

塩水楔の制御法とその効果

Control Methods of Saline Wedge and it's Effect

東京電機大学 建設工学科 正会員 有田正光 M. Arita

1 研究の目的

周囲水中に密度差を持つ流体が侵入してゆく場合に、密度カレントもしくは密度楔の二つの流れの形態が観察される。密度カレントはその長さが短く先端の形状が鈍い為、先端部に掛かる形状抗力と浮力効果に基づく侵入力が釣り合っているのに対して密度楔は極めて長く、その密度界面に掛かる界面せん断力と浮力効果に基づく侵入力が釣り合っている。この二つの流れの形態がそれぞれ如何なる条件の基に生ずるかについて詳細に検討した研究としては Jirka-Arita¹⁾の研究が挙げられる。

本論文においては河床に突起物を置いて突起物上で密度楔である塩水楔を密度カレントに変化させ塩水楔長を短くする場合の塩水楔の長さの低減を定量的に評価することを目的とする。この技術の確立は本論文において取り扱う塩水楔の問題の他にも鉱山の排気、建物の中の空気の浄化、流出油の拡散防止工などその応用範囲は非常に広い。

2 密度楔の制御法及び塩水楔の予測モデルと考える流れの場

本章においては先ず、本論文の使用する基本的な概念である密度楔を密度カレントに変化させる方法¹⁾について述べ、次に塩水楔の低減長を見積る為の基礎となる、塩水楔の流れの諸量の予測モデル^{2),3)}について述べる。最後に本論文において考察する考える流れの場について述べる。

(a) 密度カレントと密度楔の制御法に関する研究¹⁾: 密度楔と密度カレントのそれぞれがどのような条件の基に生ずるかについて、Jirka-Arita¹⁾の研究に基づいて以下に簡単に述べる。彼等は密度カレントへの接近流の流速分布形によって密度カレント先端の角度がどの様に変化するかという点について摂動法を使用して取り扱い、僅かな接近流の流速分布の変化によって密度カレント先端の角度が大きく変化することを示した。その結果より密度流が密度楔もしくは密度カレントのどちらの流動形態を取るかについては接近流の流速分布形が決定的な役割を演じる事を明らかにした。結局得られた結論は密度カレントを得る為には密度カレントに対する接近流が一樣流速(流速勾配=0)もしくは流速分布の勾配が正(境界層流れの場合の流速勾配を負とする)でなければならないという事である。

この知見に基づけば流れの中の境界層の存在によって密度楔となる侵入する密度流を密度カレントに変化させる方法は種々考えられるが、著者等によって提案された手法のシャドウグラフ法による流れの可視化写真を写真1に示す。写真1aは水路底面に段差を設置し、境界層を加速することによって段差の先端部において、ほぼ一樣流速を得る事によって密度カレントを得たもの、写真1b、

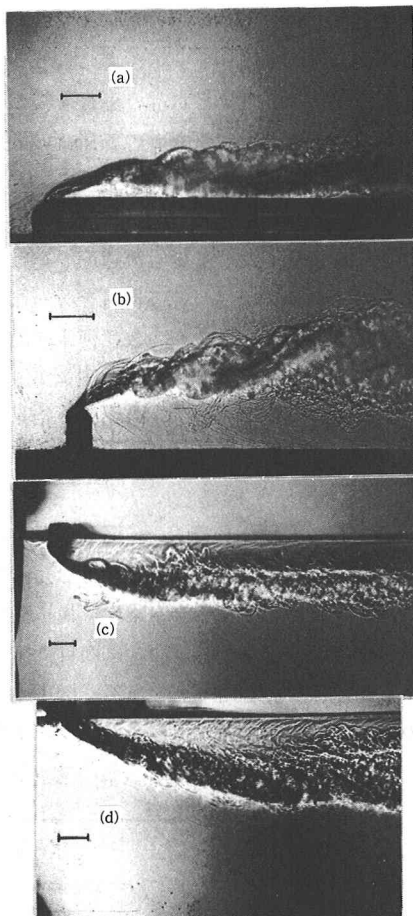


写真1 シャドウグラフ法による密度カレントの流れの可視化(Jirka-Arita¹⁾, バーの長さ2 cm)

