

粉雪雪崩の模擬実験

—保存性及び非保存性傾斜サーマルの流動特性—

福 嶋 祐 介*・早 川 典 生*・近 藤 敏**

Model Experiments on Powder Snow Avalanches
—Dynamics of Conservative and Non-Conservative Inclined Thermals—

Yusuke FUKUSHIMA, Norio HAYAKAWA and Satoshi KONDO

In order to investigate the dynamics of powder snow avalanches, the experiment on fronts of gravity currents on the inclined wall is carried out. Experiments concerned are inclined plumes and inclined thermals using saline water and turbid water into fresh water. The saline gravity current is conservative and turbid one is non-conservative. The speed and the maximum height of the front of gravity currents are measured for all cases. The salinity concentration profiles are measured for the case of saline gravity currents. The non-dimensional speed of saline inclined wall plumes and thermals are nearly constant in the flow direction. On the contrary, the non-dimensional speed of turbid inclined thermal decreases in the flow direction.

Key words: powder snow avalanches/model experiments/inclined thermals/inclined plumes/suspension clouds

1. はじめに

雪崩による災害防止のためには、雪崩の流動機構を解明する必要がある。しかし、一般的に雪崩の現地観測は極めて困難であり、その流動機構は十分に明らかにされているとはいえない。一方、雪崩、特に表層乾雪雪崩である粉雪雪崩の流動が実験室規模の密度流フロントの流動とほぼ相似であることが指摘されている。このような観点から密度流フロントの実験により間接的に粉雪雪崩の流動機構を検討しようとする試みがなされてきた。

一方、単純な密度流フロントと粉雪雪崩の相違点は次のようである。一般に密度流フロントを形成する流体は塩分濃度差や温度差に基づく密度差が主因の保存性の流体である。これに対し、粉雪雪崩は固体粒子である雪粒子と空気で構成される混相流体であり、空気中での雪粒子の沈降速度を無視できない非保存性流体である。

密度流フロントを形成する流体が上流から連続的に供給される流れをプリューム、流体が瞬間的に与えられる場合をサーマルと呼ぶ。このような密度流フロン

トが傾斜面上を流下するとき、これを傾斜壁面プリュームあるいは傾斜壁面サーマルと呼ぶ。ここではより簡略化して“傾斜プリューム”及び“傾斜サーマル”と呼ぶことにする。傾斜プリュームと傾斜サーマルの模式図をFig. 1に示す。

密度流フロントすなわち傾斜サーマルあるいは傾斜プリュームと粉雪雪崩が類似しているという観点から、何人かの研究者により、単純な保存性の密度流フロントの実験が行われてきた。Beghin et al.¹⁾は、一定幅の傾斜した水路において一定量の塩水を瞬間的に放出させる保存性の傾斜サーマルの室内実験を行った。福嶋・早川・加納²⁾は、塩水を用いた二次元傾斜プリュームのフロントについて実験を行い、フロントの先端速度と最大高さの流下方向変化を求めた。Hopfinger and Beghin³⁾は硫酸バリウム懸濁液を用いた非保存性傾斜サーマルの室内実験を行い、周閉水の連行についてのモデルを提案し、議論を行っている。しかし、彼らのモデルでは連行係数が周閉水と本体の密度比に関係するという妥当でない結果が導かれている。Escudier and Maxworthy⁴⁾等によって行われた極めて大スケールの条件を含む三次元鉛直サーマルのデータでは、連行係数が密度比によらず0.1–0.25の範囲でほぼ一定値をとることが明らかにされているからである。

福嶋⁵⁾は、傾斜サーマルについて提案された“サー

原稿受付：平成7年5月8日

*長岡技術科学大学工学部建設系

**新日本製鐵㈱

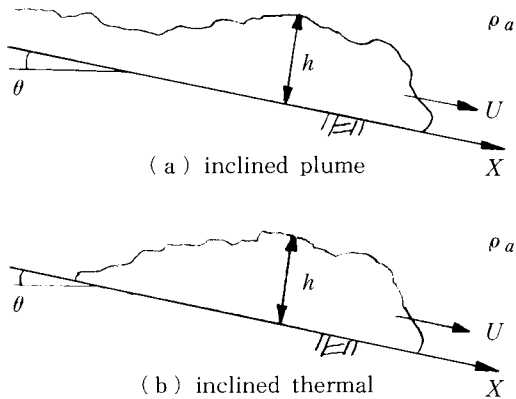


Fig. 1 Schematic views of an inclined plume and inclined thermal.

