

河 口 の 塩 水 楔 に つ い て

電力中央研究所	伊 藤 剛
建設省土木研究所 工学博士	佐 藤 清 一
北海道大学工学部 工学博士	岸 力
建設省土木研究所	富 永 正 照

1. 緒 論

河口では河水と海水とが接触し両者の密度差のために大規模な密度流が形成される。しかもその流況は H. Stommel (1953)¹⁾ によれば、河水と海水との混合の程度によつて図—1 に示す弱混合型 (Negligible mixing), 緩混合型 (Moderate mixing) 強混合型 (Intense mixing) の 3 型式に大別される。図は河口縦断面内の塩分々布を示したもので線の濃淡で塩分の大小をあらわしてある。

図—1 (a) は弱混合型で表層の河水層と底層の海水層とがほとんど混合せず、明瞭な成層をなすものである。両層の間の混合は小さいから、水平方向の密度勾配はほとんど存在しない。この型は潮汐の小さい河口に多くみられるものである。

図—1 (c) は強混合型で河水層と海水層との間に強い混合がある場合であり、深さの方向には密度差はみられない。しかし水平方向には明瞭な密度勾配が存在し、等塩分線はほぼ垂直線である。

図—1 (b) は緩混合型で混合が中程度の場合であり、水深方向にも水平方向にも密度勾配が存在する。

潮汐の大きな河口部では、漲潮、落潮の往復運動と漲潮時の逆流により底面から発生する乱れが、底層と表層とを混合させることとのため、(a) 型がみられることは少なく、(b) 型または (c) 型の流況を示すのが普通である。もちろん (b) 型の中でも混合の程度によつては、比較的 (a) 型に近いものから (c) 型に近いものまで種々の段階が存在する。一般に密度流の機構は非常に複雑であるが、比較的簡単な場合について理論的な研究が行なわれた。

潮汐が小さく海水の侵入状況が弱混合型で表層の河水がある流速をもつて 流下するときは、両層の境界面にせん断力が働らきそれが密度勾配と平衡を保つて海水はクサビ状をなして河水の中に侵入することになる。このような場合について、H.G. Farmer および G.W. Morgan (1952)²⁾ は境界面に沿うせん断力がクサビの上では至るところ一定であるとの仮定のもとに、クサビの形状を与える式を求めた。また J.B. Schijf および J.C. Schönfeld (1953)³⁾ は境界面における摩擦抵抗が Chezy の型式であらわされるものとして、クサビの長さを与える式を示した。

以上の理論的取扱いは川幅が一定の場合であるが、川幅の変化した場合については Stommel (1951)⁴⁾、Stommel および Farmer (1952)⁵⁾ 等の研究がある。

潮汐の大きな河口では緩混合型または強混合型の塩分々布が形成されるが、この場合については B.H. Ketchum (1951)⁶⁾、A.B. Arons および H. Stommel (1951)⁷⁾ 等の研究があるが、これらの理論はいずれも月または年を単位とするような比較的長期間の平均値に対するものである。したがって満潮時にある地点の塩分濃度がいかなる値をもつかという實際上重要な問題に対しては適用することができない。

以上密度流の機構に関する既往のおもな理論にふれてきたが、緩混合型を示す海水の侵入については一般的な解法が得られていない。以下に利根川および宮崎県五ヶ瀬川の観測結果にもとづいて、緩混合型の海水侵入について考察し、海水侵入の距離 (以下限界点と名付ける) を見つめる方法を示す。

2. 緩混合型の海水の侵入

2.1 緩混合型塩分々布の実例

図—1 海水侵入の型

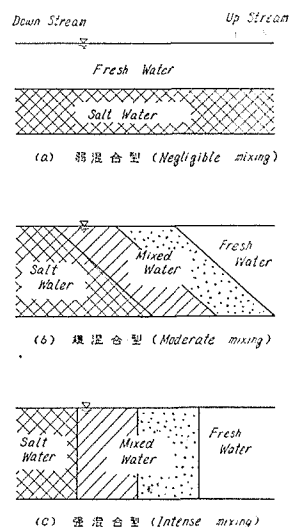


図-2 (a)

