

三次元傾斜サーマルの流動特性

福嶋祐介*・早川典生**・備前 亨***

本研究では淡水中に塩水による三次元傾斜サーマルを形成させその流動機構を調べた。室内実験により、三次元傾斜サーマルの最大高さ、最大横広がり幅、フロントの流下速度を測定した。水の連続式、塩分濃度の保存式及び運動方程式に加え、サーマルの横広がりを規定する方程式よりなる三次元傾斜サーマルの基礎方程式を提案し、数値積分の結果と実験値を比較したところ、三次元傾斜サーマルの最大高さ、フロントの流下速度について、理論が実測値をよく説明することを示した。

Key Words : inclined thermal, gravity current, front, underflow

1. 序論

周囲流体より密度の大きな流体が斜面上に放出されると下層密度流が形成される。下層密度流は斜面に沿って流下しながら発達するが、流入が連続的であるか瞬間的であるかによって、それぞれ、傾斜プリューム (inclined starting plume) 及び傾斜サーマル (inclined thermal) に大別される。傾斜プリュームは、非定常なフロント部とそれに続く定常部に分けて考えることができる。定常部の流速は一般的にフロントの移動速度に比べて大きいので定常部の流体はフロント部に流入する。このため、傾斜プリュームのフロントの浮力は時間とともに増加する。一方、傾斜サーマルでは浮力は一定に保たれる。この点が傾斜プリュームと傾斜サーマルの大きな違いである。

傾斜サーマルは自然界で数多く観察される。海域や大きな湖で発生する泥水流、山岳地域で発生する粉雪崩、火山の活動に伴う火碎流などである。また、環境問題に関連して、工場の煙突からの排煙、火力発電所あるいは原子力発電所からの温排水、液化天然ガス貯蔵所からの漏出ガスなどの流動がある。これらの流れの原因となる密度差は、溶解性物質、温度差、濁質などで生ずる。これらのうち温度差、濁質は加熱・放熱、巻き上げ・沈降などに依って時間的距離的に変化する非保存性の密度流を形成し、塩分などの溶解性物質は保存性の密度流を形成する。泥水流、粉雪崩、火碎流、温排水などは非保存性の密度流の代表例であり、河口での淡・塩二層流、塩水による密度流などは保存性の密度流の代表例である。これら非保存性及び保存性の密度流のいずれもサーマルを形成する。

傾斜サーマルの幾何学的特性に着目すると、二次元的

なサーマルと、三次元的なサーマルに大別される。二次元傾斜サーマルは、横方向にはほぼ同じ流動機構を有する流れであり、三次元傾斜サーマルは横方向に流動特性が変化する。従来の研究の多くは二次元傾斜サーマルについて行われてきた。Simpson¹⁾は学問分野を超えた広い範囲の密度流について解説を行い、二次元傾斜サーマルの研究の重要性を強調している。Hopfinger and Beghin²⁾は粉雪雪崩への適用を前提として塩水及び硫酸バリウム混合水による二次元傾斜サーマルの実験を行い、その流動特性を詳細に調べている。その結果、傾斜サーマルの形状、周囲水の進行と斜面の傾斜角との関係を求めた。また、密度差が極めて大きい硫酸バリウム混合水と密度差の小さい塩水によるサーマルの比較を行い、二つの流れの流動形態に大きな違いがないことを示している。Beghin et al.³⁾は、鉛直サーマルの理論を二次元傾斜サーマルに発展させた理論を提案し、傾斜角 θ が $5^\circ < \theta \leq 90^\circ$ の範囲でサーマルの運動をシミュレートできることを示している。

福嶋⁴⁾は、Beghin et al.³⁾の理論を拡張し、二次元粉雪雪崩の解析手法を開発した。この理論は、雪粒子が底面を通じて巻き上げ、沈降を生ずることを考慮して質量保存式を導き、さらに乱れエネルギーの収支式をサーマル理論に新たに組み込んだものである。Fukushima and Parker⁵⁾はこの理論を1986年新潟県棚口地区で発生した表層雪崩に適用し、理論がこの雪崩を良好に再現することを示した。また、福嶋、鍵山^{6),7)}は、粉雪雪崩の解析手法を火碎流の理論に発展させ、雲仙・普賢岳で発生した火碎流のシミュレーションを行っている。この理論は粉雪雪崩の理論に温度の影響を考慮したものであり、流れは基本的に二次元である。

一方、粉雪雪崩では横断方向に幅広く発生するもの（これを面発生雪崩という）ばかりでなく、広い斜面上の点源的に発生するもの（これを点発生雪崩という）が

* 工博 長岡技術科学大学助教授 工学部建設系 (〒940-21 長岡市上富岡町 1603-1)

