

# 粒径分布を考慮した浮遊性傾斜サーマルの流動特性

福嶋 祐介\*・今田 昌運\*\*

Flow Dynamics of Inclined Thermal of Suspended Solid Particles with Size Distribution

Yusuke FUKUSHIMA, Masayuki IMADA

**Abstract:** The experiments on the non-conservative inclined wall thermals using the mixture of water and barium sulfate particles are carried out. The experimental results obtained are compared with the numerical simulations. The new numerical model of an inclined wall thermal is proposed, in which the distribution of grain size is taken into account. The model consists of the continuity equation, the mass conservation equation and the momentum equation. In the model, the dimensionless value  $\alpha$  related to the entrainment coefficient  $E_w$ , the form drag coefficient  $c_D$ , and the grain size  $D$ , are chosen as parameters. Comparing the results of the numerical calculation with experimental results of inclined thermals, the values of  $\alpha = 0.5$ ,  $c_D = 0$  to  $0.5$  and  $D = 0.017 \sim 0.029$ mm are obtained.

**Key Words:** inclined thermal, suspension flow, particle diameter, numerical analysis, powder avalanche

## 1. 序 論

傾斜壁面サーマル(以下サーマル)は重力流の代表例であり、自然界で多く観測される。例えば、厳冬期山岳地帯で発生する煙型雪崩、海底や湖沼で発生する泥水流などである。傾斜サーマルは、密度差が保存される溶解性物質によって形成される“保存性傾斜サーマル”と、密度差が保存されない固体粒子の浮遊によって形成される“非保存性傾斜サーマル”とに分類される。この現象は非定常な運動を伴うことなどから十分な解明がされていない。特に煙型雪崩などの非保存性のサーマルは急斜面では斜面上に堆積している固体粒子を巻き上げ、流下方向に次第に加速する。また緩勾配斜面や室内実験などの小規模なサーマルでは粒子を巻き上げるほど乱れエネルギーが強くないので、サーマルから固体粒子が沈降し、サーマルは次第に減速する。

これまで、保存性の重力密度流については多くの研究がある。Beghin and Olagne<sup>1)</sup>は三次元の傾斜サーマルの実験と理論的検討を行っている。上石・川田<sup>2)</sup>は塩水を用いた傾斜プルームの実験を行っている。福嶋ら<sup>3)</sup>は塩水を用いた傾斜プルームの実験を行い、先に提案された二次元傾斜プルームの理論(福嶋<sup>4)</sup>)との比較を行っている。これらの研究は何れも煙型雪崩の模擬実験として行われたものである。

一方、非保存性のサーマルの流動機構を考慮するためには、固体粒子の特性を十分に考慮することが必要である。特に粒径はその大きさによって静水中の沈降速度が変化することから、サーマルの流動に与える影響は大きい。浮遊粒子の流体力学特性を考慮した傾斜サーマルの研究はあまり多くはない。著者ら(福嶋・金子<sup>5)</sup>、福嶋・萩原<sup>6)</sup>、福嶋・萩原・坂本<sup>7),8)</sup>)は固体粒子の沈降を考慮したサーマルの理論を提案し、実験を行いその結果と数値解析結果と比較してきた。これらの研究では粒子の直径を平均粒径で代表させている。一方、粒径の大きさは沈降速度と密接に関わっており、その分布(grain size distribution)を考慮することは浮遊サーマルの流動機構をより深く解明する上で重要であると考えられる。

本研究では、淡水中に塩水あるいは硫酸バリウム(以下バリウム)混合水を流下させ、二次元的に保存性あるいは非保存性サーマルを実験で再現した。測定項目として従来の研究で測定されてきたサーマルの流下特性、流動特性とともに硫酸バリウム粒子の粒径分布も測定した。流出ボックス内と流下方向に20cm間隔で採取した硫酸バリウム粒子を資料としてコールターカウンターを用いて粒度分布を測定した。これらの実験ではサーマルの流下速度を大きくするため、塩水濃度、バリウムの濃度を大きい場合も実験を行った。本論文では、新たに粒度分布を考慮した流動モデルを提案し、実験結果と比較・検討を行った。

原稿受付平成11年5月18日

\*長岡技術科学大学環境・建設系

\*\*エイエスビルコンサルタント

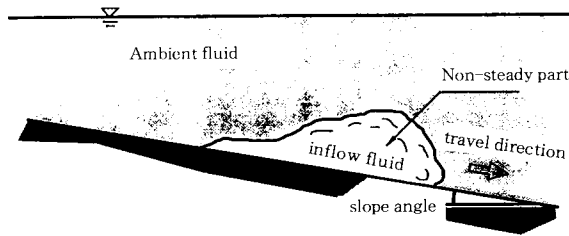


図1 傾斜壁面斜サーマルの模式図

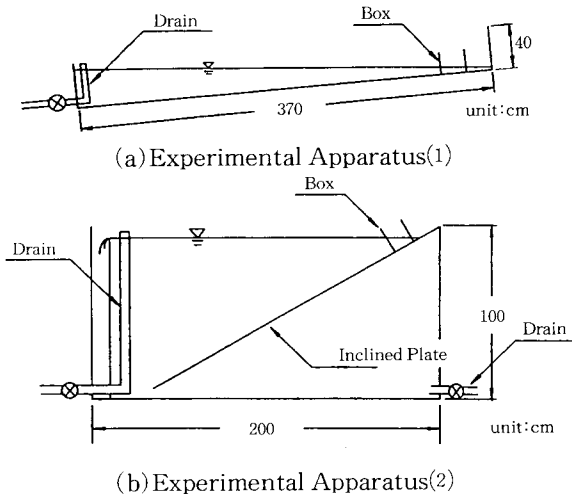


図2 実験装置(a)と(b).

