

九大 工学部 正 賀 裕 申一郎

九大 工学部大学院 学生員 〇 占 本 勝 弘

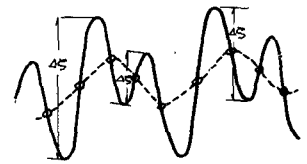
大分臨海工業地帯に於いて使用される工業用水の確保は、大野川を主水源として計画され、造成が進むにつれ、必要用水量も増大してゆく。従って、現取水地帯に於いて塩分の侵入しない安定な表層取水が、どの程度まで可能であるかという問題や、需要量の増加に依して適当な取水地帯の選定、或いは上流地帯の取水により激化されるであろう塩分遡上の状況等を推定するために、大分県工業用水局では、例年、規模の大きい塩分観測を実施している。これらの観測のうち、昭和40年7月～8月にかけて行われた長期に亘る塩分の連続観測資料については、嶋、及び椎貝が解析し、大野川の塩分侵入形態が、上げ、夕時には、強混合型に近く、下げ、夕時には、塩水楔的であるとをいへ、潮上げ、流量にえする塩分の定性的な応答に関して、詳しい報告を行っている。次いで、昨年夏、異常な干天続きによる渇水であった機会に、塩分侵入機構を把握するために、大野川各地帯に於いて、躍層を中心とする塩分鉛直分布の性状について、詳しい調査・観測を行った。資料は、なお整理検討中であるが、中間報告的に、大野川に於ける塩分侵入の性状とその機構について、若干の考察を加えてみた。

1.) 大野川の潮汐と入退潮量

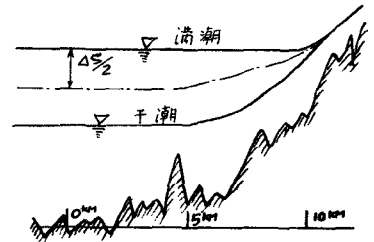
河川に於ける塩分の侵入、遡上は、河道を媒介として、主として、上流よりの河川流量、及び外海の潮汐によって規定される。塩分観測と併行して行われた水位観測、及び、鉛直量水標記録によると、夏期における大野川の潮汐振動は、1日2回潮であるが、月齢に依いて、顕著な日潮不等を示し、各潮平均潮位 $\bar{H}$ は、一日一回の週期で昇降している。

大野川では、干満の潮位差を ΔS とすると、大潮、小潮に於いて $\bar{H}$ 及び ΔS は、右に示す程度である。

	$\bar{H}$ (m)	ΔS (m)
大潮	$\begin{cases} 0.18 \\ 0.44 \end{cases}$	$\begin{cases} 2.0 \sim 2.2 \\ 1.3 \sim 1.5 \end{cases}$
小潮	$\begin{cases} 0.28 \\ 0.25 \end{cases}$	$\begin{cases} 1.0 \\ 0.7 \end{cases}$



次に満干潮時に於ける同時水位を model 的に書くと、右図の様であり、(1) 満潮時の水面形状は、感潮限界地帯(大潮時、10.5 km、小潮時、10 km 程度)まで殆んど水平である。(2) 干潮時水面形は、5 km 地帯まで、殆んど水平で、それより上流で順次勾配を増し、河床勾配に近づく。大野川では、8 km 地帯より上流を除くと、時間的な位相のずれや、潮汐の変形は殆んど認められないので、塩分侵入範囲である 0 km ぐら



or 8 km 近向の入退潮量を推定するために、水位は、平均潮位を中心とし、 $(\Delta S/2) \cos \theta t$ の形で振動するとしても大きな誤差は生じない。従って、連続の式 $(\partial a / \partial x) + (\partial Q / \partial x) = 0$ を差分式に直し、感潮限界地帯より次式、

$$\left. \begin{aligned} Q_i - Q_0 &= -\Delta x_i \left(\frac{\Delta S}{\Delta t} \right)_i \cdot B_i(\xi) \quad \dots \dots \dots \\ Q_i - Q_{i-1} &= -\Delta x_i \left(\frac{\Delta S}{\Delta t} \right)_i \cdot B_i(\xi) \quad \dots \dots \dots \end{aligned} \right\} (1)$$

によって、各地帯の潮流量 $Q_t = |Q_{s \max}| \sin \theta t$ ($Q = Q_t + Q_0$) を計算し、潮流量振幅 $|Q_{s \max}|$ と外海の潮汐 $(\Delta S/2)$ に対してプロットしたものが、図-1 である。

2) 塩分侵入の性状

2.1) 塩分及流速の鉛直分布

図-2は満潮時と干潮時に於いて5km, 6km地点に於いて測定した流速分布と塩分分布の時間的変化を示したものの一例である。又図-3は満潮時と干潮時に於ける塩分分布を各地点について示したものである。これらの図から