** Ph.D 長岡技術科学大学教授 工学部建設系 (同上)

*** 工修 秋田県技師 (秋田市山王 4-1-1)

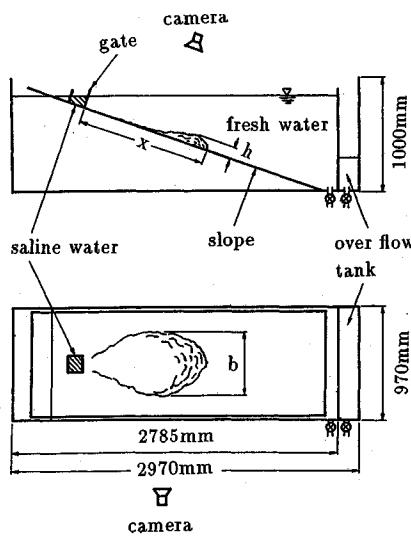


図-1 実験装置

知られている。点発生の雪崩はその流動形態において、本質的に三次元的である。この点から見ても三次元傾斜サーマルの流動特性を明らかにすることの意義は大きいものと考えられる。

以上のようにサーマルの流動特性を知ることによって、自然界で生ずる様々な流動現象を理解する上で多くの基礎知識を得ることができる。しかしながら、前述した実験及び理論はいずれも二次元の条件に限定されており、三次元的なサーマルについてのものではない。本研究では、広い斜面上の三次元傾斜サーマルの運動を明らかにする目的で、淡水中に塩水による三次元傾斜サーマルを形成させその流動機構を室内実験により調べたものである。実験ではフロントの流動特性、最大高さ、最大横広がり幅、フロントの流下速度の時間的变化を測定した。次に従来の二次元傾斜サーマルの基礎方程式を拡張发展させ、三次元傾斜サーマルの基礎方程式系を構築する。この基礎方程式系は、水の連続式、塩分濃度の保存式及び運動方程式に加え、サーマルの横広がりを規定する方程式よりなる。この基礎方程式を数値積分し、今回得られた実験結果と比較する。

2. 三次元サーマルの実験

(1) 実験装置及び実験方法

実験は図-1に示すような長さ 297cm、深さ 100cm、幅 97cm のアクリル製の幅広水槽で行った。この水槽内に、長さ 265cm、幅 95cm の傾斜板が取り付けられており、 $0^\circ \sim 20^\circ$ までの傾斜角に設定することができる。この傾斜板の上端から 53cm の位置に長さ 14cm、幅 15cm の放流ゲート付きの塩水タンクが設置しており、ゲートを開放することにより、サーマルを形成させることができ

表-1 実験条件

Run No.	angle θ (deg)	saline water			fresh water	
		C(%)	$t(^{\circ}C)$	$\rho(g/ml)$	$t(^{\circ}C)$	$\rho(g/ml)$
1	5	2.11	4.2	1.01840	6.0	0.99997
2	5	6.06	12.0	1.05146	11.2	0.99961
3	5	10.02	13.2	1.08867	12.2	0.99950
4	10	2.11	3.5	1.01845	5.8	0.99997
5	10	6.06	12.0	1.05146	11.2	0.99961
6	10	10.02	12.8	1.08880	12.0	0.99953
7	15	2.11	4.5	1.01838	5.5	0.99998
8	15	6.02	12.4	1.05100	11.8	0.99953
9	15	10.02	12.8	1.08880	12.0	0.99955
10	20	2.11	3.5	1.01845	5.5	0.99998
11	20	6.02	12.4	1.05100	11.8	0.99948
12	20	10.16	13.5	1.08999	12.4	0.99955

きる。今回行った実験条件では、側壁の影響を考慮し、傾斜サーマルの最大横広がり幅が約 80cm となるまでで測定を中止している。この位置は下流端から 100cm の位置に相当し、下流端の影響は無視できる。

実験は次のような手順で行った。

- 1) 水槽内に所定の角度で傾斜板を設置する。
- 2) 塩水層にウラニン色素を混入した一定量 (1000ml) の塩水を満たし、同時にその水面まで淡水を満たす。
- 3) ゲートを引き上げ塩水サーマルを発生させ、その流動状況を水槽の側面及び上面に設置したビデオカメラにより撮影する。

以上の操作を傾斜角 $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ の 4 ケース、塩水の初期濃度約 2%, 6%, 10% の 3 ケースとの組み合わせにより合計 12 ケースについて行った。実験条件を表-1 に示す。測定は以下のように行った。傾斜サーマルの流動状況をビデオ撮影した。これを画像解析し、フロントが 5cm 流下するごとの経過時間 t 、サーマルの最大厚さ h 、及び最大横広がり幅 b を読みとった。また、フロントの流下速度 U はフロントの位置と経過時間より計算した。この種の流れは大規模の渦運動に基づく非定常性が大きいので、乱れの影響を考慮して、各ケースとも 3 回ずつの実験を行いその平均値をもって結果の代表値とした。

(2) 実験結果と考察

a) 傾斜サーマルの流動形態

図-2に初期濃度 6% の傾斜サーマル形状を側方から観察した結果を傾斜角ごとに示す。実験条件は順に Run 2, Run 5, Run 8, Run 11 である。この図及びビデオ画像の分析により、傾斜角が小さいものではサーマルの形状はほぼ相似になっているのに対し、傾斜角が大きいものでは間欠的な渦の発生に伴い界面が波打っていることがわかった。フロント前部の形状に着目すると、斜面の

