

II-174 密度フロントの形成に関する基礎的研究

長岡技術科学大・工学部 (学) 南将人・(正) 中村由行・(正) 早川典生

1. 序 河川水の海上への拡がりについては、柏村¹⁾²⁾とはいふとする実験的研究や、Takano³⁾、福岡⁴⁾による解析等があるが、いずれも沿岸流の存在が考慮されていない。沿岸流がある場合の河川水の拡がりについては、早川⁵⁾による実験的研究以外に、研究例は少ない。

河川水が沿岸流のある海域に流出すると、しばしば明瞭な密度フロントが形成される事が知られている。早川⁵⁾は、模型水槽において、沿岸流水と河川水との間にフロントが形成される事を見出し、フロント付近において表面流速の速度ベクトルが収束し、水の交換が抑制される事を観察した(Fig. 1)。本研究においては、密度フロントが安定に存在する条件と見出す事がかりとして、鉛直二次元系でのフロントの存在条件と議論する。その為に、簡単な一次元数値モデルを作り、二次元水槽を用いた実験と比較する。

2. 一次元数値モデル 単純の為に、Fig. 2の様な系において、フロントの位置が動かない、定常状態を考える。質量、体積の保存から

$$\rho_2 u_2 h + \rho_1 u_1 (D + \eta) = \rho_2' u_2' (h - D) \quad (1)$$

$$u_2 h + u_1 (D + \eta) = u_2' (h - D) \quad (2)$$

全層及び上層の運動量のバランスから

$$\begin{aligned} & \rho_2' u_2'^2 (h - D) - \rho_2 u_2^2 h + \rho_1 u_1^2 (D + \eta) \\ &= \frac{1}{2} \rho_2 g h^2 - \frac{1}{2} \rho_1 g (D + \eta)^2 - \rho_1 g (D + \eta) (h - D) - \frac{1}{2} \rho_2' g (h - D)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$- \rho_1 u_1 (D + \eta) e u_1 + \rho_1 u_1^2 (D + \eta) = \frac{1}{2} \rho_1 g (D + \eta) D - \frac{1}{2} \rho_1 g (D + \eta)^2 + \tau_i l \quad (4)$$

がそれぞれ成立つ。但し、静水圧近似を用い、(4)式の τ_i は界面抵抗、 l はフロント長さを示す。

定常状態が成立つ為には、上層から下層へ $\rho_1 u_1 (D + \eta)$ の質量が輸送されねばならないが、その時の上層の流速の平均値を $e u_1$ とおいて、連行による運動量輸送を表わした。

以上の基礎方程式系(1)~(4)より、 $(h, D, u_1, u_2, \rho_1, \rho_2)$ を given parameter とし、 (l, η, u_2', ρ_2') を求める。特に、フロント長さ l が何によって決まるか、を調べることを目的とする。運算に便利な様に、単位幅流量及び密度差を次の様に定義する。

$$g_1 = u_1 (D + \eta), \quad g_2 = u_2 h, \quad g_2' = u_2' (h - D) \quad (5)$$

$$\Delta \rho_1 = \rho_2 - \rho_1, \quad \Delta \rho_2 = \rho_2 - \rho_2' \quad (6)$$

l についての結果と示す。

$$\text{Turbulent Type} : \tau_i = \frac{1}{2} \rho_1 C_f (u_1 + u_2)^2$$

$$\frac{l}{D} = \frac{2(1-\epsilon)}{C_f (1+\alpha X)^2} - \frac{X}{C_f (1-X)} \quad (7)$$

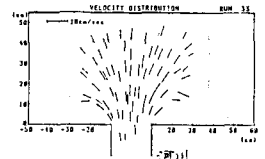
where

$$X = D/h, \quad \alpha = q_2/q_1 = \Delta \rho_1 / \Delta \rho_2 - 1$$

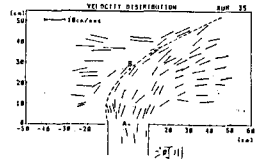
$$\text{Laminar Type} : \tau_i = \frac{1}{2} \rho_1 \frac{C}{Re} (u_1 + u_2)^2, \quad Re = \frac{(u_1 + u_2) h}{\nu}$$

$$\frac{l}{D} = \frac{1+\alpha X}{c \nu D^2} q_1 \left(-\frac{X}{1-X} (\alpha+1)^2 - X \alpha^2 + 1 + \frac{2}{X} (1-\epsilon) \right) \quad (8)$$