1cは写真1aとほぼ同様な手法にもとづくものであるが、水路底もしくは水表面に突起物を設置し一様流速を得る事によって密度カレントを得たもの、写真3dは境界層の流れの流速欠損部の一部を吸い出して密度カレントを得たものである。

本論文においては写真1bの方法に基づいて河床に突起物を設置し、塩水楔を密度カレントに変化させ塩水楔の遡上を阻止する場合について検討する事とする。以下にこの手法を「突起物法」と呼ぶ事とする。上述のように突起物法によって塩水楔を密度カレントに変化させる為には、突起物上で一様流速もしくは速度勾配が正となる必要がある。突起物上における流速分布が一様流速分布となる為の突起物の高さ： Δh は突起物より十分上流の境界層の流速分布が $1/7$ 乗則に従う（著者等¹⁾の実験によって検証されている）と仮定すると流れの水深を h_0 として、 $\Delta h = h_0/8$ となる。従って突起物上で密度カレントを形成させる為の条件は $\Delta h \geq h_0/8$ となる。

(b) 塩水楔諸量の予測モデル（Arita-Jirka^{2),3)}）の概要： Arita-Jirka は塩水楔の流れの諸量の予測モデルについての検討を行い、塩水楔の流れの諸量を精度良く予測し得るモデルを得た。その予測モデルの概要を以下に簡単に述べる。

予測モデルの為には密度界面の界面抵抗係数及び零流速面の連行係数が必要になるがその見積りの為には著者等^{2),4)}によって導かれた理論式を使用する。著者等によって導かれている零流速面の連行係数を与える理論式は乱れエネルギーの生産に伴う連行を表わす項と粘性逸散に伴う連行を表わす項とから成り立っている。その中で粘性逸散に伴う連行を表わす項は成層の度合いが強まる事にに基づく界面付近の再層流化を表わし得る項であり塩水楔などの成層流の問題においては重要な項となる。また彼等は密度界面の界面抵抗係数： λ_i と零流速面の連行係数： α_j の関係について理論的に検討し、 $\lambda_i = 2 \alpha_j$ の関係式を得た。この様にして得られた理論式は実験・実測結果と比較されその妥当性が検証されている。

さらに著者等³⁾はこの零流速面の連行係数と密度界面の界面抵抗係数の理論式を使用して塩水楔の流れの諸量の予測モデルについて検討を行った。予測モデルによって予測し得る塩水楔の流れの諸量は河川密度フルード数、河川レイノルズ数、河床勾配をパラメータとして塩水楔全長、塩水楔界面形状、下層を流動する塩水の流量などである。また予測モデルによる予測の結果と実験・実測データとは比較されその妥当性は検証されている。予測モデルの予測の結果より、下層を流動する塩水流量は河川レイノルズ数の影響を強く受ける事など、従来説明されなかった諸点が明らかにされたことは重要である。

(c) 考える流れの場： 図1に示す様に河川中に侵入している塩水楔の流れの中に高さ： Δh の突起物を水路底に設置し、塩水楔の長さを短くしようとする場合の流れの場の模式図を図1に示す。図中において破線は突起物が存在せず水路中に塩水楔が存在する場合の密度界面の位置を表わしている。また、①断面＝突起物の十分上流側の断面、②断面＝突起物の設置地点の断面、③断面＝密度カレントの頭部よりも若干、下流側に採った断面である。図中の記号で u, q, h, F_r はそれぞれ上層（水表面から密度界面迄）の流速、流量、水深、上層密度フルード数を表わし、また添字 $0, 1$ はそれぞれ塩水楔の始点における値、塩

