

粒子浮遊サーマル実験による煙型雪崩流動シミュレーションモデルの適用性

福嶋 祐介*

Applicability of Simulation Model for Powder Snow Avalanches
by Using Experimental Results on Inclined Suspension Thermals

Yusuke FUKUSHIMA

In this paper, the applicability of simulation model of powder snow avalanches is examined by the experimental results of inclined thermals with suspended solid particles. The simulation model consists of the mass conservation equations for the air and snow particles and the momentum equation, and is called the three-equation model. In the simulation model, the entrainment coefficient is expressed by a linear function of the slope angle of the bottom. This model is examined by the experimental data of inclined thermals using the mixture of water and solid particles. The reasonable numerical results are obtained in terms of the longitudinal variations of the height, the speed, the volume of solid particles in the thermal.

Key words : powder snow avalanches, solid-fluid two-phase flow, inclined thermals, numerical simulation

1. 序 論

厳冬期の山岳地帯に多量の降雪があると煙型雪崩（粉雪雪崩とも、powder snow avalanche）が発生する（Hopfinger¹⁾）。煙型雪崩は雪粒子の濃度は小さいが約100m/sもの流下速度に達するため、規模の大きな災害になることもある。このような煙型雪崩による災害を未然に防止するためには、雪崩の流動機構を把握することが重要である。雪崩の流動シミュレーションにより、流動範囲を知ることができれば雪崩防災地域（ハザードマップ）の策定を行うことが可能になる。また、雪崩の流動に伴う衝撃力を知ることにより、種々の雪崩災害防止施設の設計に反映することもできる。

著者は、1986年以来、煙型雪崩の流動シミュレーション手法の開発を行って来た（福嶋²⁾）。さらに、福嶋・早川³⁾は三次元地形データを考慮したシミュレーションの方法を提案した。このモデルはEscudier and Maxworthy⁴⁾のサーマルモデル及び Beghin, Hopfinger and Britter⁵⁾の傾斜サーマルモデルを基礎として、斜面上の雪層の洗掘（巻き上げ）、堆積（沈降）を考慮したモデルである。これらのモデルを1986年新潟県柵口地区で発生した大規模な煙型雪崩に適用した（福嶋⁶⁾、福嶋・早川³⁾）。また、杉森ら⁷⁾は1996年福井県勝山市横倉及び小原で発生した雪崩の

再現計算を行い、現地観測から推定された雪崩の高さについて十分妥当な結果を得た。

一方、現地観測で煙型雪崩の測定を行うことは極めて困難である。そこで流動シミュレーションモデルの妥当性を検討するために、煙型雪崩を模擬する傾斜サーマルの室内実験を行うことが考えられている。Hopfinger and Beghin⁸⁾、Beghin, Hopfinger and Britter⁵⁾は雪崩を意識して、硫酸バリウム粒子と水との混合水及び塩水を用いて、連行係数、形状係数、フロントの流下速度や最大厚さ等、様々な流動特性を実験的に調べた。そのほか、塩水による傾斜サーマルの実験として、上石・川田⁹⁾、福嶋・早川・山口¹⁰⁾の研究がある。また、固体粒子として硫酸バリウムを用いた混合水による実験として、福嶋・金子¹¹⁾、福嶋・萩原¹²⁾の研究がある。三次元の傾斜サーマルをアツかつた研究として、Beghin and Orlange¹³⁾、福嶋・早川・備前¹⁴⁾がある。これらはいずれも実験とともに三次元傾斜サーマルの解析法も提案している。

本研究の目的は、煙型雪崩の流動シミュレーションモデルの高精度化を図るため、塩水及び固体粒子として硫酸バリウム混合水を用いて室内実験を行い、モデルの適合性を検討することにある。このため、煙型雪崩の模擬実験を行い、サーマルの流動に伴う流速ベクトル場の把握を行う。また、減速時のバリウム粒子の沈降量を測定し、これより流下するバリウム粒子の重量を算定した。さらに、フロントの流下速度、最大厚さを測定する。これらの浮遊性傾斜サーマルの流動特性のデータをシミュレーションモデルによる数値解析の結果と比較する。

原稿受付：平成10年5月30日

*長岡技術科学大学環境・建設系

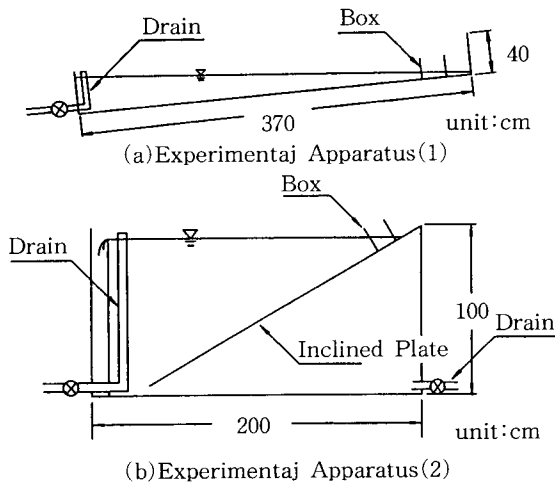


Fig. 1 Experimental apparatus (a) and (b)

Table 1 Summary of experimental conditions (1).

Run	θ (°)	C_0 (%)	ϵ_0
S1	10	1	0.00726
S2	10	5	0.0362
S3	30	1	0.00726
S4	30	3	0.0221
S5	30	5	0.0362

θ は水路の傾斜角, C_0 は初期塩水濃度, ϵ_0 はサーマルの初期相対密度差

2. 煙型雪崩の模擬実験

先に発表した煙型雪崩のシミュレーションモデルと比較するため、傾斜サーマルの室内実験を行った。雪に見立てた固体粒子として、硫酸バリウムを用いた。硫酸バリウム粒子の比重は4.37、粒径は2.0~50.8 μm であり、これに対応する沈降速度は、 7.34×10^{-4} ~ 4.73×10^{-1} cm/s である。

Fig. 1 に実験装置を示す。傾斜角が 5° , 10° の場合は(a)の長さ3.7m、高さ0.4m、幅0.15mの装置を用い、 30° の場合には(b)2.0m、高さ1.0m、幅0.15m 矩形水槽に傾斜板を設置した。

実験手順は以下の通りである。

1. 水槽に淡水を満たし、幅15cm、奥行き15cmの流出ゲートもつボックスを上流端に設置する。
2. 流出ボックスに、1 l の塩水あるいは硫酸バリウム混合水を入れ、十分攪拌する。

Table 2 Summary of experimental conditions (2).