マル理論”に基づいて粉雪雪崩のシミュレーションモデルを提案し、これを1986年新潟県棚田地区で発生した表層雪崩に適用した。福嶋・早川⁶⁾は、このモデルを三次元地形を考慮したシミュレーションモデルに発展させた。これらのモデルでは、連行係数、形状係数などのパラメータが含まれており、これらは Beghin et al.¹⁾らおよび Escudier and Maxworthy⁴⁾の実験データに基づいてその関数形が定められたものである。また、福嶋⁷⁾は、粉雪雪崩などの粒子流を念頭におき固体粒子を浮遊する二次元の密度流フロントの流体力学的モデルを提案した。この論文では先に述べた福嶋・早川・加納²⁾の保存性傾斜プリュームフロントの実験結果との比較がなされており、抗力係数の値を適切に選べば、モデルは保存性の傾斜プリュームフロントの先端速度、最大高さの流下方向の変化を説明できることを示した。福嶋・早川・備前⁸⁾は、側方が拘束されない三次元の傾斜サーマルについて、実験的・理論的に検討を行い、サーマル幅に実験式を取り込むモデルを提案した。モデルによる数値解を実験値と比較した結果、サーマル理論は三次元傾斜サーマルに対しても適用可能であることを示した。

以上のように単純な保存性の傾斜サーマルあるいは傾斜プリュームについてはこれまでかなりの研究の積み重ねがあり、その流動特性が明らかにされてきた。一方、粉雪雪崩との類似点の多い非保存性の傾斜サーマルについては、あまり研究がなされていないようである。本研究では、非保存性の傾斜サーマルの流動機構を明確にするため、保存性の傾斜プリューム及び保存性と非保存性の二次元傾斜サーマルの実験を行う。これらを直接比較することにより、非保存性の傾斜サー

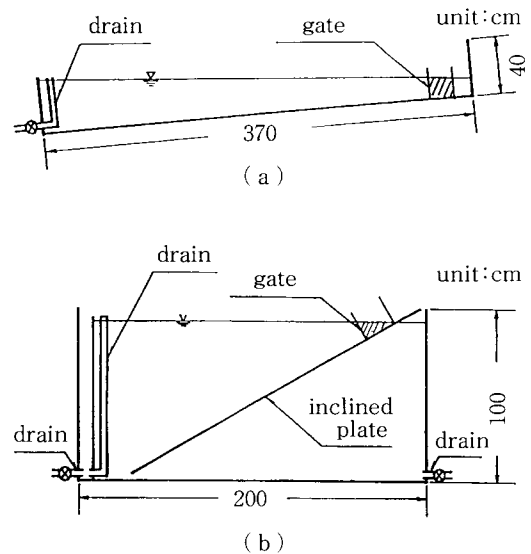


Fig. 2 Experimental apparatuses No.1 and No.2.

マルの流動機構を明らかにしようとするものである。

2. 実験装置と実験方法

実験に使用した水槽は、傾斜角 5° 、 10° については Fig. 2 (a) に示す、長さ 370 cm、高さ 40 cm、幅 15 cm の矩形アクリル製水槽を用いた。また、傾斜角 30° については Fig. 2 (b) に示す長さ 200 cm、高さ 100 cm、幅 15 cm の水槽を用いた。

傾斜プリュームの実験は次のように行った。水槽の上端に幅 14.8 cm、高さ 2.0 cm のスロットを設け、塩分濃度を 1 %、3 %、5 % に設定し、水路の傾斜角を 5° 、 10° 、 30° として一定の流量 0.12 l/s の塩水を流入させた。

傾斜サーマルの実験は次のように行った。保存性流体（塩水）、非保存性流体（硫酸バリウム混合水）は水槽の上流部に設置したボックスに一定量（1 l）貯め、ゲートを引き上げることによって流入させた。実験条件は初期濃度を 1 %、3 %、5 % に設定し、水路の傾斜角を 5° 、 10° 、 30° とした。傾斜サーマルは基本的に非定常流であり、乱流変動も大きいことから、同一条件で 3 回の実験を行い、その平均値をもって測定値とした。

測定項目は次の通りである。水路の側方から 2 台のビデオカメラを設置し、得られたビデオ画像をストップモーションアナライザーを用いて、フロント先端部

Table 1 Experimental conditions for conservative inclined thermals.