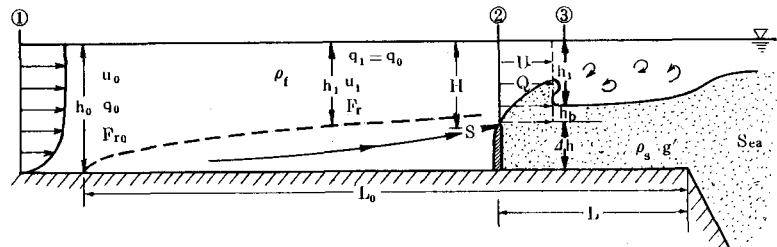


図1 流れの場の模式図
-180-

水楔の領域の中での値である事を示している。さらに、 H, U, Q = ②断面の水深、流速、流量； h_b = ③断面の突起物による塩水層の堰上げ高さ； ρ_f = 淡水の密度； ρ_s = 塩水の密度； $g' = \epsilon g$ ； $\epsilon = (\Delta\rho/\rho_f)$ ； $\Delta\rho = \rho_s - \rho_f$ ； g = 重力の加速度； L_0 = 塩水楔全長； L = 突起物によって短くなった塩水楔の長さ——である。

ここで以下の解析の為に次の密度フルード数を定義する。 $F_r = u_1 / (g' h_1)^{1/2}$ ：上層密度フルード数であり、その塩水楔の始点における値は河川密度フルード数となり $F_{r0} = u_0 / (g' h_0)^{1/2}$ ；である。 $F_H = U / (g' H)^{1/2}$ ：突起物のある断面、②において定義する密度フルード数である。 $F_b = U / (g' h_b)^{1/2}$ ：突起物の後部断面、③において定義する密度フルード数で長さのスケールには塩水層の堰上げ高さ： h_b を使用する。

なお、本論文においては議論の簡略化の為に河床勾配の無い場合についてのみ取り扱う事とする。塩水楔の長さや界面形状などの塩水楔の流れの諸量は河床勾配の影響を大きく受けて変化するものであるので河床勾配が存在する場合は別途計算が必要である。

3 塩水楔長に対する[突起物法]の効果の定量的評価

突起物の挿入によって侵入を阻止される塩水楔は塩水楔の塩水層の厚さが突起物の高さ： dh より小さい部分であると考えたと見積り誤差が大きくなる。より予測の精度を上げる為には密度カレントの後部の塩水層の堰上げ高： h_b を考慮にいれる必要がある(図1参照)。本章においては先ず塩水層の堰上げ高： h_b の具体的な評価法を示し、次にそれを使用して塩水楔長の低減効果を定量的に見積るとともに塩水楔の河川への遡上を完全に阻止する為の条件を求める。

(a) 密度カレントによる塩水層の堰上げ高： h_b についての考察： Benjamin⁵⁾は次式で示される密度カレントの頭部の混合が無視しうる場合の解を得た。なお次式において $n = h_b / H$ である。

$$F_b^2 = (1-n)(2-n) / (1+n) \tag{1}$$

ところで Britter-Simpson⁶⁾は水路の底面にベルトコンベアーを設置し、境界層流れの流速欠損部を加速しほぼ一様流速を得ることによって密度カレントを実験的に得た。図2中に彼等の実験データの範囲と式(1)のBenjaminの理論式を示している。同図より Britter-Simpson の実験値は Benjamin⁵⁾の理論より高い値を示している事が認められる。これは密度カレント頭部においては激しい混合が生ずる事に基づくものである。

また、図2中に、著者等の行った突起物法による実験結果とそれに類似な段差を使用した方法(写真1a)による実験結果を示すが、著者等の実験結果は Britter-Simpson の実験値よりさらに高い値を示していることが認められる。この事は水路中に突起物や段差を設置して境界層を加速し密度カレントを得ようとする場合は密度カレント頭部の混合の効果以外の二次のオーダーの効果を考慮する必要があることを示している。この二次のオーダーの効果とは突起物や段差の先端部：S(図1参照)において密度カレントを発生させようとする場合、密度

