

傾斜サーマルの初期流動に関する実験的研究

羽田野袈裟義¹・矢野晶人²・松本治彦³・朝位孝二⁴

¹正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科(〒755-8611 宇部市常盤台2丁目16-1)

²正会員 工修 (株)建設技術研究所 中国支社技術部 (〒730-0013 広島市中区八丁堀2-31)

³正会員 博士(工学) 宇部短期大学教授(〒755-0056 宇部市文京町5-40)

⁴正会員 博士(工学) 山口大学講師 工学部社会建設工学科(〒755-8611 宇部市常盤台2丁目16-1)

斜面上で生じた淡・塩水の開放交換流の流動を実験的に検討した。斜面を流下する下層流とこれを補償する上層流の運動を調べている。その結果、傾斜サーマルの初期の流動は、初期塩水体積と初期相対密度差から決まる時間、長さおよび速度のスケールと底面勾配により表現されること、これらのスケールを用いて有用なレイノルズ数が定義されること、下層流先端部の厚さは漸増するがその増加割合は水面の影響がない場合に比べて小さいこと、最大厚さの断面の密度フルード数は漸増して一定値に漸近しその値は底面勾配とともに増加すること、上層補償流先端部の流動厚さはほぼ一定で仕切位置水深の0.2-0.3倍程度、密度フルード数は1程度であることなどを明らかにした。また、密度流先端部のくびれや循環流について力学的な検討を行っている。

Key Words: *inclined thermal, initial motion, water surface effect, exchange flow, densimetric Froude number*

1. はじめに

周囲流体より密度の大きな流体が斜面を流下する下層密度流は、自然界においては貯水池の濁水密度流、山地斜面での冷気流、海底での乱泥流などとして出現し、水工学および関連の分野で強い関心をもたれている。たとえば、洪水時に生じた濁水密度流^{1), 2)}は貯水池濁水長期化や堆砂の問題と関連する現象である。山地部で夜間の放射冷却によって発生する冷気流^{3), 4)}は、霜害や凍害や濃霧の問題を生じる。また、海底における乱泥流^{5), 6)}は、土砂輸送や堆積について興味をもたれ地質学の分野におけるメインテーマの一つである。

海底における乱泥流の発生機構の一つとして、海底地震により大陸棚で発生した濁水が大陸斜面を流下して発生することが挙げられる。1929年にグランドバンク近海で海底ケーブルが次々に切断された事故は海底地震で発生した乱泥流の通過によるものとの見方が有力である⁷⁾。濁水密度流では土粒子の巻き上げと沈降が同時に生じているが、巻き上げが沈降を上回ると流れの密度が増大し、それにもなって速度が増大する。速度が増大すると土粒子の巻き上げがさらに活発となり、これがさらに密度

と速度を増大する。このようなプロセスで濁水密度流は乱泥流に発達すると考えられる。このような観点から濁水密度流の発達・減衰についてはいくつか興味ある研究がなされている^{8), 9), 10)}。密度流の加速・減速は流れのフルード数に支配され¹¹⁾、土砂の巻き上げは掃流力に支配される。したがって、濁水密度流が乱泥流に発達するか、あるいは土粒子の沈降のために減速して最終的に消滅するかは、初期のあるいは現に生じている流れのフルード数と掃流力/限界掃流力比に規定される¹²⁾。

以上のことから、傾斜サーマルの流動初期の流れの性質を予測することは重要である。傾斜サーマルに関してこれまで活発な研究^{13) ~ 24)}により多くの重要な知見が得られている。Beghinら¹³⁾、福岡ら^{18), 23), 24)}、秋山ら^{20), 21), 22)}はサーマル全体を一体として取り扱い、抗力係数を導入して解析している。平野ら¹⁵⁾、羽田野ら¹⁹⁾は任意の断面に成立する基礎式から出発し、先端部における現象の相似性を仮定して、最大厚さの断面に適用している。芦田ら^{9), 14)}は任意断面に成立する基礎式をサーマル全体にわたり積分し、最終的にサーマル全体についての式を導いて解析している。これらの研究より、傾斜サーマルは流下とともに流動厚さを増大し、その増加割合は底面勾配

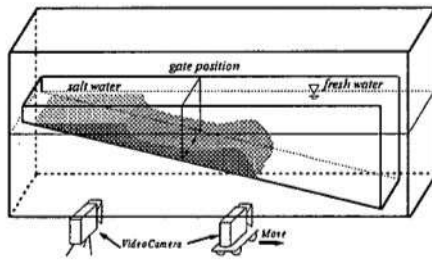


図-1 実験装置の概略

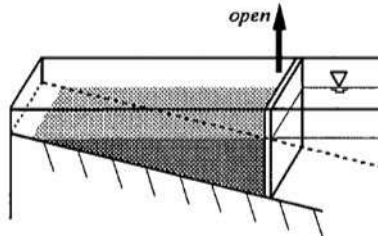


図-2 塩水の供給方法

に応じたほぼ一定値をとること、先端移動速度は初期には加速が生じてその後減速する傾向があることなどが明らかにされている。一方、流動形態の変化が著しい初期流動に焦点を当てた研究は殆ど行われていない。このような傾斜サーマルの初期流動については、これを斜面上の解放交換流れとしてとらえることによりさらに有用な情報が得られると考えられる。

本研究は、Bar²⁹が水平底面について行ったのと同様に傾斜サーマルの初期流動を斜面上の開放交換流れとしてとらえ、淡・塩水を用いた室内水路実験によりその流動特性を検討するものである。下層流と上層流の双方について、流動厚さ、先端速度、密度フルード数などの諸量の変化特性、および水理条件との関係などを調べた。