となる。Fig. 3において、 $\rho_1 = 1.00 (g/cm^3)$ 、 $\rho_2 = 1.02$ 、 $e = 0$ の場合における l と流量比 g_2/g_1 及び 厚み比 $D/h (=X)$ との関係を示す。但し、これは乱流型(7式)の場合であるが、層流型の場合も



a) 沿岸流なし



b) 沿岸流あり(破線がフロント)

Fig. 1 模型水槽実験での表面速度ベクトル

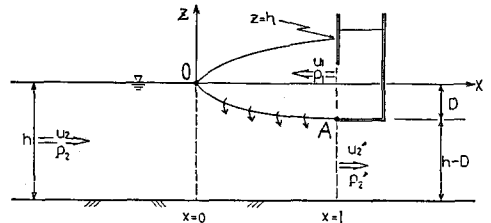


Fig. 2 一次元モデルの諸量の定義

定量的に大きな違いはみられない。例えは(7)の結果と無限水深の海域の場合に適用すると、($h \rightarrow \infty$)

$$C_f \frac{l}{D} = \frac{2(1-e)}{(\frac{u_2}{u_1} + 1)^2} \quad (9)$$

となって、有限な解が存在する事がわかる。

3. 二次元水槽実験

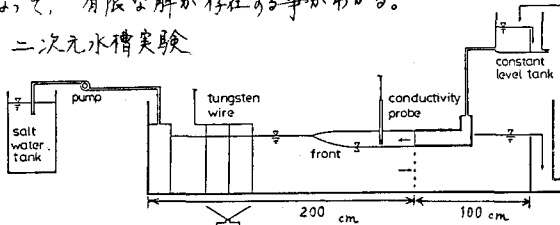


Fig. 4 実験装置略図

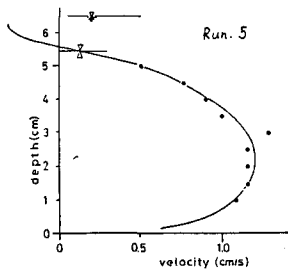


Fig. 5 流速分布

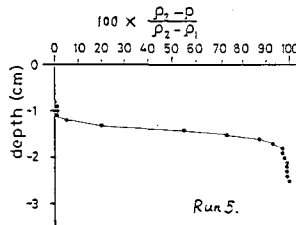


Fig. 6 密度分布

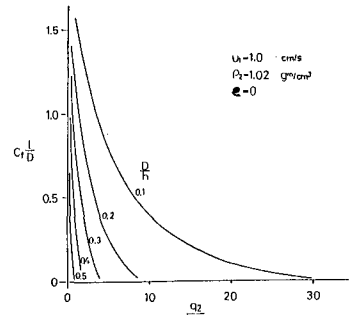


Fig. 3 二次元モデルによる l と g_2/g_1 の関係

Run	L	h	D	α_1	α_2	u_1	u_2	u_{2v}	R_1	u_2/u_1	$1/u_1$	Q/h	g_2/g_1
1	150.0	9.5	1.0	1.0	1.0025	0.53	1.39	---	1.27	2.57	15.8	0.105	98.0
2	40.5	6.5	1.0	1.0	1.0020	0.14	1.13	---	1.53	8.09	6.2	0.154	52.3
3	143.0	6.5	2.2	1.0	1.0050	0.10	1.40	1.13	5.50	14.63	22.0	0.338	43.2
4	130.0	6.5	2.2	1.0	1.0053	0.11	1.42	---	5.67	13.22	20.0	0.338	39.1
5	135.0	6.5	2.2	1.0	1.0050	0.07	0.97	1.00	11.46	14.59	20.8	0.338	42.9
6	130.0	6.5	2.2	1.0	1.0050	0.15	1.58	---	4.32	10.60	20.0	0.338	31.2
7	90.0	6.6	2.2	1.0	1.0051	0.15	1.79	---	3.43	11.70	13.6	0.333	35.1

Table 1. 実験条件 (単位は c.g.s.)

