

# 緩斜面上におけるサーマルの流動特性について

## FLOW CHARACTERISTICS OF THERMALS OF LOW SLOPE ANGLES

秋山 壽一郎<sup>1</sup>・浦 勝<sup>2</sup>・富岡 直人<sup>3</sup>・末広 祐志<sup>3</sup>

Juichiro AKIYAMA, Masaru URA, Naoto TOMIOKA and Yushi SUEHIRO

<sup>1</sup>正会員 Ph.D. 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804北九州市戸畑区仙水町1-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (同上)

<sup>3</sup>学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程 (同上)

Flow characteristics of miscible conservative two-dimensional thermals on slope angles ranging from  $1^\circ$  to  $5^\circ$  are investigated experimentally. It is found that, in the range, the total buoyancy force within the thermal body is less than 50% of initial total buoyancy force and that larger total buoyancy force remains within the thermal body with larger slope angle. With use of a large number of experimental data, such important gross flow characteristics as the spatial growth rate of maximum height, entrainment function and others are quantified as functions of bottom slope angles. These flow characteristics indicate that the motion of the flow changes its characteristics in a slope angle between  $1^\circ$  and  $3^\circ$ .

*Key Words: density current, gravity current, inclined thermal, low slope angle*

### 1.はじめに

周囲流体より重い流体が傾斜面上に瞬間的に放出されると、斜面に沿って流下発達し、傾斜サーマル (Inclined Thermal) を形成する。傾斜サーマルは、粉雪雪崩などの自然災害問題のみならず、貯水池・湖への流入濁水や埋め立て工事による濁りの発生などの水質環境問題とも深く関わっており、その流動特性を明らかにすることは工学的に重要である。

傾斜サーマルに関する研究は、水理学や流体力学の分野にとどまらず、気象学や地質学などの幅広い分野においてこれまで活発に進められてきた。2次元傾斜サーマルについては、例えば、Beghin et al.<sup>1)</sup> は、塩水を用いた保存性傾斜のサーマルの形状、最大層厚変化率、移動速度、連行係数などの特性量と底面傾斜角度 $\theta$ との関係を $\theta=5\sim90^\circ$ の範囲で理論的・実験的に明らかにしている。Hopfinger and Tochon-Danguy<sup>2)</sup> は、斜面上に堆積した雪の連行を考慮した簡単な雪崩の理論を提案し、 $\theta=20^\circ$ の場合について移動速度および最大層厚について比較検討を加えている。平野ら<sup>3)</sup> は、 $\theta=11.7^\circ$ の塩水サーマルの塩分濃度分布などを調べるとともに特性の理論に基づく理論の適用性について検討を加えている。また、芦田ら<sup>4)</sup> は、 $\theta=0.286^\circ$ 、 $0.573^\circ$  および  $0.955^\circ$ 、Laval et al.<sup>5)</sup> は、 $\theta=1\sim7^\circ$ の緩斜面上の

微細粒子を用いた堆積性濁水サーマルを対象とし、その最大層厚変化率、移動速度、流下方向の堆積量、濃度分布などについて調べている。さらに芦田ら<sup>4)</sup> は、相似理論に基づく濁水塊モデルの適用性についても検討を加えている。Liu et al.<sup>6)</sup> は、塩水ならびに温度差を用い、 $\theta=1\sim3^\circ$ の緩斜面上のサーマル内部の温度分布を明らかにするとともに仮想原点の位置について考察を加えている。秋山ら<sup>7), 8), 9)</sup> は、傾斜角度 $\theta=5\sim90^\circ$ の範囲における保存性2次元傾斜サーマルの主要な流動特性量を普遍的に定量化するとともに抵抗係数を考慮した理論モデルの適用性について検討している。

これらのうち、芦田ら<sup>4)</sup>、Laval et al.<sup>5)</sup> および Liu et al.<sup>6)</sup> の研究は、いずれも緩斜面上の2次元サーマルを対象としたものではあるが、緩斜面上のサーマル特有の現象や流れの特性について調べたものではない。著者の知る限り、 $5^\circ$ 以下の傾斜サーマルの流動特性について触れた唯一の研究は、Beghin et al.<sup>1)</sup> のものである。そこでは、その流動特性について定量的な検討が加えられているわけではないが、 $\theta=0\sim5^\circ$ の低傾斜角度でサーマル的な特性から水平面上の重力密度流先端部的な特性へと遷移するのではと推論している。また、著者ら<sup>8)</sup> は初期総浮力が流下方向へ保存されると仮定し、 $\theta=5\sim90^\circ$ で流れの平衡状態におけるOverall Richardson数 $R_i$ を実