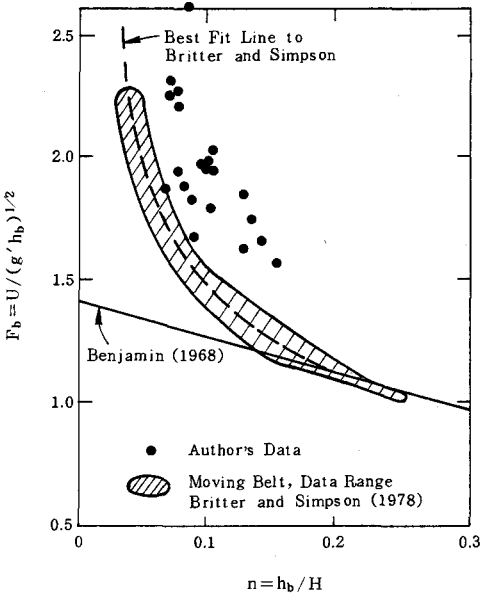


図2 密度カレントの実験データと Benjamin⁵⁾の理論の比較 (● 著者等の実験¹⁾, /// Britter-Simpson⁶⁾の実験データの範囲)

カレント先端の激み点：Sに到る流れは境界層の流速欠損部からのものとなる為に、激み点における圧力は一樣流速が水平に流動し激み点に到る場合（例えばBritter-Simpsonの実験の場合）に比較して小さくなる事によるものである。この点についてJirka-Arita¹⁾は考察を行い、実験の整理に当っては実際の密度カレント先端に対する接近流速：Uではなく激み点における圧力低下を考慮した効果的接近流速： $U_{eff} (\leq U)$ を使用する事を提案している。彼等は上流の境界層流れの水路底から dh の高さの流れの平均的なエネルギーを持つ部分が激み点に到ると考え次式を得た。

$$U_{eff} = U \left\{ \frac{2n}{(1+n)} + \frac{(1-n)}{(1+n)} \left\{ 1 + \frac{(\alpha_b - \alpha_1)}{(1+d)^2} \right\} \right\}^{1/2} \quad (2)$$

ここに、 $d = dh/h_0$ ， α_1 = 突起物上流の境界層における運動量補正係数， α_b = 突起物によって置き換えられる突起物上流の境界層における平均的エネルギー補正係数であり、 $\alpha_b = \alpha_1 p^{3/7}$ である。本論文には示さないが著者等の実験データを式(2)を使用して再整理すると図2の著者等の実験データは同図中のBritter-Simpsonの実験範囲と一致する事から著者等の導入した効果的接近流速の概念は妥当なものであるといえる。

(b) 塩水層の堰上げ高： h_b と遡上を阻止される塩水楔の高さの定量的評価法：(a)節で行った考察を基に塩水層の堰上げ高さ： h_b を定量的に定める為の考察を行い以下に簡条書にして述べる。

① 図2の縦軸の F_b を、突起物の先端における密度フルード数： F_H に $F_H = n^{1/2} F_b$ の関係式を使用して変換し、なおかつ著者等のデータの為に式(2)より効果的接近流速： U_{eff} を算出した上で効果的密度フルード数： F_{He} を $F_{He}^2 = U_{eff}^2 / g'H = F_H^2 (U_{eff}/U)^2 = F_{r0}^2 / (1-p)^3 (U_{eff}/U)^2$ の関係式より計算する。その結果を縦軸に F_{He} を取って図2を再プロットしたものが図3である。当然の事ながらBritter-Simpsonの実験データとBenjaminの理論の場合は $F_{He} = F_H$ であるのでそれらの図2から図3への変換に当っては著者等のデータの場合のような式(2)を使用しての計算は必要としない。なお図中の破線は著者等とBritter-Simpsonの両実験データの範囲に対するベストフィットラインである。以後の議論においてはこの破線を使用して議論を進めることとする。結局、図3の破線より突起物のある断面における効果的密度フルード数： F_{He} の関数として密度カレントの後部の堰上げ水深： $n = h_b/H$ が定まる事となる。