$\theta (^{\circ})$	$C(\%)$	$T_0(^{\circ}\text{C})$	$\rho_0(\text{g/cm}^3)$	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	ε
5	1.0	22.0	0.99780	1.00601	0.00822
5	3.0	21.8	0.99784	1.02264	0.02485
5	5.0	22.0	0.99780	1.03933	0.04163
10	1.0	22.0	0.99780	1.00611	0.00832
10	3.0	21.8	0.99784	1.02267	0.02488
10	5.0	22.0	0.99780	1.03934	0.04163
30	1.0	22.0	0.99780	1.00601	0.00823
30	3.0	21.8	0.99784	1.02264	0.02485
30	5.0	22.0	0.99780	1.03934	0.04163

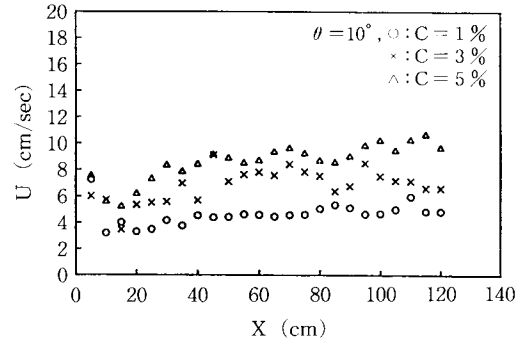
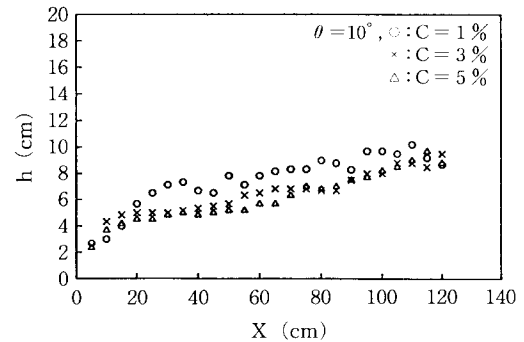
Table 2 Experimental conditions for non-conservative inclined thermals.

$\theta (^{\circ})$	$C(\%)$	$T_0(^{\circ}\text{C})$	$\rho_0(\text{g/cm}^3)$	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	ε
5	1.0	14.0	0.99927	1.00699	0.00772
5	3.0	14.1	0.99926	1.02241	0.02317
5	5.0	14.0	0.99927	1.03785	0.03861
10	1.0	14.0	0.99927	1.00699	0.00772
10	3.0	14.0	0.99927	1.02242	0.02317
10	5.0	14.0	0.99927	1.03785	0.03861
30	1.0	13.6	0.99933	1.00704	0.00772
30	3.0	13.4	0.99935	1.02250	0.02316
30	5.0	13.4	0.99935	1.03793	0.03860

Table 3 Experimental conditions for conservative inclined plumes.

$\theta (^{\circ})$	$C(\%)$	$T_0(^{\circ}\text{C})$	$\rho_0(\text{g/cm}^3)$	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	ε
5	1.0	23.2	0.99754	1.00575	0.00823
5	3.0	21.8	0.99784	1.02264	0.02485
5	5.0	22.0	0.99780	1.03934	0.04163
10	1.0	23.2	0.99754	1.00575	0.00823
10	3.0	21.8	0.99784	1.02267	0.02488
10	5.0	22.0	0.99780	1.03934	0.04163
30	1.0	22.0	0.99780	1.00601	0.00823
30	3.0	21.8	0.99784	1.02264	0.02485
30	5.0	22.0	0.99780	1.03934	0.04163

が5 cm流下するごとにフロント部の最大厚さ h ，流下速度 U を測定した。濃度分布はスロットからの距離が20cm, 40cm, 80cmの断面で水路底面から上方に1 cmおきに導電率計プローブを設置し，導電率計の