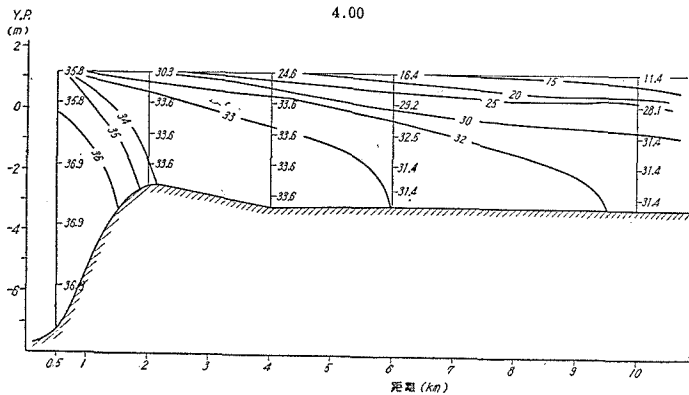


図-2 (b)

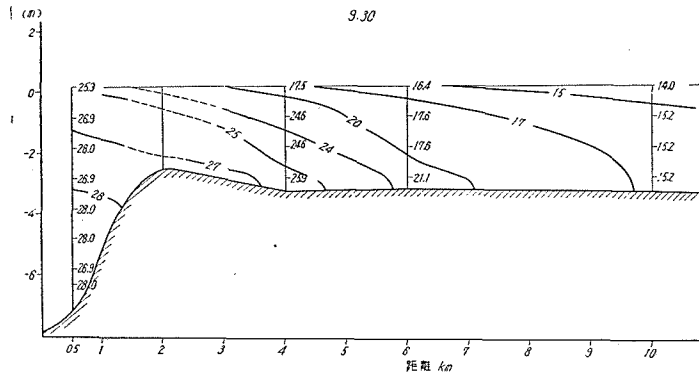
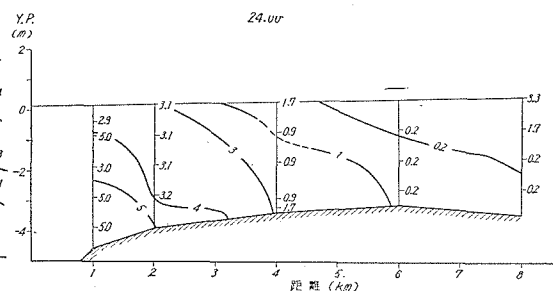
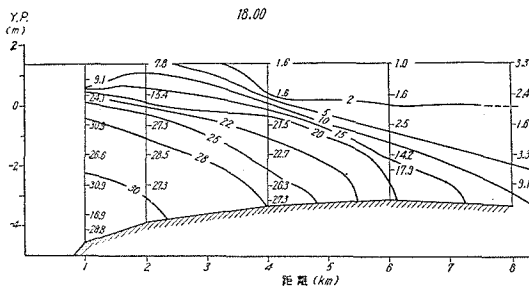


図-3 (a)



すもので、潮差は 1.25 m で前例 8 月の場合とあまり変わりはないが、河川流量は $183.3 \text{ m}^3/\text{sec}$ (取手) で前例の約 3 倍平水量に近い値であつた。図-3 (a) および (b) はそれぞれ満潮および干潮の時刻における塩分々布を示したものである。河川流量が多いので塩水の侵入は少なく図-3 (a) の満潮時でも 30% 以上の塩分は河口よりわずか 2 km の区間、それも底層付近のみにみられるにすぎない。また図-3 (b) によれば干潮時には河道内の塩分はほとんど完全に排出されたとみられる。この例においても塩分々布はやはり典型的な緩混合である。