Run	θ (°)	C_0 (%)	f_r	ϵ_0
1	5	1	0.407	0.00314
2	5	3	0.422	0.0100
3	5	5	0.488	0.0196
4	10	1	0.459	0.00354
5	10	3	0.513	0.0122
6	10	5	0.545	0.0219
7	30	1	0.457	0.00353
8	30	3	0.531	0.0126
9	30	5	0.562	0.0235

θ は水路の傾斜角, C_0 はバリウム粒子の初期重量濃度, f_r はバリウム粒子の初期設定重量と流下した重量の比, ϵ_0 はサーマルの初期相対密度差

3. ゲートを引き上げ、重い水が底面に沿って流下する傾斜サーマルを発生させる。
4. この様子を側方からビデオカメラで撮影する。
5. 硫酸バリウムの実験では、流下方向に20cm毎の区間で、粒子の沈降量を測定する。
6. 撮影した映像から、ストップモーションアナライザーを用い、流下方向に0 cmから120cmの範囲で、フロントの流下速度と最大高さを読みとる。

実験では、特に、雪崩の減速域に着目し、従来の実験で測定項目とした先端移動速度、最大厚さの流下距離変化に加え、固体粒子の沈降量の流下方向変化を測定した。また、傾斜サーマル内でどのような流動であるかを調べるため、画像解析により速度ベクトルの面的分布も測定した。画像解析にはライブラリー製の「ひまわり」によって画像のサンプリングを行い、さらに同社の画像解析ソフト「FLOW-vec32」を用いた。

実験は、フロント及び周囲水の流動を調べる実験では塩水のサーマルを用い、減速域の流動を調べる実験では硫酸バリウム混合水を用いた。

塩水を用いた実験条件を表1、硫酸バリウム混合水を用いた実験条件を表2に示す。 $f_r (=Ba_0/B_0)$ は、はじめに設定したバリウム重量 (B_0) からボックス内で沈降したバリウム重量 (Bf_0) を差し引いて、サーマルとして流下したバリウム重量 (Ba) のボックスでの量 $Ba_0 (=B_0 - Bf_0)$ を求め、 B_0 との比を計算したものである。バリウム混合水を攪拌してから実験を開始するまでの時間をほぼ同一に保つことで f_r をほぼ一

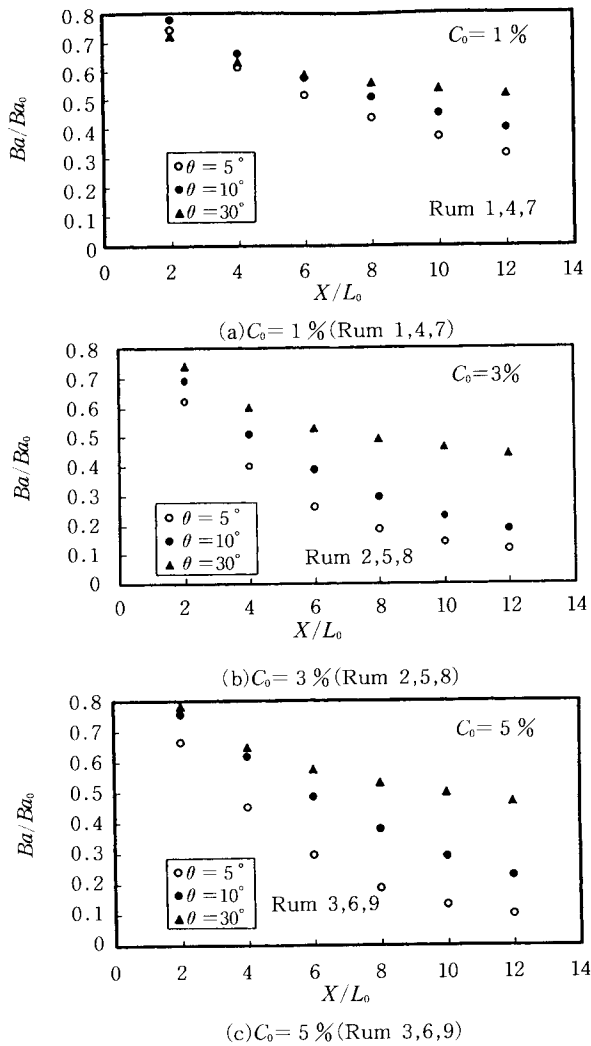


Fig. 2 Non-dimensional weight of Barium particles transported by thermals

定に保つことができた。また、初期相対密度差 ε_0 は、 Ba_0 から求めた。

フロントの流下速度及び最大高さは、水路側方からビデオ撮影した後、ストップモーションアナライザーを用いて解析、測定した。これらの実験結果については、流動シミュレーションの数値計算結果と比較して、後節で示す。

サーマルが流下すると流入部のボックスと水路には硫酸バリウムが沈降して残される。実験では、流入部のボックスおよび流下方向に20cm毎の区間に沈降したバリウムの重量 (B_f) をサイフォンで採取し測定した。サーマルとして流下するバリウムの重量 (B_a , 以下バリウム重量と呼ぶ) は、上流の位置のバリウム重量から考えている区間での沈降量を差し引くことに