## 2. 実験装置及び実験方法

### 2.1 実験装置

傾斜壁面サーマルの模式図を図1に示す。実験は斜面の傾斜角が $10^\circ$ と $30^\circ$ の2種類で行った。傾斜角 $10^\circ$ の実験では図2(a)の水槽を用いた。この水槽は長さ370cm、高さ40cm、幅15cmのアクリル製水槽である。また傾斜角 $30^\circ$ の場合では、図2(b)に示す、水路長200cm、高さ100cm、水路幅30cmのアクリル製水槽に幅15cmのアクリル板を傾斜角 $30^\circ$ に固定したものをを用いた。

### 2.2 実験方法

サーマルによる流れ場を調べるため、塩水による保存性傾斜サーマルの実験を行った。この場合、まず、淡水(水道水)を満たした水槽にプラスチック粒子を傾斜面に沈降させた。上流部に設けたボックスに塩水を1リットル入れる。ゲートを引き上げると塩水が流下し、傾斜壁面サーマルを発生させる。その様子をビデオカメラに撮影し画像解析ソフトを用いて流速ベクトルを測定した。

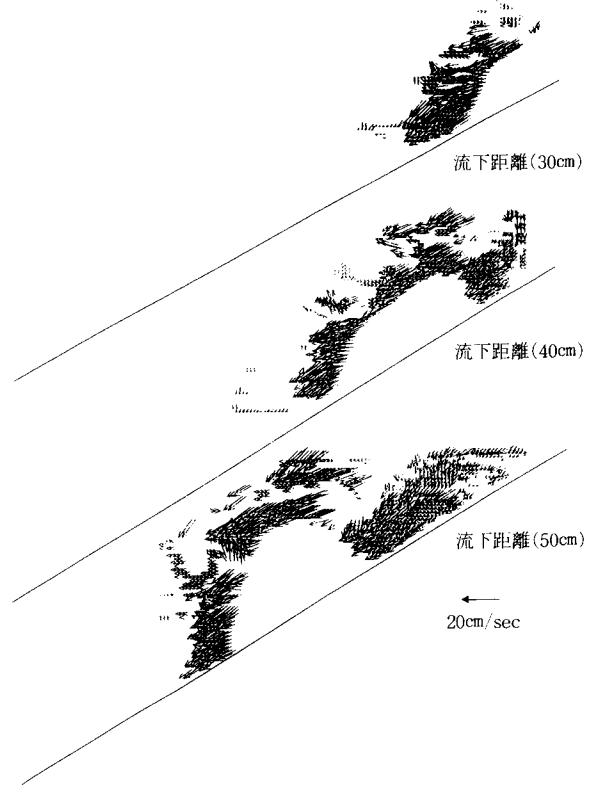


図3 サーマルの流速ベクトルの流下距離変化

次に、非保存性の傾斜壁面サーマルの流動特性を調べた。淡水を満たした水槽上部のボックスに硫酸バリウム混合水を1リットル入れる。ゲートを引き上げることによってサーマルを発生させる。その流れをビデオカメラで撮影し、最大厚さ、流下速度を測定した。サーマルとして流下する硫酸バリウム粒子量(以下ではサーマル量と呼ぶ)を測定するため、流下距離20cmごとにバリウム粒子を採取し、その沈降量を測定した。採取した硫酸バリウム粒子を粒径測定装置コールターカウンターを用いることによって、バリウム粒子の粒径分布を測定した。硫酸バリウムの比重は4.37である。本研究で対象とした実験の条件を表1にまとめて示す。

## 3. 実験結果とその考察

### 3.1 保存性傾斜サーマルの実験結果

流速ベクトルの流下距離に対する変化を図3に示す。これらは始め底面に沈降した粒子の動きの流速ベクトルを表す。この図から流下した直後のサーマルは、流下方向への流速ベクトルが大きく、それに比べ上方の流速ベクトルはあまり大きくない。しかし、流下距

表1：実験条件

Run No.	slope (°)	Initial C. Co (%)	Temp. °C	$\rho a$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\Delta\rho / \rho a$ (-)	-
1	30.0	25.0	16.0	0.99902	0.325	Saline
2	10.0	5.0	11.0	0.99961	0.04014	Barium
3	10.0	20.0	13.0	0.99938	0.18261	Barium
4	30.0	5.0	14.0	0.99924	0.04017	Barium
5	30.0	20.0	14.5	0.99917	0.18279	Barium