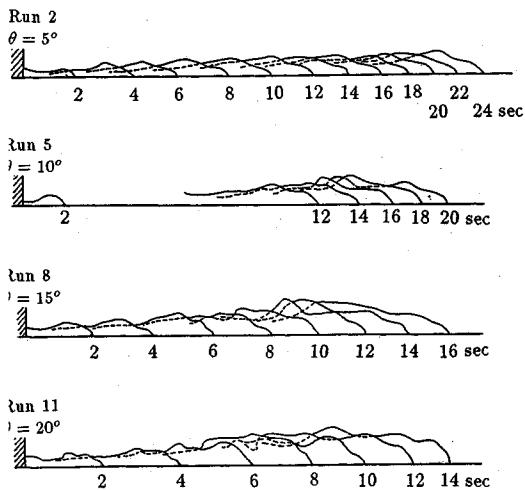


図-2 異なる傾斜角の側面からの流動形態

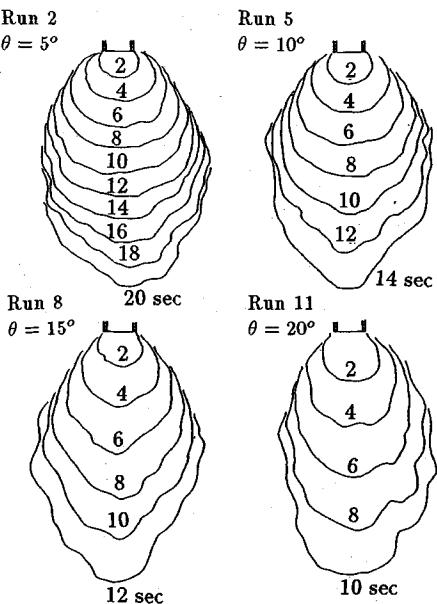


図-3 異なる傾斜角の上面からの流動形態

傾斜角が小さい条件では先端部の界面と底面のなす角は小さいが、斜面の傾斜角が大きくなるに従って、先端部の界面と底面とのなす角は大きくなる。

図-3は上方から観察した傾斜サーマルの流動形態を傾斜角の違いで比較したものである。初期濃度は6%である。実験条件はRun 2, Run 5, Run 8, Run 11である。これらの図より、放流直後のサーマルの平面形状は円形に近く、その後重力の影響で流下方向に引き延ばされた橢円形に変化していくのがわかる。傾斜角が大きくなるほど、橢円の長軸が短軸に比べて長くなる傾向にある。

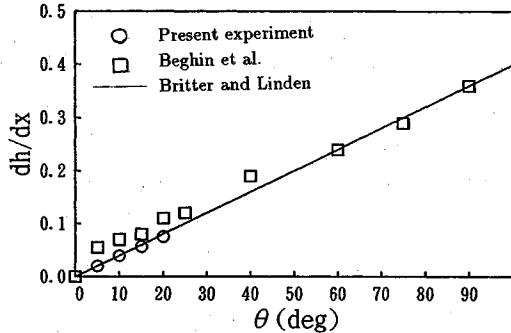


図-4 最大厚さの増加率

b) 傾斜サーマルの最大高さ

次に、傾斜サーマルの最大厚さの時間変化について考察する。ここで、最大厚さはサーマルフロント部における最大厚さをいう。図-2に示すように、一般に流下するサーマルフロント部においては常に細かい界面波が認められるが、データの読みとりに際して、平滑化した。最大厚さはフロント付近に現れるが、傾斜角が大きい場合や初期濃度が大きい場合にはフロントから離れた位置に最大高さが現れることがある。

後節で示すように、傾斜サーマルの最大厚さは流下距離に対して一次関数的に増加する。そこで、各傾斜角ごとに、最大厚さの増加率 dh/dx を回帰計算により求めた。この結果を図に表したもののが図-4である。○印が本実験より得られたものを表し、□印が Beghin et al.³⁾ の二次元傾斜サーマルの実験結果である。また、実線は Britter and Linden⁸⁾が傾斜ブリュームの実験によって求めた回帰式である。この図より本実験の結果は Beghin et al. の二次元サーマルに比べて 0.6-0.7倍程度と小さく、Britter and Linden の結果とほぼ同様の結果となっている。このように、最大厚さの流下方向の増加率が二次元サーマルの場合に比べて小さくなる点は三次元サーマルの特性であるといえる。

c) 最大横広がり幅

最大横広がり幅は、実験装置の上方から観察した傾斜サーマルの最大幅で定義される。傾斜サーマルの横広がりは流下とともに大きくなり、最大高さに比べて容易に測定できる。図-5は最大横広がり幅の流下方向変化を傾斜角別に示したものである。(a)から(d)まで順に傾斜角 θ が 5°, 10°, 15°, 20°である。各図においてパラメータは濃度である。これらの図より、多少のデータのばらつきはあるものの傾斜角が一定であれば、サーマルの最大広がり幅は濃度によらず一定になることがわかる。最大広がり幅の流下距離に対する増加率 db/dx は傾斜角によって変化する。図-5の結果を解析し db/dx と $\tan \theta$ の関係を回帰式により求めると次のようになる。