② 図4は任意の突起物の高さ： $p = dh/h_0$ に対応する F_{He}/F_{r0} の値を n の関数として描いているものである。同図は上述の F_{He} と F_{r0} の関係式及び式(2)で与える U_{eff} と U の関係式より得られる次式を使用して計算されたものである。

$$\frac{F_{He}}{F_{r0}} = \left[\frac{2n}{(1+n)} + \frac{(1-n)}{(1+n)} \left\{ 1 + \frac{(\alpha_b - \alpha_1)}{(1+d)^2} \right\} \right]^{1/2} / (1-p)^{3/2} \quad (3)$$

結局、図4もしくは式(3)を使用して計算することにより、河川密度フルード数： F_{r0} と突起物の高さ： p が与えられれば n の関数として F_{He} が定まる事となる。

③ 従って、任意の F_{r0} と p の値のもとに図3

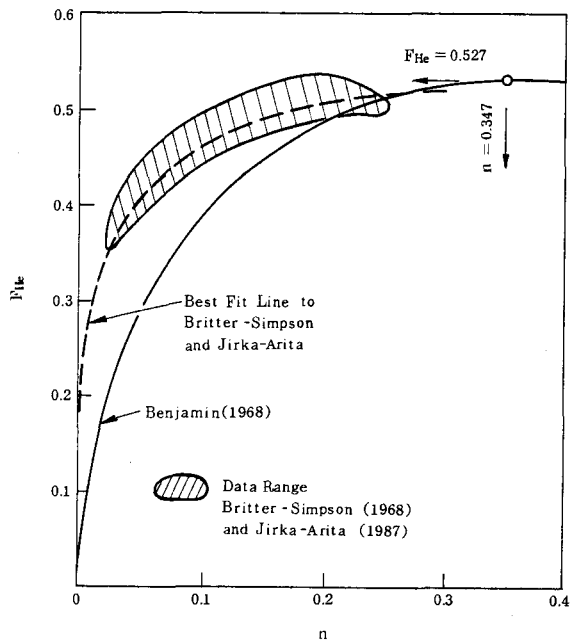


図3 効果的密度フルード数： F_{He} と塩水層の堰上げ高さ： n の関係

と図4を使用して試行錯誤的に F_{He} と n の真の値を定めることによって突起物による塩水層の堰上げ高さを求める事ができる。もしくは与えられる F_{r0} と p の値における図4の曲線を図3中にプロットし、図3の破線との交点を求めることによって F_{He} と n の値が定まる。

④ 以上の手続きによって任意の河川密度フルード数： F_{r0} を持つ河川中に高さ： p の突起物を立てた場合に遡上が阻止される塩水楔の塩水層の高さが $p + n(1-p)$ を計算することによって定まる。

(c) 塩水楔の遡上阻止長に関する具体的計算例と塩水楔侵入の完全阻止の条件： 本節では上述の考察に基づいて塩水楔の遡上長の低減の具体的な計算例を示す。その為に必要な塩水楔の長さや界面形状の為の予測モデルとしては前述のように著者等の予測モデルを使用する。図5は塩水楔の全長に関する予測モデルによる計算結果であるが、河川レイノルズ数の効果が非常に大きいことが認められる。以下の突起物の効果の具体的な計算例はMississippi川の塩水楔を念頭において河川レイノルズ数： $Re(=q_0/\nu; \nu = \text{水の動粘性係数}) = 10^8$ の場合について行うこととする。図6にその計算例を示すが、図中の $p=0$ の曲線は河床に突起物が無い場合の塩水楔長であり、図5の $Re = 10^8$ の曲線と一致する。なお図中の縦軸の L は短くなった塩水楔長(図1参照)を表わす。同図より河床に設置された突起物の効果はかなり大きい事が分かる。ただし、突起物の効果の程度は河川密度フルード数、河川レイノルズ数の条件によって大きく異なるものであることが認められ、実際の設計に当っては工學上の判断が求められる。

今一つ重要なことは塩水楔の河川中への侵入を完全に阻止する為の条件を求める点にあると考えられる。河川中への塩水楔の侵入を完全に阻止する為には密度カレントの後部、つまり断面③の上層の密度フルード数： F_r が河口の条件 $F_r = 1$ (下層