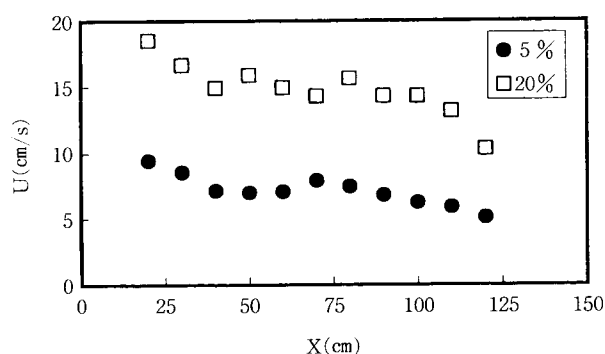


図4 流下速度の流下距離に対する変化(Run 2, Run 3)

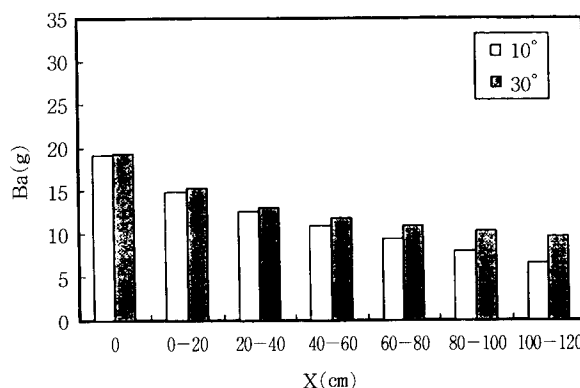


図6 サーマル量の流下距離に対する変化(C<sub>0</sub> = 5%, Run 2,  $\theta = 10^\circ$ , Run 4,  $\theta = 30^\circ$ )

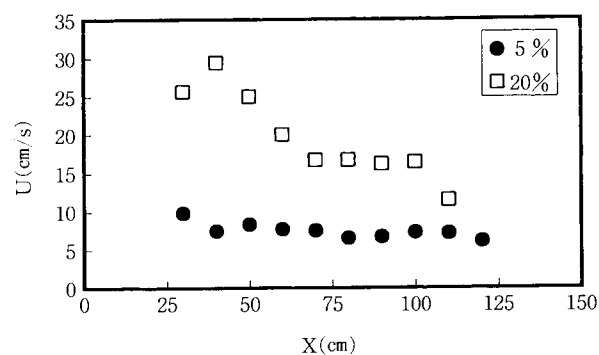


図5 流下速度の流下距離に対する変化(Run 4, Run 5)

離が大きくなるに従って、上向きの流速ベクトルも次第に大きくなる。このことは、流下直後のサーマルは流下方向に向かう重力成分が大きくその方向の流れが卓越することを示すものである。これに対し、流下距離が大きくなると、サーマルのフロント全体にわたって周囲水の連行が大きくなり、サーマルが発達し流速ベクトルが上方向になり、激しい渦の生成が行われているものと推定される。

### 3. 2 非保存性傾斜サーマルの実験結果

流下距離に対するサーマルの流下速度の変化を図4、5に示す。サーマルの流下速度は初期濃度が増加すると大きくなり、流下距離が大きくなるに従って流下速

度が減少する。初期濃度が大きくなるとサーマル内の負の浮力が大きくなるため、流下速度が大きくなると考えられる。周囲水の連行や粒子の沈降により負の浮力が減少することに対応して、流下方向にサーマルの流下速度が減少したものと考えられる。また傾斜角30°、濃度20%では流下直後の流下速度の減少が大きい。これは流下直後では粒子の沈降量が他の条件に比べ、多くなったことが原因の一つとも考えられる。

流下距離に対するサーマル量の変化を図6、7に示す。なお、ここで言うサーマル量とはサーマルとして流下した硫酸バリウムの重量を20cm間隔で算定したものである。この図から初期濃度5%の場合では、流下距離が大きくなるにつれサーマル量の差が生じている。これは $\sin \theta$ に比例して流下方向に働く重力の斜面方向成分が大きくなるため、サーマル内の粒子がより遠くに運ばれた事が考えられる。初期濃度が20%の場合では、全体的にサーマル量の差が大きくなっていることが分かる。これは傾斜角30°、初期濃度20%では流入ボックスの傾きが大きく、流入ゲート付近に硫酸バリウム粒子が多く堆積しており、混合水の流下に伴って多量に流出したため、傾斜角の影響が強く現れたことが主因であると考えられる。

実験に用いた硫酸バリウムの粒径を粒径測定装置コー

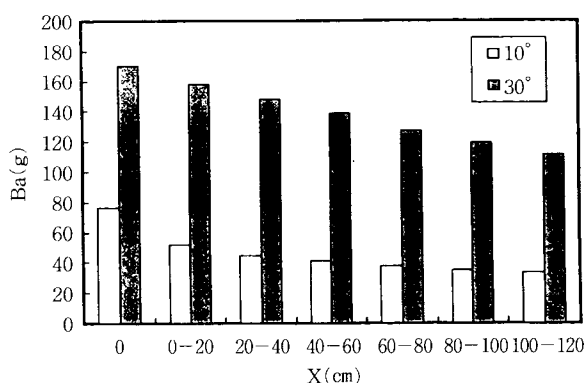


図7 サーマル量の流下距離に対する変化( $C_0 = 20^\circ$ , Run 3,  $\theta = 10^\circ$ , Run 5,  $\theta = 30^\circ$ )