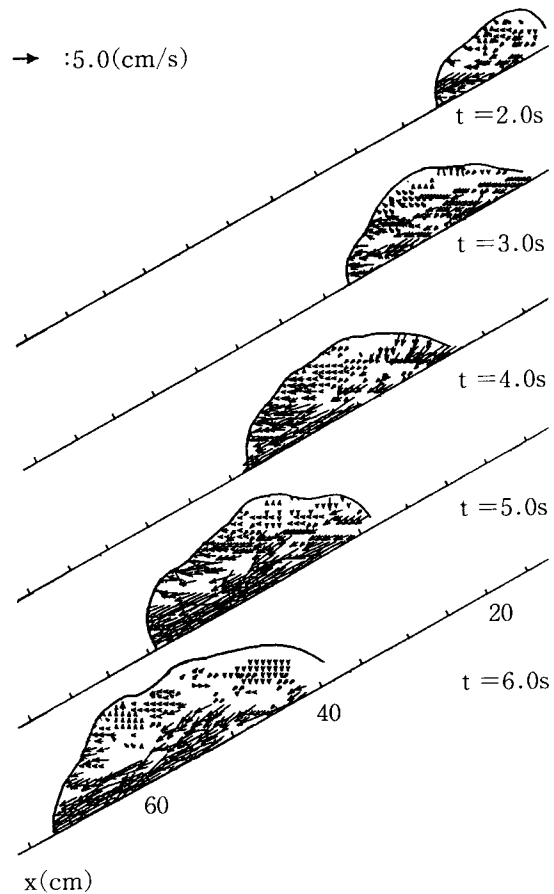


Fig. 3 Velocity vectors in the thermal (Run S5, $\theta = 30^\circ$, $C_0 = 5\%$)

より、サーマルとして流下するバリウム重量が求められる。Fig. 2に、計算で求めたバリウム重量 Ba を上流端でのバリウム重量 Ba_0 で無次元化した Ba/Ba_0 を無次元流下距離 ($= x/L_0$, $L_0 = V_0^{1/3}$, L_0 は代表長さ, $V_0 = 1 \text{ l}$ は混合水の初期体積) に対し示したものである。設定濃度は上から順に $C_0 = 1\%$, 3% , 5% である。バリウム重量は流下距離に対し指数関数的に減少すること、また傾斜角が小さいほど無次元バリウム重量の減少が大きいことが分かる。この理由は、小さな傾斜角ほどフロントの流下速度が小さく、粒子の巻き上げより粒子の沈降が卓越する結果、対象とする区間をフロントが通過する時間が長くなるためと考えられる。

本実験では、塩水あるいは硫酸バリウム混合水を用いて、現地の煙型雪崩の模擬実験を行うことに主眼をおいている。両者の流れが力学的に相似であるか否かは、この両者の流れではフルード相似 (密度フルード相似) で比較するのが適当であろう。今の場合、密度フルード数 F_r は次のようになる。

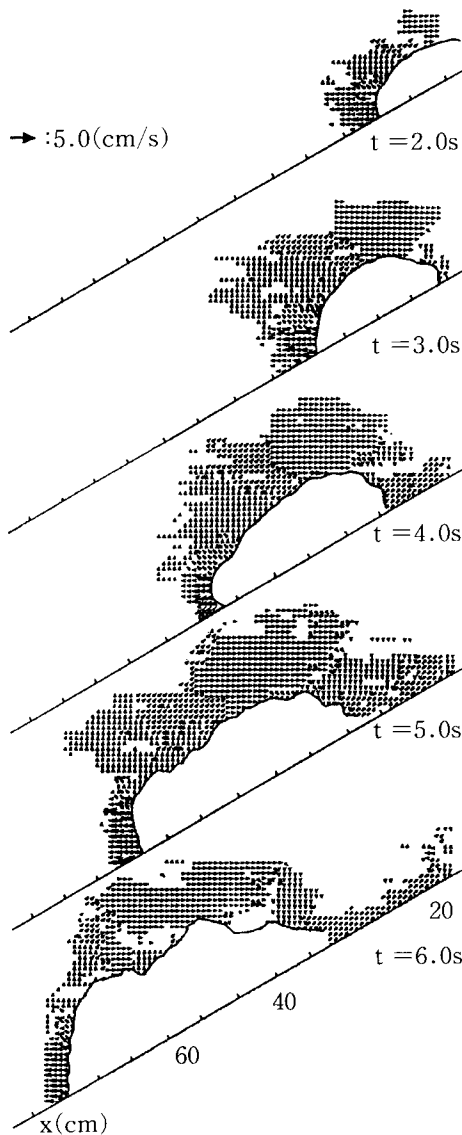


Fig. 4 Velocity vectors around the thermal (Run S5, $\theta = 30^\circ$, $C_0 = 5\%$)

$$F_r = \frac{u}{\sqrt{\epsilon gh}} \quad (1)$$

ここで、相対密度差 $\epsilon = \{RC / (1 + RC)\}$ であり、R は塩水の場合相対密度差と塩水濃度の比、硫酸バリウム混合水の場合固体粒子の水中での比重と重量濃度の比である。実際の雪崩のように固気混相流の場合、ほとんどの場合 $\epsilon = 1.0$ としてよい。実際の煙型雪崩での F_r として、杉森ら⁷⁾ が流動シミュレーションモデルで検討した横倉雪崩では、傾斜角が $8^\circ \sim 15^\circ$ の場合で $F_r = 4.5 \sim 4.9$ 、今回主として検討している 10° の場合で $F_r = 0.77 \sim 0.84$ であった。すなわち、今回の模擬実験では、フルードの相似が成り立っているとはいえない。ただし、両者の流動形態は互いに似ており、模擬実験としての意義は十分にあるといえる。特に後節で

示すように、規模が小さな固液二相流である傾斜サーマルと、規模が極めて大きい固気二相流である煙型雪崩は同じ流動モデルで説明できることが現在の段階では重要である。

サーマルの流動場を画像解析し、流速ベクトルを求めた結果を Fig. 3, 4 に示す。これらはトレーサーとして水の密度とほぼ等しいプラスチック粒子を用いて可視化を行ったものである。Fig. 3 は上流端のボックスにいたる塩水にプラスチック粒子を入れ、ゲートを開けたのちビデオ撮影し、それを画像解析したものである。Fig. 4 は水槽中にプラスチック粒子を浮遊させた後、粒子を含まない塩水をサーマルとして流下させて、画像解析を行った結果である。

