

緩混合型河川における流速と密度の鉛直分布について

長崎大学工学部 正会員 橋 東一郎 正会員 古木勝弘
長崎大学工学部 学生員 原 雅也 学生員 芦 塚和壽

1. まえがき

緩混合型の河口部において、侵入塩分による顕著な密度勾配が鉛直・流下両方向に存在し、その流況は複雑である。乱れや流速・塩分分布に及ぼす浮力効果を定量的・理論的に評価する研究は少ない。そこで緩混合型河川にある川内川において流速・密度の鉛直分布を観測した。本文は観測結果の概要を記し、さらに流況を擬等流として取り扱った Hansen & Rattray の理論を参照して、緩混合型河川の流況特性を検討したものである。

2. 観測とその結果

川内川の河口から 1.7, 3.2 km の 2 地点のほぼ流心に舟を繫留し、計器を垂下して塩分、流向・流速を 30 分毎に観測した。密度勾配を求めたために塩分は両地点で流速は 3.2 km 地点で計った。流速は、1 回転/パルスを出すフロイラ式流速計を鉛直線上に 4 個配置し、その出力を分間パルスレコーダに記録し、更に所定の距離引き上げて 5 分記録するという方式で密な分布が計られた。流向は流向計を別に垂下して求めた。以上の観測の要目を表-1 に記す。なお、筑後川の大潮時は緩混合型とみられるので、筑後川工事事務所による観測資料の要目も附記した。9月19, 20日に実施した観測結果から、満潮を基準として、満ち干にかけての流速・密度分布を図-1 (a), (b) に、水位 H、平均流速 U_m 、表面流速 U_s 、平均密度 $\langle \rho \rangle$ 、表面密度 ρ_s の時間変化を図-2 に示す。

表-1

河川名・位置・観測日	観測時間 Q_t	水位 H	平均流速 U_m	表面流速 U_s	U_m の範囲
川内川 No. 1 (3.2 km) 60.9.19	44.7	18.20	4.3	2.9	~0
川内川 No. 2 (3.2 km) 60.9.20	60.0	18.16	3.8	3.0	~31
筑後川 No. 3 (3.0 km) 60.11.27	45.0	18.05	4.0	2.7	~26
本川 (0 km) 41.9.23	77.7	18.07	5.5	4.4	~43
筑後川 (0 km) 41.9.23	33.3	18.09	7.0	2.4	~40

時間変化を図-2 に示す。 (a) 密度分布 : 密度 ρ を断面平均 $\langle \rho \rangle$ と乱れからの偏差 $\hat{\rho}$ 及び乱れ ρ' に分けて便宜的に次式で表す。

$$\rho - \langle \rho \rangle = \langle \rho \rangle \{ 1 + \nu (x/h) + \hat{\theta}(y) \}, \quad \langle \hat{\theta} \rangle = 0 \quad \dots (1)$$

密度分布とその特性量は河口からの距離によって変わり、潮汐、淡水流量の関数であるが、川内川の測定では $\eta (=y/h) = 0 \sim 0.5$ で密度分布はほぼ一様で、その上部の密度勾配が潮汐に応じて図のように変形する。また、底層密度、平均密度 $\langle \rho \rangle$ 及び乱れ方向密度勾配 ν に及ぼす潮汐の影響は小さい。

(b) 流速分布 : 図-1 (a) にほぼ一潮汐について測定した流速分布を示す。日没のため ($\frac{1}{15} \sim \frac{1}{15}$) T (T は潮汐周期) の分布がとれなかったのは残念であるが、図より明らかなように、

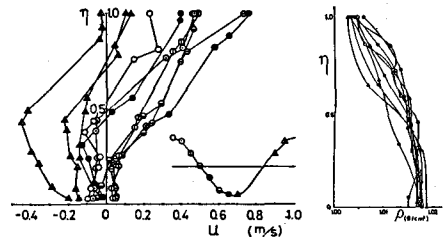


図-1 (a)

図-1 (b)