表2: 硫酸バリウムの粒径分布

粒径 ( $\mu$ )	実測個数 (個)	個数微分値 (-)	体積微分値 (-)
2.009-2.565	35033	0.4203	0.12209
2.565-3.120	24233	0.2908	0.1521
3.120-4.002	14190	0.1702	0.1866
4.002-4.998	6176	0.0741	0.1639
4.998-6.356	2146	0.0257	0.1144
6.356-8.006	1046	0.0125	0.1129
8.006-10.09	416	0.00499	0.0899
10.09-12.71	105	0.00126	0.0453
12.71-16.01	1	0.00001	0.00086
16.01-20.18	1	0.00001	0.00176

ルターカウンターZM型によって測定した結果を表2と図8で示す。個数微分値とは各粒径範囲で測定した個数と全測定個数との割合を表したものである。また、粒径分布の流下に伴う変化を図9, 10に示す。このケースでは、沈降速度の違いにより、大きな粒径の粒子の比率が流下方向に伴い減少し、小さな粒径の粒子の比率が増加する傾向にあることが分かった。これは、大きな粒径の粒子は静水中での沈降速度が大きく沈降しやすいが、小さな粒径の粒子は沈降速度が小さく沈降しにくい為である。しかしながら、今回の実験では粒子の沈降速度に大きな差は見られず、この傾向は顕著には現れなかった。

#### 4. 粒径分布を考慮した傾斜サーマルの流動モデル

著者らが進めてきた傾斜壁面浮遊サーマルの流動モデル(福嶋ら<sup>8)</sup>)を発展させ、固体粒子の粒度分布を考慮できるように改良した。流動モデルの基本的な構成

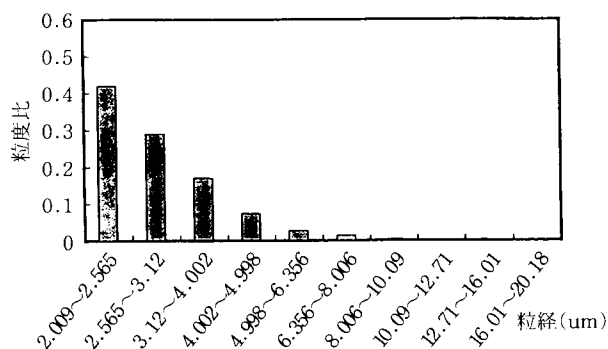


図8 硫酸バリウムの粒径分布

はサーマルの体積の連続式と流下方向の運動方程式、粒径分布を考慮した固体粒子の輸送方程式である。モデルを構築する上での仮定は基本的にはこれまでのものと同一であり、連続式、運動方程式に変更点はない。

傾斜サーマルの模式図と記号を図11に示す。斜面の傾斜角を $\theta$ 、周囲流体の密度を $\rho_a$ 、サーマルの平均密度を $\rho$ 、サーマルの層厚を $h$ 、サーマルの断面積を $A$ 、サーマルフロントの流下速度を $U_f$ 、底面の長さを $P_b$ 、サーマルの周囲流体と境界面との長さ(潤辺長)を $P_s$ 、サーマルの流下距離を $s$ 、重力加速度を $g$ とする。

固体粒子の粒径分布が全体で $n$ の範囲で分割する。その中で $k$ 番目の粒径区分の体積濃度を $C_k$ とする。体積濃度の総和を $C$ で表す。すなわち、

$$C = \sum_{k=1}^n C_k \quad (1)$$

である。解析では底面近傍の濃度も必要になるがこれは式(1)に準じて、次のように表される。

$$C_b = \sum_{k=1}^n C_{bk} \quad (2)$$

混合水としての密度 $\rho$ は $C$ を用いて次のように書ける。

$$\rho = \rho_a + (\rho_s - \rho_a)C = \rho_a(1 + RC) \quad (3)$$

ここで、 $R$ は固体粒子と周囲水の相対比重であり次式で表される。

$$R = (\rho_s - \rho_a) / \rho_a \quad (4)$$

固体粒子混合水の周囲流体中での相対密度差 $\epsilon$ はこの相対比重差 $R$ と固体粒子の体積濃度 $C$ を用いて、 $RC$ で表される。

福嶋が初めて示したように、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し、各種の形状関数を用いて、サーマルの幾何学的な特性を表現する。