サーマル内部の流速ベクトルは、底面付近で流れが速く、流下方向の速度ベクトルが卓越し、フロントの前端では巻きあがるベクトルが現れる。後部ではサーマル内に上から巻き込まれるようなベクトルが現れている。フロントの形状は半楕円で近似できることもわかる。サーマル周囲の流速ベクトルは、サーマル前面での流下方向と上向きのベクトルが現れている。後部では流下方向に巻き込まれるベクトルが確認できる。Fig. 4 に示されるように、サーマルの流下に伴って、フロント前部と後部で周囲水を連行する機構が明らかである。

3. 煙型雪崩の流動シミュレーションモデル

福嶋²⁾ は煙型雪崩の流動シミュレーションモデルを提案した。このモデルは Beghin et al.⁵⁾ の傾斜サーマルの解析モデル (Eacudier and Maxworthy⁴⁾) を基礎として、雪粒子の沈降、巻き上げを考慮したものである。重力密度流の実験結果を用いて、煙型雪崩のシミュレーションモデルの適用性を検討する。このため、福嶋²⁾ の提案したモデルに修正を加えたモデル (福嶋・金子¹¹⁾, 福嶋・萩原¹²⁾) により、実験結果との比較を行う。福嶋²⁾ のモデルには三式モデルと四式モデルがあるが、本論文では三式モデルを用いた。

以下にモデルの概要をまとめて示す^{2), 11), 12)}。Fig. 5 に示すように、固体粒子の密度を ρ_s 、周囲流体の密度を ρ_a 、固体粒子の体積濃度を C とするとき、混相流体の密度 ρ は次のように表される。

$$\rho = \rho_a + (\rho_s - \rho_a)C = \rho_a(1 + RC) \quad (2)$$

ここで、 $R = (\rho_s - \rho_a) / \rho_a$ は、固体粒子の相対比重差である。周囲流体中との相対密度差 ϵ は RC で表される。

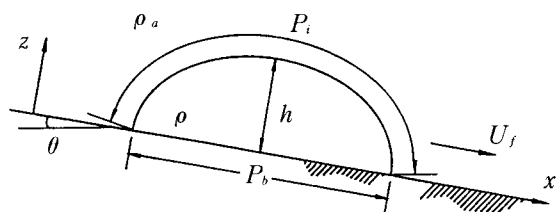


Fig. 5 Schematic view of inclined wall thermal.

サーマルの形状が斜面の傾斜角によって相似であると仮定する。この仮定は Hopfinger et al.⁸¹, Beghin et al.⁵¹ の実験により、傾斜角 θ が 5° 以上で成立することが確かめられている。傾斜サーマルの面積 A 、内部境界面の潤辺長 P_i 、底面の長さ P_b は最大厚さ h の一義的な関数であり、これらに対する形状係数 ξ_A , ξ_i , ξ_b を用いて次のように表す。

$$A = \xi_A h^2 \quad (3)$$

$$P_b = \xi_b h \quad (4)$$

$$P_i = \xi_i h \quad (5)$$

サーマルの水の体積の保存式は次のように表される。

$$\frac{d}{dt} (1 - C) A = E_w U P_i \quad (6)$$

ここで、 t は時間、 E_w は周囲流体の連行係数、 U はフロントの質量中心の移動速度である。また固体粒子の質量保存式は次式で表される。

$$\frac{d}{dt} C A = v_s (E_s - c_b \cos \theta) P_b \quad (7)$$

ここで、 v_s は固体粒子の静止流体中での沈降速度、 E_s は固体粒子を底面から浮上させる連行係数、 c_b は底面付近での固体粒子の体積濃度である。底面密度 ρ_b と c_b との関係は次式で表される。

$$\rho_b = \rho_a (1 - c_b) + \rho_s c_b = \rho_a (1 + R c_b) \quad (8)$$

式(6)と式(7)の和をとると、混相流体の質量保存式は次のようになる。

$$\frac{d}{dt} \rho A = \rho_a E_w U P_i + \rho_s v_s (E_s - c_b \cos \theta) P_b \quad (9)$$

また、サーマルの体積の保存式は次式で表される。

$$\frac{dA}{dt} = E_w U P_i + v_s (E_s - c_b \cos \theta) P_b \quad (10)$$

式(6)、式(7)、式(9)、式(10)のうち、2つが独立である。シミュレーションモデルでは、式(7)と(10)を用いることにする。

運動方程式は次式で表される。

$$\frac{d}{dt} (\rho + k_v \rho_a) U_f A = (\rho - \rho_a) g A \sin \theta - \tau_i P_i - \tau_b P_b - F_D \quad (11)$$

ここで、 k_v は仮想質量係数、 U_f サーマルのフロントの移動速度、 g は重力加速度、 τ_i , τ_b は、それぞれ、内部境界面と底面に作用するせん断応力、 F_D はサーマルに作用する抗力である。サーマルの位置 s は次式で求められる。

$$\frac{ds}{dt} = U_f \quad (12)$$

式(7)、(10)、(11)が傾斜サーマルの流動を表す基礎方程式である（三式モデル）。

シミュレーションモデルを構築するために、基礎方程式に加えて、構成方程式が必要である。

内部境界面及び底面に作用するせん断応力 τ_i , τ_b 、フロントに作用する抗力 F_D は、次のようにフロントの移動速度 U_f と関係づけられる。

$$\tau_i = \rho_a \frac{1}{2} f_i U_f^2 \quad (13)$$

$$\tau_b = \rho_b \frac{1}{2} f_b U_f^2 \quad (14)$$

$$F_D = c_D \rho_a \frac{1}{2} U_f^2 h \quad (15)$$

フロントの形状係数及び仮想質量係数はフロントの形状が半楕円形で表される (Beghin et al.)⁵¹ と考え、次のように表す。

$$\xi_A = \frac{\pi}{4} \xi_b \quad (16)$$

$$\xi_i = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \sqrt{(4\xi_b^{-2} + 1)} \xi_b \quad (17)$$

