

バイパス型の分・合流部を含む水路内での塩水くさびの挙動について

Salt-Water Intrusion in a Channel with a Bypass-Type Branch

芝浦工業大学 正員 菅 和利

東京大学工学部 正員 玉井信行

1. はじめに

塩分遡上の計算では、Estuary 数が大きい強混合状態を対象とした拡散モデルと、緩混合、弱混合状態を対象とした多層流モデルが用いられているが、今日の段階では非常に単純化された境界条件下でのみ計算が可能である。実際の河道では支川との分・合流部、急縮、急拡部等の地形の複雑さに加えて、潮汐の不定流効果により、現象は複雑であり、どのような現象が生じるかについてさえ不明な点が多い。本研究ではこれら地形の因子の一つである分・合流部を有する水路内での塩水の遡上現象を実験的に解明したものである。

支川を含んだ河道内での塩分分布の計算では、支川の流量、塩分を本川への横流入として連続の式及び質量保存の式に考慮するのみで、運動量の交換については無視して本川を計算し、その結果を境界条件として支川を再度計算する方法が良く取られている¹⁾。又地形の効果としては、縦拡散係数を単に割増しすることによってのみ考慮されて来た²⁾。これらの方法はいずれも拡散モデルを基礎としており、我が国の多くの河川で見られる緩混合、弱混合を取り扱う多層流モデルにおいては、このような地形の影響については考慮されていない。本報告では弱混合、緩混合状態の塩水くさびが図-1に示すようなバイパスタイプの分・合流部を通過する場合の非定常な挙動を可視化を中心として解明し、最大遡上距離に及ぼす分・合流部の効果について明らかにしたものである。さらに定常状態でのシミュレーションを、密度、運動量の分散を考慮した2層流モデル³⁾によって行った。

2. 分・合流部の効果について

2-1 実験装置の概要

実験装置は図-1に示すように直線水路Ⅰと曲線水路Ⅱとがバイパスタイプに結合されたものである。A, B区間でのⅠ, Ⅱの中心線上での長さの比は1:1.3であり、流量配分は1:0.1である。又Ⅰ, Ⅱの勾配は1/50と1/70である。測定にはビデオ装置及び導電率計、水素気泡発生装置を用いた。

2-2 塩水くさび遡上時の挙動

図-1の海部に相当する水槽の塩水面を上昇させ、水路内に塩水の遡上を生じさせる。遡上を開始したくさびは分流部Aに達すると、分流部での水路幅の拡大により下層塩水は横方向に広がる。これによりくさびの遡上のdriving forceの下層圧力が横方向に分散するので遡上速度が減少し分流部Aに滞留する。なお分流部、合流部の呼び方は、淡水の流下についてではなく、塩水くさびのフロントの遡上に着目して決定しているので、図-1のA点が分流部で、B点が合流部である。くさび先端部が分流部に滞留している間に、この地点より下流部の下層塩水量が増加し、界面が上昇する。この結果下層の圧力勾配が増加し、くさびはⅠ, Ⅱの水路に再び遡上を開始する。図-2(a)は遡上速度の場所的な変化の一例を示したものである。この図は上記のことを示しているが、さらに分流部通過後のフロントが一時加速されることを示している。これは、分流部が局所的に縦方向の圧力勾配を増加させる効果を有していることを示唆している。この一時加速効果は、貯水池に流入する密度フロントが合流部で向きを変える場合にも見られ⁴⁾、滞留効果と共に出現する効果である。又図-2(b)は分流部Aでのフロントの様子を上方よ