2. 実験装置と方法

実験装置は、図-1に示すように、長さ550cm、幅70cm、高さ60cmの水槽内部に長さ500cm、幅10cm、高さが上流端20cm、下流端60cmの変可勾配水路を設けたものである。実験は、フルオレセインナトリウムで着色した塩水を用いて、水槽内の水路で行った。水路を所定の勾配にして水路上流部にゲートを設け、水槽内に水道水を貯留したのち、所定の体積・濃度の着色塩水をゲートより上流部に貯めた。そして水道水・塩水とも落ち着いた後、図-2のようにゲートを速やかに上方に移動させて塩水の供給を行った。ゲートの移動に際しては、流体を乱さないよう注意した。水路の上流と下流からスライドプロジェクターにより水路中心線を含む鉛直面を照射し、これによ

表-1 実験条件

Run	i	V(l)	$\Delta\rho/\rho$	H_0 (cm)	Re_0	t_1 (°C)	t_0 (°C)
1	1/4	1	0.005	7.07	4162	19.0	20.0
2			0.010		5886	18.8	20.0
3			0.020		8324	19.0	20.0
4	1/5	1	0.005	6.33	3521	20.5	20.1
5			0.010		4979	20.0	20.0
6			0.020		7042	20.0	20.0
7	1/8	1	0.005	5.00	2475	21.0	21.0
8			0.010		3500	19.5	21.0
9			0.020		4950	18.5	20.5
10		2	0.005	7.07	4162	20.8	21.0
11			0.010		5886	19.8	20.8
12			0.020		8324	18.5	20.5
13	1/10	1	0.005	4.47	2093	23.4	24.1
14			0.010		2961	23.1	24.0
15			0.020		4187	22.5	24.0
16		2	0.005	6.33	3521	23.8	24.0
17			0.010		4979	23.0	24.0
18			0.020		7042	22.5	23.9
19	1/15	1	0.005	3.65	1545	23.0	22.3
20			0.010		2184	23.0	22.0
21			0.020		3089	23.0	22.0
22		2	0.005	5.16	2598	23.1	22.1
23			0.010		3674	23.1	22.0
24			0.020		5195	23.0	22.0
25	1/20	1	0.005	3.16	1245	25.8	26.0
26			0.010		1760	25.0	25.2
27			0.020		2490	24.8	25.0
28		2	0.005	4.47	2093	25.8	25.8
29			0.010		2961	25.0	25.1
30			0.020		4187	24.5	25.1
31	1/30	1	0.005	5.48	2838	25.8	25.6
32			0.010		4013	25.0	25.1
33			0.020		5675	24.2	25.2
34		2	0.005	3.65	1545	24.4	25.3
35			0.010		2184	24.0	25.1
36			0.020		3089	22.5	25.0
37	1/40	1	0.005	2.24	740	21.6	21.6
38			0.010		1047	21.1	21.8
39			0.020		1480	21.0	21.5
40		2	0.005	3.16	1245	21.7	21.7
41			0.010		1760	21.1	21.8
42			0.020		2490	21.0	21.7
43	1/40	1	0.005	2.24	740	21.6	21.6
44			0.010		1047	21.1	21.8
45			0.020		1480	21.0	21.7

t_1 : Salt Water, t_0 : Fresh Water

り映し出された流れの状況を水路側方からビデオカメラにより撮影・録画し、画像解析により形状、層厚、先端位置を測定した。ビデオカメラは2台使用し、それぞれゲート上流側と下流側の録画を分担するようにした。下流側のカメラは、先端部を追尾するため、台車に設置しておき台車をレール上で移動させた。

実験条件は、水路勾配*i*=1/4~1/40、相対密度差 $\Delta\rho/\rho=0.005\sim0.020$ 、塩水供給体積*V*=1~3(*l*)の範囲で変化

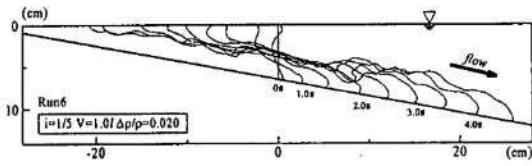


図-3 流動状況

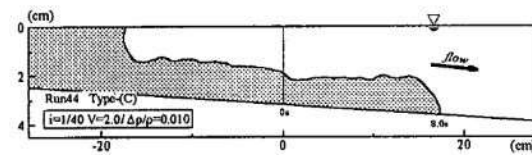
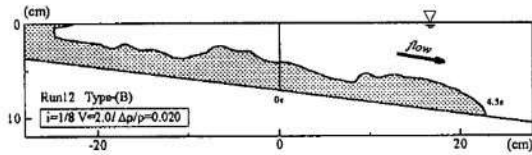
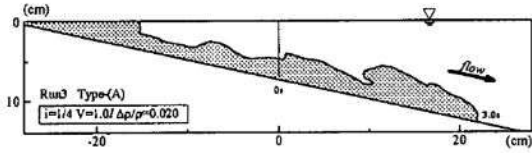


図-4 流動状況の分類(上図から(A),(B),(C))

させ、表-1に示す条件で45通りの実験を行った。表中の H_0 はゲート位置水深、 Re_0 はレイノルズ数²⁵⁾であり次式で与えた。

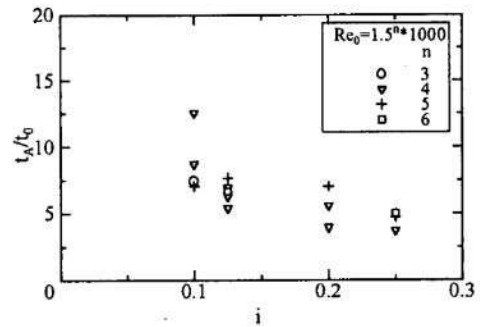
$$Re_0 = H_0 (g' H_0)^{1/2} / \nu \quad (1)$$

ここに、 ν は水の動粘性係数、 g は重力加速度、そして $g' = g \Delta \rho / \rho$ である。水槽水温は18.5~25.8°Cで、水槽水と塩水の温度差の最大値は $\Delta \rho / \rho = 0.005$ の場合で0.9°C、 $\Delta \rho / \rho = 0.010$ の場合で1.5°C、 $\Delta \rho / \rho = 0.020$ の場合で2.9°Cであり、密度差に占める温度の効果の割合は最大で5%程度であったので温度差の効果は無視した。また、再現性の確認のため、各条件において3回以上の実験を行い、再現性を確認した後、その1つを実験データとして画像解析を行った。