験的に算定し、 $R_i$ が $\theta$ に対して線形的に減少することを明らかにしたが、 $\theta=5^\circ$ での $R_i$ 数が $\theta>5^\circ$ の値と比べて異常に大きな値を示しており、このことから、緩斜面上のサーマルでは流動特性に何らかの違いが生じていると推察される。

本研究は、以上のような事実を踏まえ、 $\theta=5^\circ$ 以下の緩斜面上における2次元傾斜サーマルの流動特性について実験的に検討を加え、特性量の定量化を行なうとともに、相似性に基づくサーマル理論の適用性についても論じたものである。

## 2. 実験装置および条件

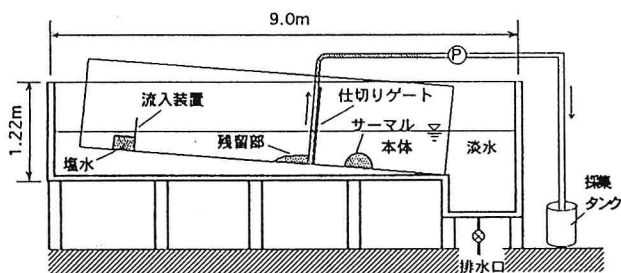


図-1 実験装置

実験装置は、図1に示すように長さ9.0m、深さ1.22m、幅0.6mの大型水槽内部に長さ7.5m、深さ1.0m、幅0.2mの両面アクリル製の可変勾配水路を設置したものである。水路上流端には放流ゲート付きの流入装置が設置されており、ゲートを瞬間的に引き上げることで、流入装置内部に満たされたウランで着色した初期密度 $\rho_0$ の塩水を初期単位幅体積 $\Lambda_0$ で一様密度 $\rho_a$ の静止した周囲水中に瞬間的に流入させ、傾斜角度 $\theta$ の斜面上に重心移動速度 $U$ で流下する平均密度 $\rho$ のサーマルを形成させた。

保存性2次元傾斜サーマルの流動形態は、周囲流体が静止かつ一様密度の状態では、初期単位幅体積 $\Lambda_0$ 、初期相対密度差 $\varepsilon_0(=\rho_0-\rho_a)/\rho_a$ などの流入条件と底面傾斜角度 $\theta$ によって規定される。そこで、 $\Lambda_0$ と $\varepsilon_0$ はそれぞれ $\Lambda_0=10\text{cm}^2$ と $\varepsilon_0=0.08, 0.10, 0.12$ とし、 $\theta$ は $1^\circ, 3^\circ$ および $5^\circ$ の3通りに変化させ実験を行なった。その際、各 $\theta$ においてできるだけ発達した流れの領域を得られるように $\Lambda_0$ および $\varepsilon_0$ を選定した。

## 3. 流れの観測と実験方法

図2に緩斜面と急斜面におけるサーマルの流況の一例を示す。緩斜面上のサーマルでは、循環流が弱いため、サーマル後方の残留塩水をサーマル内部に取り込むことができず、傾斜ブルーム後続部のような残留部が明確に見られることが特徴である。

そこで、サーマル後部に取り残された残留塩水の状況を知る目的で、サーマル最大高さの3割の位置で塩分濃度をオイラー的に導電率計を用いて計測した。その一例を図3に示す。図中ではサーマル本体の区間をサーマル本体の通過時間として示してある。また、測定点の座標 $(x, y)$ も示してある。同図より、

(1)サーマル内部の混合作用が弱いため、内部の相対密度差が一様でないこと、(2)サーマル本体の後方ではかなりの量の塩水が残留しており、その量は相対的に低角度の方が多いこと、(3)サーマル本体後部で $\varepsilon$ が急激に減少しており、その減少率が傾斜角度の増大とともに大きくなっていることから、周囲水の連行が主にサーマル後端部で行なわれており、低角度の方が連行がより弱いこと、などの低傾斜角度におけるサーマルに特有の興味深い特徴が認められる。