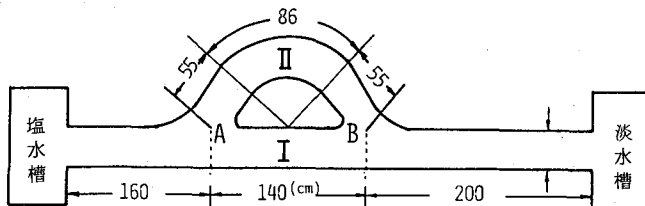


図-1 実験装置

り見たものである。

上流よりの淡水流量が同じでも分流部 A への下流からの塩水供給量の大小によって、Ⅰ、Ⅱの水路を遡上するそれぞれのフロントの移動速度に差が生じ、合流部で異った挙動をする。遡上時の海部から水路への塩水供給量は、海部での潮位変動の大小に依存しており、海部での塩水面の上昇速度を変化させることにより現象の差異を観測した。

i) 海部での塩水面の上昇速度が大きい場合

水路には一定流量の淡水を流しておき、海部の水槽底部より塩水を供給するが、この供給塩水の量をコントロールして塩水面の上昇速度を決定した。上昇速度の大きい場合は大潮時に相当し、小さい場合は小潮時に相当するものと考えられる。上昇速度大のケースとしては、河口部で $10\text{ cm}/25\text{ 分}$ を採用した。これは実河川での $15\text{ m}/6\text{ 時間}$ に同程度のもので、一般的な大潮時に相当していると思われる。塩水深の時間変化を示したのが図-3である。

分流部 A で分離したフロントは直線部Ⅰと曲線部Ⅱとを遡上するが、Ⅰの水路の遡上速度の方がⅡの水路より大きく、合流部 B に達した塩水はこの地点で遡上を停止し、Ⅱの水路に向かって逆流をするようになる。合流部ではⅠとⅡの水路の境界に鉛直軸を有する大きな渦が存在し、この渦とコーナー部での擾乱により合流部に早く達した塩水は淡水と激しく混合し、希釈される。希釈塩水の一部は下流へ移送され、他はⅡの水路へと逆流する。Ⅱの水路では流量が小さいので、逆流塩水はフロントの上面に沿って覆いかぶさるように移動し、滞留する。この為にⅠの水路と比べて多少緩混合状態となる。Ⅱの水路のフロントが合流部 B に達するとフロントは合流してⅠの水路を遡上し、やがて定常状態に達する。

ii) 海部での塩水面の上昇速度が小さい場合

上昇速度として図-3の鎖線で示すように $10\text{ cm}/45\text{ 分}$ を採用した。この場合にはⅠの水路を遡上するフロントの速度よりもⅡのものの方が大きく、早く合流部 B に達し i) の場合とは逆にⅠの水路に逆流する。しかしフロントの合流後は i) の場合と同じ挙動を示す。

このように、河口での塩水面の上昇速度の大小により、直線水路と曲線水路でのくさびの遡上速度は異なり、合流部に先に達したフロントは他方の水路へと逆流する。このことは先に合流部に達したフロントに対しては、合流部が sink の役割を生じ、下層塩水の遡上を益々活性化する。その結果、他方の水路のフロントの遡上速度を低下させる。

2-3 定常状態について

河口部の塩水面を一定に保持すると、合流後のフロントは遡上を停止し、定常状態に達する。この時点での合流部 B での下層塩水の合流の様子を示したのが図-4である。Ⅱの塩水はⅠの塩水を押すような形で合体し、しばらく遡上した後に混合する様子が見られ、下層では y 方向の圧力勾配 $\frac{\partial p}{\partial y}$ が負であることが予測される。これはⅡの水路はⅠの水路に比べて淡水流量が小さく、従って界面での抵抗が小さいので界面

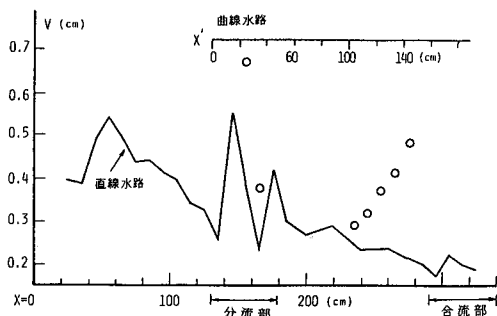


図-2(a) くさびフロントの遡上速度



図-2(b) 分流部での流況 (平面図)