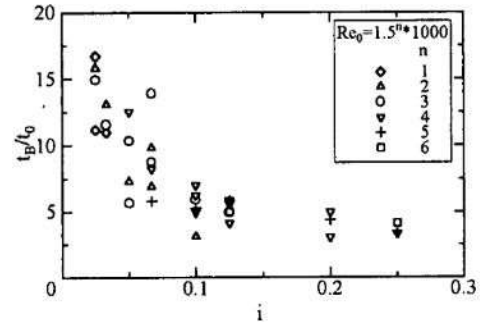
3. 実験結果

(1) 流動状況

ゲート開放後の流動状況の一例を図-3に示す。ゲートを開放すると、密度の大きい塩水は下層流として底面にそって下流へと流動する。一方、密度の小さい水道水は下層流として流下した塩水を補償する形で上層流として水表面近くを上流に向けて侵入する。ゲート付近では



(a) t_A / t_0 の変化



(b) t_B / t_0 の変化

図-5 流動形状の遷移時刻

ゲート開放後しばらく淡・塩境界がゲート位置のほぼ1/2水深にある。また、この実験において下層流は先端部の流動厚さを増大しながら進行している。流動開始後の下層流先端部の流況は、時間の経過または先端の進行とともに変化する。この変化を表現するため、先端部の形状を次の3つに分類して検討する。(図-4)

(A) 下層流先端部が膨れ、先端部と後続部の境界付近で顕著なくびれが見られる。

(B) 下層流の先端部は膨れるが、顕著なくびれは見られない。

(C) 下層流の厚さは先端から後続部までほぼ一定である。

実験によれば、ゲート開放後の流れはC→B→Aのパターンで変化する。C→Bの移行の基準は先端極大厚さ/先端部極小厚さが1.5以上とした。なお、Aに移行すると、先端部のくびれ付近で間欠的に渦が合体したり分離したりし²⁶⁾、これに応じて形状がAとなったりBとなったりする状況があった。このため、一旦BからAに移行した場合はAとみなし、一旦CからBに移行した場合はBとみなした。表-1に示した各実験について、ゲートを開放してからAに移行するまでの時間 t_A およびBに移行するまでの時間 t_B を、0.5秒または1秒間隔でゲート位置の上下流±20cm程度の区間で、形状をトレースして求めた。その結果を無次元形で示したものが図-5である。図中の t_0 は

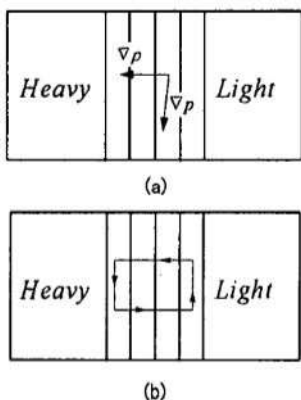


図-6 密度・圧力勾配と循環²⁸⁾

Bar²⁵⁾ が導入し, Bonneau²⁷⁾ が開放交換流れの解析に用いた時間スケールであり次式で与えられる.

$$t_0 = (H_0 / g')^{1/2} \quad (2)$$

ここに, H_0 はゲート位置水深(表-1)である. 図より, 形状データの読みとり時間間隔が大きかったことなどのため, データの散乱があるが, l_d/l_0 , l_b/l_0 も底面勾配が急なほど, そして Re_0 が大きいほど値は小さく, 流況の遷移が早いことを示している. このことは上記の無次元量による表現の有効性を示唆している. パターン(A)のくびれは, 半楕円状の下層流先端部に生じる循環がつくる上層水の運動により内部境界面が下方に押さえつけられること, および先端部の背後における後流のため内部境界面が押し下げられるという機構が組み合わされていると考えられる. 勾配が急な場合には, 流れの駆動力が大きくなり移動速度が大きくなるため, 循環が大きくしかも後流も強くなりくびれが生じ易いと推察される.

ここで先端部の循環流の機構について考察する. Bjerknes の定理によれば圧力勾配のベクトルと密度勾配のベクトルの向きが一致しない場合にはそのために渦度が生成される²⁹⁾. 渦度ベクトルを ζ , 速度ベクトルを \mathbf{u} とするとき, 上記の関係は次式で表現される.

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{\zeta}{\rho} \right) = \left(\frac{\zeta}{\rho} \cdot \nabla \right) \mathbf{u} + \frac{\nabla \rho \times \nabla p}{\rho^3} \quad (3)$$

この実験で, ゲートが開放された瞬間の, 流れが未だ生じていない時刻には, 密度界面は鉛直であり密度勾配は図-6(a)のように模式化される²⁸⁾. この圧力勾配と密度勾配によりつくりだされる渦度は, 式(3)右辺第2項により, 反時計まわりである. これを図-6(b)に示す. この回転は密度流先端部の循環流の向きと一致している. 以上より, 流動開始直後の渦構造は上記の機構によりつくられるとみてよい. 先端付近の界面が傾斜した領域では本質的には図-6と同様の圧力勾配・密度勾配となっており, 継続

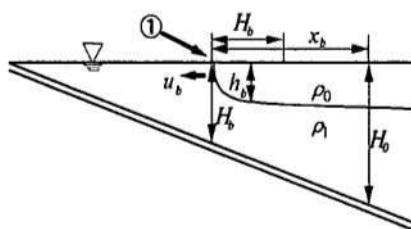
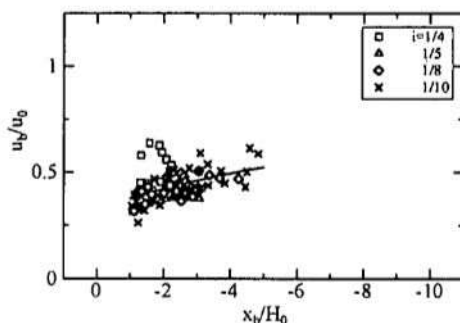
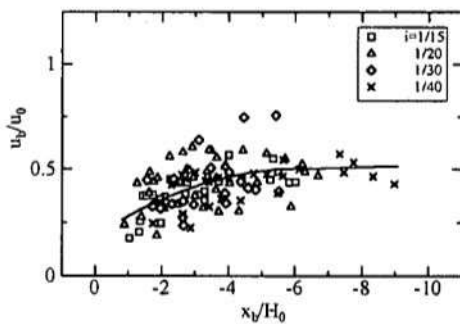


図-7 潜り点近くの諸量の定義



(a) $i \geq 1/10$



(b) $i \leq 1/15$

図-8 潜り点の移動速度

して渦度を生成する.