$$k_v = 2 / \xi_b \quad (18)$$

底面の長さに関連する形状係数 ξ_b は、斜面の傾斜角 θ の関数で与えられる。Beghin et al.⁵¹ の実験結果を整理して次のような式で表される。

$$\xi_b = 8.47 \theta^{1.13} \quad (19)$$

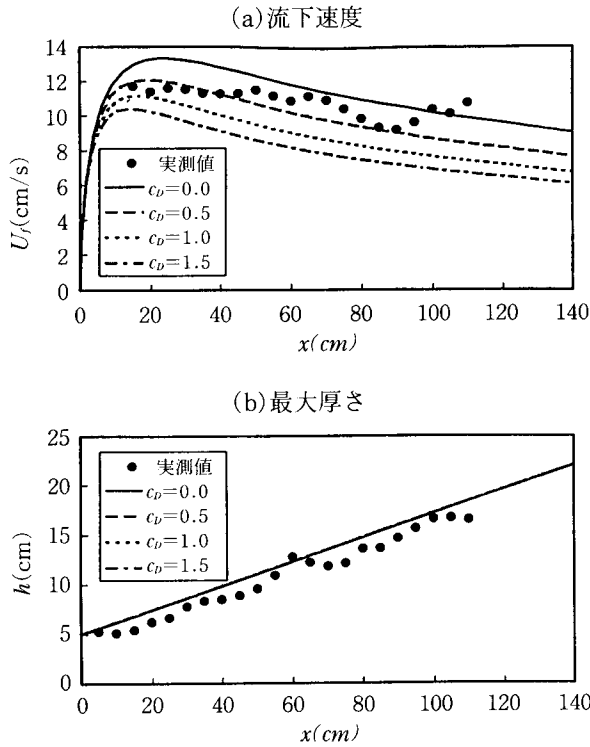


Fig. 6 Variation of the traveling speed of front and the maximum thickness (saline water, Run S5, $\theta = 30^\circ$, $C_0 = 5.0\%$).

ここで、 θ は度 ($^\circ$) で表される。
 周囲流体の連行係数 E_a は次式で表す。

$$E_a = \alpha \frac{\theta}{90^\circ} \quad (20)$$

ここで、 α は $\theta = 90^\circ$ の場合の連行係数であり、実験結果との比較により定めるものとする。

4. 傾斜サーマルの実験値と数値解析結果との比較

(1) 塩水による傾斜サーマル

煙型雪崩の流動シミュレーションモデルを2. 節の実験結果と比較する。まず、塩分濃度の差が密度差を生ずる原因となる塩水による傾斜サーマルについて検討する。この場合には式(7)の右辺は沈降速度 v_s が零となる。すなわち、

$$AC = AC_0 = const. \quad (21)$$

である。解くべき方程式は上式に加えて、式(1), (10)の3つである。密度の変化が小さい場合、式(3)を式(10)に代入し、 $dx/dt = U$ の関係を用いて積分を行うと次のようになる。

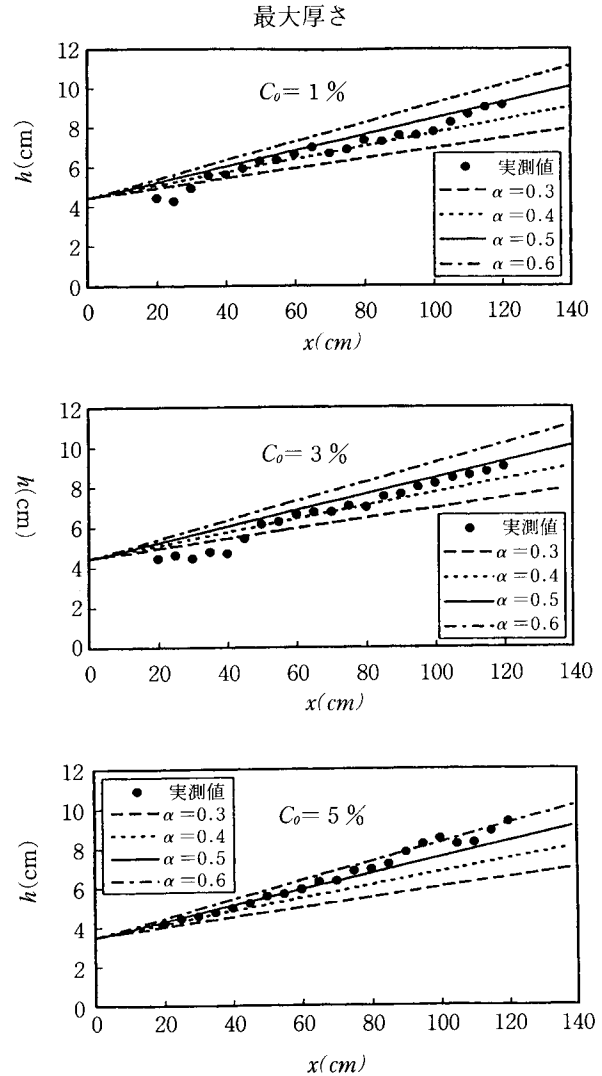


Fig. 7 Maximum thickness of thermals where α is chosen as a parameter ($\theta = 10^\circ$ and C_0 = Initial concentration of Barium sulfate particles), Run 4, 5 and 6.

$$h = h_0 + \frac{E_a \xi_i}{2 \xi_A} (x - x_0) \quad (22)$$

すなわち、サーマルの最大厚さの増分 $h - h_0$ は仮想原点からの流下距離 $x - x_0$ に比例して増加するという結果を得る。 $h - h_0$ に対して、水の連行係数 E_w 、形状係数 ξ_i 、 ξ_A が含まれているだけである。式(16), (17), (20)に明らかなようにこれらは斜面の傾斜角 θ だけの関数である。これは上述の式から明らかなように、流れの規模や流下速度には依存しない。