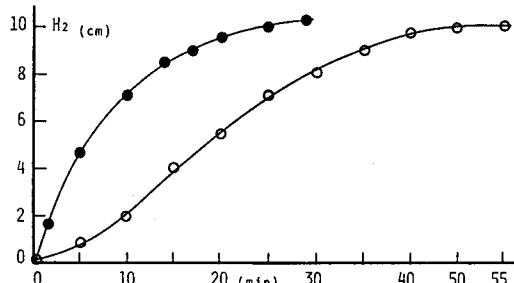


図-3 河口部での界面上昇の時間変化

の勾配はゆるやかであり、合流点では I の水路より界面位置が高くなるためである。合流部下層での $\partial p / \partial y < 0$ は I の水路にとっては塩水の source が横方向に存在することに当たり、この塩水補給はくさびの最大遡上距離を増加させる。

分流部では図-5に示すように界面勾配が急になり、階段状を呈する。これは幅の拡大による上流側での界面低下と、この為に生じる界面の曲率の増大による圧力の静水圧分布からのずれの効果とに起因している。さらに付加的には形状抵抗が無視できない大きさと考えられる。しかし本研究では幅の変化と圧力のずれとに原因をおくこととする。この階段状の界面変化は下層塩水の上流への供給を活発とし、くさびの最大遡上距離を増大させる働きをすると考えられる。

分・合流部の最大遡上距離への寄与を確かめる為に、分・合流部の無い場合と比較したのが図-6である。河口部での水位、界面位置、塩水の密度を一定に保ち、淡水流量を変化させて遡上距離を変化させた。4Lは同じ条件下で、分・合流部がある場合の最大遡上距離 L_j と仕切りを入れて直線水路とした場合の最大遡上距離 L_s との差 $4L = L_j - L_s$ である。又図-6の横軸は、河口を $x = 0$ とした場合の L_j の位置を示したものである。遡上距離が分流部に達しないケースでは、仕切りを入れた場合には多少流れの様子が変化するが $L_j \approx L_s$ であり、 $0 < L_j < x_1$ の範囲では分・合流部の最大遡上距離への寄与は無視しうる。次に遡上距離が分流部と合流部との間にある場合には分流部のみの効果と考えられるが、4Lは正で L_s の約1~2割程度遡上距離が大きくなることがわかる。又遡上距離が合流部を過ぎた場合には分流部、合流部、曲線部（バイパス）の効果により遡上距離が大きく増加することがわかる。この場合には $4L = (0.1 \sim 0.2) L_s$ である。

以上定常状態での分・合流部の効果について述べたが次の3点に要約できる。

- (1) 分流部は下層塩水の上流への供給を増加させる。
 - (2) 合流部は直線水路に対して塩水の source となる。
 - (3) 曲線水路は上流部への塩水供給のバイパスとなる。
- これら3つの効果によって最大遡上距離が増加すると推測することができる。

遡上距離が大きくなること、及び図-5で示したように分流部より上流では界面勾配が小さくなることは見掛け上界面抵抗が小さくなることを意味している。図-7は分流部では幅の変化を考慮し、式(1)を用いて界面抵抗係数を計算し、経験式と比較したものである。分流部より上流では界面抵抗係数 f_i が約半分近くまで小さくなっていることがわかる。この結果は須賀⁵⁾による狭窄部を有する水路での実験結果と同じ傾向を示している。 f_i の計算では $120 < x < 170$ の間で水路幅Bが2倍になり、合流部では幅Bの変化は考えないこととして、直線部についてのみ求めたものである。抵抗係数 f_i の算定では、下層流速、連行、流線の曲りによる付加圧力勾配等は無視した。なお式(1)においてはx軸は淡水の流れ方向に取り、 h_1 、 h_2 、