(2) ゲート上流部の流況

前節でみたように, ゲート上流部の流れは上層流体による表面補償流である. この流れを記述するため, ゲート位置より上流部の流れの諸量を図-7のように定義する. すなわち, ゲート位置を原点とし, ここでの水深を H_0 , 上層水と下層水の境界線と水面の交点を潜り点①, ゲートから潜り点までの距離を x_b , 潜り点の水深を H_b , その進行速度を u_b とする. この流れの先端厚さを h_b とするが, これは次のように定義した. すなわち, 潜り点から H_b 下流にとった長さにあたる上層流厚さの平均を h_b とした.

a) 潜り点の移動

図-8は底面勾配 i をパラメータとして潜り点の移動

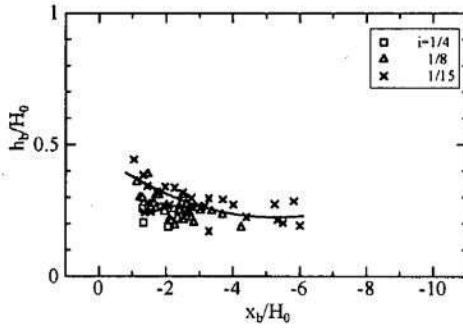


図-9 h_b/H_0 の変化

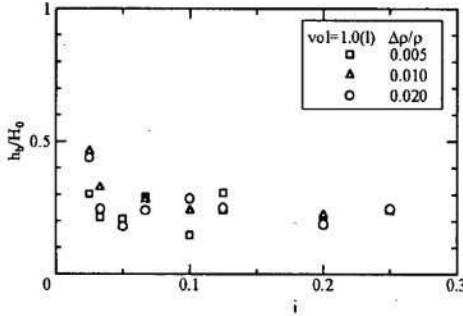


図-10 h_b/H_0 と勾配 i の関係

速度 u_b の変化を無次元形で示す。図中の u_0 は速度スケールであり、 $u_0 = (g'H_0)^{1/2}$ である。x を流下方向にとっているため、図では x_b を負値で表現している。また、勾配が同一で密度差や塩水供給体積の異なる実験を同じ記号でプロットしている。それによると多少のデータの散乱はあるが、いずれの条件でも u_b/u_0 は増加して 0.5 程度の一定値に漸近している。 $u_b/u_0 \sim x_b/H_0$ の関係の回帰式は次のようである。

i) $i \geq 1/10$

$$u_b/u_0 = -0.0028(x_b/H_0)^2 - 0.0540(x_b/H_0) + 0.325 \quad (4a)$$

ii) $i \leq 1/15$

$$u_b/u_0 = -0.0085(x_b/H_0)^2 - 0.1039(x_b/H_0) + 0.186 \quad (4b)$$

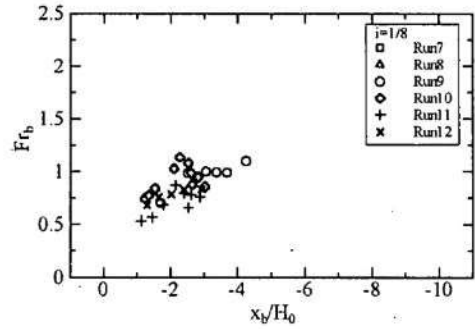
$$[-6.1 \leq (x_b/H_0) \leq -0.9]$$

$$u_b/u_0 = 0.503 \quad (4c)$$

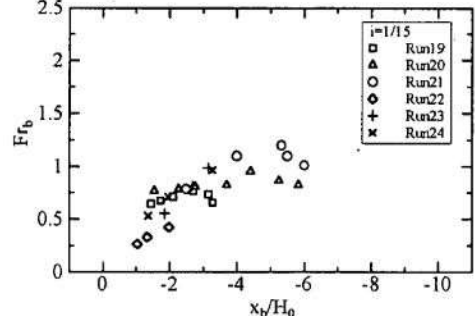
$$[-9.0 \leq (x_b/H_0) < -6.1]$$

b) 上層流の先端厚さ

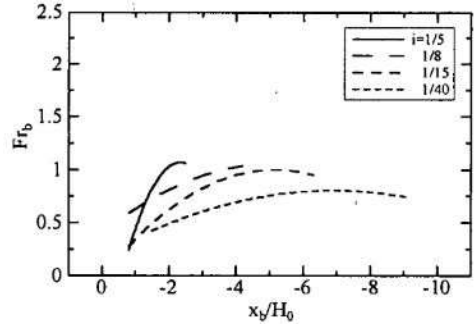
前記のように定義した上層流先端厚さは本実験では大体 0.5cm~2.5cm 程度であり、ビデオ撮影の結果から求めた関係で値の小さいものについてはある程度の誤差は免れない。緩勾配ではゲート近くの水深が小さいため、この影響は緩勾配の条件で大きい。図-9にはデータの散



(a) $i=1/8$



(b) $i=1/15$



(c) 回帰曲線

図-11 Fr_b の変化

乱の少ない $i = 1/4, 1/8, 1/15$ のケースで得られた上層流先端厚さ h_b と潜り点位置 x_b の関係をゲート位置水深 H_0 で無次元化して表示している。また、図-8と同様に底面勾配 i をパラメータとして示している。図より、初期塩水体積と初期相対密度差によらず、無次元化された上層流先端厚さは 0.5 程度の値から減少し、0.2~0.3 に漸近している。

