

傾斜プリュームの流れ特性について

九州工業大学工学部 ○ 学生員 小和田 猛
正 員 秋 山 壽一郎、浦 勝

I 緒言：周囲水より重い流体が連続的に斜面上に放出されると、底斜面に沿って流下発達し下層密度流を形成する。この現象は自然界において頻繁に観測される基本的かつ重要な密度流である。本研究は、流入条件及び底面傾斜角を様々に変化させ、同一条件下で繰り返し実験を行ない、重力下層密度流の流動特性に関して統一的な知見を得ることを目的としたものである。

II. 実験：実験は $\theta=5.17^\circ$ 及び 8.13° に対しては長さ10.0m、深さ0.45m、幅0.2mの大型水路を用い、 $\theta=45^\circ$ 及び 60° に対しては長さ2.0m、深さ0.36m、幅0.22mの小型水路を使用した。計測を行なった流れ特性量は、先端部では移動速度(U_h)、及び先端部形状で、後続部では層厚(h_f)である。いずれの特性量もVTRによって測定した。表-1に実験条件を示す。

III. 実験結果：重力下層密度流の重要な特性量について得られた結果について以下列挙する。流れの定義図は図-1に示した通りである。

無次元先端移動速度(U_h^*)： U_h^* は式(1)によって定義される。図-2に本研究によって得られた結果とBrüer & Linden(1980)によって整理された従来の結果との比較を示す。 U_h^* は同図から明らかなように、底面角度 θ に対する強い依存性を有せず、式(2)で近似的に表わされるようである。

$$U_h^* = U_{fe} / (Bo_{eq})^{1/3} \quad (1) \quad ; \quad U_h^* = 1.5 \pm 0.2 \quad (2)$$

ここに、 $Bo = (\rho_0 - \rho_a)g / \rho_a$ 流入浮力； ρ_0 = 流入水の濃度； ρ_a = 周囲水の濃度； g = 重力加速度。

先端形状：先端部の形状は、図-3に示すように最大層厚(h_f)と先端部長さ(L)で無次元化すると、同一底面角度に対しては、流入条件にかかわらず、ほぼ相似形を保ちながら流下するようである。先端部の形状を式(3)、(4)で定義される断面アスペクト比 $f(\theta)$ と断面面積比 $S_1(\theta)$ によって表わすと、図-4、5に示すように $f(\theta)$ と $S_1(\theta)$ はそれぞれ θ の関数として式(5)、(6)のように近似的に表示できる。

$$f(\theta) = h_f / L \quad (3) \quad ; \quad S_1(\theta) = A / (h_f L) \quad (4) \quad \text{ここに、} A = \text{先端部断面面積。}$$

$$f(\theta) = 0.00229 \theta + 0.39 \quad (5) \quad ; \quad S_1(\theta) = 0.00084 \theta + 0.73 \quad (6) \quad \text{for } \theta = 5^\circ \sim 60^\circ$$

先端部最大層厚変化率(dh_f/dx)及び後続部層厚変化率(dh/dx)：平衡状態においては、先端部最大層厚はlinearに増加することが従来の研究で認められている。一方、後続部と極めて類似した流れである連続下層密度流に対して、Ellison & Turner(1959)が“normal 状態”の概念を導入し、この状態では層厚はやはりlinearに増加することが実験的にも確かめられている。 dh_f/dx 及び dh/dx に関する結果を整理したものが図-6である。同図から dh_f/dx と dh/dx はそれぞれ θ の関数として式(7)と(8)で近似的に与えられる。

$$dh_f/dx = 0.004 \theta \quad (7) \quad ; \quad dh/dx = 0.001(\theta + 5) \quad (8) \quad \text{for } \theta = 0^\circ \sim 60^\circ$$

先端部と後続部の層厚比(h_f/h)：式(7)と(8)の関係をを用いると近似的に式(9)が得られる。流速分布の測定によって得られた本研究の結果との比較より、 h_f/h はこの関係式にほぼ従っていることが判る(図-7)。

$$h_f/h = 4 \theta / (\theta + 5) \quad (9) \quad \text{for } \theta = 0^\circ \sim 60^\circ$$

先端部と後続部の流速比(U_h/U)：先端部と後続部との間にBernoulliの定理を適用すると流速比は式(10)で与えられる。今、後続部が“normal 状態”であると仮定すると、後続部の支配方程式である漸変流の式より、式(11)が得られる。

$$U_h/U = (\alpha + 2a_2R/\alpha)/2 \quad (10) \quad ; \quad (1 + a_1R_n/2)E_e - a_2R_n \tan \theta - f_0 = 0 \quad (11)$$

ここに、 $\alpha = u_m/U$ ； u_m = 流線に沿う後続部の局所流速； U = 後続部の平均流速； a_1, a_2 = 分布定数； R = 後続部のOverall Richardson 数($= Bh \cos \theta / U^2$)； R_n = Normal Richardson 数； f_0 = 底面摩擦損失係数。

式(11)において、連行係数 E_e を式(12)型で表現できるとすると、 R_n は解析的に式(13)のように求まる。

$$E_e = c/R_n \quad (12) \quad ; \quad R_n = a_1 c/2 + f_0 + \sqrt{(a_1 c/2 + f_0)^2 + 4c a_2 \tan \theta/2 a_2 \tan \theta} \quad (13)$$

最終的に、 U_h/U は式(10)に式(13)を代入することによって理論的に得られる。図-8は係数 α を決定する目的で、式(10)と実験データを比較したものであるが、 $\alpha=1.1$ とすれば両者の一致は良いようである。