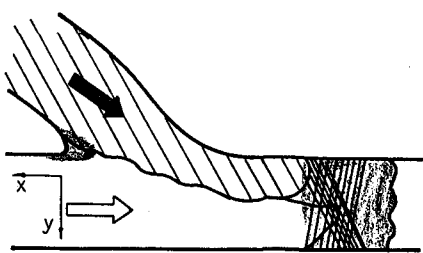


図-4 合流部での流況（平面図）

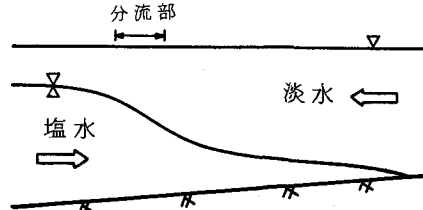


図-5 分流部での界面形状

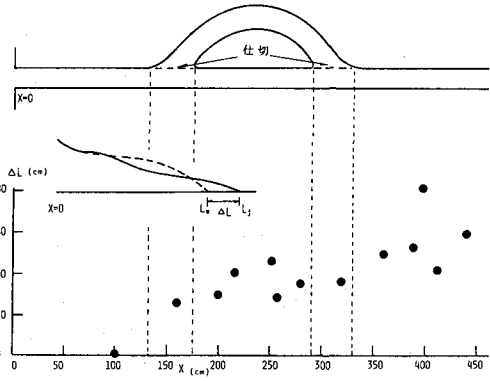


図-6 遡上距離の増分

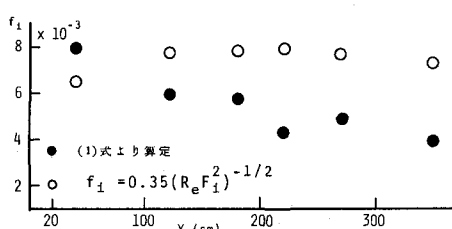


図-7 界面抵抗係数

a_1, ρ_2, U_1 は上下層の水深、密度及び上層の流速であり、 $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1$ である。

$$f_i = 2F_{d1}^2 \frac{h_2}{h_1 + h_2} \left\{ - (1 - F_{d1}^2) + \frac{U_1^2}{gB\varepsilon} \frac{\partial B}{\partial x} \right\}, \quad F_{d1} = \frac{U_1}{\sqrt{\varepsilon g h_1}} \quad (1)$$

3. 分流部での付加圧力について

図-5で示すように分流部では水路幅が拡大し、それに伴い界面形状が階段状を呈し流線の曲率が大きくなる。この流線の曲りによる静水圧分布からの偏差を付加圧力として考慮し、この付加圧力の流れ方向の勾配に相当して、下層を遡上する塩水流量が増加すると考える。

圧力 $p(x, z)$ を静水圧 $\bar{p}$ とそれからの偏差 $\Delta p(x, z)$ の和として表わすと、運動量保存式の圧力項 $-\partial p / \partial x$ の上層内での積分は次のようになる

$$-\int_h^s \frac{\partial p}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_h^s \bar{p} dz - \bar{p}_h \frac{\partial h}{\partial x} + \bar{p}_s \frac{\partial s}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \int_h^s \Delta p dz - \Delta p_h \frac{\partial h}{\partial x} + \Delta p_s \frac{\partial s}{\partial x} - M_1 \quad (2)$$

z 軸は鉛直上方に取り、 s, h, b は水面、界面、底面の z 座標を示し、 $h_1, h_2, U_1, U_2, \rho_1, \rho_2$ は上層、下層での水深、層平均流速、密度を表わす。

圧力偏差 Δp は z 方向に分布しているが、近似的に層平均値で考えることとする。

$$\Delta \hat{p} = \frac{1}{h_1} \int_h^s \Delta p dz, \quad \Delta p_h \approx \Delta \hat{p}, \quad \Delta p_s \approx \Delta \hat{p}, \quad \bar{p} = \rho_1 g z \quad (3)$$

式(3)を用いて式(2)を書き直す。

$$-\int_h^s \frac{\partial p}{\partial x} dz = -\frac{1}{2} g h_1^2 \frac{\partial \rho_1}{\partial x} - g \rho_1 h_1 \frac{\partial h_1}{\partial x} - \rho_1 h_1 \frac{\partial h_2}{\partial x} - \rho_1 g h_2 \frac{\partial b}{\partial x} - h_1 \frac{\partial}{\partial x} \Delta \hat{p} - M_1 \quad (4)$$