図-4 および 5 は昭和 29 年 4 月および 11 月に観測した五ヶ瀬川における塩分々布を示すものである。図-4 は 4 月 4 日の観測結果で、潮差は 1.95 m、河口流量は $15 \text{ m}^3/\text{sec}$ であつた。図-5 は 11 月 11 日の観測結果で河川流量は $27 \text{ m}^3/\text{sec}$ であつた。図中の塩分々布は塩素量 (ppm) で示してあるが、塩素量 Cl と塩分 s との間には次の関係がある⁹⁾。

$$s = 0.030 + 1.8050 \text{ Cl}$$

すなわち $\text{Cl} = 19000 \text{ ppm}$ は $s = 34.33\%$ に相当する。

五ヶ瀬川においても塩水の侵入状況は緩混合型であるが、利根川の例とくらべて等塩分線の勾配が急でやや強

わが国の太平洋岸に注ぐ河川では、河口でかなり大きな潮汐を受けから、海水の侵入は多く緩混合型である。図-2 は昭和 29 年 8 月 13 日~14 日利根川で行なつた観測結果を示すものである。利根川下流部の平時流量は昭和 16~25 年の間の布川観測所の資料⁹⁾によれば表-1 のごとくなっている。

これに対し観測時の河川流量は $60 \text{ m}^3/\text{sec}$ (取手) であつて潟水量に近い値であり、潮差は 1.10 m であつた。図-2(a)(b) はそれぞれ満潮および干潮の時刻における塩分々布を示したものである。図-2 (a) をみると満潮の時刻には塩分濃度 30% をこえる塩水が河口より 10 数 km も侵入し、かつ、等塩分線はクサビ型である。

表-1 利根川下流部(布川)の平時流量

種別	豊水	平水	低水	潟水
流量 (m^3/s)	323.4	175.4	100.5	46.5

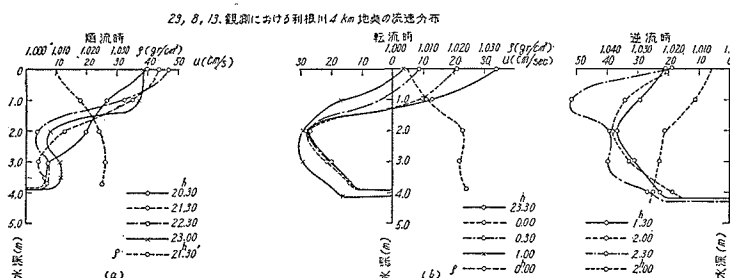
図-3 は昭和 29 年 10 月 15 日同じく利根川で行なつた観測結果を示す図-3 (b)

混合型に近い性質を示している。例えば図-4(b)は4月観測のほぼ満潮時であるが、このときの5000 ppmの線の勾配は 11×10^{-4} であるのに対し、図-3(a)の利根川の例では5000 ppmに相当する塩分9‰の線の勾配は 6.2×10^{-4} で前者のほぼ1/2である。図-5の例では5000 ppmの線の勾配は 29×10^{-4} にもなっている。

2.2 緩混合型における流速分布

前述の利根川における観測で得た流速分布を図-6に示す。この図によると流速分布は水平密度勾配の存在のため順流時、転流時および逆流時においてそれぞれ特徴ある形を示すのがみられる。

図-6



順流時には水平密度勾配は水面勾配と逆符号で流れを減速する方向に作用する。従つて流速は密度流性の強い下層と傾斜流性の強い表層とで明瞭な差ができ図-6(a)の形となる。

逆流時には水平密度勾配は水面勾配と同符号で流れを加速する方向に作用する。しかも密度勾配は上層にくらべて下層が大

きいから流速分布は図-6(c)のごとく最大流速は水面下ある深さのところにあられ、円管内の流速分布に似た形となる。

順流から逆流に変わる時刻には水面勾配はほとんどないから、下層では密度勾配が水面勾配より大となり、表層は順流、下層は逆流といういわゆる交換流(Exchange flow)¹⁰⁾の状態があらわれる。