先端部の連行係数(E_d)：先端部の連行係数 E_d を式(14)で表現すると、先端部に対する連続の式(秋山ら(1991))より E_d は式(15)のように表わされる。

$$E_d = q_e / (L U_h) \quad (14) \quad ; \quad E_d = S_1 (dh_f/dx) - f(\theta) [(U/U_{fe} - 1 + k_u)(h/h_f - k_u)] \quad (15)$$

ここに、 q_e = 先端部連行量； $k_u = 1 - U_m/U_f$ ； U_m = 混合層の平均流速。

式(15)において、 $f(\theta)$ 、 $S_1(\theta)$ 、 dh_f/dx 、 h/h_f は実験的に式(5)、(6)、(7)、(9)で与えられており、 k_u は非定常重力密度流の数値モデル(秋山ら(1991))より $k_u=0.6$ と同定されている。また、 U_h/U は式(10)で $\alpha=1.1$ として、近似的に決定されているので、これらを式(15)に代入し、 θ を変化させ計算を行なうと、図-9が得られる。この結果は、秋山ら(1991)が数値計算により決定した E_d -値と極めて良く一致する。このことから、 E_d -関数も θ の関数として、式(16)で表わされるようである。

$$E_d = 0.053 + 0.0075 \theta \quad (16) \quad \text{for } \theta = 0^\circ \sim 60^\circ$$

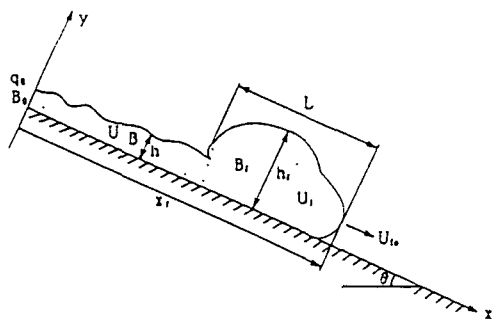


図-1 定義図

表-1 実験条件

$\theta (^{\circ})$	$Bo(\text{cm}^2/\text{s})$	$q_0(\text{cm}^2/\text{s})$
5.71	20.58	9.0
8.13	20.58	9.0
45.00	4.90	1.03
		2.03
	9.80	1.02
		2.02
	19.60	1.02
		2.02
60.00	4.90	0.62
		1.01
	9.80	0.62
		1.01
	19.60	0.62
		1.01

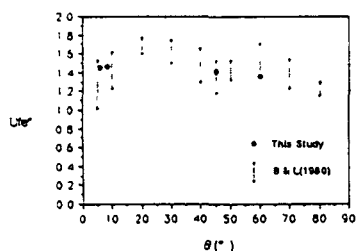


図-2 $U_{fe}/U_{\infty} \sim \theta$ の関係

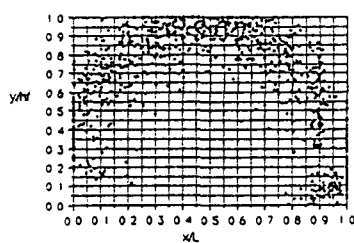


図-3 先端部の形状 ($\theta = 60^{\circ}$)

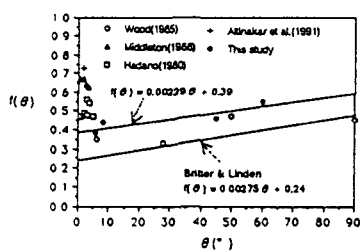


図-4 $f(\theta) \sim \theta$ の関係

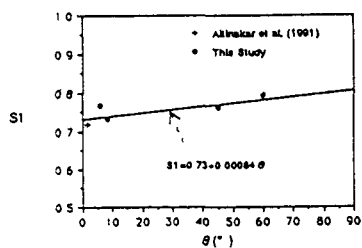


図-5 $S_1(\theta) \sim \theta$ の関係

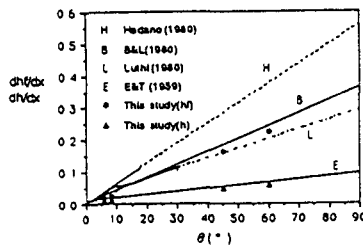


図-6 dh/dx , $dh/dx \sim \theta$ の関係

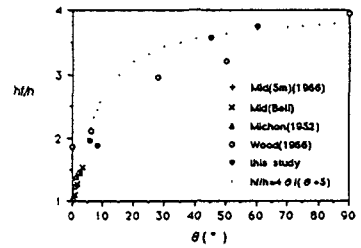


図-7 $h_f/h \sim \theta$ の関係

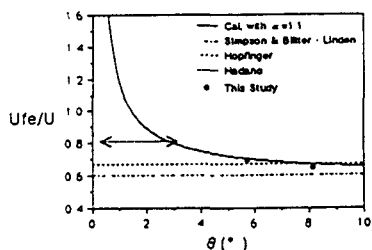


図-8 $U_{fe}/U_{\infty} \sim \theta$ の関係

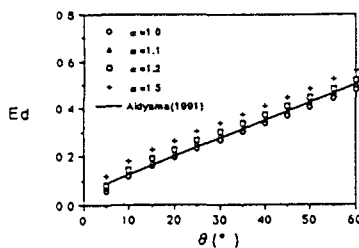


図-9 $E_d \sim \theta$ の関係

IV. 参考文献

秋山ら (1991), 水工論文集 第35巻
 Britter & Linden (1980), J.F.M.
 Ellison & Turner (1959), J.F.M.