水表面付近で海に向い、底面付近では逆上する恒流が存在し、順流時の大きい表面流速、停留時附近の exchange flow など、緩混合型河川に特有の流速分布が認められる。図-3 の模式図と慣用の記号を用い、密度と同様に流速を $u = U_m + \hat{u} + u'$ と分ける。この乱れにおける乱れによる剪断応力は次式

$$\frac{\tau}{\rho_f} = -\overline{u'v'} = K_m \frac{du}{dy} = -\int_0^y \frac{\partial u}{\partial t} dy + g h I_w (1-\eta) - \frac{1}{2} g h \frac{\langle \rho \rangle}{\rho_f} \nu (1-\eta)^2 \quad \dots (2)$$

で与えられる。ここに K_m は渦動粘性係数、 I_w は水面勾配である。簡単のため、非定常項を無視すると (2) 式は次式となる。

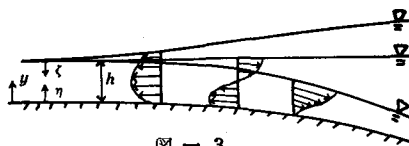


図-3

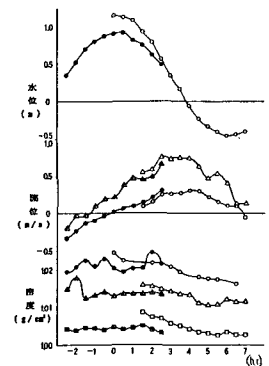


図-2

$$K_H(du/dy) = gR I_w(1-\eta) - gR I_p(1-\eta)^2 = u_{*0}^2[(1-\eta) - \sigma(1-\eta)^2]$$

$$u_{*0} = \sqrt{gR I_w}, \quad I_p = \langle p \rangle / \nu / 2\beta, \quad \sigma = I_p / I_w \quad \dots (3)$$

剪断応力は (i) 水面勾配による応力と流束方向の密度勾配による応力からなること、(ii) $\sigma > 1$ ($I_p > I_w$) のときには底面付近に逆流域が形成されること、(iii) I_w は下げ潮、上げ潮に応じて正負の値を周期的にとるが、 I_p は常に正で、 I_p の効果は底面近傍で著しく、逆流を助長する方向に作用する。これから、緩混合型河川の流束は前述の恒流で特徴づけられることが理解できる。

3. 観測結果の検討と渦動粘性係数

Hansen & Rattray は擬等流を仮定した式(3)において、次の仮定 (i) 渦動粘性係数 K_H は Const. (ii) 境界条件として $y=0$ で $u=0$ のもとに式(3)を積分し、1潮汐間の平均勾配 $\bar{I}_w$ と u_f との関係を求め、 u_f/u_* を $\chi_f = \langle p \rangle / \nu g R^2 / \beta K_H u_f$ ($\sigma = \frac{1}{3} / (\frac{\chi_f}{2} + \frac{1}{4})$) をパラメータとする $\chi = (1-\eta)$ の関数として表わした。ここでは1潮汐間の各時点で上の仮定が成立するものとし

$$\left. \begin{aligned} \frac{u_f}{u_*} &= \frac{3}{2}(1-\chi)^2 + \frac{1}{6}\chi(\chi^2 + \frac{1}{3} - \frac{9}{8}\chi^2) \\ \chi &= \frac{\langle p \rangle / \nu g R^2}{\beta K_H u_*} = \frac{\nu}{\alpha} \bar{R}_i, \quad \bar{R}_i = \frac{\langle p \rangle g R^2}{u_*^3} \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

上の χ の式で $K_H = \alpha u_* R$ においており、 $\bar{R}_i$ は overall Richardson 数である。また、Hansen & Rattray にならって、簡略化した密度の拡散方程式を積分して密度分布を求めると、近似的な密度 flux の保存式 $\int_0^h u \langle p \rangle (1+\theta) dy = 0$ は、 β を密度の拡散係数 K_p と渦動粘性係数との比 ($\beta = K_p / K_H$) として、

$$1680\beta(\alpha/\nu) = 3.2 + 1.583(\nu/\alpha)\bar{R}_i + 0.020(\nu/\alpha\bar{R}_i)^2 \dots (5)$$