利根川では昭和29年～31年にかけ数回の流速観測が行なわれたが、その結果から交換流の持続時間と河川流量、潮汐振幅との関係をしらべると表-2のごとくなる。

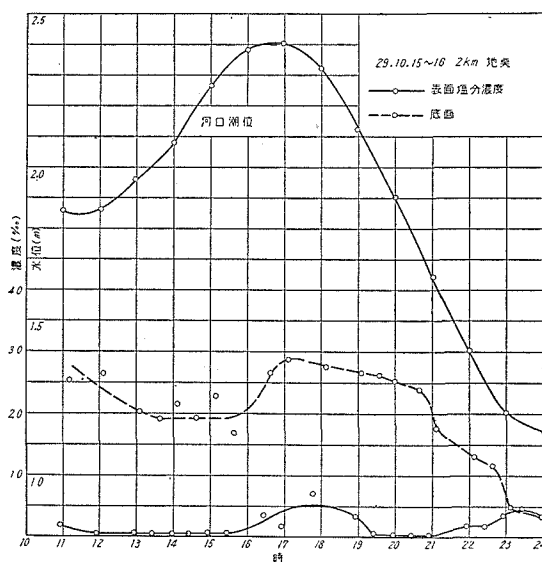
表-2によれば昭和31年8月22日の観測のごとく極端に渇水の場合には交換流の持続時間がやや短くなっているが、それ以外の例では持続時間は河川流量や潮汐振幅にはあまり関係がないようである。また持続時間は河口から上流に行くにつれ長くなる傾向がみられる。利根川の河口付近では水面勾配が緩であるから、相当な出

表-2 交換流の持続時間

年月日	河川流量 $Q(\text{m}^3/\text{sec})$	潮汐振幅 $R(\text{m})$	観測地点(河口よりの距離)				
				0 km	1 km	2 km	4 km
29. 7. 28	121.6	1.0	60分				
29. 8. 13	60.0	0.45			60	75	80
29.10.15	183.3	0.55	40	55	70		
31. 8. 22	15.0	1.0	30				

水でないかぎり潮汐によつて逆流が生ずる。したがつて転流時に底層に水平密度勾配があれば交換流が生じうるはずで、その持続時間は水面勾配と密度勾配の相互関係によつてきまる。昭和31年の場合に持続時間が短かいのは、流量が少ないので河口付近では密度勾配が表層と底層とで差が少なくなつたためとみられる。これに対し、持続時間が上流ほど大きくなる傾向は表層と底層との密度勾配の差が上流ほど大きいということと説明される。例えば図-7は昭和29年10月15日の観測における河口より2 km, 4 km, および6 kmの

図-7(a)



3地点における表面塩分と底層塩分との時間的変化を示したものである。表面では各時刻とも3地点間にはほとんど塩分差はなく、したがつて水平密度勾配もほぼ0に近い。底面では2 kmと4 kmの2地点間では塩分差は少ないが、4 kmと6 kmの2地点間ではかなりの塩分差がみられ、底層に水平密度勾配が集中しているのがわかる。

つぎに五ヶ瀬川の流速分布を調べる。前述のように五ヶ瀬川での塩分分布は利根川におけるよりも強混合型に近いが、その性質が流速分布にいかにあらわれるであろうか。図-8は昭和29年に観測した五ヶ瀬川筋における

図-7 (b)

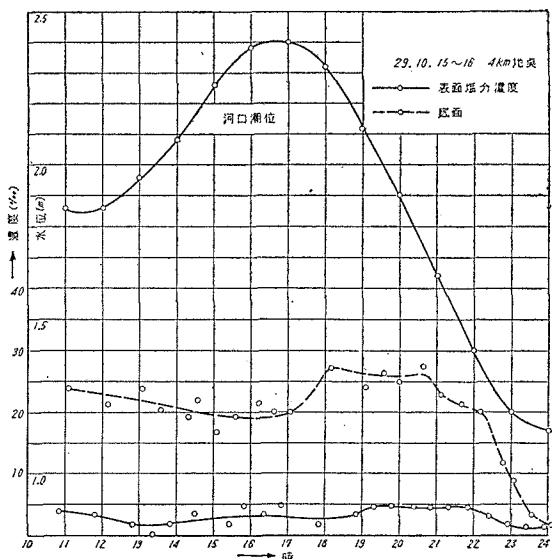


図-7 (c)