図中の曲線は図中のデータに対する回帰曲線で、その式形は次のようである。

$$h_b/H_0 = 0.0085(x_b/H_0)^2 + 0.0895(x_b/H_0) + 0.460 \quad (5)$$

次に、無次元化された上層流先端厚さ h_b/H_0 の漸近値の実験条件による変化を調べた。その結果を図-10に示す。勾配が最も緩やかなケースを除くと h_b/H_0 は 0.2~0.3 程度の

表-2 式(7)の係数 (Fr_b)

$i \setminus$ 係数	a	B	c
1/5	-0.353	-1.649	-0.856
1/8	-0.0250	-0.257	0.398
1/15	-0.0383	-0.395	-0.013
1/40	-0.0130	-0.180	0.183

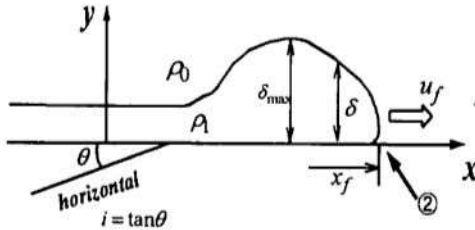


図-12 先端部諸量の定義

値となっている。勾配が緩やかなケースの挙動については今後検討したい。

c) 上層流先端部の密度フルード数

ここでは上層流先端部の密度フルード数 Fr_b は、上層・下層の密度差を $\Delta\rho$ として次式で定義した。

$$Fr_b = u_b / \sqrt{g \cdot h_b \cdot \Delta\rho / \rho} \quad (6)$$

底面勾配 i をパラメータとして、潜り点の移動にもなる Fr_b の変化を図-11に示す。 Fr_b は増加しながら一定値に漸近するようである。漸近値は水路勾配、初期塩水体积、初期相対密度差にはほぼ無関係に1程度である。このことは、上層流は重力と慣性力がほぼバランスしていることを示唆している。また、データの散乱が少ない $i = 1/5, 1/8, 1/15, 1/40$ に対して回帰式を次の2次式で求めた。

$$Fr_b = a(x_f / H_0)^2 + b(x_f / H_0) + c \quad (7)$$

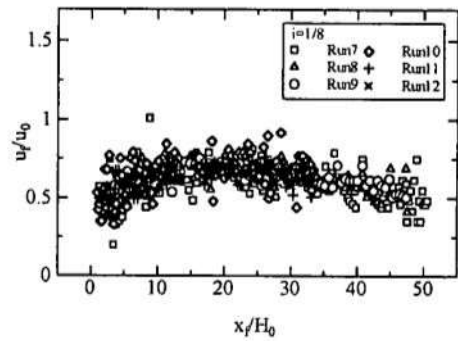
各勾配に対する係数 a, b, c の値は表-2のようであり、勾配が急な程、 Fr_b は急速に漸近値に近づくことがわかる。

(3) 下層流先端部の流況

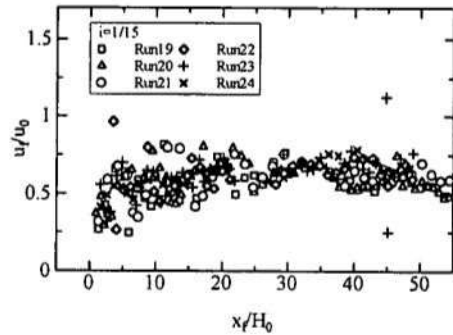
下層流先端部の特性を記述するため、先端部の諸量を図-12のように定義する。すなわち、先端を②とし、ゲート位置から先端までの距離を x_f 、先端移動速度を u_f 、最大流動厚さを δ_{max} とする。

a) 先端移動速度

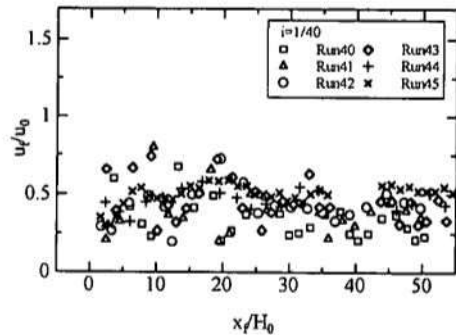
傾斜サーマルの既往の研究²⁹⁾により、傾斜サーマルは流動開始後加速して最大速度に達したのち減速することが明らかにされている。先端移動速度の変化を無次元形で図-13に示す。 u_f / u_0 は漸増して最大値に達した後漸減する。なお、勾配が1/15より急な場合は $u_f / u_0 \sim x_f / H_0$ のプロットは初期塩水体积や初期相対密度差によらず水路勾配