下層についても同様に圧力項を下層内で積分する。

$$\begin{aligned} -\int_b^h \frac{\partial p}{\partial x} dz &= -\frac{\partial}{\partial x} \int_b^h \bar{p} dz + \bar{p}_h \frac{\partial h}{\partial x} - \bar{p}_b \frac{\partial b}{\partial x} \\ &= -h_2 \frac{\partial}{\partial x} \bar{p}_h - h_2 \frac{\partial \Delta \hat{p}}{\partial x} - \frac{1}{2} h_2^2 g \frac{\partial \rho_2}{\partial x} - \rho_2 g h_2 \frac{\partial h_2}{\partial x} - \rho_2 g h_2 \frac{\partial b}{\partial x} - M_2 \end{aligned} \quad (5)$$

式(4), (5)の下線を引いた項が付加圧力による項であり、 $M_i = -g \partial (\lambda_i \Delta \rho_i) / \partial x$ は分散項⁸⁾である。

分・合流部での淡水、塩水の補給を考えると、分散項を考慮した積分型の方程式は次のようになる。

$$U_1 \frac{\partial h_1}{\partial x} + h_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} = E (|U_1| - |U_2|) - \frac{h_1 U_1}{B} \frac{\partial B}{\partial x} + q_1 \quad (6)$$

$$U_1 \frac{\partial \rho_1}{\partial x} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{h_1} E |U_1| \quad (7)$$

$$\begin{aligned} U_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} &= \frac{g h_1}{2 \rho_1} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} - g \frac{\partial h_1}{\partial x} - g \frac{\partial h_2}{\partial x} - g \frac{\partial b}{\partial x} - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial \Delta \hat{p}}{\partial x} - \frac{f_i}{2 h_1} (U_1 - U_2) |U_1 - U_2| \\ &\quad - \frac{\rho_1}{\rho_1 h_1} (U_1 - U_2) E |U_2| + D_1 \end{aligned} \quad (8)$$

$$U_2 \frac{\partial h_2}{\partial x} + h_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} = -E (|U_1| - |U_2|) - \frac{h_2 U_2}{B} \frac{\partial B}{\partial x} + q_2 \quad (9)$$

$$U_2 \frac{\partial \rho_2}{\partial x} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{h_2} E |U_2| + D_2$$

$$\begin{aligned} U_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} &= -\frac{\rho_1}{\rho_2} g \frac{\partial h_1}{\partial x} - \frac{g h_1}{\rho_2} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} - \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial \Delta \hat{p}}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{h_2^2}{\rho_2} g \frac{\partial \rho_2}{\partial x} - g \frac{\partial h_2}{\partial x} - g \frac{\partial b}{\partial x} \\ &\quad - \frac{f_b}{2 h_2} |U_2| U_2 + \frac{f_i}{2 h_2} \frac{\rho_1}{\rho_2} (U_1 - U_2) |U_1 - U_2| + \frac{\rho_2}{\rho_2 h_2} E |U_2| (U_1 - U_2) + D_3 \end{aligned} \quad (10)$$

q_1, q_2 は単位幅、単位長さ当りの流入量、 D_1, D_2, D_3 は分散項³⁾を表わす。

くさびの遡上距離が増加し、見掛け上抵抗係数が減じていることが図-5、図-6、図-7に示されており、この原因として分流部での付加圧力（上流への塩水の付加的な供給）と、合流部での下層塩水の供給を考えているので、 $\partial h_1 / \partial x$ 、 f_i を示す式において検討を行う。

簡単な為に $\partial \rho / \partial x$ 及び分散項を無視すると式(6)~(11)より次式が得られる。

$$\begin{aligned} (1 - F_{i1}^2 - F_{i2}^2) \frac{\partial h_1}{\partial x} = & F_{i2}^2 \frac{\partial b}{\partial x} + \frac{(1 - \epsilon F_{i2}^2)}{g B \epsilon} (U_1^2 + U_2^2) \frac{\partial B}{\partial x} \\ & - \frac{(1 - F_{i2}^2)}{\rho_1 g} \frac{\partial \Delta \hat{p}}{\partial x} - \frac{(1 - \epsilon F_{i2}^2)}{g B h_1 \epsilon} U_1 q_1 \\ & + \frac{U_2 q_2}{g B h_2 \epsilon} - \frac{E U_2}{g h_2 \epsilon} (|U_1| - |U_2|) - \tau_{i1} - \tau_{i2} \end{aligned} \quad (12)$$

