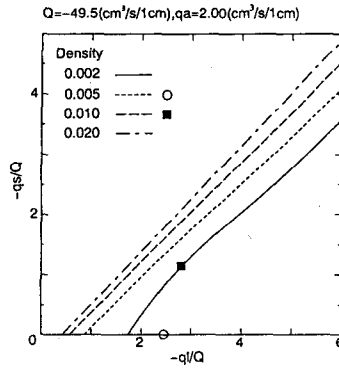


図 5

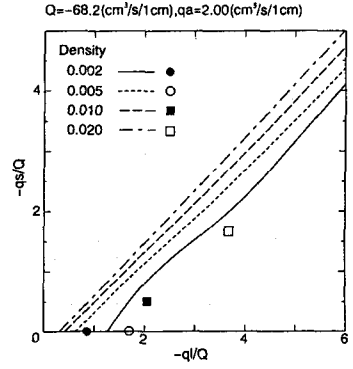


図 6

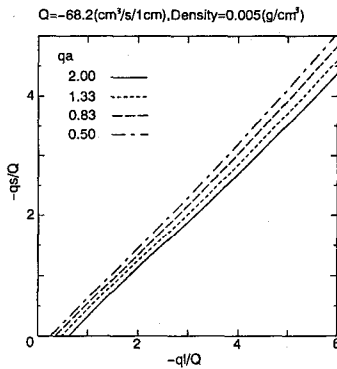


図 7

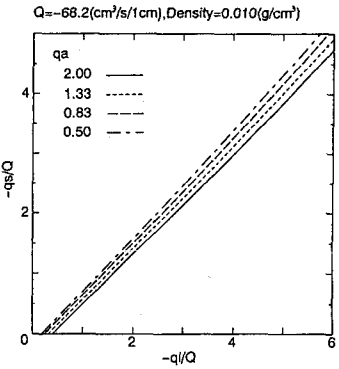


図 8

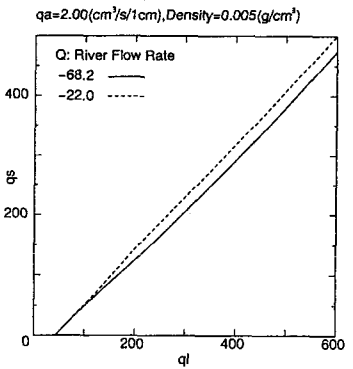


図 9

参考文献

- 1) T. J. McDougall(1978): Bubble plume in stratified environment: J. Fluid Mech. vol. 85 pp665-672
- 2) S. Tekeli and W. H. C. Maxwell(1980): Physical modeling of bubble screens: J. Waterway Port Coastal and Ocean Div., Proc. ASCE vol1106 pp49-64
- 3) T. Asaeda and J. Imberger(1993): Structure of bubble plume in linearly stratified environment : J. Fluid Mech. vol. 249 pp35-57