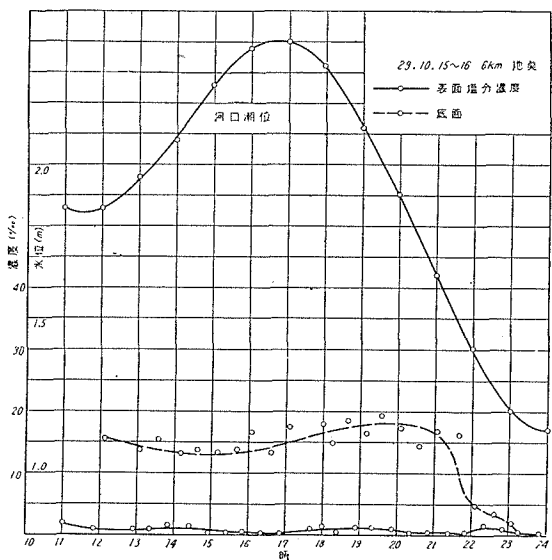


図-8 (a)

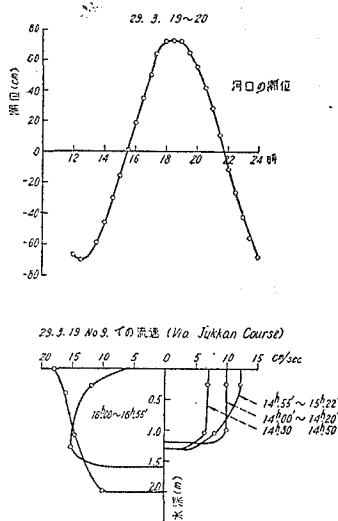
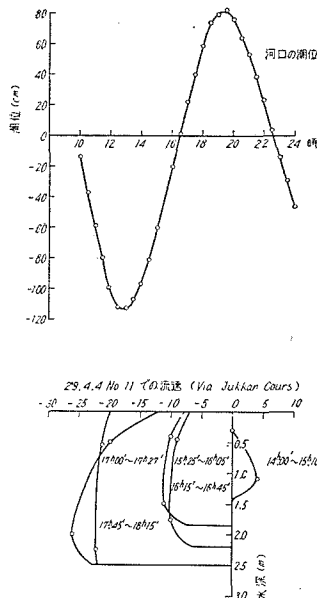


図-8 (b)



流速分布である。図-8と図-6とを比較してまず気がつくのは五ヶ瀬川では交換流があらわれないことである。また順流時、逆流時においても利根川の例のような流速分布の特徴はあまり明かではない。これは五ヶ瀬川の塩分分布が強混合型に近く、表層と底層で水平密度勾配の差が小さいためである。図-9は昭和29年4月観測におけるE点(図-4参照)とそれより上流500mのC点における表面塩分および底面塩分の時間的変化を示したものであるが、水平密度勾配は表面から底面までほぼ一様に近い。

表-2によれば利根川では河川流量、潮汐振幅の大小にかかわらずある程度交換流が持続するのに対して、五ヶ瀬川では交換流があらわれない。これは上述のとおり水平密度勾配が表層と底層で異なるか、あるいは一様に近い値をもつかによつて決まるのであるが、結局表層と底層との乱流混合の大小に帰着されるわけである。乱流混合の大小は具体的には河川の粗度係数として表現されるから、交換流の持続時間は粗度係数と結びつけられる可能性がある。