(I) 満潮停留時(番号1)に於いて、表層で強い順流であるが中層部より下にかなりの強さの逆流が存在し所謂 exchange flow が形成されている。満潮を過ぎると表層の順流が卓越し底層部の逆流は2時間程度遅れて順流に変化する。(2, 3) 塩分の鉛直分布は中層部より

底層にかけて、Y方向に一樣な濃度 S_0 の層の上に ds/dy の大きい混合領域が形成される。上述の流速分布に対応して満潮時には表面濃度 S_0 は急減し、底面濃度 S_b は2

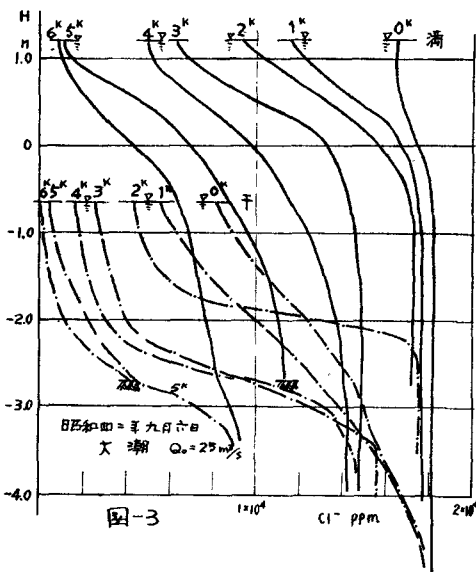
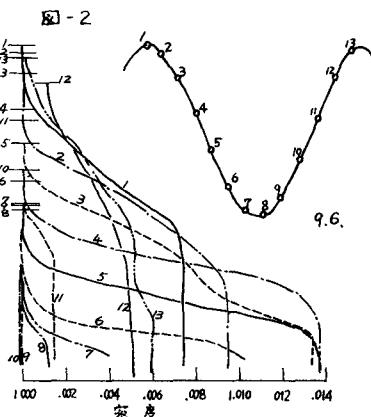
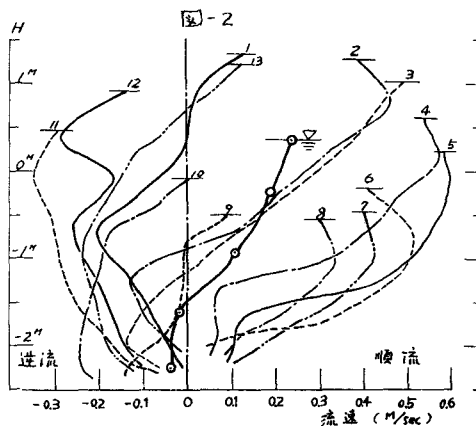
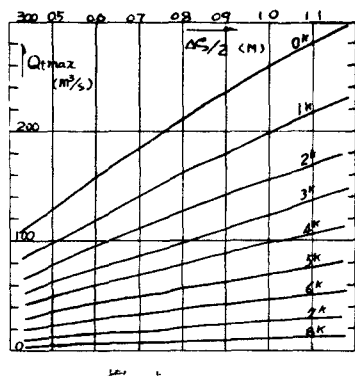
時間程度遅れて最大値に達する。

(II) 引き潮の盛時(4, 5, 6)では、塩分分布には顕著な躍層が存在し濃度は小さく $S_s = \text{const}$ の上層と $S_b = \text{const}$ の下層の間に ds/dy の非常に大きい躍層と三つに分けられる。この時期の塩分分布は底層の順流速度が小さく一般に速い勾配 du/dy が大きい。又躍層の位置と $(du/dy)_{\text{max}}$ の位置とは一致していることが特徴的である。

(III) 干潮停留時より上り潮にかけて(9~13)はまず、底面附近に逆流が現われ、逆流範囲が上方に波及すると共にその速度分布は、下げ潮時に比して一様化されている。この時期の塩分分布は逆流の塩分と淡水との衝突混合のため大きな乱れが起生し、 ds/dy の値は満潮時下げ潮時に較べるとかなり小さい。

(IV) $Y/h = 1$ (水表面) 0.75 0.50 0.25, 0 (底層) に於ける

流速の時間的変化をプロットし各層に於ける一週間の平均流速を求めたものが図-2中の太線(—○—)として記入してある。底面に逆流領域が存在し大野川の流れを平均的に見るとき、水平方向の密度差による循環



濃度が形成されていることがわかる。

(Ⅶ) 水平方向の密度勾配を考慮した場合の運動方程式は 剪断力を τ として、

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g \left[(i - \frac{\partial h}{\partial x}) - \int_y^h \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} dy \right] + \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \rho g \int_y^h I_* dy - \int_y^h \rho \frac{Du}{Dt} dy \\ I_* &= I - I_p \quad - I_p = \int_y^h \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} dy \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