Fig. 6 にフロントの流下速度、最大厚さの計算値と実験値を比較して示す。実験は塩水による保存性傾斜サーマル (塩水, $\theta = 30^\circ$, $C_0 = 5.0\%$) の条件で行ったものである。数値計算のパラメータは抗力係数 c_D である。水の連行係数のパラメータ $\alpha = 0.5$ としている。

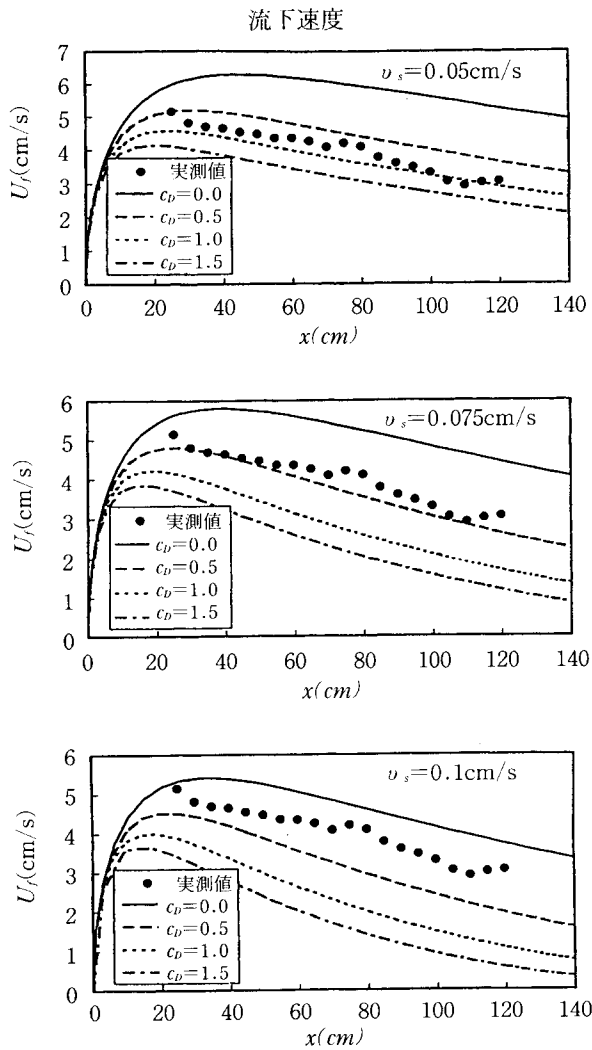


Fig. 8 Traveling speed of thermals where v_s and c_D are chosen as parameters. $\theta = 10^\circ$, $c_0 = 3\%$, Run 5.

この値は、福嶋・早川・山口¹⁰⁾の $\alpha = 0.3$ に比べて若干大きい。これはフロントの移動速度の定義が前回は質量中心の速度を用いていたのに対し、今回は質量中心の速度に加えフロントの伸び速度の和を用いたためである。このことを考慮すると、塩水サーマルの数値計算結果は実験値と比較して十分妥当な結果であると言える。

(2) 硫酸バリウムによる傾斜サーマル

本節では、硫酸バリウム混合水を用いた非保存性の傾斜サーマルのフロントの流下速度、最大厚さ、バリウム重量の実験値と数値解析結果を比較する。

先にも述べたように、傾斜サーマルの流動シミュレーションモデルには3つのパラメータが含まれている。水の連行係数 E_w あるいは α 、粒子の沈降速度 v_s 、フロントに作用する抗力係数 c_D である。式(2)で示したように最大高さは h_{max} は連行係数 E_w のみによって決まる。

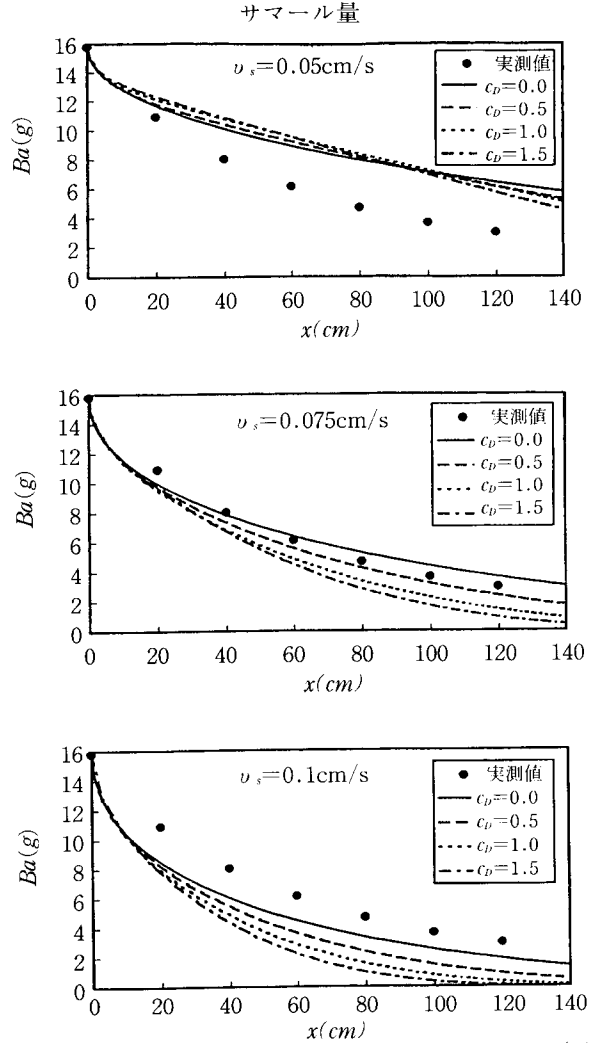


Fig. 9 Weight of Barium sulfate particles Ba(g) in the thermals where v_s and c_D are chosen as parameters. $\theta = 10^\circ$, $c_0 = 3\%$, Run 5.