Fig. 3 Variation of front speed in the flow direction of inclined plumes ($\theta = 10^{\circ}$).Fig. 4 Variation of thickness of front in the flow direction ($\theta = 10^{\circ}$)

出力電圧をAD変換器でデジタル信号としてパソコンでデータ処理を行った。測定対象としたのはスロットから120cmの範囲である。保存性の傾斜サーマルの実験条件をTable 1，非保存性の傾斜サーマルの実験条件をTable 2，傾斜プリュームの実験条件をTable 3にまとめて示す。硫酸バリウムの粒径はコールターカウンターで測定した結果2.0–50.8 μm であり，沈降速度をストークスの式で計算したところ， 6.22×10^{-4} cm/sから0.402cm/sであった。

3. 保存性傾斜プリュームの実験結果

傾斜プリュームのフロント部と傾斜サーマルとの大きな違いは，プリュームではフロント部の上流に流量一定の定常部（フロントに続く後続部）が存在することである。よく知られているように，二次元すなわち水路幅が一定の傾斜プリュームの定常部は，流下距離が大きくなると，「最大流速が一定」，「厚さが直線

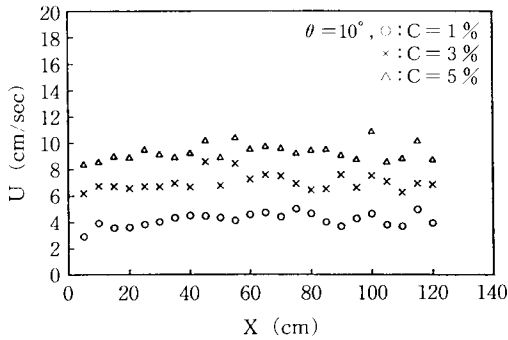


Fig. 5 Front speed of conservative thermals ($\theta = 10^\circ$).

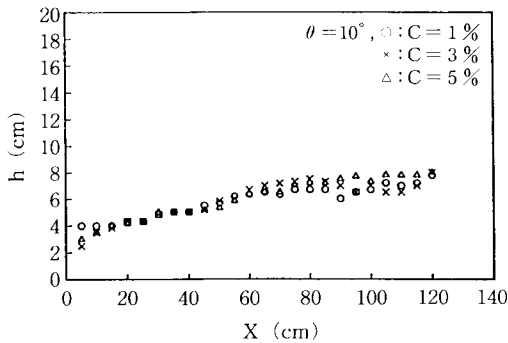


Fig. 6 Front thickness of conservative thermal ($\theta = 10^\circ$).

的に増加」, 「相対密度差が流下距離に反比例」するという流れの「平衡領域」に漸近する特性を持っている(福嶋⁹⁾)。一方, フロント部についても, 流下距離が十分大きくなると, 定常部と同様に, 「フロント速度が一定」, 「最大厚さが線形に増加」, 「フロント部の平均密度が流下距離に反比例して減少」という, 「平衡領域」に達することが実験的にも理論的にも示されている(福嶋・早川・加納²¹, 福嶋²²)。

このような傾斜ブリュームフロント部の運動は雪崩に対する上流からの雪の供給が十分にある場合に相当する「流れ型の雪崩」に対応するものといえる。

Fig. 3は塩水による傾斜ブリューム(傾斜角 $\theta = 10^\circ$, 初期塩分濃度1%, 3%, 5%)のフロント速度を示す。当然のように, 一定の傾斜角では塩分濃度の大きい方がフロント速度は大きくなっている。この範囲ではフロントの速度は流下方向(X方向)に僅かに増加している。

また, Fig. 4は最大高さを流下距離に対して示した

ものである。この図より, 最大高さは初期塩分濃度に依らず, 流下方向にはほぼ線形に増加することがわかる。

フロント速度, 最大厚さに関するこのような傾向は他の傾斜角の実験条件でも同様な結果が得られた。すなわち, 本実験の範囲では流入条件に対して, 流下距離(水路長)が短く, 流れは平衡状態には達しておらず, 平衡領域に至る前の「形成領域」にあることが分かる。