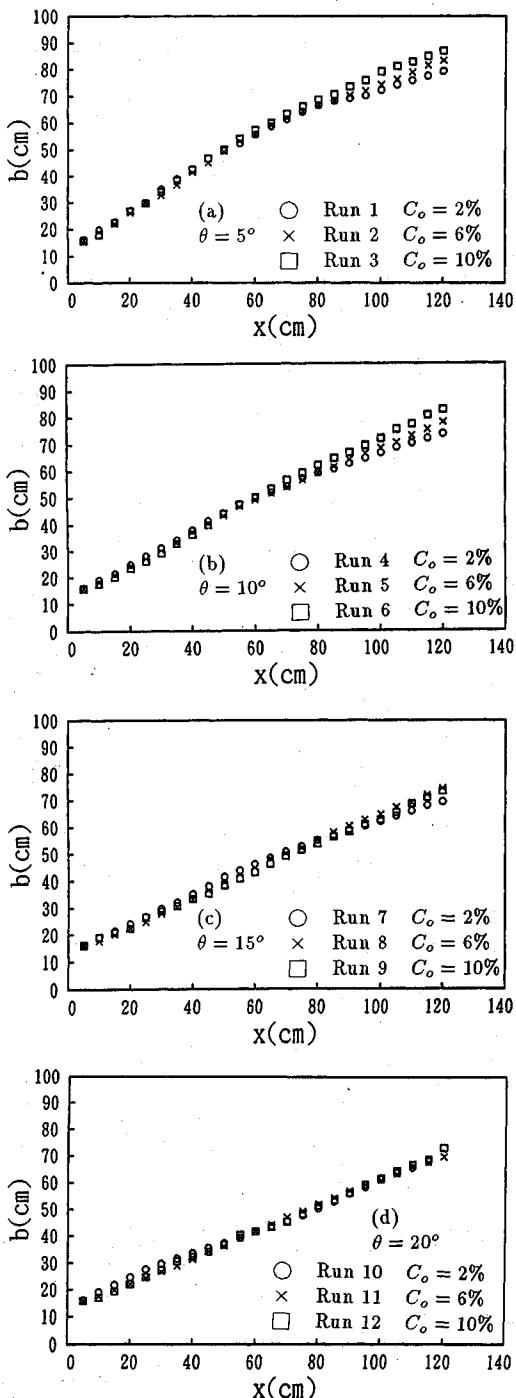


図-5 最大横広がり幅の流下距離変化

この式から明らかのように、最大高さの増加率とは逆に、広がり幅の増加率 db/dx は $\tan \theta$ が大きくなると小さく

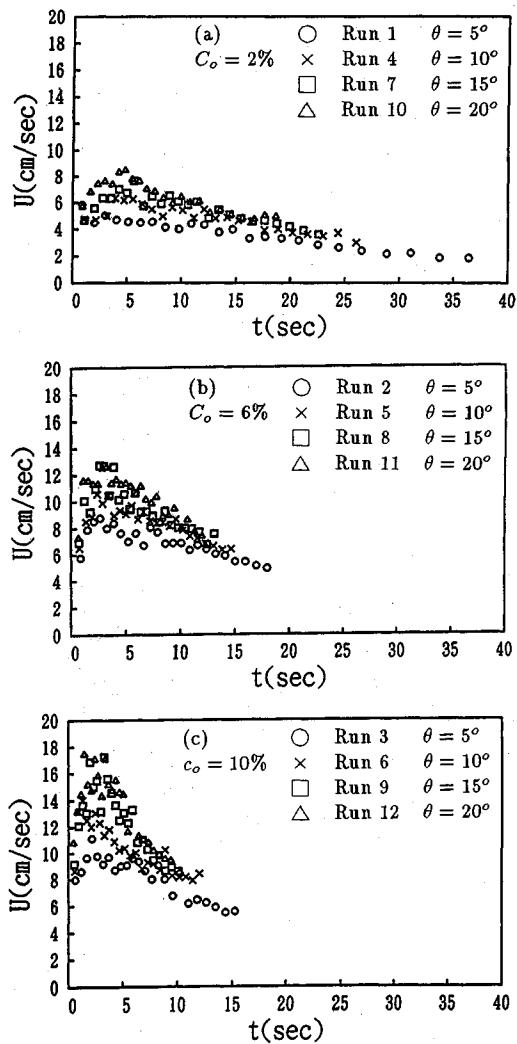


図-6 フロントの流下速度の時間変化

なる。 $\tan \theta$ が大きくなると斜面方向の有効重力（後述、式(2)）が大きくなり、斜面方向に塩水が流れ、最大高さの増加率が増す。一方、 $\tan \theta$ が小さくなると、有効重力が小さくなり横方向への流れが大きくなり、最大広がり幅が大きくなる。

d) フロントの流下速度 U

2(1) で述べたように、傾斜サーマルフロントの流下速度は、フロントが 5cm 進むのに要した時間から求めた。図-6 は同一の初期濃度で傾斜角が異なるフロントの流下速度を経過時間に対して示したものである。(a)～(c) は順に初期濃度 2%, 6%, 10% のものである。これらの図から以下のことがわかる。傾斜角が大きく、初期濃度が大きいほど、フロントの流下速度が大きくなる。フロントの流下速度は塩水の放流直後に最大となりその後