そこで、サーマル本体の有効重力の保存状況を定量的に調べる目的で、次のような実験を行った。図1に示すように水路内の所定の位置に仕切りゲートを設置し、サーマル本体が通過すると同時にゲートを瞬間的に降ろし、サーマル本体とそれより後方の残留塩水とを分離した。その際、サーマル本体のくびれた部分で分離した。その後、ゲートによってプールされた残留塩水をポンプで丁寧に採集タンクに回収し、その塩分濃度と体積を導電率計で測定し、残留塩分を求めた。その際、傾斜サーマルは一過性の非定常流れであるので、水路中の1ヵ所にゲートを設置し、同一条件下で3回の繰り返し実験を行いデータの信頼性を高めるとともに、ゲートの設置点を移動させ同一条件下で5回の実験を行ない、残留塩分の流下方向変化を求めた。

また、サーマルの移動速度と同じ速度でVTRカメラを移動させ、高性能のVTR(Hi8、SONY)に収録された画像の解析を行なうことにより、サーマルの形状ならびに重心移動速度 $U$ を求めた。図4に傾斜サーマルの定義図を示す。

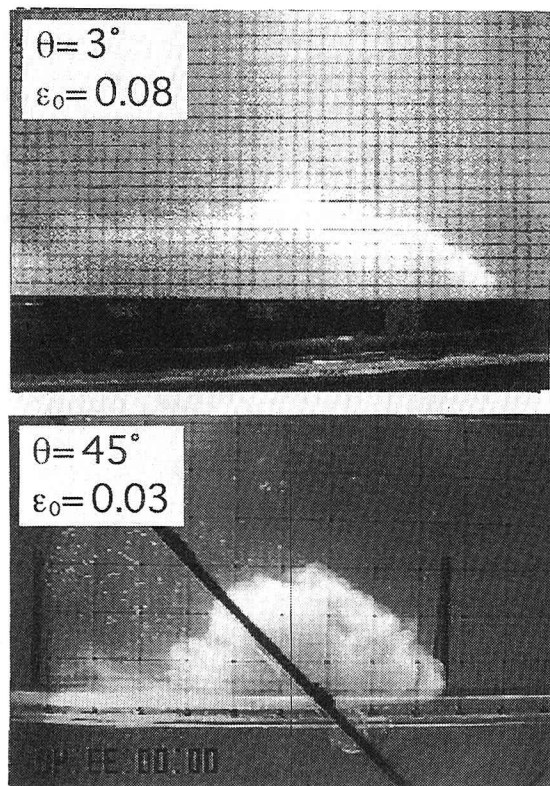


図-2 流況の一例(上：緩斜面 下：急斜面)

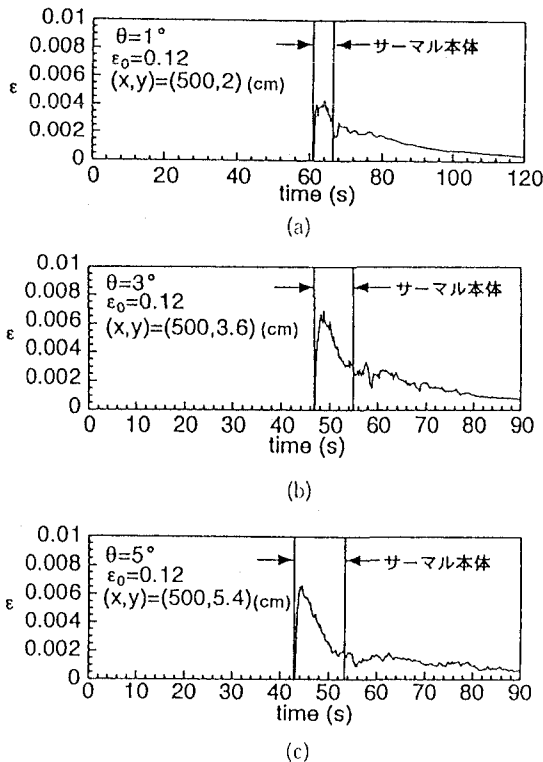


図-3 導電率計の出力結果の一例  
((x,y)は測定位置を示す)