4. 保存性の傾斜サーマルの実験結果

福嶋⁵¹は, 粉雪雪崩の解析において, 雪崩の流動が傾斜サーマルに類似していることに着目し, サーマル理論をもとに粉雪雪崩のシミュレーション手法を提案した。このモデルでは, サーマルの形状などを表すために様々な形状係数が用いられている。これらの諸係数は理論的に定めることはきわめて困難で, さらに, 粉雪雪崩の現地観測も困難をきわめることが予想される。このような立場に立てば, 塩水による傾斜サーマルの実験の必要性は大きいことが理解されるであろう。

本節では, 塩水を用いた保存性の傾斜サーマルの測定結果について述べる。Fig. 5に示したのは, 一定の傾斜角($\theta = 10^\circ$)で, 異なる塩分の初期濃度により得られた, サーマルのフロント速度の測定結果である。また, Fig. 6は同じ実験条件に対する最大厚さの流下距離方向の変化を示したものである。Fig. 5を見ると, フロントの流下速度は流入直後($x < 20\text{cm}$)を除いてほぼ一定値で推移していることが分かる。また, フロント速度は初期塩分濃度が大きいほど大きくなっている。

フロントの最大厚さを示したFig. 6で顕著なのは, 傾斜角が同一であれば塩分濃度が違って最大厚さの変化に僅かの差しかみられないことである。図では示さないが, 最大厚さの増加率 dh/dx は傾斜角によって変化し, 傾斜角が大きいほど, dh/dx は大きくなることが分かった。この傾向は傾斜ブリュームでも同じであった。

Fig. 7は濃度1%, 傾斜角 10° の条件で $x = 40\text{cm}$ で測定した濃度分布の経時変化である。時間は, 導電率計のプローブの設置した位置にフロントが到達した時間を $t = 0.0\text{s}$ とし, 以下0.5sおきに濃度分布を描いたものである。この図より, $t = 1.5\text{s}$, 2.0s 付近で最大厚さが表れており, この位置で最大濃度は0.75%程度の大きさである。時間が経過すると, 最大濃度が次第に減少し, $t = 5.0\text{s}$ では最も低いプローブが僅かに塩分を検出している。保存性の傾斜サーマルでの

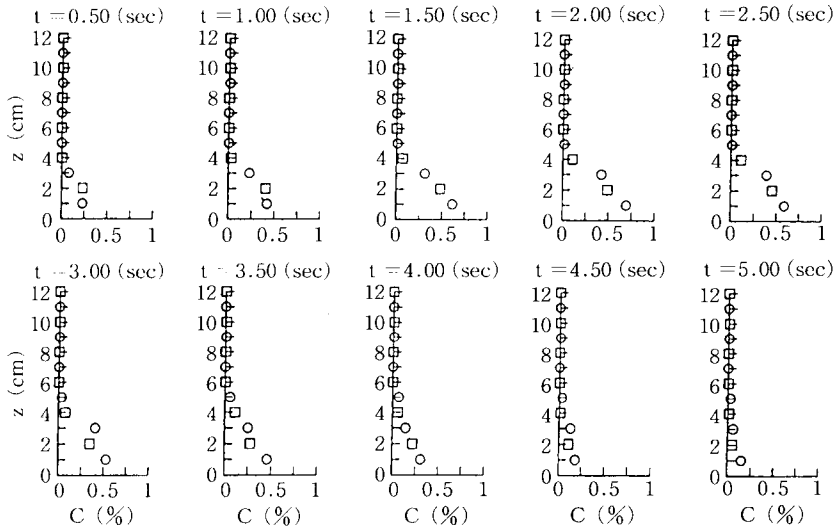


Fig. 7 concentration profiles of conservative inclined thermals ($\theta = 10^\circ$, $C_0 = 1\%$).