図-9

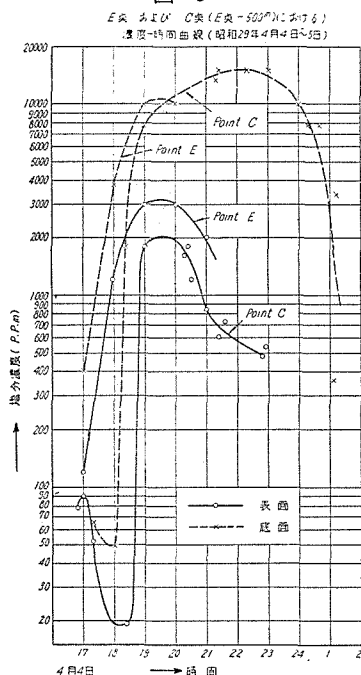


図-10

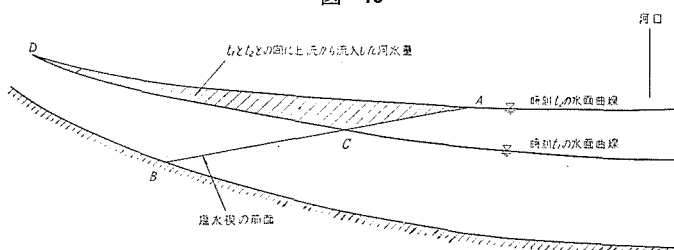
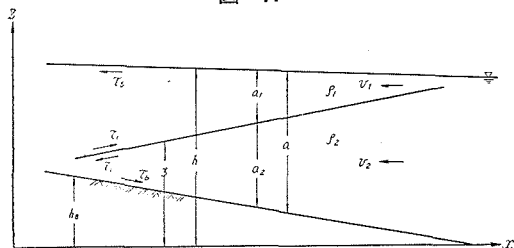


図-11



ここに

$$i_1 = \frac{\tau_i - \tau_s}{\rho_1 g a_1}, \quad i_2 = \frac{\tau_b - \tau_i}{\rho_2 g a_2}$$

$$\tau_s: \text{表面のせん断力}, \tau_i: \text{境界面のせん断力}, \tau_b: \text{底面のせん断力}, i_b: \text{底勾配} = -\frac{dh_B}{dx}$$

$$\varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \quad \rho: \text{密度}$$

(1) および (2) において、

$$\tau_s = 0$$

(3)

3. 緩混合型における海水侵入の限界点

3.1 概要

前述のごとく海水の侵入型式が緩混合型の場合には、その機構を説明する一般的解法は与えられていない。すなわち密度流の影響をふくめた基本方程式から流速分布、塩分分布等を求めることははなはだ困難である。しかし海水の河川への侵入を扱う場合には、工学的には海水侵入の限界点を問題とすることが多い。ここではこのような実用的見地から海水侵入の限界点を決める方法を示す。

3.2 原理および手順

緩混合型の場合は、塩分の等濃度曲線がクサビ状を呈しており、淡水から海水まで濃度は徐々に変化している。しかしこれらの等濃度曲線の一つに注目してその位置を決めることができれば、実用的な目的には十分であると考えられる。そこである等濃度曲線を塩水クサビの前面とし、その線より上流側を淡水、下流側を海水とみなすことができるものとし、この位置を求めることを考える。

転流時に交換流が起こらず従って河水がこのクサビによつてせきとめられた状態にある場合は、次のように漲潮時のある時刻の塩水クサビの位置を決めることができる。

図-10 においてある時刻 t_1 の水面曲線とある時刻 t_2 の水面曲線との間のボリュームは、その間に侵入した海水量と上流から流入した河

水量とによつて満たされるはずである。

上述の条件によつて河水と海水はほとんど混合することなく、しかも河水は全て海水の上流側に貯溜されるのであるから、図に示すように両水面曲線で囲まれたボリュームを塩水クサビの勾配に等しい勾配を持つ線で二分し、各ボリュームを侵入海水量と流入河水量に等しくすれば、その線は塩水クサビの前面を示すことになる。

したがって塩水クサビの前面勾配が求められれば問題は解決したことになる。クサビの前面勾配は次のようにして近似的に計算することができる。

図-11に示す記号を用いるとき上下二層の流体の運動の式は次のとおりである。

$$\frac{\partial v_1}{\partial t} + g \frac{\partial a_1}{\partial x} + g \frac{\partial a_2}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + g(i_1 - i_b) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_2}{\partial t} + (1 - \varepsilon)g \frac{\partial a_1}{\partial x} + g \frac{\partial a_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} + g(i_2 - i_b) = 0 \quad (2)$$

$$\tau_i = \frac{\rho g(v_1 - v_2)|v_1 - v_2|}{c_i^2} = 0 \quad (4)$$

$$\tau_b = \frac{\rho g V_2 |V_2|}{c_b^2} \quad \rho = \frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2) \quad (5)$$