時間の経過とともに徐々に減少して行く。同じ傾斜角であれば、初期濃度が大きいほど、放流から最大流速になるまでの時間が短くなる傾向も見られる。

(3) データの無次元表示

ここでは、実験結果の解釈を深めるため、データの無次元化を行う。無次元化に当たって、後述する理論に基づき、主要な次元量として、サーマルの斜面方向の有効重力 B_o 、塩水の初期体積 V_o を選んだ。 B_o の次元は次のようである。

$$B_o = V_o R C_o g \sin \theta = [L^3 LT^{-2}] = [L^4 T^{-2}] \dots\dots (2)$$

ここで、 R は相対密度差と塩分濃度の比、 C_0 は初期濃度、 θ は斜面の傾斜角である。また、 $[L]$ 、 $[T]$ はそれぞれ長さと時間の次元であることを示している。初期体積の次元は $V_0 = [L^3]$ であるから代表長さ L_* は次のように表される。

代表時間(特性時間スケール) T_* , 代表速度(特性速度・スケール) U_* はそれぞれ次のように表される。

$$T_* = \frac{L_*^2}{B_o^{1/2}} = \left[\frac{L^2}{(L^4 T^{-2})^{1/2}} \right] = [T] \dots \dots \dots \quad (4)$$

$$U_* = \frac{B_o^{1/2}}{V_o^{1/3}} = \left[\frac{(L^4 T^{-2})^{1/2}}{(L^3)^{1/3}} \right] = [LT^{-1}] \dots \dots \dots (5)$$

以上の代表長さスケール L_* , 代表時間 T_* , 代表速度 U_* を用いると, 無次元の流下距離 x^* , 最大厚さ h^* , 時間 t^* , 流下速度 u^* は次のように表される.

$$x^* = x/L_* \quad h^* = h/L_* \quad t^* = t/T_* \quad u^* = U/U_* \quad (6)$$

これらを用いて、最大高さ及びフロントの流下速度を無次元化したのが図-7、図-8である。図-7において縦軸は無次元最大高さ、横軸は無次元時間である。これらの図は(a)～(d)まで順に、傾斜角 θ が $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ の結果であり、パラメータを初期濃度とした結果である。これより、実験結果は多少のばらつきはあるものの、無次元高さは無次元時間とともに一次関数的に増加していることがわかる。図は示さないが、傾斜角の違いに依っても無次元高さの無次元時間による変化特性に大きな違いは見られないこともわかった。図-8において縦軸はフロントの無次元流下速度であり、横軸は無次元時間である。これらの図-8(a)～(c)は順に、初期濃度 C_0 が2%、6%、10%の結果であり、傾斜角をパラメータとしたものである。図より無次元時間 $t_* \leq 4$ の範囲では実験条件により差が認められるが、これより大きな無次元時間では差は次第に小さくなって行くのがわかる。無次元時間の小さい範囲で実験値のばらつきが大きい理由は、次のように考えることができる。実験の開始直後、すなわち、

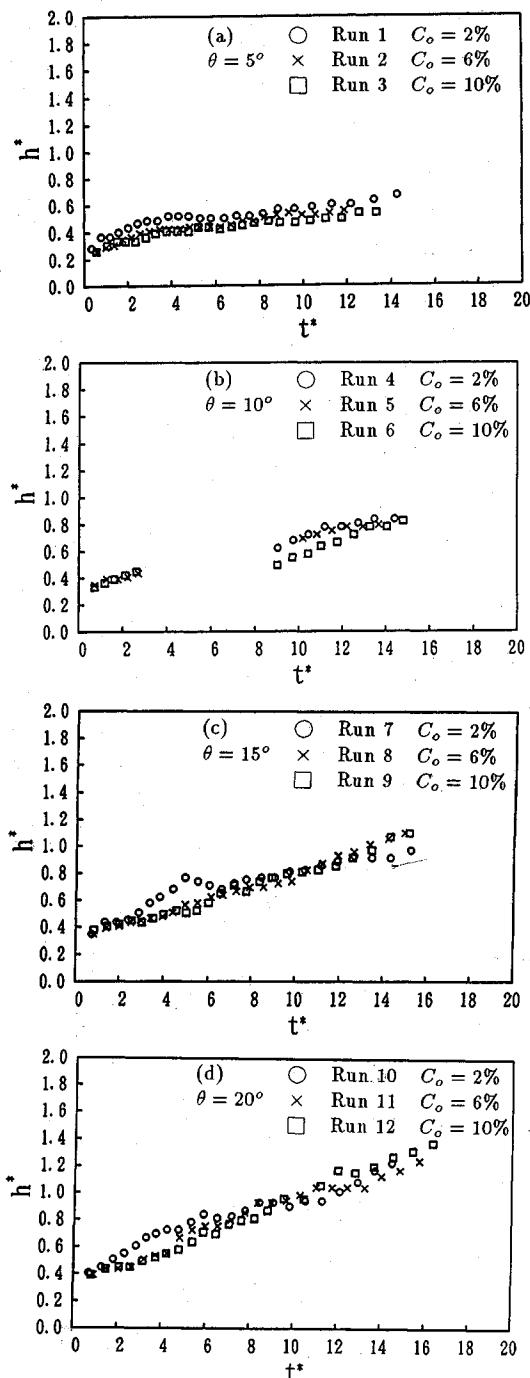


図-7 無次元最大厚さと無次元時間の関係

塩水槽のゲートを引き抜いた直後では、塩水槽と主水槽の水位差やゲートの引き抜き方が実験によって微妙に異なるためであろう。以上のように、無次元化した最大高さ、フロントの流下速度はいずれも無次元時間に対して、