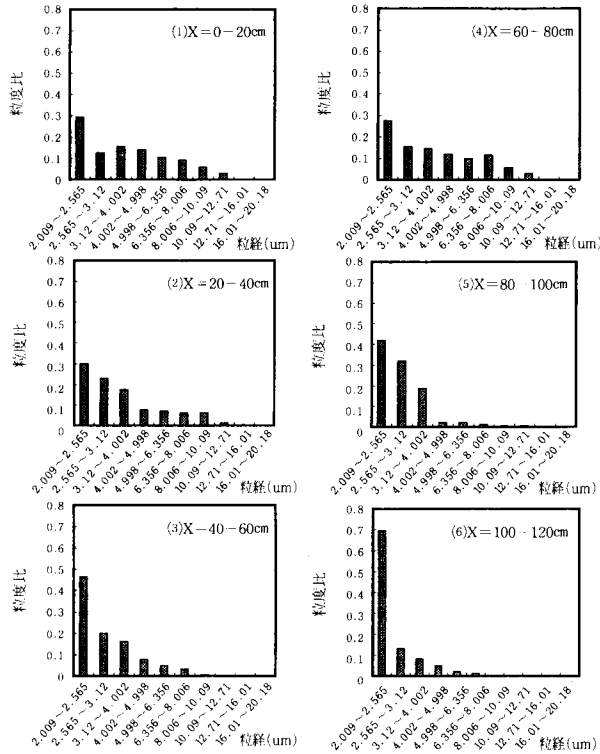


図9 流下距離20cmごとの粒径分布の変化, (Run 4,  $C_0 = 5\%$ ,  $\theta = 30^\circ$ ).

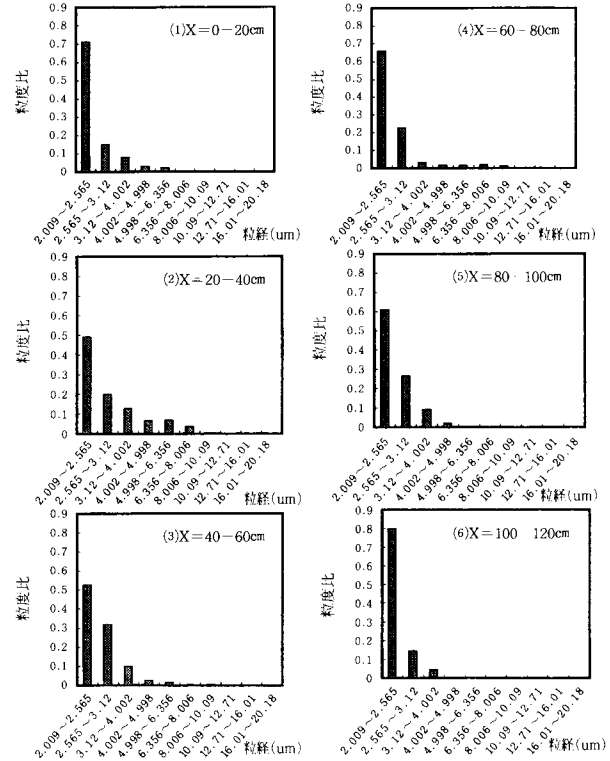


図10 流下距離20cmごとの粒径分布の変化, (Run 5,  $C_0 = 20\%$ ,  $\theta = 30^\circ$ ).

この仮定は、福嶋ほか<sup>(5),(6),(7),(8)</sup>により、傾斜角  $\theta$  が  $5^\circ$  以上で成立することが確かめられている。このとき、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  $\xi_A$ 、 $\xi_i$ 、 $\xi_b$  を用いて次のように表す。

$$A = \xi_A h^2 \quad (5)$$

$$P_b = \xi_b h \quad (6)$$

$$P_i = \xi_i h \quad (7)$$

このとき、 $k$  番目の粒径区分に対する固体粒子の輸送方程式は次のように表される。

$$\frac{d}{dt} C_k A = v_{sk} (p_k E_{sk} - c_{bk} \cos \theta) P_b \quad (8)$$

ここで、 $t$  は時間、 $v_{sk}$ 、 $p_k$ 、 $E_{sk}$ 、 $c_{bk}$  はそれぞれ  $k$  番目の粒径区分の沈降速度、路床での割合、粒子の連行係数、底面近傍の体積濃度である。式(7)は粒径区分の数  $n$  本あることになる。混合水の体積の保存式は次のようになる。

$$\frac{dA}{dt} = E_w U P_i + \sum_{k=1}^n v_{sk} (E_{sk} - C_{bk} \cos \theta) P_b \quad (9)$$

ここで、 $E_w$  は周囲流体の連行係数、 $U$  はサーマルの質

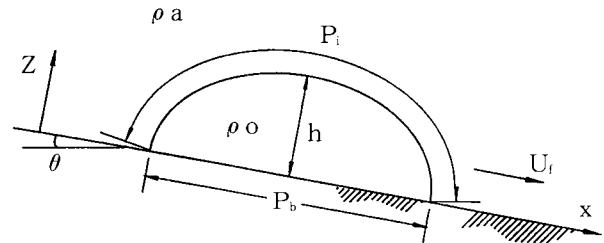


図11 傾斜壁面浮遊サーマルの模式図と記号

量中心の移動速度である。底面密度  $\rho_b$  と  $C_b$  との関係は次式で表される。

$$\rho_b = \rho_a (1 - C_b) + \rho C_b = \rho_a (1 + RC_b) \quad (10)$$

流下方向の運動方程式は次式で表される。

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

ここで、 $k_n$  は仮想質量係数、 $U_i$  はサーマルフロントの移動速度、 $g$  は重力加速度、 $\tau_i$ 、 $\tau_b$  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。サーマルフロントの質量中心の位置  $s$  は次式で求められる。