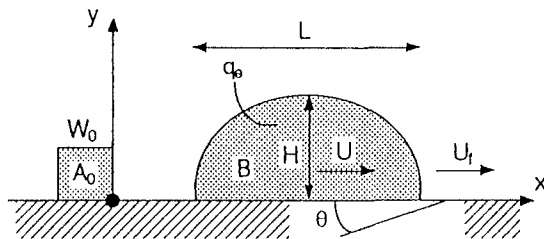


図-4 傾斜サーマルの定義図

#### 4. 実験結果

緩斜面上のサーマルでは、図3で見たように初期総有効重力 $W_0 (=A_0 \varepsilon_0 g)$ が流下際に際して保存されないことが大きな特徴であるが、それが流動特性にどのような差異を生じるのかについて以下で検討する。その際、 $\theta \leq 5^\circ$  の流動特性を $\theta > 5^\circ$  の場合<sup>8)</sup>と同様な方法で算定するのではなく、形状や重心移動速度 $U$ は画像解析から得られる情報に基づき定量化を行い、断面平均浮力 $B$ やOverall Richardson数 $R_i$ は上述した総有効重力の保存状況に関する実験結果と画像解析から得られる情報に基づき、 $W_0$ の非保存性を考慮した上で、特性量の定量化を行なった。

##### (1) サーマル本体の有効重力 $W$ と初期有効重力 $W_0$ との比 $W/W_0$ の流下方向の変化

図5は $\varepsilon_0 = 0.08$ の場合のサーマル本体の総有効重力 $W$ と初期総有効重力 $W_0$ の比である $W/W_0$ と流下距離 $x$ との関係を調べたものである。全体的に $x$ が増

加しても、 $W/W_0$ はほぼ一定に保たれることや $\theta$ が小さいほど $W/W_0$ が小さくなっていることが認められる。いずれにせよ、サーマル内部の総有効重力 $W$ は50%以下であり、予想以上に多くの塩分がサーマル後方に取り残されていることがわかる。

