

九州大学工学部 正員 植 東一郎

” ” ○ 浜 村 実

” 大学院 学生員 橋本美喜男

まえがき 塩水楔の抵抗係数については底面の摩擦抵抗を重視する Keulegan の研究や内部波の造波抵抗が卓越するとした種々の理論など多くの研究があるが、我々は塩水楔についての室内実験によって抵抗の性質を明確にすることを試みるとともに内部波高や濃度変動の spectrum について実験した。また昨年夏 松本川及び大野川に於て躍層を中心とする塩分分布、流速分布の測定を行ひ、これらの結果から塩水楔型河川における塩分侵入の性状及び境界面における抵抗係数について若干の考察を行はつた。

1 境界面の抵抗係数

図-1 のように幅 B の水路に深さ H の塩水が侵入しているときの流れの基礎式は慣用式で記すと

$$\text{上層 } \frac{\rho}{2g} \frac{dU^2}{dx} = - \frac{dH}{dx} - 2 \frac{C_w}{sgB} - \frac{C_i}{sgk_1} \quad (1)$$

$$\text{下層 } \frac{\rho}{A_2} \frac{d(Uh_2)}{dx} = - \frac{dH}{dx} + \epsilon \frac{dh_1}{dx} + \frac{C_i}{sgk_2} + \frac{C_b}{sgk_2} \quad (2)$$

である。ここに C_i , C_b , C_w はそれぞれ境界面、底面、及び側壁の摩擦抵抗、 ϵ は境界面上に於ける流速、 $-\frac{dH}{dx}$ は水面勾配、 $\epsilon = \frac{2g}{\lambda}$ である。

塩水楔の形状から及ぶ C_b を求めると Keulegan が試みていくように C_w を適当に推定し (1) 式より U_1 、(2) 式より U_2 を逆算すれば U_1 の水面勾配 $-\frac{dH}{dx}$ が求められ

めて小さい ($10^4 \sim 10^5$) ため精度のより算定は望めない。従って以下では及ぶ C_b を $C_b = f_1 U_1^2$, $C_b = f_2 U_2^2$ で定義し (1), (2) 式より $\frac{dH}{dx}$ を消去して次式

$$(1 + \frac{f_2}{k_1}) \frac{C_b / \rho}{U_1^2} + \frac{C_b / \rho}{U_2^2} = F' = - \frac{sgk_2}{U_1^2} \left[(1 - \delta F_1^2) \frac{dH}{dx} - \frac{\beta}{\lambda} \frac{d}{dx} \left(\frac{U_1^2 h_2}{\rho} \right) \lambda' \frac{U^2}{sgB} \right] \quad (3)$$

を基礎式として用いる。2 層流に於ける流速分布、塩分分布の一例を図-1 に示すが、 U_1 を境界面流速として厚さ h_1 の塩水楔層及び下層塩水層の流速分布を簡単な境界条件を満足する次式で近似する。ここで $\lambda = U_1 / C$, $\eta_1 = h_1 / \lambda$, $\eta_2 = h_2 / \lambda$ である。この流速分布より層流を仮定して U_1 , U_2 を求めると $C_b / \rho = 4(\frac{\rho}{U_1 k_1}) U_1^2$, $C_b / \rho = 2(\frac{\rho}{U_2 k_2}) U_2^2$ となり

$$F' = (1 + \frac{f_2}{k_1}) \frac{C_b / \rho}{U_1^2} + \frac{C_b / \rho}{U_2^2} = (6 + 4 \frac{f_2}{k_1}) \left(\frac{U_1^2 h_2}{\rho} \right)^{-1} \quad (4)$$

となる。粘度補正係数 β は実用上 1.0 とみなし $\beta = \frac{1.0 \cdot \lambda^2}{U_1^2} = 0.133$ となる。なお Keulegan は底面に於ける乱流摩擦抵抗が大きめの役割りを持っているが逆流最大流速点以下の流れを平行板間の流れに類推して乱流遷移する限界 Reynolds 数 $\frac{2}{3} \frac{U_{max}}{h_1} \cdot \frac{1}{3} h_1 = 580$ とするとこの値に對応する限界