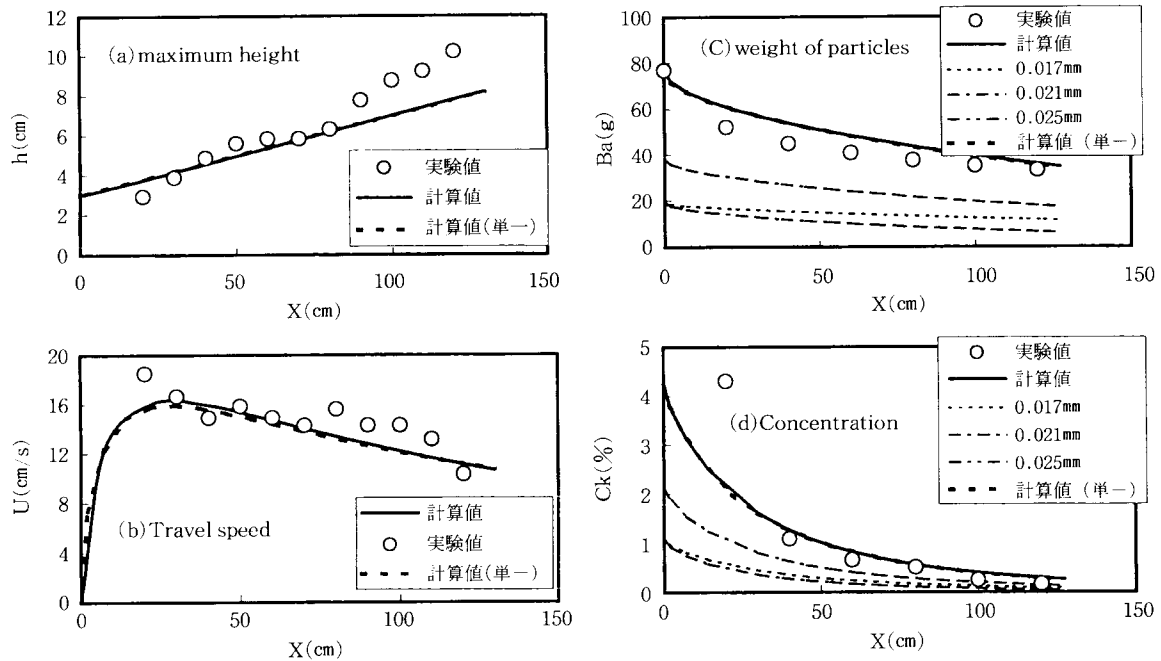


図12 計算結果と実験結果との比較(Run 3, C0 = 20%,  $\theta = 10^\circ$ ,  $\alpha = 0.5$ ,  $c_D = 0.5$ )

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

式(8), (9), (11), (12)が傾斜サーマルの流動を表す基礎方程式である。これは主たる微分方程式が3つであることから三式モデルと呼ばれる(福嶋<sup>9)</sup>)。

流動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  $\tau_i$ ,  $\tau_b$ , フロントに作用する抗力  $F_D$  は、サーマルの質量中心の流下速度  $U_f$  とフロントの移動速度  $U_f$  と次のように関係づけられる。

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

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

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

ここで、 $f_i$ ,  $f_b$  はそれぞれ、上部境界面と、底面での摩擦抵抗係数、 $c_D$  はフロントの抗力係数である。

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(福嶋, 1986)と考え、次のように表す。

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

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

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

底面の長さに関連する形状係数  $\xi_b$  は、斜面の傾斜角  $\theta$  の関数で与えられる。福嶋(1986)は次のような実験式を提案した。

$$\xi_b = 8.47 \theta^{-1.3} \quad (19)$$

ここで、 $\theta$  は度( $^\circ$ )で表される。

周囲流体の連行係数  $E_w$  は次式で表す。

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

ここで、 $\alpha$  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。Escudier and Maxworthy<sup>10)</sup>では規模の大きな鉛直三次元サーマルの場合で、 $\alpha = 0.1 \sim 0.25$  の値を報告している。一方秋山ら<sup>11)</sup>は室内実験による保存性の二次元サーマルに対し  $\alpha = 0.4$  となることを報告している。

粒径分布を考慮した底面での固体粒子の連行則度  $E_s$  は Akiyama and Fukushima<sup>12)</sup>により提案されている。しかし、今回の比較に用いた実験では流れの規模が小さいことから粒子の沈降が卓越した領域にあり、底面からサーマルへの粒子の連行は無視できるほど小さい