濃度分布は最先端部及び後端部で小さく、フロントの中央部で大きくなっている。福岡ら¹⁰⁾の測定によれば、傾斜ブリュームフロント部の濃度分布はフロント内で相似ではなく、先端部からの距離によって大きく異なることが示されており、濃度の最大値は、フロントの後ろの定常部で現れる。一方、Fig. 7ではフロント後部 ($t = 5.0$ s) では濃度がかかなり小さくなっている。このようにフロント後部での濃度分布の違いが傾斜ブリュームと傾斜サーマルの濃度分布特性の違いであるといえる。この差はフロント後部から塩水の供給があるか (ブリュームの場合)、供給がないか (サーマルの場合) の違いによることは明らかである。

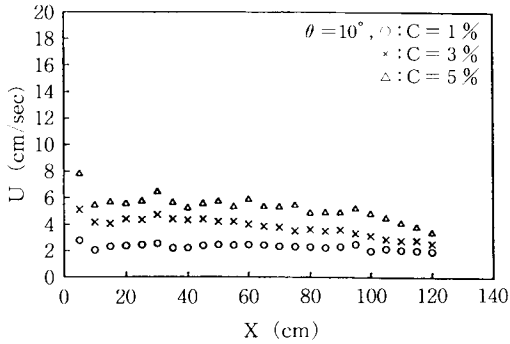
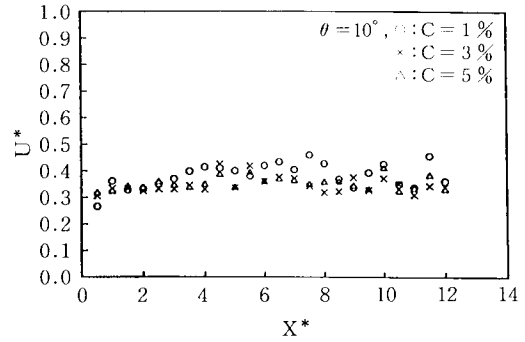
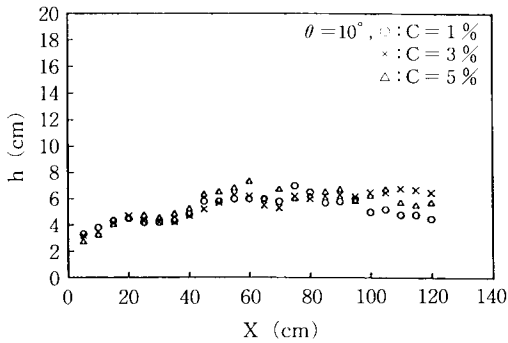
5. 非保存性の傾斜サーマルの実験結果

Fig. 8はフロントの流下速度を流下距離に対して示したものである。水路床の傾斜角は $\theta = 10^\circ$ である。この場合はFig. 5の保存性の場合と比較して、フロントの流下速度は流下距離に伴って次第に減少している。この傾向は $C = 5\%$ の条件で顕著である。この理由として考えられるのは、硫酸バリウムの沈降性の影響が顕著に表れたものと解釈できる。サーマルの運動を引き起こす原因は、サーマルと外部流体との密度差に基づく浮力である。塩水による保存性の傾斜サーマルではサーマルの浮力の総和は流下方向に変化せず一定である。一方、硫酸バリウムによる非保存性の傾斜サーマルでは、粒子の沈降性の影響によって、サーマルの浮力の総和は流下方向に減少していく。このため、フ

ロントの速度が流下に伴って減少したものと解釈される。

Fig. 9は最大厚さの流下方向変化を示したものである。この場合も保存性のサーマルと異なり、単調に最大厚さが次第に減少してゆく。この傾向は各図の $C = 1\%$ の場合に特に顕著である。このようにフロントの最大厚さに対しても硫酸バリウムの沈降性の影響が現れている。

著者の一人 (福嶋⁵⁾) が提案した粉雪雪崩のシミュレーションモデルによれば、粉雪雪崩の発達、減衰は雪崩内の空気の流れがある基準より大きい小さいかによることが示唆される。すなわち、空気の流れがある基準より大きければ雪崩は底面からの雪層を巻き上げ、連行することにより全体の浮力が増し、雪崩は加速する。一方、空気の流れがある基準より小さい場合には、雪崩は雪粒子を浮遊・維持することはできず斜面上に雪粒子を沈降・堆積し、全体の浮力が小さくなるため雪崩の運動は減衰し、やがて静止にいたる。基準となる空気の流れの大きさは、雪粒子の粒径によって決まると考えられる。このような観点から、非保存性の傾斜サーマルの実験結果を判断すると、今回の実験では、サーマル内の乱れ運動エネルギーが小さく、粒子を斜面上に沈降・堆積する減衰期の雪崩に対応すると考えられる。


 Fig. 8 Front speed of non-conservative thermals ($\theta = 10^\circ$)

 Fig. 10 Non-dimensional front speed of conservative inclined thermals ($\theta = 10^\circ$).