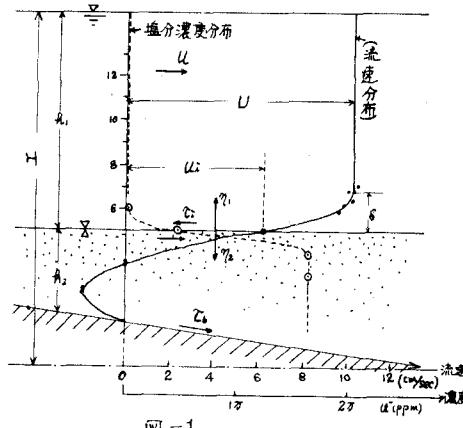


図-1

$\frac{U_{10}}{D}$ の値は 7.85×10^3 とする。成久の実験及 Keulgan の多くの実験では $\frac{U_{10}}{D} = 2 \times 10^3 \sim 7 \times 10^3$ の範囲であり底面抵抗は乱流によるものとは思われる。

邊水模の実験結果及び側壁の抵抗係数 F' 及 Reynolds 数 $\frac{U_B}{D}$ との実験曲線を用いて (3) 式の F' を計算し、さらに境界面のみの抵抗を取出すために (3) 式に於ける $\frac{U_{10}}{D}$ として理論値を代入して境界抵抗 $\frac{\tau_{w0}}{U_1^2}$ を

逆算し層流としての境界摩擦抵抗 $\frac{\tau_{w0}}{U_1^2} = 4 \left(\frac{U_{10}}{D} \right)^{-1}$ との比を Keulgan が示した境界面の不安定パラメータ $\Psi = \left(\frac{U_{10}}{D} \cdot \frac{U^2}{Eg D} \right)$ で示したもののが図-2 である。

Keulgan によると内部波の碎波による下層塩分までの再拾起

の出は 370 度である。図-2 はほゞこの値以下では底面に平行な純粹な摩擦抵抗のみが作用しているが出が生じると Ψ が増大し、内部波の発生、発達及び碎波が境界抵抗の増大に対して大きな役割を持つことを示している。内部波による抵抗増加と $\frac{\tau_{w0}}{U_1^2} = f_{iw} U^2$ とおくと

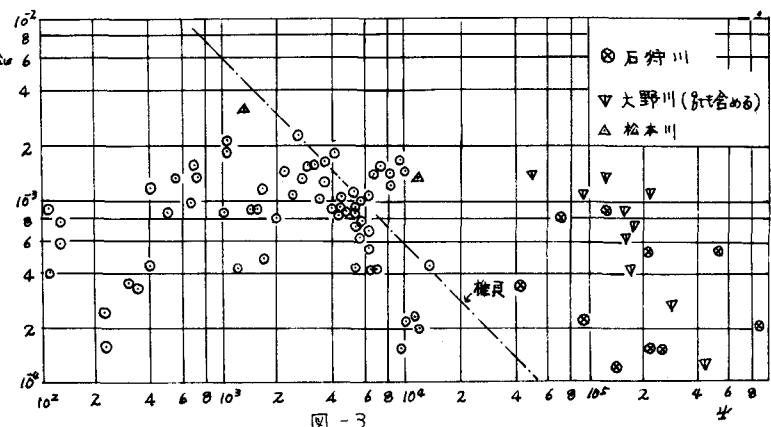
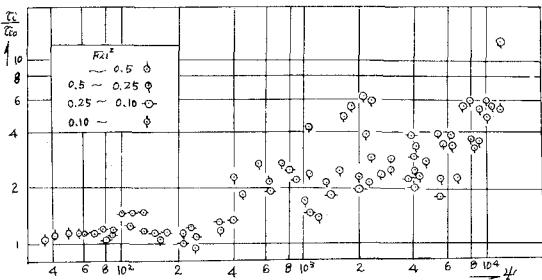
$$f_{iw} = \frac{1}{1 + \frac{\Psi}{\Psi_0}} \left(\frac{U_1}{D} \right)^2 \left[F' - \left(6 + 4 \frac{\Psi_0}{\Psi} \right) \left(\frac{U_{10}}{D} \right)^{-1} \right]$$

となり f_{iw} を坐につけたものが図-3 である。この図には大野川によって測定された石狩川のデータから計算した抵抗係数及び松本川、大野川にかける測定結果(後述)も示してある。矢の長さは著しく f_{iw} は $\Psi = 400 \sim 10^6$ の範囲で平均的には 1.2×10^3 程度の値から 3×10^6 程度までやかに減少する傾向がみられる。