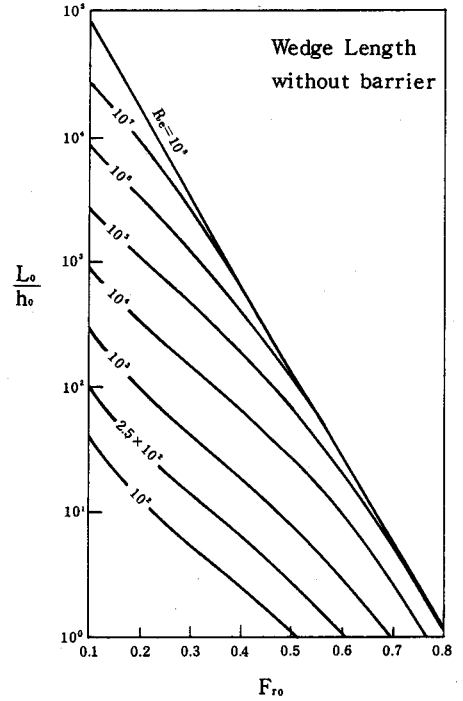


図5 予測モデル^{2),3)}による塩水楔全長の計算(突起物が無い場合)

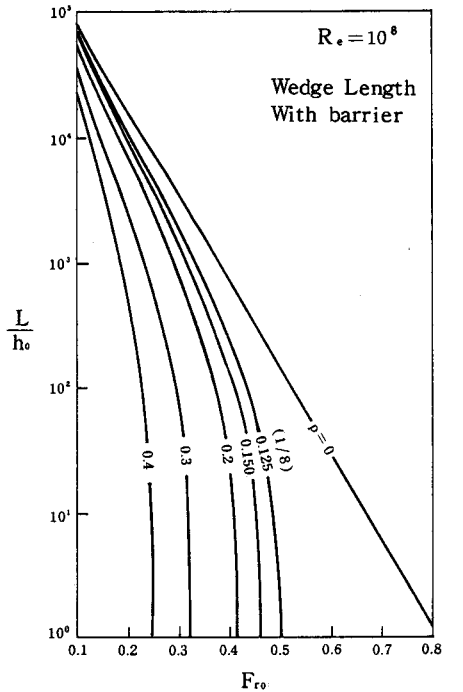


図6 突起物による塩水楔長の低減効果 ($p = dh/h_0$; $p=0$ は突起物が無い場合)

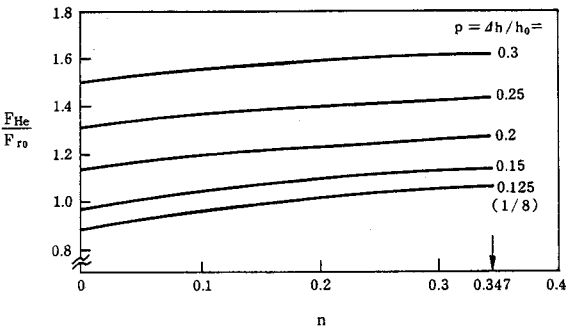


図4 突起物の高さによる効果の密度フルード数の変化
—183—

の塩水の流動を考慮すれば河口において F_r は若干1より小さくなるがほぼ1に等しい)となることである。従ってこの条件を満たす下層水深： $h_2 = h_0 - (q_0^2/g')^{1/3}$ より突起物の高さや密度カレントによる塩水層の堰上げ高さの合計： $4h + h_b$ が大きい場合に塩水楔は河川中への侵入を阻止される事となる。この条件は図3に示す様に密度カレントの頭部の混合が無視しうる場合は Benjamin の理論解の与える F_{He} の最大値を与える点