沈降速度と抗力係数はフロントの流下速度、バリウム重量の双方に影響を与える。そこで、まず、最大厚さの流下方向変化と連行係数を変化させた数値解析結果と比較することにより、 α の値を定める。このようにして求めた α の値を用い、 v_s 、 c_D の両方を系統的に変化させて、対応する実験結果と比較し、最も妥当な値を定めることにする。

Fig. 7は、傾斜角 $\theta = 10^\circ$ の場合で、初期濃度が1%、3%、5% (Run 4,5,6) に対する最大厚さの実験結果に対し、 α の値を0.3~0.6の範囲で変化させて計算した結果を示す。これらより、3つの初期濃度が異なる結果について、 $\alpha = 0.5$ とした数値計算結果が妥当な値を与えることが示される。また、式(2)で予測されたように、濃度の違いによる最大厚さの変化は比較的小さい。

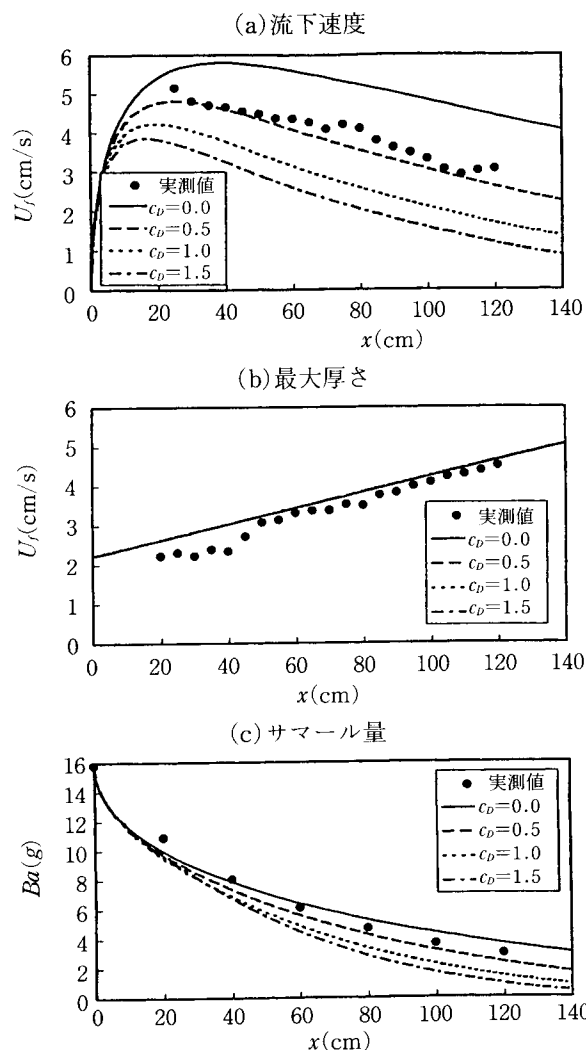


Fig.10 Results of numerical solutions where (a) travel speed, (b) maximum thickness and (c) weight of Barium sulfate particles in the thermals. $\theta = 10^\circ$, $c_0 = 3\%$, Run 5.

Fig. 8, 9 (何れもRun5)は硫酸バリウム粒子の沈降速度 v_s 、フロントに作用する抗力係数 c_D の両方を変化させて計算したフロントの流下速度、バリウム重量の結果を実験結果と比較したものである。実験条件は、傾斜角 $\theta = 10^\circ$ 、初期濃度 $C_0 = 3\%$ である。2つの図から v_s 及び c_D の違いにより、流下速度、バリウム重量は敏感に変化する事が分かる。これらから判断して、最適なパラメータの値は $v_s = 0.075\text{cm/s}$ 、 $c_D = 0.5$ とするとき、数値計算結果は実験結果を良好に再現することができる事が示される。

Fig.10は $c_D = 0.5$ 、 $v_s = 0.075\text{cm/s}$ 、 $\alpha = 0.5$ (Run 5)として計算した結果を傾斜角 $\theta = 10^\circ$ 、 $C_0 = 5\%$ の実験結果と比較したものである。これらより、シミュレーションモデルに含まれるパラメータを適切に選ぶ

ことにより、モデルによって、(a)流下速度、(b)最大厚さ、(c)サーマル重量の実験値に対して何れもよい精度で再現されることが分かる。すなわち、煙型雪崩の流動シミュレーションモデルが実験室規模の非保存性傾斜サーマルの流動をよく説明できることが示された。

Fig.11は、今回の実験による連行係数 E_w の結果を斜面の傾斜角(θ)に対してプロットしたものである。図中にはBeghin, Hopfinger and Britter⁵⁾及び秋山・浦・齋藤・富岡¹⁶⁾の実験結果も示されている。三者の実験結果は何れも傾斜角が大きくなると E_w も単調に増加する。しかし、その大きさはそれぞれの実験で異なり、秋山らの値は最も小さく、次に今回の実験結果さらに Beghin et al.の値の順となっている。このように連行係数の値はそれぞれの実験で若干異なる。この原因として考えられることは、実験装置による依存性である。秋山ら¹⁶⁾はこの理由として、Beghin et al.の実験では密閉型の水槽を用いているため逆流が生じその影響が無視できないためと推定した。

また、Escudier and Maxworthy⁴⁾は大規模な鉛直三次元サーマルにおける連行係数のデータを収集し、この場合の連行係数が $\alpha = 0.1 \sim 0.25$ の間にあることを示した。これらの値はFig. 11の値に比べてかなり小さい値である。このように連行係数の値は装置の大きさや現地規模の流れなどによってもその値が変化する可能性がある。これは煙型雪崩の流動シミュレーションで実際の雪崩の再現計算を行う場合に留意すべきことである。実際のシミュレーションでは、雪粒子の沈降速度を適切に選ぶ必要があるが、それに比べて連行係数も適切な値を選択する必要がある。