 Fig. 9 Front thickness of non-conservative thermals ($\theta = 10^\circ$)

U_0 , 代表長さ L_0 は式 (1) の結果を用いて次のように表される。

$$U_0 = B_0^{1/2} / V_0^{1/3} = [L^4 T^{-2}] / [L^3] = [L T^{-1}] \quad (2)$$

$$L_0 = V_0^{1/3} = [L] \quad (3)$$

このとき、無次元流下速度 U^* , 無次元流下距離 x^* はこれらを用いて,

$$U^* = U / U_0 \quad (4)$$

$$x^* = x / L_0 \quad (5)$$

のように表される。

最大厚さは長さの次元をもつことから、無次元化した図は Fig. 6, Fig. 9 と相似形になる。従ってここでは流下速度のみを無次元化して表し、考察する。

Fig. 10 は、保存性の傾斜サーマルについて、無次元化したフロントの流下速度を無次元流下距離に対して、各傾斜角ごとに示したものである。これらの図から無次元化した流下速度は、斜面角が同じであれば初期濃度に依らず、流下距離に対してほとんど変化せずほぼ一定値となる。また、無次元流下速度の大きさそのものは傾斜角が小さいほど大きい。

Fig. 11 は、非保存性の傾斜サーマルの無次元流下速度を無次元流下距離に対して示したものである。これらの図より、無次元流下速度は無次元流下距離が大きくなるに従って徐々に減少することが分かる。また、無次元流下速度の最大値は保存性の場合の約 1/2 程度と小さな値となっている。このように無次元のフロントの流下速度は、Fig. 10 と Fig. 11 のように流入水が保存性であるか或いは非保存性であるかによって大きく

$$B_0 = V_0 (\Delta \rho / \rho)_0 g \sin \theta = [L^3] [L T^{-2}] = [L^4 T^{-2}] \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度、 $(\Delta \rho / \rho)_0$ は初期相対密度差、 θ は水路の傾斜角であり、 $[L]$, $[T]$ はそれぞれ、長さと言時間の次元であることを表す。代表速度

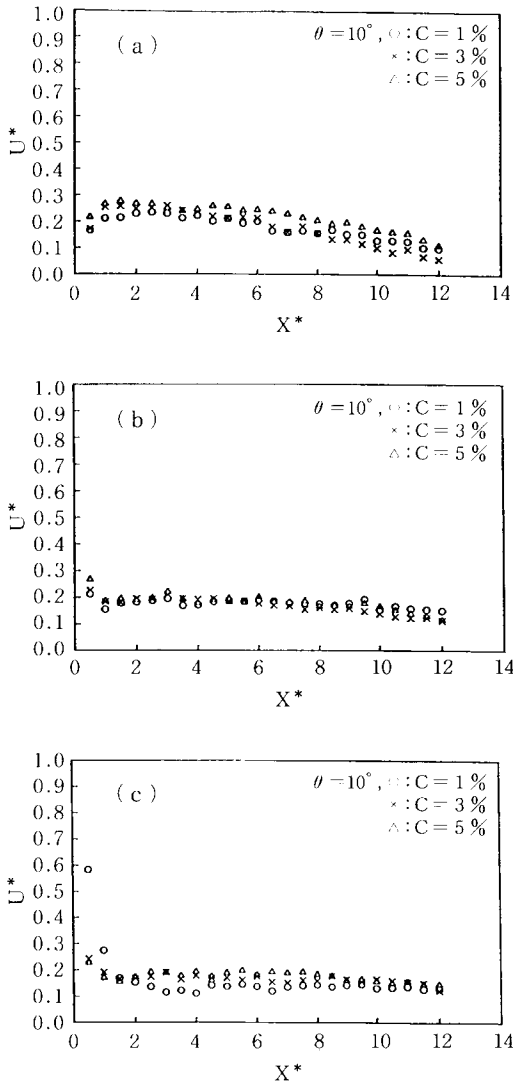


Fig.11 Non-dimensional front speed of non-conservative inclined thermals.