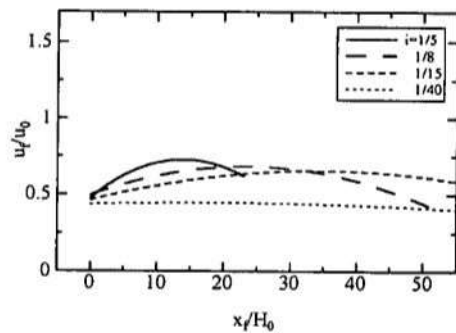
(a) $i=1/8$



(b) $i=1/15$

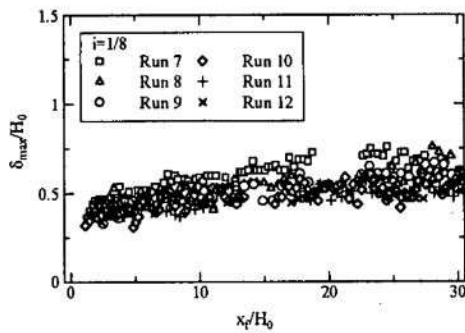


(c) $i=1/40$

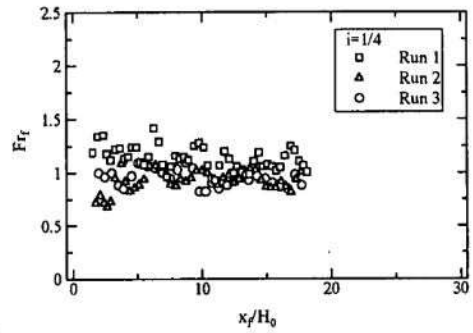


(d) 回帰曲線

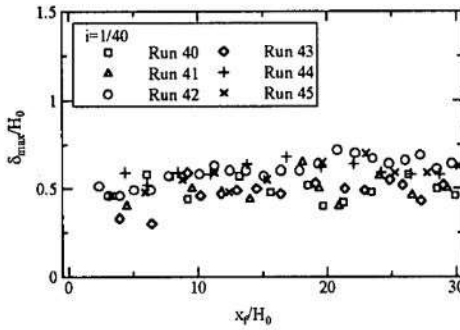
図-13 先端移動速度の変化



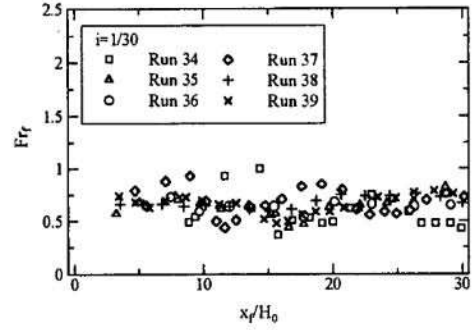
(a) $i=1/8$



(a) $i=1/4$



(b) $i=1/40$



(b) $i=1/30$

図-14 最大厚さの変化

図-16 密度フルード数の変化

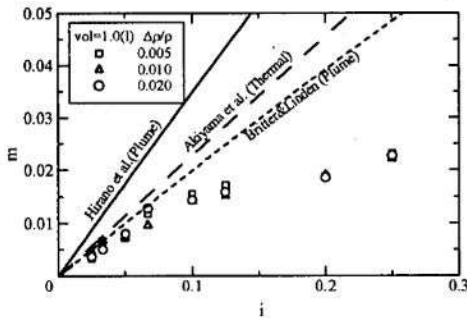


図-15 ふくらみ係数と勾配の関係

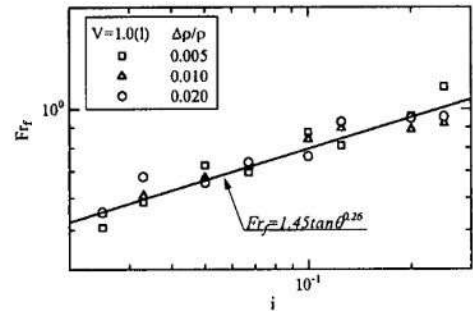


図-17 密度フルード数と勾配の関係

によって決まる1本の曲線にそって分布し、 u_f/u_0 の最大値は0.7程度である。勾配が1/20より緩やかな場合には図のプロットは初期塩水体積や相対密度差の影響が大きく u_f/u_0 の値は小さい。このような勾配による図-13の相違については今後さらに検討が必要である。次に、図中のプロットに対して次式により回帰分析を行った。

$$u_f/u_0 = a(x_f/H_0)^2 + b(x_f/H_0) + c \quad (8)$$

各勾配に対する係数 a, b, c は表-3のようである。回帰分析の結果より、勾配が急な程 u_f/u_0 の最大値を与える x_f/H_0 が小さいことがわかる。

表-3 式(8)の係数 (u_f/u_0)

$i \setminus$ 係数	a	b	c
1/5	-0.00131	0.0363	0.476
1/8	-0.00034	0.0170	0.466
1/15	-0.00016	0.0112	0.463
1/40	-0.00003	0.0010	0.436

b) 先端部最大厚さ

図-14は下層流先端の進行にともなう先端部最大厚さ δ_{max} の変化を無次元形で示したものである。この図に対応する δ_{max} の初期値は勾配1/8では2~3cm, 勾配1/40で1~2cm程度である。また、 H_0 は供給塩水体積と底面勾配により

変化することを付記する。図より、無次元先端最大厚さ δ_{max}/H_0 は0.5程度の値からほぼ直線的に増加する。また、 δ_{max}/H_0 の増加は勾配1/8で確認されるが勾配1/40ではあまり顕著でない。図ではデータが散乱しているが、これは再現性やフロントの進行にともなう変動が反映されているとみられる³⁰⁾。

次に先端部最大厚さの増加率として x/H_0 が0 から20~30程度の間のデータを用いて次式のふくらみ係数 m を求めた。

$$m = d\delta_{max} / dx \quad (9)$$

図-15はふくらみ係数を底面勾配に対してプロットしたものである。図には、秋山ら³¹⁾のサーマルの結果、Britter & Linden³²⁾、および平野ら³³⁾のプルームの結果を記入している。本実験の結果でも底面勾配が急になるとふくらみ係数が増加する。しかしながらその大きさは前記の既往の結果に比べると小さい。特に、急勾配の m は割合としてかなり小さいものとなっている。秋山らや平野らの実験は、水深がある程度深く水表面の影響の小さい条件で行われている。Britter & Linden の実験は密閉された容器内で行われているが、流れが上下の境界壁の影響を受ける状況ではない。それに比べて本実験では水深が浅く、水表面の影響により流動厚さの発達を抑えられ、このため既往の研究結果に比べて m が小さくなっていると考えられる。これは有限水深における傾斜サーマルの流動の1つの性質と考えてよい。

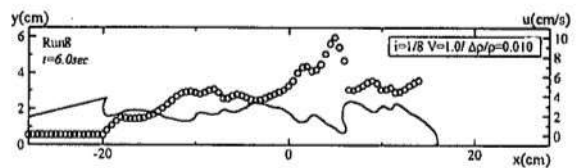
c) 先端部の密度フルード数

先端部最大厚さ δ_{max} と先端移動速度 u_f を用いて先端部の密度フルード数 Fr_f を次式で定義した。

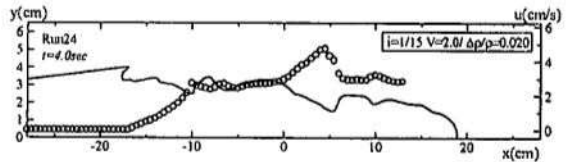
$$Fr_f = u_f / \sqrt{g \cdot \delta_{max} \cdot \Delta\rho / \rho} \quad (10)$$