は一般的に成立つと考えられる。

(1) において境界面の摩擦勾配 $i_1 \doteq 0$ とすれば

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_1}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} &= 0 \\ \therefore \frac{\partial h}{\partial x} &= -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

(2) を書きなおして (6) に代入し、さらに $v_1 \doteq v_2$ と仮定すれば

$$\frac{1}{g} \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \left(\frac{\partial v_2}{\partial t} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} \right) + \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\rho}{\rho_2} \frac{v_2 |v_2|}{a_2 c_b^2} = 0 \quad (7)$$

$1/g \left(\frac{\partial v_2}{\partial t} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} \right)$ は水面勾配と同じ条件であるから、緩混合型では一般に $\partial \zeta / \partial x$ に比して小さいと考えられる。したがって第1項を第2, 第3項に比し無視すれば

$$\left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\rho}{\rho_2} \frac{v_2 |v_2|}{a_2 c_b^2} = 0 \quad (8)$$

が得られる。

上式において底面の抵抗係数 c_b を現地観測によつて定めるときは、その他の諸量は計算できるものであるから塩水クサビの勾配 ($\partial \zeta / \partial x$) を求めることができる。 a_2 は近似的にクサビの存在する区域の平均水深の 1/2 程度の値をとれば十分である。

以上塩水クサビの位置を決める方法をのべてきたが要約すると次のとおりである。

- (1) 漲潮時のある時刻 (t_1) の水面曲線と塩水クサビの位置を求めようとする時刻 (t_2) の水面曲線とを計算または実測等から求める。
- (2) 時刻 t_1 から t_2 までの間に両水面曲線間に流入する河水量を算定する。
- (3) (8) 式から塩水クサビの勾配を計算する。
- (4) 二つの水面曲線と塩水クサビの前面 ((3) 項で求めた勾配を有する) とで囲まれた領域のボリュームが (2) 項で求めた河水量と一致するようにクサビの位置をきめる。

3.3 実例による検討

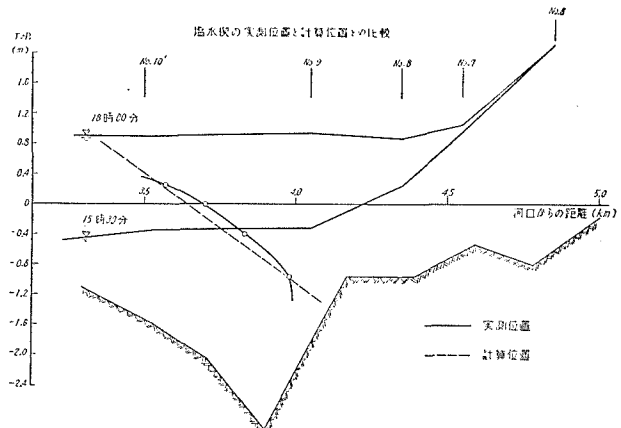
五ヶ瀬川では昭和 29 年に海水の河川への侵入状況を把握するために、水位、流速、塩分等に関する広範な調査が行なわれた。先にのべた塩分分布、流速分布等もこの調査によるものである。

五ヶ瀬川では交換流がほとんど起こらないから、近似的に海水は河水をせきとめた状態で河川中に侵入するとみなしてよい。また塩分侵入の型も図-4 にみられるように各等濃度曲線が比較的平行であること、1000 ppm を境としてその上下で $\partial \rho / \partial x$ にかなりの差があること等からみて、1000 ppm の曲線の上部を淡水、下部を平均濃度 5000~6000 ppm 程度の海水と考え、1000 ppm の曲線を前面とする塩水クサビとみなしてもさしつかえないと思われる。

図-12

図-12 は昭和 29 年 4 月 4 日の観測資料から上述の方法によつて 18 時の塩水クサビの位置を計算し¹¹⁾、実測値と比較したものである。計算においては 1000 ppm の等濃度曲線を河水と海水との境界としたので、実測値も図-4(a) の 1000 ppm の等濃度曲線をとっている。図-12 によると実測値と計算値とはかなりよく一致し、この方法が実用上、十分満足すべきものであることが検証された。