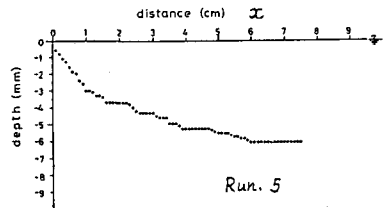


Fig. 7 界面形状

水槽は長さ 3 m, 幅 30 cm のアクリル製水槽で、一端から塩水と、ノズルから淡水を流入させ、フロント先端が停止する水理条件を探した。密度(食塩濃度)は電導度計、流速は水素気泡法により、測定した。Run. 5 の場合の流速及び密度分布(いずれも淡水ノズル口から 90 cm 離れた点)を Fig. 5 及び 6 に、界面形状を Fig. 7 に示す。本実験例はいずれも建行の大部分が淡水ノズル口付近で、しかも界面がノズル下端よりも下方に下がってしまった。そこで、玉井⁶⁾に代り、塩水と淡水の界面計算による方法を準用して、界面形状及びフロント長さ l を求めた。基礎運動方程式は玉井⁶⁾による(4.29)式であるが、今建行がなく、上層流速 $U_1 = 0$ の場合と考えると、界面位置を与える式は簡単に(10)式で与えられる。今 F_1 及び h が一定であることから、(10)式を積分してフロント長さ l と与える式(11)が容易に求められる。(11)式による計算結果と、実験結果によるフロント長さを比較すると、Fig. 8 の様になった。

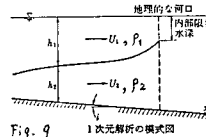


Fig. 9 1次元解析の模式図

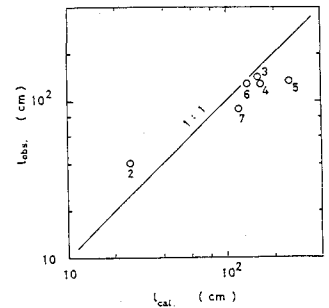


Fig. 8 フロント長さ l の実験値と計算値の比較

$$F_1^2 = \frac{g_2^2}{\epsilon g h^3}, \quad \epsilon = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_2}$$

$$g_2 = u_2 h_2, \quad \epsilon_1 = f_{10} \frac{\rho_2 U_1^2}{2}, \quad \epsilon_2 = f_{20} \frac{\rho_2 U_2^2}{2}$$

$$f_{10} = \frac{5.6}{R_{\epsilon_1}}, \quad f_{20} = \frac{8.8}{R_{\epsilon_2}}$$

$$\frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} \frac{1}{h} = \frac{1-X^2}{2} - \frac{(1-X)^4}{F_1^2} \left(\frac{1}{4} - \frac{1-X}{5} \right) + \frac{1}{20F_1^2} - \frac{1}{2} \quad \dots (11)$$

$$\frac{dh_2}{dx} = - \frac{\frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} F_1^2 \frac{h^4}{h_2^2 (h-h_2)}}{1 - F_1^2 (h/h_2)^3} \quad \dots (10)$$

4. 謝辞 本研究は、科研費 総合A「密度流現象における建行概念の統一とその応用」により行われた。

5. 文献 1) 相村; 工水学シリーズ 75-B-7, 土木学会水理委員会, 1975 4) 福岡ら; 土木学会論文報告集, No. 327, 1982
2) Kashiwamura et al.; IAHR, Novosibirsk, Symp., 1972 5) 早川ら; 海洋工学講演会論文集, 1983
3) Takano; J. Oceanogr. Soc. Jap., 10, 1954 6) 玉井; 密度流の水理, 技報堂, 1980