2. 内部波及び塩分変動のスペクトラム

図-4 は図-1 の実験例について内部波高及び濃度変動の周波数スペクトルを示したものの一例である。内部波高は周期は約 15 秒、振幅 0.5 cm の長波性の波の上に短かい周期の波が重畠したものであるが抵抗増加及び塩分のすき上げに寄与するものは碎波状態にある短周期の波と考えられる。従って内部波高の変動から適当な移動平均を行ひ長周期の波に際して相関係数及びスペクトラムを計算した。明らかに $f = 0.8 \text{ cycle/sec}$ に卓越した周波数が存在していること、及びより高周波領域では周波数の-3乗に比例してスペクトルは減少している。この平衡領域における spectrum の形は境界面の不安定要素を n_{pe} とすると次元的に次の形

図-2



$$P_f(\omega) = \delta f(u_c) \omega^3$$

をとることが予想される。ここで δ : 定数
 $f(u_c)$: 速度の次元を持つ定数である。塩分変動の測定は境界面より $\pm 0.5\text{cm}$ とに測定した。
 境界面及び -0.5cm 位置の変動は長周期の波の通過にともなう変動と短周期成分とからなる。
 ここで境界面より 0.5cm 上方の位置における塩分変動の spectrum の例のみを図-4 に示した。この位置では僅かなら内部波とほぼ同一の卓越周波数が認められるが、 1cm 上方では内部波との関連性は消失してしまう。また塩分変動のスペクトルは高周波領域で周波数の $-1/2$ 指数に比例し乱流のそれに近い。

3. 塩水楔としての松本川、大野川の塩分侵入河口における

る平均の入射

朝潮を Q_{t0} 、河

川固有流量を

Q_t とすると、

松本川は Q_t/Q_{t0}

≥ 0.5 、大野

川ではほど

$Q_t/Q_{t0} = 0.6 \sim 0.1$

の範囲にある。

朝汐に応する

両河川の鉛直

方向の流速分

布、塩分分布

の時間的変化

を示す1例を

図-5, 6 に示

(た) 松本川

で河床満水處

にてその位置

を変えるが、

塩分分布には

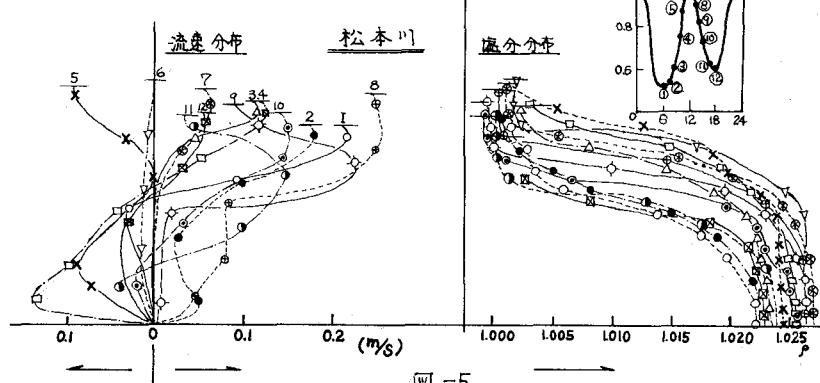
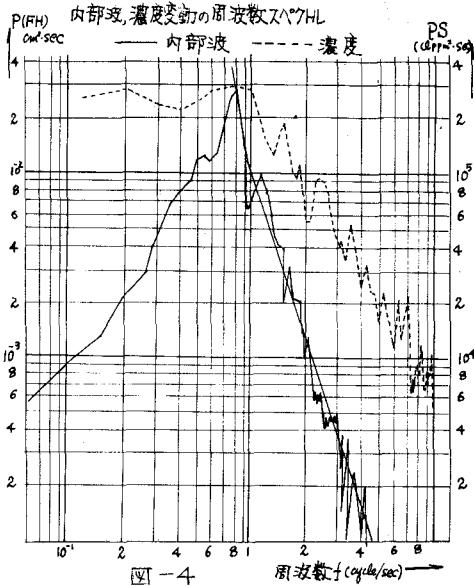