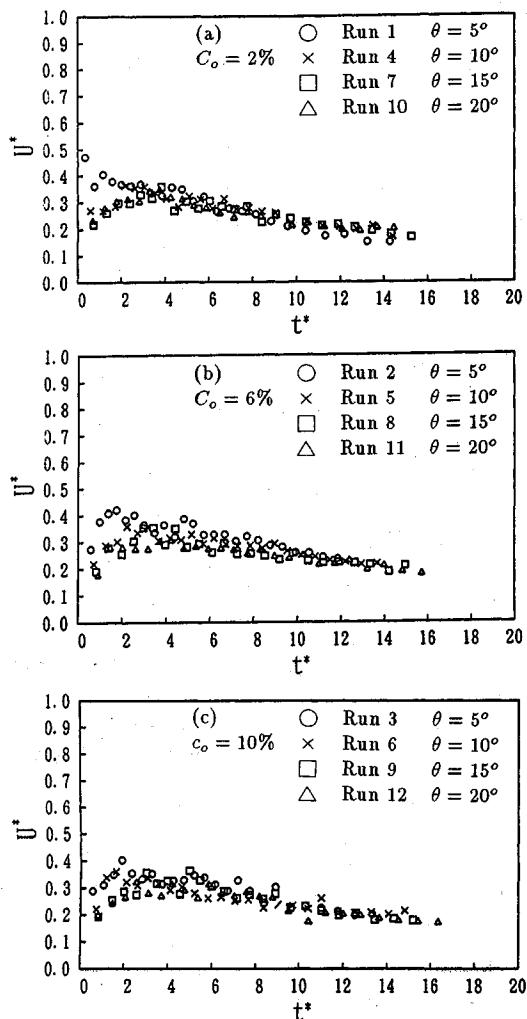


図-8 無次元速度と無次元時間の関係

相似的な変化特性をもつことが示された。

3. 三次元サーマルの理論とその適用結果

序論で述べたように、 Beghin et al.³⁾は鉛直サーマルの理論を二次元の傾斜サーマルに対して発展させた理論式を提案している。ここではその理論を基に三次元の傾斜サーマルの理論を提案する。ここでは、三次元の傾斜サーマルの形状を半楕円体であると仮定し、未知数をサーマルの最大高さ h 、平均濃度 C 、フロントの流下速度 U 、最大横広がり b として解く。基礎方程式は以下に示す、連続の式、運動方程式、塩水濃度の保存式、横広がりを求める式の4つである。

$$\frac{d(\rho + k_v \rho_a) V U}{dt} = (\rho - \rho_a) g V \sin \theta$$

$$dCV/dt = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

ここで、 t は時間、 x は流下方向の座標、 V はサーマルの体積、 S_i 、 S_b はそれぞれ界面と底面の面積、 g は重力加速度、 ρ 、 ρ_a はそれぞれサーマルと周囲水の密度、 E_a は周囲水の連行係数、 θ は傾斜角、 α は連行に関係する補正係数、 k_v は付加質量係数である。

式(7)の右辺は周囲水の連行に伴うサーマルの体積の増加率を表したものである。式(8)の左辺はサーマルの加速度と付加質量項である。右辺第一項は重力項、第二項、第三項はそれぞれ界面と底面に作用するせん断力である。式(9)はサーマルの塩分が保存されることを表している。式(10)は横広がりを規定する方程式である。この式の導入にあたっては、距離 x と時間 t の間に成り立つ恒等式 $dx/dt = U$ を用い、最大横広がり幅の流下距離変化率を式(1)の実験式で表したものである。

式(7)から式(10)を解くためにはさらにいくつかの関係式が必要となる。傾斜サーマルの三次元的な形状を半椭円体として仮定したことにより、その体積は次のように表される。

ここで、 P_b はサーマル底面の長さであり、最大厚さの関数として次のように表す

$$P_b = \xi_b h \quad \xi_b = 8.09\theta^{-1/3} \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

ここで、 β は傾斜角によって決まる形状係数である。式(12)は、 Beghin et al.³⁾の実験結果を求め、著者らが水路床勾配の関数として求めたものである。また、サーマル底面の面積、サーマルと周囲水の界面との面積は次のように表される。

ここで、係数 α_1 は、式(7)の α に含めて考えるものとする。付加質量係数 k_v はサーマルの形状から決まり、次のようになる。

周囲水の連行係数 E_a は、 Beghin et al.³⁾ の実験結果を基に次のようにおく。

式(12), (14)において斜面の傾斜角 θ は度(deg)で表すものとする。式(15)は二次元の傾斜サーマルの実験により得られたものであるが、式(7)の右辺には係数 α