で与えられる。ここに I は水面勾配である。上式を解くことは極めて困難であるが上述した流速分布の特性として、上げ潮下げ潮時共に I_p は正の値を持ち、かつ底層程大きいことから定性的には理解できる。

2.2) 等濃度曲線と潮流による移動

42年8月31日 ($Q_0 \div 20 \text{ t/s}$, 小潮, 干→満)。9月6日 ($Q_0 \div 25 \text{ t/s}$, 大潮, 満→干→満) に於ける Cl^- 濃度の 10^3 , $5 \times 10^3 \text{ ppm}$ の等濃度曲線を一時毎に河床の最深部と共に図-4, 図-5に示した。

さて、濃度の基礎式は次式

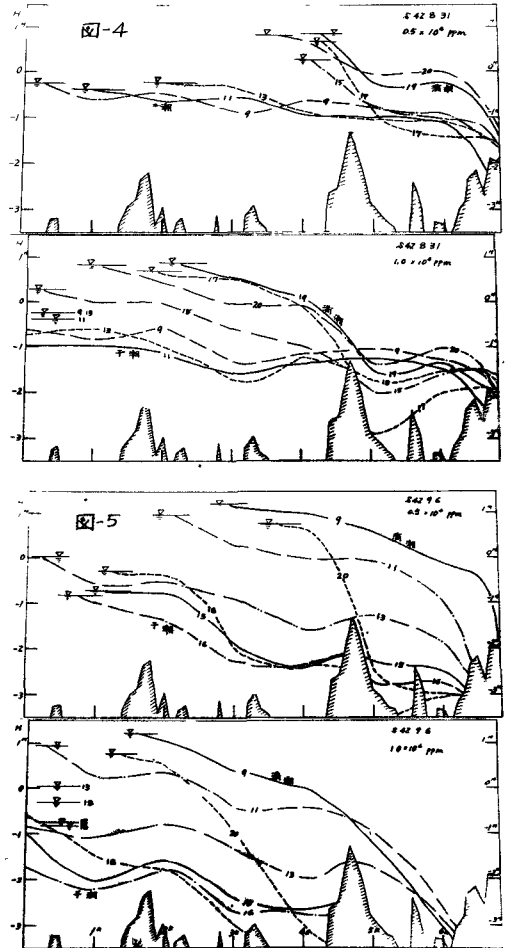
$$(\partial s / \partial t) + \nabla \cdot \mathbf{v} s = D_y (\partial^2 s / \partial y^2) \quad \dots (4)$$

で与えられるが、躍層の中心(大野川では、大略 $85 \times 10^3 \text{ ppm}$ に相当)では $(\partial s / \partial y^2)$ は小さい。従って、一潮流間に於ける 5×10^3 , 10^3 ppm の等濃度曲線の移動はほぼ流速 $\mathbf{v}$ ($u, v = u_h + \int_y^s (\partial u / \partial x) dy \div \partial s / \partial x + \int_y^s (\partial u / \partial x) dy$) で運ばれたと見做しても良い。一般に、① $|u|$ の値は、水表面の $|\partial s / \partial x|$ から深さとともに減少し河床で $v=0$ となること。

② 潮流の量の振幅 $|Q_{\text{max}}|$ が図-1に示す様に上流側に、かなり急速に減少すること、 Q_{max} 下げ潮時には前述した様に上流の順流が大きく、下流で小さいことなどのために下げ潮に伴って等濃度曲線は勾配を減して、塩水楔型を呈することからわかる。又、上げ潮時には①②の要因の他に、外海からの塩分輸送、拡散が加わって勾配を増し、大潮時には強混合に近くなる。

次に等濃度曲線が河床を切り遡上限界点とは

して流量に規定された平衡点の周りを潮汐に依りて、周期的に前進後退を繰り返している。明らかに、低濃度曲線の遡上限界点はその平衡位置が上流にあり、 $|Q_{\text{max}}|/Q_0$ が小さいため、潮汐による動きは、少ない。又、大野川では河床最深部形状、特に4.6 KM 及び6.8 KM 地点の突起が、塩分侵入を抑制する



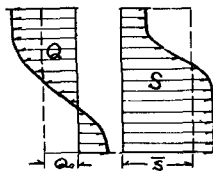
意味で重要な役割を担っている。図4,5で等濃度曲線はこの二つの突起に集中形成傾向あり、特に、4.6 km 点の突起は下流の等濃度曲線がこの突起を越える迄塩水の侵入を遮断し、その後、突起を越えた塩水の斜面に沿って滑り落ちる形で両突起間のプールを充たしてゆく。従って、この区間の塩水動きは、0~4 km の動きとはかなり異なっているであろう。