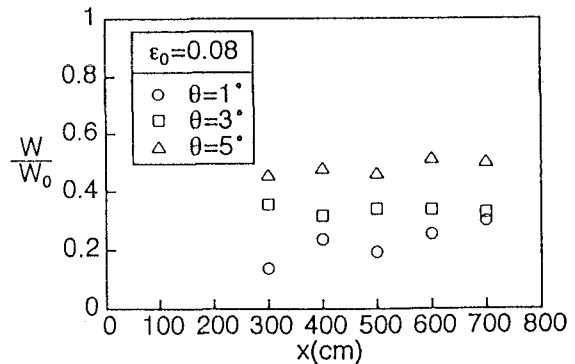


図-5 傾斜サーマルの総有効重力と初期総有効重力との比 $W/W_0$ の流下方向変化

##### (2) Overall Richardson数 $R_i$ の流下方向の変化

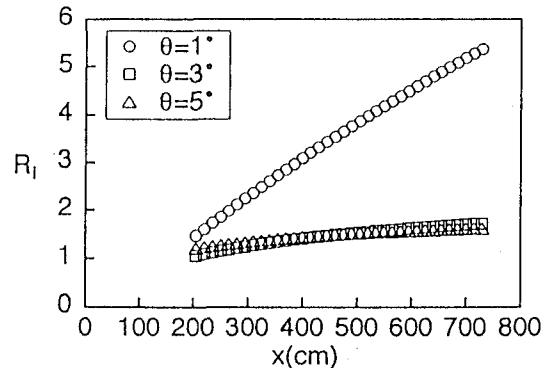


図-6  $R_i$ と $x$ との関係

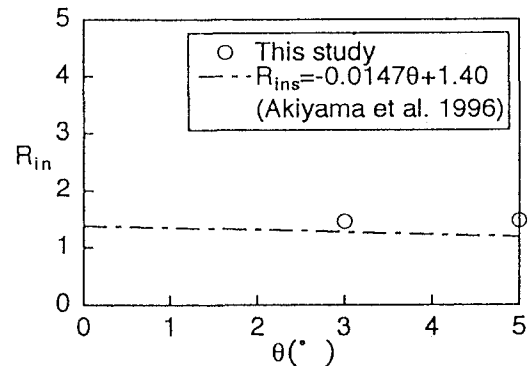


図-7  $R_i$ と $\theta$ との関係

傾斜サーマルのOverall Richardson数 $R_i$ を式(1)で定義する。

$$R_i = \frac{FW \cos \theta}{S_i U^2 H} \quad (1)$$

ここに、 $F$ と $S_i$ はそれぞれ式(2)と(3)で定義される断面アスペクト比、断面面積比である。

図6はサーマル内部の総有効重力Wを用いて算定された $R_i$ 数と流下距離 $x$ との関係を調べたものである。 $\theta=3^\circ$  および $5^\circ$  では、 $\theta>5^\circ$  の場合と同様に $R_i$ 数が $x$ についてほぼ一定となる傾向が認められる。しかし、 $\theta=1^\circ$  ではそのような傾向が認められず、 $\theta=1\sim3^\circ$  において $R_i$ 数の挙動の変化が生じると推察される。図7は $R_i$ 数がほぼ一定となった十分に発達したサーマルのOverall Richardson数 $R_{in}$ と $\theta$ との関係について調べたものである。ただし、 $\theta=1^\circ$  では $R_i$ 数が一定とならないので、そこでの $R_i$ 数は図中に表示していない。また、同図には $\theta>5^\circ$  に対して得られた関形式を外挿したものを一点鎖線で示してある。同図から明らかなように、 $\theta>5^\circ$  と $\theta\leq5^\circ$  での $R_{in}$ 数とを比較すると、著しい差異が認められないことがわかる。

従って、 $\theta=1^\circ$  での特性量をサーマル的に定量化することはできないと考えられるが、比較検討のために、 $\theta=1^\circ$  と $\theta=3\sim5^\circ$  および $\theta>5^\circ$  における各特性量の違いについて定量的に調べることにする。

### (3) 形状および形状係数( $S_1$ 、 $F$ )

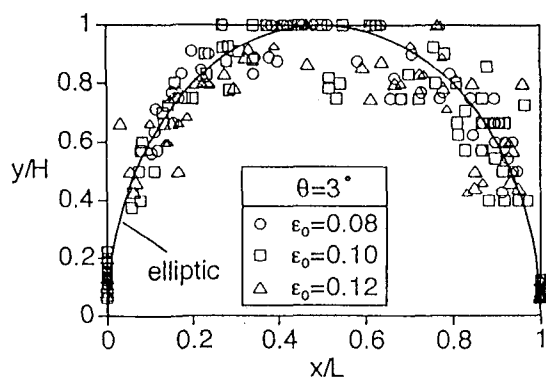


図-8 無次元サーマル形状

図8は $\theta=3^\circ$  での無次元サーマル形状であるが、同図から明らかなように $\theta=3^\circ$  および $5^\circ$  では、流入条件にかかわらず半楕円形状の相似形を有することがわかった。しかし、 $\theta=1^\circ$  ではややばらつきが大きく、必ずしもそのような関係が良好に成立しないことがわかった。また、図6より明らかなように、 $\theta=1\sim3^\circ$  において流動現象に変化が生じていると考えられるので、以下では、 $\theta=1^\circ$  のデータは除外して特性量の定量化を行なっている。なお、添字の $m$ と $s$ はそれぞれの緩斜面と急斜面を表す。