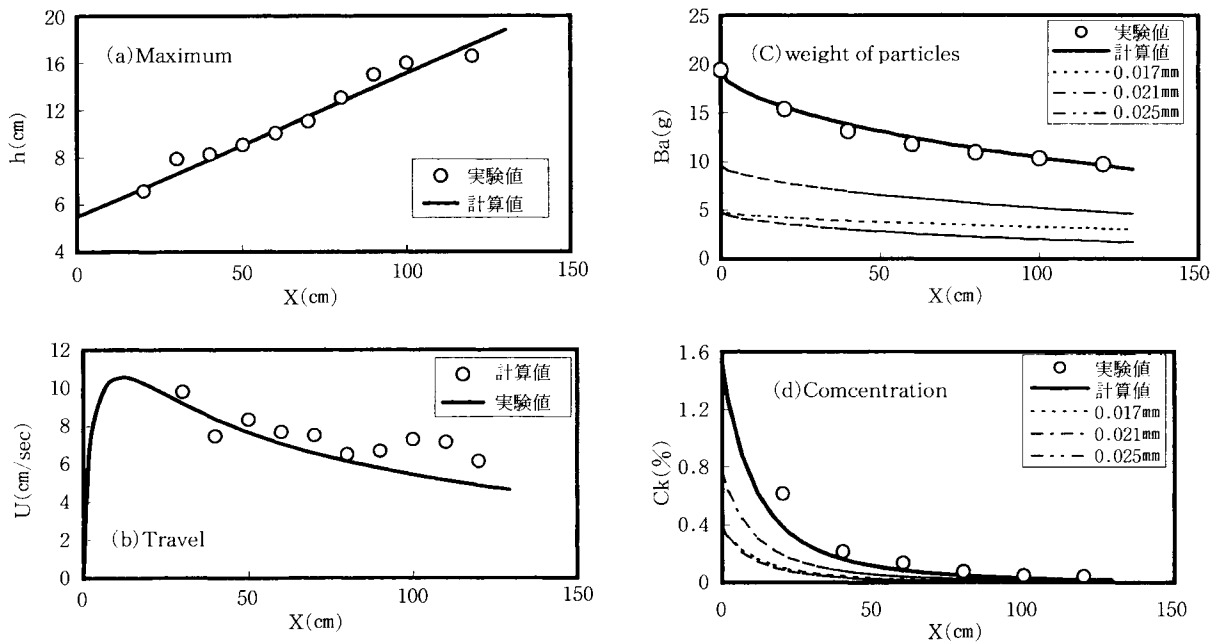


図13 計算結果と実験結果との比較 (Run 4,  $C_0 = 5\%$ ,  $\theta = 30^\circ$ ,  $\alpha = 0.5$ ,  $c_D = 0.5$ )

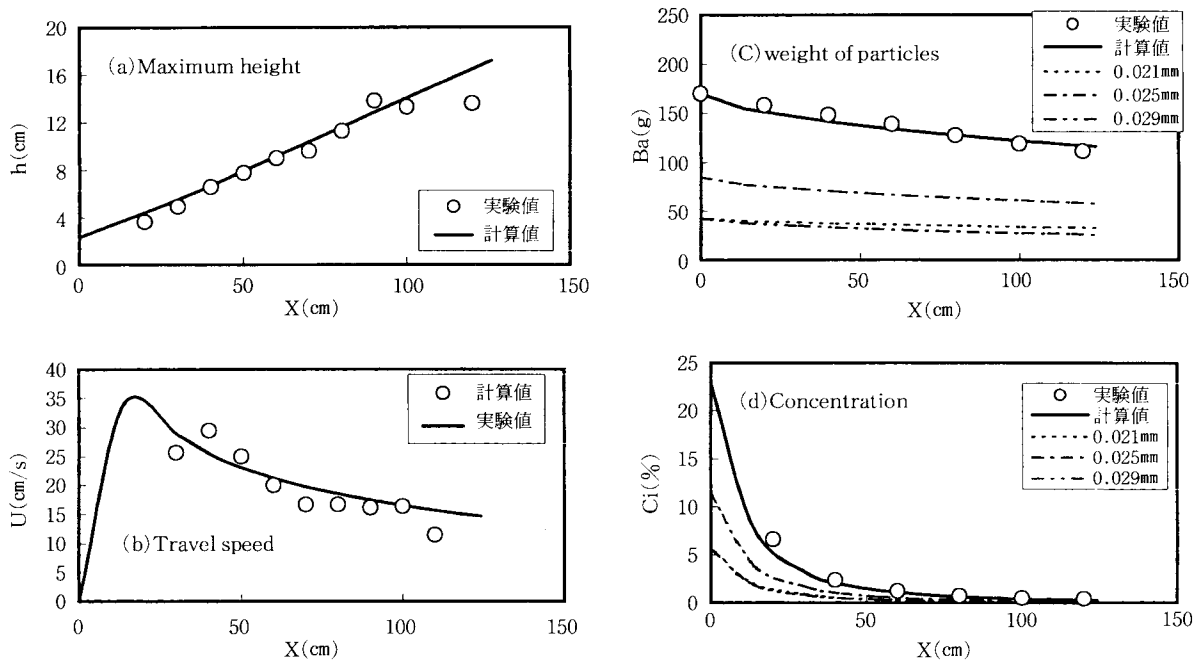


図14 計算結果と実験結果との比較 (Run 5,  $C_0 = 20\%$ ,  $\theta = 30^\circ$ ,  $\alpha = 0.5$ ,  $c_D = 0.5$ )

ので今回の解析ではこれを零とした。

計算では、パラメータとして粒子の粒径 $D_{sk}$ を与えることにする。今回の実験の範囲では粒子レイノルズ数が十分に小さいので、沈降速度をストークスの式で求めた。

$$v_{sk} = \left( \frac{\rho_s}{\rho_a} - 1 \right) g \frac{D_{sk}^2}{18\nu} \quad (21)$$