又 f_i については付加流量を表わす項以外では $U_2 = 0$ として簡略化すると

$$\begin{aligned} f_i = & 2 F_{i1}^2 \frac{h_2}{h_1 + h_2} \left\{ - \frac{\partial h}{\partial x} (1 - F_{i1}^2) + \frac{U_1^2}{g B \epsilon} \frac{\partial B}{\partial x} - \frac{1}{\rho_1 g} \frac{\partial \Delta \hat{p}}{\partial x} \right. \\ & \left. - \frac{U_1 q_1}{g B \epsilon h_1} + \frac{U_2 q_2}{g B \epsilon h_2} \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

となる。式(13)の付加圧力の勾配 $\partial \Delta \hat{p} / \partial x$ は正であるのでこの項は f_i を見掛け上小さくする働きをし、又付加的な塩水補給も同様な働きをすることがわかる。しかし流線の曲りによる付加的な圧力勾配は分流部近傍のみの局所的なものであり、分流部より上流への効果として以下のように考えることとする。

- a) 分流部では $\partial \Delta \hat{p} / \partial x > 0$ であるので、式(12)からわかるように $\partial B / \partial x$ の効果も重って $-\partial h_1 / \partial x$ は増加して、分流部での界面形の階段状をより強くする。(b) 界面の段差が大きくなると、下流から分流部への塩水の供給が活発になる。(c) 分流部より上流では下層水深が小さくなり、この層に塩水が活発に供給されるので遡上距離は増大する。(d) 合流部では曲線水路の方が流量が少ないので界面の標高が直線水路のものより高く、横方向の圧力勾配が形成され、曲線水路から塩水が直線水路に供給される。(e) この供給によってさらに遡上距離が増大する。

これら(a)~(e)の効果を定常場合の再現計算に考慮することとする。

4. 定常状態の再現計算について

著者らは緩混合状態までもを対象としうるように、流速分布、密度分布形を考慮して導いた積分型2層基礎式（式(6)~(11)）を用いて直線水路での塩水くさびの定常再現計算を行い良好な結果を得ている⁸⁾。この基礎式を用い、分・合流部を有する水路での再現計算を行う。

4-1 分流部の取り扱い

分流部では $\partial B / \partial x$ を分流始点から終点まで漸拡しているとして考える。流線の曲りによる付加圧力は、界面の形状を $\partial B / \partial x$ のみ考慮して求め、これを境界とし、ポテンシャル流れとしてリラクゼーション法で流線を計算することにより、その分布状態を知ることができる。しかし、本研究では、局所的な流れの様子よりも、この局所的な現象の全体への効果を取り入れることに視点を置いているので、近似的に以下のように取り扱う。守谷⁶⁾らの研究結果を参照し図-8に示すように、階段状界面形により発生する付加圧力は断面Ⅰでは $\Delta \hat{p}$ で、断面Ⅱではゼロと考える。この圧力差 $\Delta \hat{p}$ に起因する流れを付加下層流速として表すこととし、下層での浮力効果を考慮すると、付加流速 $\hat{U}_2$ は次式で表わせる。

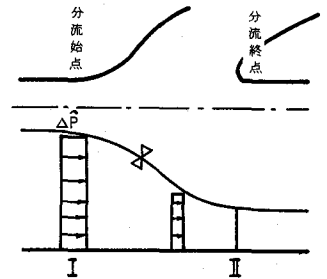


図-8 付加圧力の分布

$$\hat{U}_2 = \sqrt{\frac{2 \Delta \hat{p} (\rho_2 - \rho_1)}{\rho_1 \rho_2}} \quad (14)$$