ここに注意すべきことは、上述の方法によつて塩水クサビの位置を求めても、その上流側になお若干の混合層が存在することであ



る。それゆえ塩分侵入の限界点を知るためには、この混合層の厚さを観測によつて見積ることが必要である。

4. 結 論

海水の河川への侵入状況を、強混合型、緩混合型および弱混合型に分類し、主として緩混合型について考察し塩分侵入の限界点を見積る方法を示した。この方法は海水の侵入状況が次のような場合に適用される。

- (1) 海水がクサビ状に侵入すること。
- (2) 交換流が生ぜず海水が河水をせきとめた状態になること。

五ヶ瀬川では調査の結果上の二条件が 大体満足されていることが認められた。そこで上述の方法によつて塩水クサビの位置を計算し、観測値と比較したところ大体満足すべき結果を得た。

一般にある河川において改修計画、その他の事情によつて河川の状態が変化することを考えて 海水侵入の限界点を見積ることは、はなはだ困難で見るべき解法がなかつた。このような場合には次のようにして海水侵入の限界点を見出すことができる。

- (1) 河口の潮位曲線と固有流量とを与える。
- (2) 密度差を無視し、特性曲線法によつて水利計算を行なう。この場合必要な資料は現況の調査から決める。
- (3) 干潮時の同時水位曲線をかく。
- (4) 満潮時と感潮区域の上流端が転流する時刻との間のある時刻を選ぶ。この時刻の同時水位曲線をかく。
- (5) 上の二曲線間に貯溜される河水量を計算する。

固有流量 $\times$ (干潮時から選定した時刻までの時間)

(6) (5)の貯溜河水量によつて塩水クサビの大体の位置を決める。この位置の転流時刻が先に選定した時刻と一致しなかつた場合には、両者が一致するまで上述の手順をくり返す。

(7) (6)において両時刻が一致した場合には、さらに塩水クサビの勾配を計算する。この場合流速は(6)において決めた位置の平均流速を使用する。粗度係数は現在の調査結果を十分に参照して決める。

(8) (5)で求めた貯溜河水量と(7)で計算した勾配からクサビの位置を正確に決める。

(9) 現況の調査資料から混合層の厚さを推定し、以上の計算に加味して海水侵入の限界点を定める。

上述の手順はもちろん本文にのべた 解法を主体としているが、これに加えて一般に河川中のある場所の塩分濃度は、その場所が逆流している間は増すが転流すると減ずるという考え方を導入している。上述の手順中(4)、(5)、(6)はこの考え方にもとづいている。

参 考 文 献

- 1) Stommel, H.: The role of density current in estuaries, *Proceedings Minnesota Int. Hyd. Convention*, Sep. 1953
- 2) Farmer H.G. and G.W. Morgan: The salt wedge, *Proceedings, Third Conference on Coastal Engineering*, 1952
- 3) Schijf, J.B. and J.C. Schönfeld: Theoretical considerations on the motion of salt and fresh water, *Minnesota Int. Hyd. Convention*, Sep. 1953
- 4) Stommel, H.: Recent developments in the study of tidal estuaries. *Tech. Rep. Woods Hole Oceano. Inst. Ref.* No. 51~53, 1951
- 5) Stommel, H. and H.G. Farmer: Abrupt change in width in two-layer open channel flow, *Journal of Marine Research*, Vol. XI, No. 2, 1952
- 6) Ketchum, B.H.: The exchange of fresh and salt waters in tidal estuaries, *Journal of Marine Research*, Vol. X, No. 1, 1951
- 7) Arous, A.B. and H. Stommel: A mixing length theory of tidal flushing, *Trans. A.G.U.*, Vol. 32, No. 3, 1951
- 8) 建設省関東地方建設局: 利根川の解析 (上) 1955
- 9) 須田院次: 海洋科学 p. 179
- 10) 3) に同じ
- 11) 伊藤 剛, 佐藤清一, 岸 力, 富永正照: 河口の塩水楔について, 建設省土木研究所報告 No. 101 (未刊)