3) 塩分の横断分布

$$\text{一次元の拡散方程式} \quad \frac{\partial(AS)}{\partial t} + \frac{\partial(QS)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(EA \frac{\partial S}{\partial x} \right) \quad \dots (5)$$

を潮汐の一週期について積分する時 Q, S の平均は下図の様なものが、 $Q_0, \bar{S}$ で置き換えると QS の項には、Cross term が発生する。この項は拡散形式で書き、 $E'_x A \cdot (\partial \bar{S} / \partial x)$

$$\text{とすると} \quad -\frac{Q_0}{A} \bar{S} = (E_x + E'_x) \frac{\partial \bar{S}}{\partial x} \quad (6)$$



となる。一方 40年8月 & 42年8月19月観測の資料から流量毎に満潮時の $\bar{S}$ を縦断的にプロットしたものを図6に示す。

図-6 と (6) 式 とから逆算して $(E_x + E'_x)$ の値を S に対してプロットすると図-7 の様になる。この値は密度差を伴った普通の開水路流れの水平拡散係数 E_{x0}

$= 4.5 h u \sqrt{f}$ の 10 倍に越える値である。その理由は逆流を伴う大きな速度勾配の存在及び安定な密度場における E_x の減少による E_x の増加と、ともに E'_x が大きな値をもつためであろう。以上の要因は主として、工方向の密度勾配により力に基づいたものであるから、

mean flow に関する Energy 方程式

$$\rho \frac{D u^2}{D t} = \rho g I_0 u + u \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad \dots (7)$$

を一週期について平均した右辺第一項

$$\rho J_x = u_0 \rho g I_0 \approx \bar{\rho} g \int_0^h |\partial \phi / \partial x| dy \cdot u_0 \approx \rho g h |\partial \phi / \partial x| u_0 \approx \rho g h S / L$$

と第二項の Energy dissipation $\rho \bar{q} = \overline{u (\partial \tau / \partial y)}$ と $\rho I u^2 / h$ との比に

関係すると考えられる。後者の表示は Harleman のハロマンダーと一致するので、

$$\text{Harleman に従って、} (E_x + E'_x) / E_0 \approx (J / \bar{q})^m \quad \dots (8) \quad \text{と仮定}$$

これを m の値に対して彼は Delaware River について、 $m = 3/4$ を与えている

が、Ippen & Harleman の実験からは $m = 1/2$ 程度であるから、実験結果から適当な値を決めるものとしておく。(6)(8)式より $x=0$ で $S=S_0$ とおくと S の分布は次式で表わされる。

$$1 - (S/S_0)^m = \frac{m}{S_0^m \alpha} \int_0^x \frac{(Q_0/A)^{1-m}}{h^{3/4} G^{1-m} (g/L)^m} dx \quad (9)$$

大野川では 0 km を原点に取り近似的に $A = A_0 e^{-\beta x}$ ($A_0 = 1050 \text{ m}^2, \beta = 2.07 \times 10^{-4}$) で表示され h, L は Const. である。 G については (8) の形に疑問があるので、一定 Const. とし、これらをまとめて係数 K_m とおくと濃度分布は

$$1 - (S/S_0)^m = Q_0^{1-m} \cdot K_m \cdot [e^{\beta(1-m)x} - 1] \quad \dots (10)$$

漸上限界 x_* は $x_* = 2.3 [\beta(1-m)]^{-1} \log_{10} \{ (1 + K_m Q_0^{1-m} \times K_m Q_0^{1-m})^{-1} \} \quad \dots (11)$ で表わされる。

$m = 3/4, K_m = 0.88$ として、計算した結果を図-6 中に実験で示した。 Q_0 と x_* との関係は、かなり妥当の様である。河口附近の拡散係数が過少である、今後検討の余地が多い。

図-6

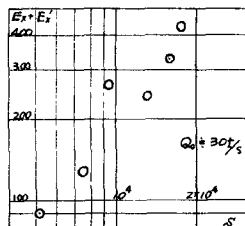
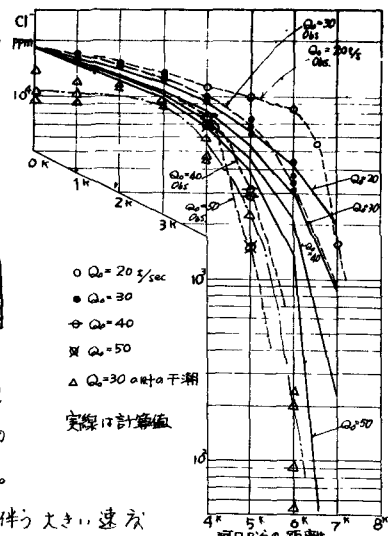


図-7