又 $\Delta \rho$ の値は、 $U_1, \partial B / \partial x, \Delta \rho$ 等によって変化する値であるが、再現計算では河口流出の結果を参照し、次式を採用した。

$$\Delta \hat{p} = 0.2 (1/2 \cdot \rho_1 U_1^2) \quad (15)$$

式 (14), (15) より $\hat{U}_2$ に対して次式を得る。

$$\hat{U}_2 = \sqrt{0.2 (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2} U_1 \quad (16)$$

式 (16) で与えられる付加流速に相当する付加流量を下流端での境界条件の下層流量に上乗せする。

4-2 分流終点での下層流量の配分

分流始点で $\partial B / \partial x$ を考慮して分流終点まで界面位置を計算し、この下層水深を境界条件として I, II の水路を独立した水路として考え、上流に向かって計算を行う。下層塩水の配分は I, II の水路での分流終点から先端までの連行量のそれぞれの総和に、付加流量を水路幅比で配分し上乗せすることによって行う。

4-3 下流端での境界条件

淡水流量は上流端セキの流量を用いる。下層での流量は次の手順で決定する。

1) 連行、付加流量を考えないで、下層静止として I, II 水路でのくさび形状を計算する。2) くさび界面から上層への被連行量の総和を経験的な連行係数⁷⁾を用いて計算する。3) この量に付加流量 $\hat{U}_2 \cdot B_{H_2}$ を加えて下流端での下層流量の条件とする。

4-4 合流部での取り扱い

連行、付加流量を加えて下流端より順次上流に向かって計算し、分流終点から I, II の水路を独立に計算する。合流終点まで界面位置を計算すると、I, II のそれぞれの界面標高を比較し、II の方が高い場合には II の水路を下流から移送されて来た付加流量の K 倍を I の水路の下層に加え、さらに上流に向かって計算する。K は合流部での混合による低減を示す係数で、ここでは 0.5 とした。

このようにして計算した結果の一例を示したのが図-9である。図中実線が今回の方法による計算結果を示し、白丸が実験で得られた界面位置である。又鎖線は $\partial B / \partial x$ のみ考慮した計算結果である。

実験結果との比較は良好である。

5. まとめ

- 1) 分流部ではくさび遡上時に滞留効果と共に一時加速作用を有している。
- 2) 合流部でのフロントの合体、合流の様子を明らかにした。
- 3) 分流部では界面形状が階段状となり、付加圧力勾配の発生により、下層塩水の遡上への供給を活発化させる。
- 4) バイパス型の分・合流水路は遡上距離を増大させ、その効果はフロント位置と分・合流部の相対的な位置関係によって異なる。
- 5) 付加流量を考慮した定常計算では良好な結果が得られた。

参考文献

- 1) Dong-Ping Wang : Proc. ASCE, Vol. 109, WW1, 1983.
- 2) Thather, M. L. and Harleman, D. R. F. : Technical Report No 144, M. I. T., 1972.
- 3) 玉井信行・菅和利 : 第 26 回水理講演会論文集, 1982.
- 4) 菅和利・玉井信行 : 第 36 回年次学術講演会概要集, 1981.
- 5) 須賀堯三 : 土木研究所資料, 1537 号, 1979.
- 6) 守谷祥一・福岡捷二・福嶋祐介 : 第 36 回年次学術講演会概要集, 1981.
- 7) 菅和利・玉井信行 : 第 27 回水理講演会論文集, 1983.

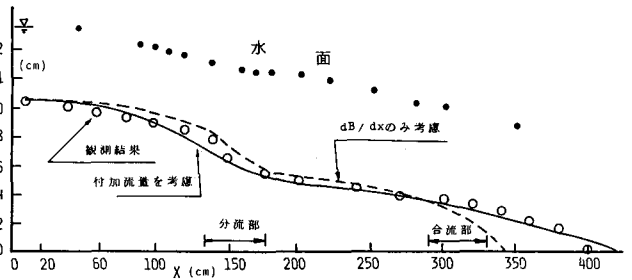


図-9 界面位置の計算結果