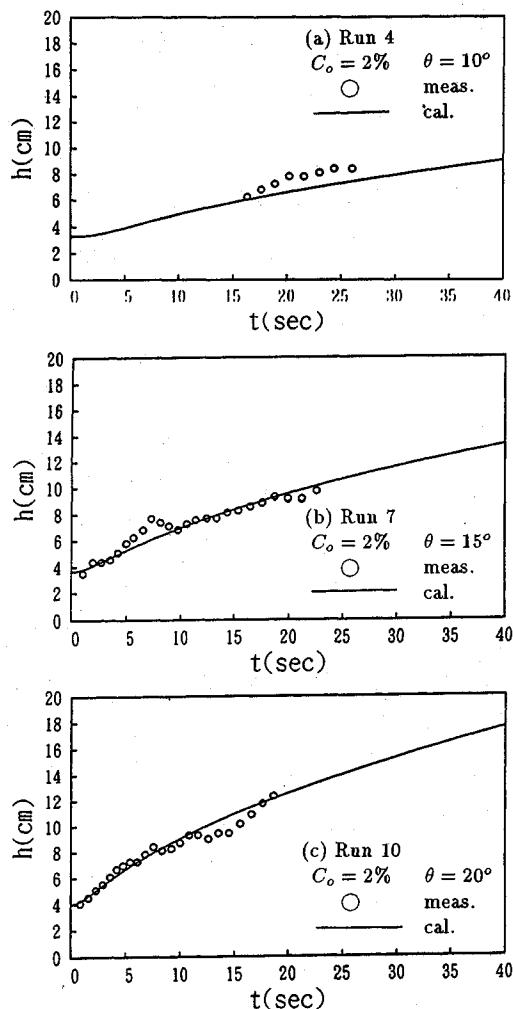


図-9 最大厚さの計算値と実験値との比較

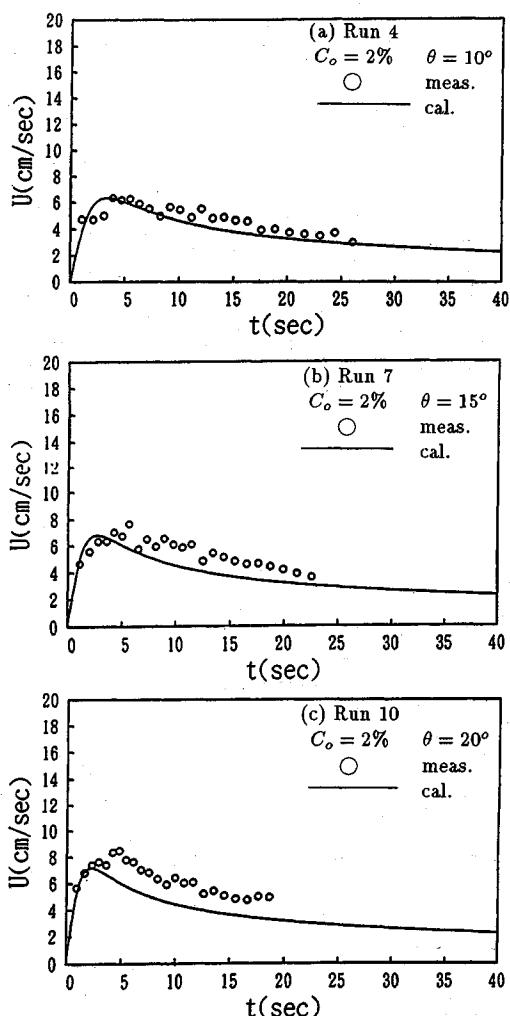


図-10 流下速度の計算値と実験値との比較

が連行係数 E_a の積の形式で表されている。通常、三次元の流動では二次元に比べ連行係数が大きくなる。したがって、 α の値は 1.0 以上の値をとることが予想される。

以上の基礎方程式を数値的に積分し、実験結果と比較した。計算では、実験におけるサーマルの初期濃度 C_o 、初期厚さ h_o 、初期幅 b_o 、初期流下速度 U_o を与え、任意時間の C 、 h 、 b 、 U を計算により求めた。計算にあたっては式(7)での係数 α を 1.0 から 2.0 まで変化させて検討した結果、 $\alpha = 1.5$ が妥当であると判断し、以下の計算では $\alpha = 1.5$ とした。図-9は最大厚さの時間変化を、図-10がフロントの流下速度の時間変化を示している。それぞれの図で (a), (b), (c) は実験条件 Run 4, Run 7, Run 10 である。図中、○印が実験値を、実線が計算値を表している。図-9より、最大厚さの計算値は実験値とよく一致している。図-10より、フロントの流下速度の計算値

は実験値のほうが遅くピークが現れており、その後の速度も実験値のほうが大きめである。しかしその差は小さく計算値は実験値の傾向をよく表しているといえる。同様な計算を他の実験条件について行ったが、傾斜角が 5° の場合を除いて、実験値との一致は良好であった。これは Beghin et al.³⁾が指摘しているように、傾斜角が 5° 以下の場合には傾斜サーマルの形状が相似にならないためである。以上より、斜面の傾斜角が 10° 以上の場合には理論値は実験値をよく再現することが示された。