### 5. 計算結果と実験値との比較

数値計算にあたっては、福嶋ら<sup>7),8)</sup>の研究から、鉛直サーマルの連行係数 $\alpha$ を0.5、抗力係数 $c_D$ を0~0.5とすると良く適合することが分かっているので、この二つのパラメータをこの範囲に設定した。今回行った

数値解析では3つの粒径を考慮した。これは式(8)において $n=3$ としたことに対応する。図9, 10にバリウムの粒径分布を示している。一方予備計算において、これを元に粒径を定めると沈降速度が小さく、実験で得られた流下方向のバリウムの沈降量とはかけ離れた結果となった。そこで、今回の解析では実験で得たバリウムの沈降量を説明できるように粒径とその初期値を試行錯誤的に推定することにした。

その結果、粒径を0.017~0.029mmと設定した場合に実験値を良く再現できることが分かった。それらの粒径を用いた場合における結果を図12, 13, 14に示す。これらの図で(a)がサーマルの流下速度、(b)が最大厚さ、(c)サーマル量、(d)サーマル内の粒子濃度である。図から、分かるように流下速度、最大厚さ、サーマル量、粒子濃度のいずれも実験誤差の範囲で統一的に非保存性サーマルの流下特性を表すことができる。このように粒径分布を考慮することでより実験値に近い値を再現することが可能になった。一方、実験値との比較で得られた粒径はコールターカウンターで測定した実験結果より大きい傾向がある。このことは、硫酸バリウムの粒子は粘着性を持つため、個々の粒子が単独で沈降するのではなく、いくつかのグループの塊(フロック)となって沈降していると考えられる。この点に関して、実験室内でどのようにフロック状になっているか、またその沈降速度がどのような値をとるのか、を知ることは困難だと思われるが今後の検討課題である。また、フロックを形成しないような粒径の固体粒子を用いて実験を行うことも今後の課題である。

## 6. 結 論

本研究から以下のような結論を得た。

保存性傾斜サーマルの実験では、サーマルフロント部の底面からの巻き上げ、上部流体の巻き込みはサーマルが流下に伴って発達するに従い大きくなる。

非保存性傾斜サーマルの実験では、流下速度は硫酸バリウムの初期濃度が20%の場合には、粒子の沈降量が多くなることから流下速度の減少が僅かに大きくなる。流下速度は流下距離によってはあまり変化しない。サーマル量は初期濃度 $C_0$ が大きくなると、傾斜角 $\theta$ の影響を強く受けるようになる。硫酸バリウムの粒径分布は傾斜角 $30^\circ$ の場合では流下に伴って粒径の大きな粒子が減少し、小さな粒子が増加する傾向にある。

数値計算と実験結果の比較からは、連行係数 $\alpha=0.5$ と固定し、 $c_b=0\sim0.5$ の範囲にすることで、粒子の粒径として、 $D_p=0.017\sim0.029\text{mm}$ ほどの粒径分

布を与えれば、浮游傾斜壁面サーマルの流下特性を統一的に再現する事ができる。このように本論文では粒径分布をもった非保存性粒子を浮遊する傾斜サーマルの計算が技術的に可能であることを示された。一方、数値解と実験結果との比較から求められた粒径は単一粒子の沈降速度をストークスの式から求めた値より、かなり大きくなったことから、硫酸バリウムの粒子が塊となって沈降していることが示唆された。

謝辞：本研究の一部は文部省科学研究費補助金基盤研究(一般C) 代表者 福嶋祐介 課題番号 09650563 の補助を受けたことを記し、深甚なる感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Beghin, P. and Ollagne, X., Experimental and Theoretical Study of the Dynamics of Powder Snow Avalanches, Cold Regions Sci. and Technol., 19, 317-356, 1991.
- 2) 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, 56-2, 109-118, 1994.
- 3) 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, 58-3, 205-214, 1996.
- 4) 福嶋祐介, 固体粒子浮遊による二次元下層密度流先端部の解析, 土木学会論文集, 461/II-22, 21-31, 1993.
- 5) 福嶋祐介・金子幸弘, 固体粒子を浮遊する傾斜サーマル減速域, 水工学論文集, 土木学会, 41, 537-542, 1997.
- 6) 福嶋祐介・萩原達司, 浮游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, 517-522, 1998.
- 7) 福嶋祐介・萩原達司・坂本充男, 粒子浮遊サーマルの実験による煙型雪崩流動モデルの適用性の検討, 雪氷, 日本雪氷学会, 60-6, 453-462, 1998.
- 8) 福嶋祐介・萩原達司・坂本充男, 固体粒子浮遊による傾斜サーマルの流動特性, 水工学論文集, 土木学会, 43, 929-934, 1999.
- 9) 福嶋祐介, 粉雪雪崩の流動機構の解析, 雪氷, 48-4, 1-8, 1986.
- 10) Escudier, M. P. and Maxworthy, T., On the Motion of Turbulent Thermals, Jour. Fluid Mech., 61-3, 541-552, 1973.
- 11) 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.
- 12) Akiyama, J. and Fukushima, Y., Entrainment of Non-Cohesive Bed into Suspension, External Memorandum, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, University of Minnesota, 195, 1985.