となり、 β は $\bar{R}_i$ の関数であるから、 α/ν は $\bar{R}_i$ の関数となる。

さて、式(4)で表面流速を u_s とすると、 $u_s/u_* = 3/2 + \chi/48 \dots (6)$ を得るから、表-1 にあげた川内川、筑後川の資料について、各時点の u_s/u_* に応ずる χ を(6)から求め、式中の $\langle p \rangle / \beta \nu$ 、 h 及び u_* の実測値を用いると、 K_H 、 $\alpha = K_H / u_* R$ 及び α/ν の値がわかる。図-4は α/ν と $\bar{R}_i$ との関係を示したもので、 α/ν の測定値は大きく散らばっているが安定成層密度流の β の平均値として、 $\beta = 0.4$ を用いた場合の式(5)の計算結果とほぼ一致している。さて、流束方向の無次元密度勾配 ν や $\langle p \rangle / \beta \nu$ の値は塩分侵入場に供給される浮力 flux $\langle p \rangle g Q_s / \beta W$ と潮流流速によって規定されるであろう。従って、 α 及び $\bar{R}_i$ を estuary Richardson 数 $R_{iE} = \langle p \rangle \beta g Q_s / W u_*^3$ に対してプロットした結果を図-5、6に示す。まず α のオーダーについて考える。均質な開水路流束の場合、渦動粘性係数は $K_{m0} = (\kappa/6) u_* R = (\kappa/6\%) u_* R$ と考えられ、 $Q_s = 10 \sim 15$ 、 $\kappa = 0.4$ として、 α_0 の値は $\alpha_0 \approx (6.6 \sim 4.4) \times 10^{-3}$ 程度である。それに対して、ここでの α の値は α_0 の $1/10 \sim 1/100$ 程度に減少しており、浮力効果による乱流の減衰が著しいことがわかる。次に、図-5、6の直線を書き直し、経験式として示すと、 $K_H = 1 \times 10^{-4} (\langle p \rangle / \beta \nu)^{1/2} (Q_s / W u_*)^{1/2}$, $\langle p \rangle / \beta \nu = 855 \frac{Q_s^2}{g h^3 W^2} \dots (7)$ となる。

観測においては建設省川内川工事事務所の方々から多大な援助を頂いた。また、観測計器の製作及び観測には本学一ノ瀬校舎はじめ、研究室員の熱心な協力があつたことを付記し、厚く謝意を表する。

参考文献：(1) Hansen, D.V. and Rattray, M.Jr. : J. Marine Res., pp. 104 ~ 124, 1965

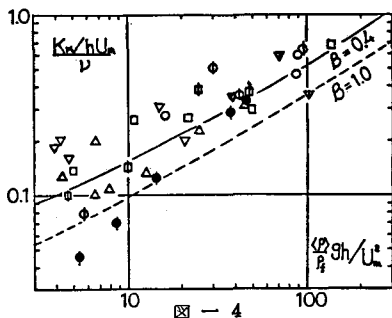


図 - 4

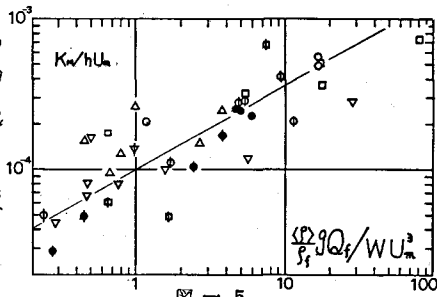


図 - 5

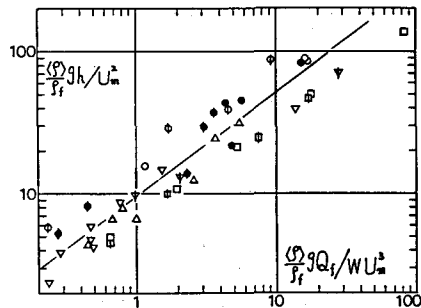


図 - 6