以上のように、本研究において三次元傾斜サーマルの流動特性の一端を知ることができた。しかしながら今回の解析ではサーマルの横広がり幅に関する実験式を用いている。この実験式は、限られた範囲の水理条件から求めたものである。また、モデルでは二次元の傾斜サーマルによって得られた関係式を準用しているものもある。

さらに多くの実験結果や野外データを行うことにより解析モデルの精密化を行う必要がある。

4. 二次元と三次元の傾斜サーマルの比較

二次元と三次元の傾斜サーマルは、上流からの浮力ラックスの供給がなく、初期条件として与えられた浮力のみの効果で斜面上を流下する点で共通する。一方、三次元サーマルでは横方向に自由度があり流下とともに、横方向に広がる点で異なる。その結果、図-4に示されたように、三次元サーマルの最大厚さの増加率は二次元サーマルの増加率の0.6-0.7倍位と小さい。同様に、三次元サーマルでは横方向に広がる影響は、フロントの速度にも現れ、ピーク後の速度は二次元サーマルと比べて早く減衰する。

一方、シミュレーションモデルの立場からは、二次元サーマルモデルの未知量が最大高さ、速度、塩分濃度の三つに対し、三次元サーマルでは、これに加えて横広がり幅が新たに未知量となる点が本質的に異なる。それ以外では、モデル中の体積を面積に取り替え、界面及び底面の面積を界面及び底面の潤滑長と置き換えることで二次元のモデルに帰着する。すなわち、今回提案した三次元傾斜サーマルのモデルは、特別な場合として二次元傾斜サーマルを含むモデルとなっている。

5. 結論

三次元の傾斜サーマルの流動特性を実験的、理論的に調べた。実験では初期濃度、斜面の傾斜角をパラメータとして系統的に変化させた。測定項目は、サーマルの最大高さ、フロントの流下速度、最大横広がり幅の時間変化、距離変化である。これらの結果は、初期濃度、斜面の傾斜角によって変化する。一方これらを無次元化した図から、無次元の最大高さ、無次元流下速度は、傾斜角、初期濃度に依らず、無次元時間に対して相似な変化特性となることを示した。また、最大高さの距離的な増加率は、二次元の傾斜サーマル、二次元ブリュームの増加率とほぼ同じ結果を得た。

これらの実験的な成果を基に、三次元の傾斜サーマルの基礎方程式を提案した。この理論式は、二次元の傾斜

サーマルの理論を発展させたもので、サーマルの体積の保存式、運動方程式、塩分濃度の保存式、横広がり幅を規定する式である。特に、横広がり幅を規定する式では三次元傾斜サーマルの実験結果を基に求めたものである。計算結果を実験値と比較したところ、斜面の傾斜角が10°以上であれば、計算値は実験の最大高さ、フロントの流下速度を適切に説明できることを示した。

本研究は、厳冬季に山岳地域で発生する粉雪雪崩の流動特性を調べる目的で行ったものである。ここで用いた理論式を三次元の粉雪雪崩に発展させる為には、斜面上の雪層の連行を定式化する必要がある。この点については今後の課題としたい。

本研究の一部は文部省科学研究費、重点領域研究（代表 福嶋祐介、課題番号04201210）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) Simpson, J.E.: Gravity currents in the laboratory, atmosphere and ocean, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 14, pp.213-234, 1982.
- 2) Hopfinger, E.J. and Beghin, P.: Buoyant clouds appreciable heavier than the ambient fluid on sloping boundaries, *Proc. Second Int'l Symp. on Stratified Flows*, Norway, Vol.1, pp.495-506, 1980.
- 3) 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.
- 4) 福嶋祐介:粉雪雪崩の流動機構の解析, 雪水(日本雪水会誌), 第48巻, 第4号, PP.189-197, 1986.
- 5) Fukushima, Y. and Parker, G.: Numerical simulation of powder snow avalanches, *J. Glaciology*, Vol.36, pp.229-237, 1990.
- 6) 福嶋祐介, 鍾山恒臣:サーマル理論に基づく火砕流の数値解析法 -雲仙・普賢岳を例として-, 水工学論文集, 第36巻, pp.217-220, 1992.
- 7) 福嶋祐介, 鍾山恒臣:火砕流の流体力学的モデルによる解析 -雲仙・普賢岳への適用, 火山(日本火山学会誌), 第37巻, 第4号, pp.159-166, 1992.
- 8) Britter, R.E. and Simpson, J.E.: Experiments on the dynamics of a gravity current head, *J. Fluid Mech.*, Vol. 88, pp.223-240, 1978.

(1992.11.2 受付)

DYNAMICS OF THREE-DIMENSIONAL INCLINED THERMAL

Yusuke FUKUSHIMA, Norio HAYAKAWA and Tohru BIZEN

In this paper, the flow dynamics of three-dimensional thermals is investigated experimentally and theoretically. The variations of the maximum height, the maximum width and the speed of the three-dimensional thermals are measured by the experiment. It is shown that the non-dimensional height and speed are both dependent on the non-dimensional time. Next, the fundamental equations are developed for the three-dimensional inclined thermals. The theory consists of the equations of the mass conservations of water and salinity in the thermal, the momentum equation, and the equation of the thermal width. The numerical integral of the basic equations described well the experimental results of the height and the speed of the inclined thermals.