図-5

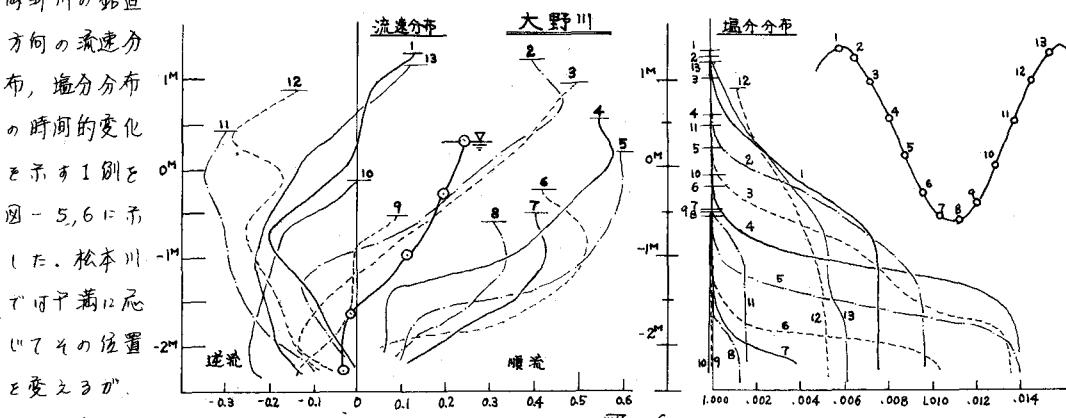


図-6

躍層が躍層が存在し、その位置と厚さが速度勾配の大きさの位置とその厚さに一致している。

一方大野川では上げ潮時の流速は下げ潮時にくらべて一様に近く、幅分の鉛直分布もほゞ一様な底層の上に混合領域が形成され、混合領域に近いが、下げ潮時には層分分布に躍層が存在し、躍層位置と $(du/dy)_{max}$ の位置とがほゞ一致していることと松本川と同様である。また西町川とも一周期の平均をとると上層は順流で躍層中心附近では流速は0となりそれより下層では逆流となり、また下げ潮時には躍層より上方の順流が卓越し、下層の流速はほゞ無視出来る程度である。

以上により、松本川、大野川における下げ潮時ににおける躍層の存在及び流況より塩水楔としての近似的な取扱いが出来よう。

いま河川流量 Q_f と平均退潮量流量 $|Q_{fl}|$ が躍層上部を流れ躍層下層流速は上層流速にくらべてかなり小さくオーダ近似としては静止しているものとすると躍層勾配 $\frac{dy}{dx}$ は

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{-\frac{g^2}{2gR^2B} \left(1 + \frac{h_1}{R}\right) + \frac{g^2}{2gR^2B} \frac{h_1}{R} \frac{dh}{dx}}{1 - \frac{Q^2}{2gR^2B^2}}$$

$$\text{但し } Q = Q_f + |Q_{fl}| \quad (5)$$

が近似的に成立するであろう。躍層勾配として濃度分布曲線に於ける躍層上部及び下部の曲率の最大の差の中央を連ねた線を用い(図-7,8) そして上層及び下層の濃度が一様な部分の密度差を用いておを逆算した結果を図-3に示している。なお横軸の坐も Q_f ではなく $(Q_f + |Q_{fl}|)$ を用いている。また、 Q_f の導入により河口附近で限界条件 $1 = \frac{(Q_f + |Q_{fl}|)^2}{2gR^2B}$ がかなりの程度で満足される。

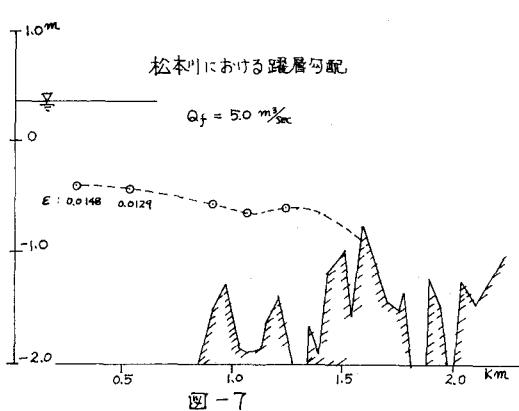


図-7

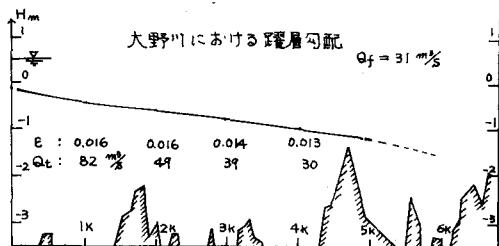


図-8