$A$ をサーマルの単位幅体積、 $L$ をサーマルの長さとして、形状係数 $S_1$ と断面アスペクト比 $F$ をそれぞれ式(2)と(3)で定義する

$$S_1 = \frac{A}{HL} \quad (2)$$

$$F = \frac{H}{L} \quad (3)$$

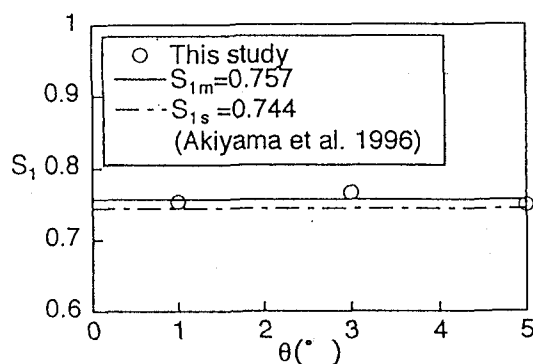


図-9  $S_1$ と $\theta$ との関係

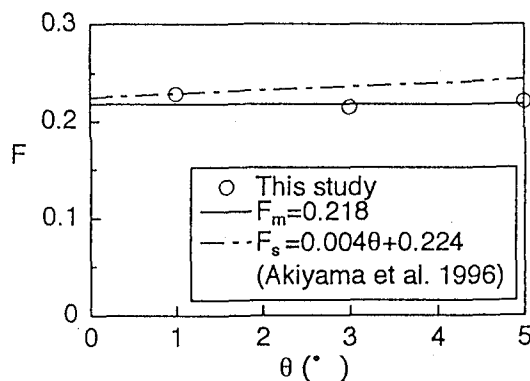


図-10  $F$ と $\theta$ との関係

$S_1$ と $F$ は、図9と10にそれぞれ示すように、 $\theta>5^\circ$  の場合とはほぼ同様な値を取り、式(4)と(5)で近似される。また、 $S_1$ 値は半楕円形状の $S_1$ 値である $\pi/4$ とはほぼ等しいこともわかる。

$$S_{1m} = 0.757 \quad (4)$$

$$F_m = 0.218 \quad (5)$$

$S_1$ については、 $\theta=1^\circ$  と $\theta=3^\circ$  および $5^\circ$  との間に傾向的な違いは認められないが、 $F$ については $\theta=1^\circ$  では若干異なった値となっていることがわかる。

### (4) 無次元断面平均浮力( $B^*$ )

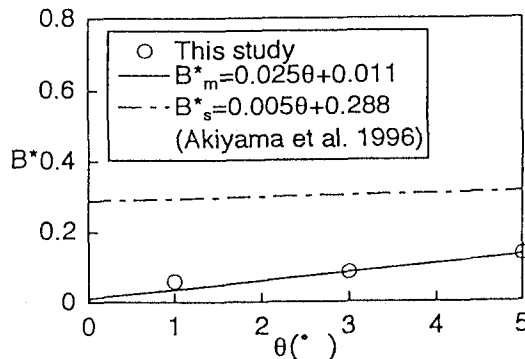


図-11 無次元断面平均浮力 $B^*$ と $\theta$ との関係

ある任意の流下距離 $x$ における断面平均浮力 $B$ は、 $B=W/A$ より求められる。さらに、そこでの最大層厚 $H$ で無次元化することにより、式(6)で定義される無次元断面平均浮力 $B^*$ を算定することができる。そこで、そのようにして求められた $\theta \leq 5^\circ$ での $B^*$ と流下距離 $x$ との関係を調べた結果、 $\theta > 5^\circ$ と同様に $x$ に対して一定となることが認められた。これは、後述するように $H \sim x$ であることから、 $\theta \leq 5^\circ$ においてもやはり $\theta > 5^\circ$ の場合と同様に $B \sim x^{-2}$ なる関係が成立することを示唆している。図11は $B^*$ と $\theta$ との関係について調べたものである。 $\theta \leq 5^\circ$ では $\theta > 5^\circ$ の関係と同様に $\theta$ に対して増加する傾向を示しているが、初期総有効重力 $W_0$ の非保存性を反映して $B^*$ は小さくなっている。なお、 $B^*$ と $\theta$ との関係は式(7)で近似される。

$$B^* = \frac{B}{W_0/H^2} \quad (6)$$

$$B^*_m = 0.025\theta + 0.011 \quad (7)$$

#### (5) 最大層厚変化率( $dH/dx$ )

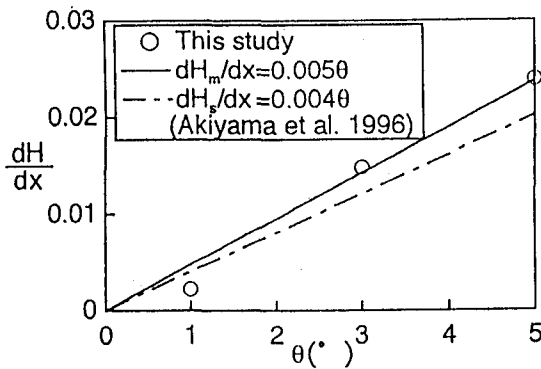


図-12  $dH/dx$ と $\theta$ との関係

最大層厚変化率 $dH/dx$ は、図12に示すように $\theta$ に対して単調に増加し、やはり $\theta=1^\circ$ では傾向がやや異なっている。また、 $\theta > 5^\circ$ と $\theta \leq 5^\circ$ の場合とでは若干の相違が認められる。しかしこの程度の違いは、誤差の範囲と見なすことができよう。同図より $dH/dx$ は式(8)で近似される。

$$\frac{dH_m}{dx} = 0.005\theta \quad (8)$$

#### (6) 無次元重心移動速度( $U^*$ )

式(9)で定義される無次元重心移動速度 $U^*$ と $\theta$ との関係について調べたものが図13である。初期総有効重力 $W_0$ の非保存性に起因してサーマルの駆動力が減少するため、 $\theta \leq 5^\circ$ の $U^*$ の方が $\theta > 5^\circ$ よりも小さくなっている。また、 $\theta=1^\circ$ ではやや傾向が異