5. 結 論

煙型雪崩の流動シミュレーションの妥当性を調べるため、塩水及び硫酸バリウム粒子の混合水を用いて傾斜サーマルでの模擬雪崩実験を行った。今回の実験は小規模なもので、特に減速域を対象とした。塩水の実験では画像解析により、サーマル内部とその周辺の流速ベクトルの面的分布の時間変化を測定した。その結果フロント前部と後部からサーマル内に進入する流速ベクトルがあることを示した。

次に硫酸バリウム粒子と水との混合水を用いた実験では、流下速度、最大厚さの流下距離変化と共にサーマル内のバリウム重量の流下距離変化を測定した。これらの実験結果とシミュレーションモデルによる数値計算結果と比較し、モデルに含まれる3つのパラメー

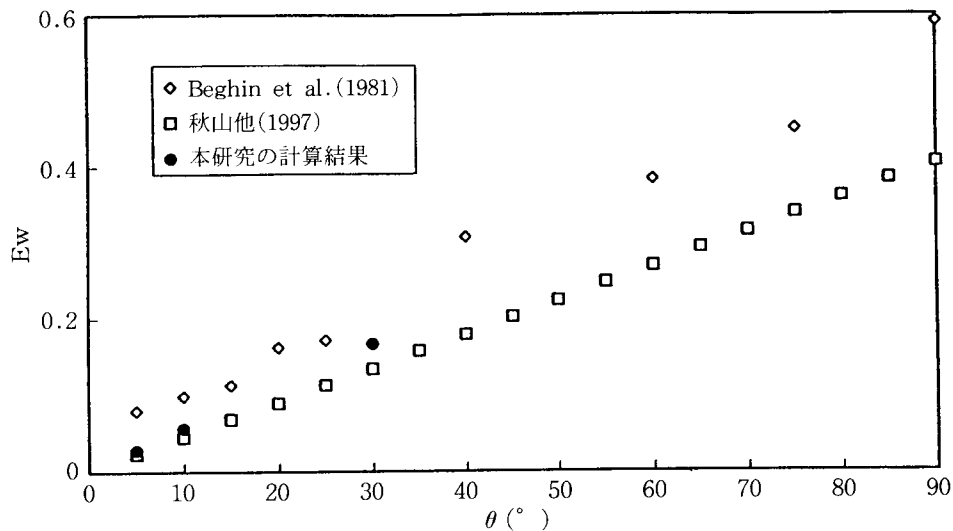


Fig.11 Entrainment coefficient of ambient water as a function of slope angle θ

タとして連行係数の係数 α , 沈降速度 v_s , 抗力係数 c_D を変化させるときの数値計算結果の違いについて考察した。 $v_s=0.075\text{cm/s}$, $c_D=0.5$ とすると、シミュレーションモデルによる数値計算と実験値がよく一致した。この沈降速度の値は、粒子径からみて妥当な値である。

このようにして得られた連行係数の値を他の研究者の値と比較し、今回の連行係数の値が従来より得られた値と同程度であることを示した。また、実際の雪崩では流れの規模が実験室の規模と大きく異なることから、連行係数の評価について留意が必要である。また、現地規模の雪崩のシミュレーションを行う場合には、雪粒子の沈降速度あるいは代表粒径、抗力係数の値を適切に選ぶことも必要である。

謝 辞

本研究の一部は文部省科学研究費補助金、基盤研究(C)(代表 福嶋祐介、課題番号0960563)の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Hopfinger, E.J., Snow Avalanche Motion and Related Phenomena, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.15, 47-76 (1983).
- 2) 福嶋祐介, 粉雪雪崩の流動機構の解析, 雪氷, Vol.48-4, 1-8 (1986).
- 3) 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, Vol.51-1, 11-18 (1992).
- 4) Escudier, M.P. and Maxworthy, T., On the Motion of Turbulent Thermals, *J. Fluid Mech.*, Vol.61-3, 541-552 (1973).
- 5) Beghin, P., Hopfinger, E.J. and Britter, R.E., Gravitational Convection from Instantaneous Sources on Inclined Boundaries, *J. Fluid Mech.*, Vol.107, 407-422 (1981).
- 6) 福嶋祐介, 新潟県榑川地区表層雪崩の流動解析, 雪氷, Vol.9-1, 1-8 (1987).
- 7) 杉森正義, 北川博正, 伊藤文雄, 梅田正浩, 福嶋祐介, 1996年福井県勝山市横倉・小原で発生した表層雪崩の流動特性, 雪氷, 59(5), pp. 319-330 (1997).
- 8) Hopfinger, E.J. and Beghin, P., Buoyant Clouds Appreciably Heavier than Ambient Fluid on Sloping Boundaries, *Proc. 2nd Int. Symp. on Stratified Flows, Norway*, Vol.1, 495-506 (1980).
- 9) 上石 勲, 川田邦夫, 密度流による雪崩の運動に関する模擬実験, 雪氷, Vol.56-2, 109-118 (1994).
- 10) 福嶋祐介, 早川典生, 山口武俊, 重力密度流による煙型雪崩の流動シミュレーションモデルの検討, 雪氷, Vol.58-3, 205-214 (1996).
- 11) 福嶋祐介, 金子幸弘, 固体粒子を浮遊する傾斜サーマルの減速域, 水工学論文集(土木学会), Vol.41, 537-542 (1997).
- 12) 福嶋祐介・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(土木学会), 42, pp.517-522, (1998).
- 13) Beghin, P. and Olagne, X., Experimental and Theoretical Study of the Dynamics of Powder Snow Avalanches, *Cold Regions Sci. and Technol.*, Vol.19, 317-356 (1991).
- 14) 福嶋祐介, 早川典生, 備前 享, 三次元傾斜サーマルの流動特性, 土木学会論文集, Vol.473/II-24, 17-24 (1993).
- 15) 福嶋祐介, 早川典生, 近藤 敏, 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-, 長岡技術科学大学研究報告, Vol.17, 67-74 (1995).
- 16) 秋山壽一郎, 浦 勝, 齋藤俊一郎, 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(日本流体力学会誌), 16-2, 149-161, 1997.