図-16は上式で定義した先端部密度フルード数の先端移動にともなう変化を示したものである。図-14と同様データは変動しているが、勾配1/4で密度フルード数は1程度の値で、そして勾配1/30では0.6程度の値で推移している。本実験の範囲では x_f/H_0 が10を超えると先端密度フルード数はほぼ一定するようである。傾斜サーマルの既往の研究³⁴⁾により、先端部の密度フルード数はある程度流下するとほぼ一定値で推移することが示されている。図より、水表面の影響のある本実験の測定区間でもその状態が実現されたといえる。次に、密度フルード数が底面勾配によりどのように変化するかを調べた。密度フルード数がほぼ一定となった区間の平均的な密度フルード数を求めて底面勾配に対して図示したものが図-17である。図より、傾斜サーマル流動初期の先端部の密度フルード数は底面勾配とともに増大し、ほぼ次式で与えられる。

$$Fr_f = 1.45 \tan \theta^{0.26} \quad (11)$$



(a) Run8(t=6.0sec)



(b) Run24(t=4.0sec)

図-18 断面平均流速の変化

定義は異なるが、秋山ら³⁵⁾は急勾配なほど傾斜サーマルのオーバーオール・リチャードソン数が小さいことを報告しており、定性的に一致した傾向といえる。ただし、流動厚さの定義が異なることなどのため、秋山らの結果との比較は行わない。

(4) 断面平均流速の縦断分布

下層密度流先端部や傾斜サーマルの初期流動においては断面平均流速が流下方向にどのように変化しているかは興味深い問題である。ここでは、界面形状の時間的変化から断面平均流速の分布を推定することを試みる。静止状態から始まる密度流流動初期の遅い流れを対象とし、簡単のため進行を無視する。図-12の定義に従い下層流の単位幅流量を q とすると、連続式は次のようである。

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

式(12)を変形して次式を得る。

$$q = -\int_{x_0}^x \frac{\partial \delta}{\partial t} dx + q_0 \quad (13)$$

ここで、 q_0 は基準位置 x_0 での q である。進行がない場合、 δ の x 積分(下層の単位幅体積)が時間的に一定に保たれることになる。また、 δ, q および断面平均流速 u は時間的にも場所的にも変化する。微小な時間間隔で密度境界面の形状データを密に採取すれば、各時刻・各地点において $\partial \delta / \partial t$ 値を求めることができ、その総和として q を得ることができる。こうして求めた q と流動厚さ δ の測定値を用いて断面平均流速を次式により推定する。

$$u = q / \delta \quad (14)$$

図-18は以上のプロセスにより求めた断面平均流速の分布を密度界面の形状とともに示した例である。密度界面のデータを流下方向に0.5cm間隔、時間間隔0.5秒でサンプリングし、 x 方向に3点移動平均を施したのち処理している。図によると、断面平均流速は潜り点でのゼロか

ら徐々に増大し、フロント部後端のくびれの部分で最大値を示してそれより前方ではより小さなほぼ一定な値となっている。また、図は省略するが図-18の下層流のくびれ部分で q が増大していることが確かめられている。ただし、傾斜した境界面が移動する非定常流であるため、上記の q の増大が連行によると断定することはできない。なお図では最先端近くで密度界面の勾配が急な部分で速度が急増するようであり、今後より詳細な検討が必要である。

4. 結語

以上、傾斜サーマルの初期流動について実験的な検討を行った。本研究で得られた主要な結果は以下の通りである。

- (1) 傾斜サーマルの初期流動は、初期塩水体積と初期相対密度差から決まる時間、長さおよび速度のスケール、そして底面勾配により表現される。また、初期塩水体積と初期相対密度差の効果をレイノルズ数 Re_0 としてまとめることができた。
- (2) 流動形態は、図-4に示す3つのパターンに分類され、その遷移時刻は、水路勾配と供給塩分により決まるレイノルズ数により整理される。
- (3) 速度スケールで無次元化された上層補償流の先端速度は0.5程度に漸近し、同じく無次元下層先端速度は漸増して0.7程度に達した後、漸減する。これらの回帰式として式(4)と式(8)を得た。
- (4) 上層流先端の厚さはゲート位置水深の0.2~0.3倍、密度フルード数は1程度である。この回帰式として式(5)と式(7)を得た。
- (5) 水面の影響のある下層密度流の先端最大厚さの増加率は影響のない場合より小さい。
- (6) 下層流先端部の密度フルード数は、ある程度流下するとはほぼ一定となり、その値は底面勾配が急なほど大きい。その式表現として式(11)を得た。
- (7) 密度界面形状の時間変化から下層流の断面平均流速を推定し、リーズナブルな結果を得た。

今後は以上の知見を貯水池流入部での濁水の挙動と関連づけて検討したい。

謝辞：本研究に際し、九州大学名誉教授、平野宗夫先生に御指導、御助言を賜った。また、データ解析において山口大学卒研究生、田村宜史(日本舗道(株))、中園康二(山口大学大学院理工学研究科)、中田和秀(前田道路(株))の諸氏の熱心な協力を頂いた。実験装置製作において河元信幸技官の協力を頂いた。また、論文審査員の方々に