なっていることも確認できる。同図より、 $\theta \leq 5^\circ$ での $U^*$ は式(10)で近似できる。

$$U^* = \frac{U}{(W_0/H)^{1/2}} \quad (9)$$

$$U^*_m = 0.030\theta + 0.153 \quad (10)$$

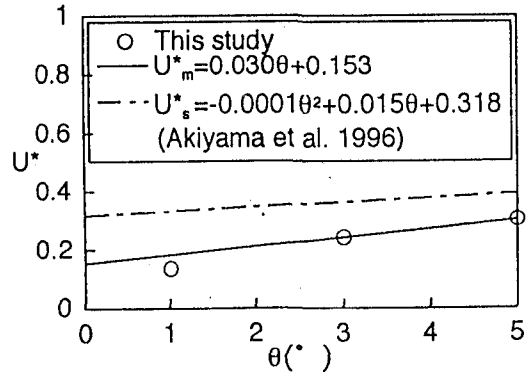


図-13 無次元重心移動速度

#### (7) 連行係数( $E_d$ )

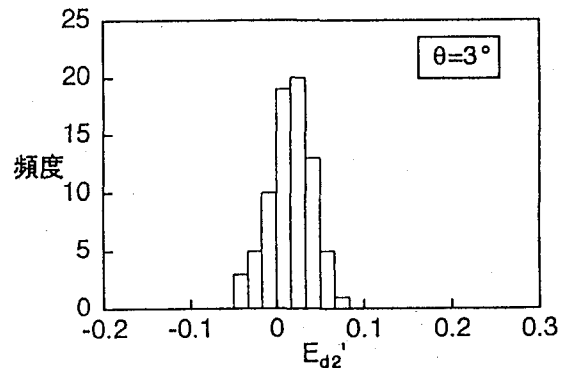


図-14  $E_{d2}'$ の頻度分布

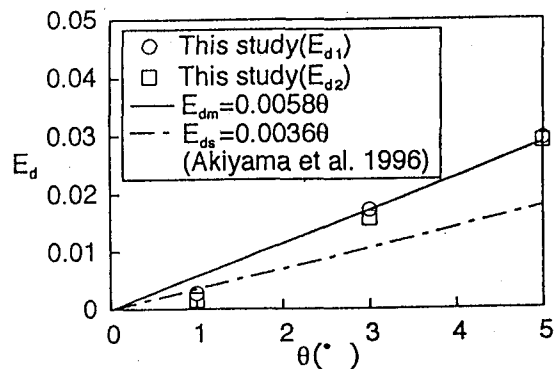


図-15  $E_d$ と $\theta$ との関係

連行係数 $E_d$ を式(11)で定義する。

$$E_d = \frac{q_0}{CU} \quad (11)$$

ここに、 $q_e$ =連行量、 $C$ =サーマルの周囲長(= $S_2\sqrt{HL}$ ) および  $S_2 = (\pi/2)^{3/2} \sqrt{4F^2 + 1/\sqrt{F}}$  である。

$E_d$  値の算定に当たっては、式(12)より算定する  $E_{d1}$  と式(13)より算定する  $E_{d2}$  の2通りの方法を用いた<sup>9)</sup>。

$$E_{d1} = 2 \frac{S_1}{S_2} \frac{dH}{dx} / \sqrt{F} \quad (12)$$

$$E_{d2} = \frac{q_e \sqrt{F}}{S_2 UH} \quad (13)$$

ここで、連行量はフロント断面積  $A$  の時間変化率  $dA/dt$  であるので、経過時間  $\Delta t$  におけるフロント断面積変化量  $\Delta A$  を画像解析より直接算定することにより  $q_e$  を求めることができる。なお、図14に示す  $E_{d2}$  の頻度分布の集合平均を取ったものが、図15中の  $\theta=3^\circ$  における  $E_{d2}$  である。