異なっていることが示された。この二つの流れの差は、5. 節で述べたように硫酸バリウム粒子の沈降性が原因していることは明かである。また、非保存性の傾斜サーマルの速度が流入直後でも保存性の場合に比べて約1/2になっていることから、上流端のボックス内で既に沈降が起こっていることが想像される。

Fig.12は傾斜プリュームのフロントの無次元流下速度を $\theta = 10^\circ$ の場合について見たものである。この場合の代表速度は上流からの浮力フラックスの1/3乗で与えられる。Fig.12においても適切な無次元化を行う

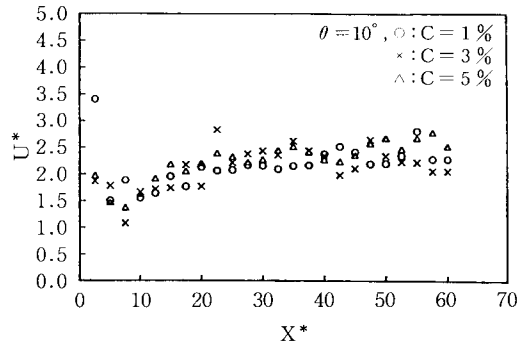


Fig.12 Non-dimensional front speed of inclined plumes ($\theta = 10^\circ$).

ことにより、同じ傾斜角であれば無次元速度の無次元流下距離変化は初期濃度に依らないことがわかる。

7. おわりに

密度差の原因が塩分、温度差などの保存性の傾斜プリュームと傾斜サーマル、雪粒子や濁質などの固体粒子による非保存性の傾斜サーマルについて実験的に検討した。本実験により、保存性の傾斜プリュームと傾斜サーマル流動特性の違いを明らかにした。傾斜サーマルに対して、フロントの流下速度を初期体積、浮力（有効重力）の総和を用いて無次元化した。無次元速度は同じ傾斜角では初期濃度に依らずほぼ同一の値になった。傾斜プリュームに対しても同様な結果が得られた。本研究で用いた実験装置では、保存性のサーマルの無次元速度がほぼ一定になるのに対し、非保存性の傾斜サーマルでは無次元速度が次第に減少するという結果が得られた。この原因として固体粒子がサーマルから沈降・離脱することが考えられる。このような非保存性の傾斜サーマルの流動は、粉雪雪崩の最終段階、すなわち雪崩が停止に至る過程に対応すると考えられる。

参考文献

- 1) Beghin, P., Hopfinger, E.J. and Britter, R.E., Gravitational convection from instantaneous sources on inclined boundary, J. Fluid Mech., Vol.107, pp. 407-422, 1981.
- 2) 福嶋祐介, 早川典生, 加納仙一, 下層密度流フロントの流動機構に関する研究, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, 第II部, pp.782-783, 1991.

- 3) Hopfinger, A.J. and Beghin, P., Buoyant clouds appreciably heavier than the ambient fluid on sloping boundaries, Second International Symposium on Stratified Flows, Trondheim, Norway, Vol. 1, pp. 495-506, 1980.
- 4) Escudier, M.P. and Maxworthy, T., On the motion of turbulent thermals, J. Fluid Mech., Vol.61-3, pp.541-552, 1973.
- 5) 福嶋祐介, 新潟県棚田地区表層雪崩の流動解析, 雪氷, 第49巻, 第1号, pp.1-8, 1987.
- 6) 福嶋祐介, 早川典生: 三次元地形を考慮した粉雪雪崩の数値解析, 雪氷, 第54巻, 第1号, pp.19-26, 1992.
- 7) 福嶋祐介, 固体粒子浮遊による二次元下層密度噴流先端部の解析, 土木学会論文集, No.461/II-22, pp.21-30, 1993.
- 8) 福嶋祐介, 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, No.473/II-24, pp.17-24, 1993.
- 9) 福嶋祐介, 乱流モデルによる傾斜壁面密度噴流の解析, 土木学会論文集, No.399/II-10, 65-74, 1988.
- 10) 福岡捷二, 水村和正, 加納敏行, 密度流先端部の流動特性に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No.274, pp.41-55, 1978.