は貴重なご議論を賜った。ここに記して深甚の謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) Haward, C.S. : Density currents in Lake Mead, Proc. of 5th Congress of IAHR, Minnesota, 1953.
- 2) 安芸周一：貯水池濁水現象, 1975年度水工学に関する夏季研修会講義集, Aコース, 1975.
- 3) Turner, J.S. : *Buoyancy Effects in Fluids*, Cambridge University Press, p.178, 1973.
- 4) Gryning, S.E., Mahrt, L. and Larsen, S. : Oscillating nocturnal slope flow in a coastal valley, *Tellus*, 37A, 2, pp.196-203, 1985.
- 5) Keunen, P.H.H. and Migliorini, C.I. : Turbidity currents as a cause of graded bedding, *J. of Geol.* 58, 91, 1950.
- 6) Middleton, G.V. : Experiments on density and turbidity currents, I. Motion of the head, *Canadian J. of Earth Science*, Vol.3, pp.523-546, 1966.
- 7) Heezen, B.C. and Ewing, M. : Turbidity currents and submarine slumps, and the 1929 Grand Banks earthquake, *Am.J. Sci.*, 250, 1952.
- 8) Chu, F.H., Pilkey, W.D. and Pilkey, O.H. : An analytical study of turbidity current steady flow, *Marine Geology*, 33, 1979.
- 9) 芦田和男, 江頭進治, 中川一：傾斜路床上における泥水塊の挙動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第24号, B-2, pp.265-282, 1981.
- 10) Parker, G., Fukushima, Y. and Pantin, H.M. : Self-accelerating turbidity currents, *J.Fluid Mech.*, 171, pp.145-182, 1986.
- 11) 平野宗夫, 羽田野袈裟義：密度流先端部の流動特性について, 土木学会論文報告集, 第314号, pp.67-73, 1981.
- 12) Hirano, M., Hadano, K., Akiyama, J. and Saitou, T. : Activation and degeneration of turbidity currents, Proc. of Int'l. Symposium, HY & IR Div., ASCE. pp.639-644, 1990.
- 13) Beghin, P., Hopfinger, E. J. and Britter, R.E. : Gravitational convection from instantaneous sources on inclined boundaries, *J. Fluid mech.*, Vol.107, pp.407-422, 1981.
- 14) 芦田和男, 江頭進治, 中川一：密度流先端部の解における相似理論の適用性, 京都大学防災研究所年報, 第25号, B-2, pp.1-17, 1982.
- 15) 平野宗夫, 羽田野袈裟義, 大日照憲, 外村健司：Inclined Thermal の流動特性について, 第27回水理講演会論文集, pp.103-108, 1983.
- 16) Lavel, A., Cremer, C., Beghin, P. and Ravenne, C. : Density surges: two-dimensional experiments, *Sedimentology*, Vol. 35, pp. 73-84, 1988.
- 17) Liu, Q., Schlapfer and Buhler, J. : Motion of dense thermals in incline, *J. of Hydraulic Eng.*, Vol. 117, No. 12, pp1588-1599, 1991.

- 18) 福嶋裕介, 早川典生, 備前亨: 三次元傾斜サーマルの流動特性, 土木学会論文集, 第473号/II-24, pp. 17-24, 1993.
- 19) 羽田野袈裟義, 平野宗夫, 李寅鉄, 楊永萩: 密度流先端部の発達過程に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第527/II-33, pp.15-26, 1995.
- 20) 秋山壽一郎, 浦勝, 富岡直人, 今宮盛雄: 保存性2次元傾斜サーマルの流動特性の予測, 水工学論文集, 第42巻, pp.555-560, 1996.
- 21) 秋山壽一郎, 浦勝, 齊藤俊一郎, 富岡直人: 傾斜重力密度流の進行係数に関する統一的考察, ながれ, 16, pp.149-161, 1997.
- 22) 秋山壽一郎, 浦勝, 富岡直人, 末広裕志: 緩斜面上におけるサーマルの流動特性について, 水工学論文集, 第42巻, pp. 511-516, 1998.
- 23) 福嶋裕介, 萩原達司: 浮遊傾斜サーマルの減速域の流動特性, 水工学論文集, 第42巻, pp. 517-522, 1998.
- 24) Fukushima, Y.: Numerical simulation of gravity current front, J. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 124, No.6, pp. 572-577, 1998.
- 25) Barr, D.L.H.: Densimetric exchange flow in rectangular channels III. Large scale experiments, La Houille Blanche, 22, pp.619-632, 1967.
- 26) 福岡捷二, 木村和正, 加納敏行: 密度流先端部の流動機構に関する研究, 土木学会論文報告書, 第274号, pp.41-55, 1978.
- 27) Bonnecaze, R. T., Huppert, H.E. and Lister, J.R.: Particle-driven gravity currents, J. Fluid Mech., vol.250, pp.339-369, 1993.
- 28) Gill, A.E.: *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academic Press, Inc., pp.237-238, 1982.
- 29) 前出文献 13), 15), 20) など
- 30) 前出文献 11), 21), 26) など
- 31) 前出文献 21)
- 32) Britter, R.E. and Linden, P.F.: The motion of the front of a gravity current travelling down an incline, J. Fluid Mech. Vol.99, pp.531-543, 1980.
- 33) 前出文献 11)
- 34) 秋山壽一郎, 浦勝, 富岡直人, 中西弥生: 斜面上のサーマルとブリューム先端部の流動特性の相違に関する理論的考察, 水工学論文集, 第42巻, pp.523-528, 1998.
- 35) 前出文献 21)

(1999. 3. 8 受付)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE INITIAL MOTION OF THE INCLINED THERMAL

Kesayoshi HADANO, Masato YANO, Haruhiko MATSUMOTO and Koji ASAI

Exchange flow of saline and fresh waters on the sloping bottom has been experimentally studied. Both underflow along the bottom and the compensating upper flow are treated. It has been found that the initial motion of inclined thermal is well described by bottom slope and scales of time, length and velocity determined by the initial volume and initial density excess of saline water. The growth rate of the maximum depth of underflow in this experiment is fairly smaller than that of the flow in which the influence of water surface is negligible. Densimetric Froude number of the front of underflow is almost constant, and the value increases as the bottom slope becomes steeper. Densimetric Froude number of the compensating upper flow is about one, and the depth is 0.2-0.3 times the depth of gate position. The direction of circulation inside the density front is explained dynamically.