図15から明らかなように、算定方法が異なるにも関わらず両者はほぼ完全に一致している。また、 $\theta \leq 5^\circ$  と  $\theta > 5^\circ$  のいずれの  $E_d$  も  $\theta$  に対して線形的に増加し、 $\theta \leq 5^\circ$  での  $E_d$  は式(14)で近似できるが、 $\theta \leq 5^\circ$  と  $\theta > 5^\circ$  との  $E_d$  値の間には若干の差異が認められる。また、 $\theta=1^\circ$  と  $\theta=3^\circ$  ならびに  $5^\circ$  では明らかな違いが認められる。

$$E_{dm} = 0.0058\theta \quad (14)$$

## 5. 結論

$\theta=1\sim5^\circ$  の緩斜面上の保存性2次元傾斜サーマルに関する実験研究を行ない、以下のような結論を得た。

- (1) サーマル内部の総浮力  $W$  は流下に伴いほぼ一定値を取るが、いずれの傾斜角度  $\theta$  においても初期総浮力  $W_0$  の50%以下であり、 $\theta$  が小さいほど  $W$  も小さくなっている。これは、 $\theta$  が小さいほど循環流が弱いために残留塩分をサーマル内部に取り込む作用が弱いためであると考えられる。
- (2) 傾斜角度  $\theta=1^\circ$  における  $R_i$  数は一定とはならず、また、一定に近づく傾向も認められない。つまり、 $\theta>1^\circ$  における Overall Richardson 数  $R_i$  は  $\theta \geq 3^\circ$  とは傾向が全く異なり、 $\theta=1\sim3^\circ$  において流動現象の変化が生じていると考えられる。
- (3) 結論(2)と関連して、 $\theta=1^\circ$  と  $\theta=3^\circ$  および  $5^\circ$  との間には流動特性量に明らかな違いが認められる。
- (4) 相似形状に基づくサーマル理論に必要な、相似形状および形状係数 ( $F$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ ) は  $\theta>5^\circ$  における関係と大きな違いはない。しかし、Overall Richardson 数  $R_i$ 、無次元重心移動速度  $U^*$ 、無次元断面平均浮力  $B^*$  および連行係数  $E_d$  などのようなサーマルの内部の総有効重力  $W$  と直接的・間接的に関係

する諸量は、 $\theta=3\sim5^\circ$  と  $\theta>5^\circ$  では傾向的に明らかな違いが認められる。

以上の結果を総合すると、 $\theta \geq 3^\circ$  では  $\theta>5^\circ$  と特性量の傾向に違いが認められるものの、相似形状に基づくサーマル理論を適用することができると考えられる。ただし、初期総有効重力  $W_0$  が保存されないで、この点に留意して理論の構築をする必要がある。また、 $\theta=1^\circ$  ではそのようなサーマル理論は適用できないと考えられる。

謝辞：本研究の一部は、文部省科学研究費、(代表者：秋山壽一郎、課題番号08455232)の援助を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Beghin, P., Hopfinger, E.J. & Britter, R.E.: Gravitational convection from instantaneous sources on inclined boundaries, *J. of Fluid Mechanics*, 1107, pp.407-422, 1981.
- 2) Hopfinger, E.J. & Tochon-Danguy, J.C.: A model study of powder-snow avalanches, *J. of Glaciology*, Vol.19, No.81, pp.343-356, 1977.
- 3) 平野宗夫、羽田野袈裟義、大本輝憲、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.
- 4) 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.
- 5) Laval, A., Cremer, C., Beghin, P. and Ravenne, C.: Density surges: two-dimensional experiments, *Sedimentology*, Vol.35, pp.73-84, 1988.
- 6) Liu, Q., Schlapfer and Buhler, J.: Motion of dense thermals in incline, *J. of Hydraulic Engineering*, Vol.117, No.12, pp.1588-1599, 1991.
- 7) 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40巻、pp.555-560、1996.
- 8) 秋山壽一郎、浦 勝、斎藤俊一郎：保存性2次元傾斜サーマルの流動特性の普遍定量化、水工学論文集、第40巻、pp.549-554、1996.
- 9) 秋山壽一郎、浦 勝、斎藤俊一郎、富岡直人：傾斜重力密度流の連行係数に関する統一的考察、ながれ、第16巻、日本流体力学会、pp.149-161、1997.

(1997.9.30受付)