($F_{He} = 0.527$, $n = 0.347$)の条件により与えられる。混合を考慮する場合においても同図に示す様に F_{He} , n が大きい領域においては Benjamin 解とほぼ一致する事により、結局、任意の F_{r0} に対して塩水楔を河口において阻止する為の p 値は式(3)において $F_{He} = 0.527$, $n = 0.347$ の条件のもとに F_{r0} を与え、同式を満足する p の値を求めることによって得られる。その様にして求められた p の値を F_{r0} の関数として図7中に実線で示す。なお、図中の破線は密度カレントの後部の塩水層の堰上げを考慮しない場合の塩水楔の遡上を完全阻止する為の p の値を示すものである。実線と破線の値は大きく異なるものであることが分かる。前述のように突起物上で密度のカレントを発生させる為には $p \geq 1/8$ の条件を満足する必要があるから図7中に実線で示す様に塩水楔の遡上を完全に阻止する為の p の値は $p < 1/8$ においては塩水層の堰上げを考慮しない場合の解と同一の軌跡を取ることとなる。

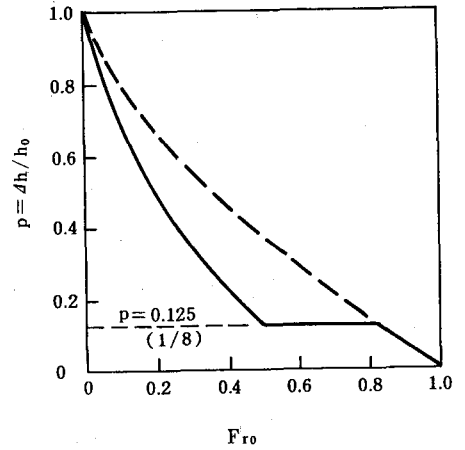


図7 河川への塩水楔侵入完全阻止の条件
— 塩水層の堰上げを考慮する場合
--- 塩水層の堰上げを考慮しない場合

4 総括および今後に残された課題

突起物を河川中に設置し塩水楔を密度カレントに変化させる事により著しくその長さを短くしうるものである事を定量的に示した。本論文に示した方法により塩水楔の低減長が計算できるがさらにモデルの精度を上げる為には以下の考察が必要であると考えられる。

突起物のある断面において一様流速となるのは $p = 1/8$ の場合であって、 $p > 1/8$ の場合には突起物のある断面における流速分布の勾配は正となると考えられる。この場合密度カレントの頭部の角度は大きくなりまた後部の塩水層の堰上げ水深は大きくなると考えられる。この事は著者等の摂動法による解析¹⁾によって明らかである。従って、 $p > 1/8$ の場合においては突起物の効果は本論文の計算で示した結果よりさらに大きくなるものと考えられ、より精度の高い予測モデルの為にはこの点についてさらに検討が必要である。

また著者等の塩水楔の予測モデルによれば塩水楔の流れの諸量は流れのレイノルズ数の影響を強く受ける事が知られている。一方、密度カレントの混合の程度や後部の塩水層の堰上げ水深に対するレイノルズ数の影響は不明である。密度カレントは激しい混合を伴うのでレイノルズ数の影響は小さいと考えられるが今後の検討が待たれる。

【参考文献】 (1) Jirka, G. H. and Arita, M.: Density Currents or Density Wedges - Boundary Layer Influence and Control Methods, J. F. M., Vol. 177, pp. 187-206, 1987. (2), (3) Arita, M. and Jirka, G. H.: Two-Layer Model of Saline Wedge; Part 1: Entrainment and Interfacial Friction and Part 2: Prediction of Mean Properties, Jour. of Hydr. Eng., ASCE, Vol. 113, No. 10, pp. 1229-1263, 1987. (4) 有田正光, G. H. Jirka: 二成層流の連行および界面抵抗係数に関する研究—塩水楔の問題を念頭において—, 水理講演会論文集, 第31号, pp. 479-484, 1987. (5) Benjamin, T. B.: Gravity current and related phenomena, J. F. M., 31, pp. 209-248, 1968. (6) Britter, R. E. and Simpson, J. F.: Experiments on the dynamics of a gravity current head, J. F. M., 88, pp. 223-240, 1978.