

傾斜サーマルの流動特性とそのシミュレーション

株式会社熊谷組 正会員 ○坂本 充男
防 衛 庁 菅原 吉浩
長岡技術科学大学 正会員 福嶋 祐介

1. はじめに

煙型雪崩や泥水流など自然界で多く観察される傾斜サーマルは、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物質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。これらの現象は、非定常な運動を伴うことなどから十分な解明がなされていない。本研究では、傾斜サーマルの流動特性を実験的に解明すると共に、理論的な検討も行い、傾斜サーマルの流動機構を明確にすることを目的とする。

2. 実験的検討

2.1 実験条件

実験装置は、 10° の実験では、長さ 3.7m、高さ 0.4m、幅 0.15m の水槽を用いた。 30° の実験では、長さ 2.0m、高さ 1.0m、幅 0.15m の矩形水槽に傾斜板を設置したものをを用いた。実験条件を表 1 に示す。

表 1 実験条件

Run	測定項目	塩水の着色剤	$\theta(^{\circ})$	C(%)
1	流下速度	プラスチック 粒子 ウラニン色素	30	1
2	最大厚さ			3
3				5
4	流速ベクトル		10	1
5				5
6			30	1
7				5

2.2 実験方法

本研究では、塩水を淡水中に流下させ、人工的に保存性傾斜サーマルを再現した。この様子を水路壁面から VTR で撮影し、流動特性として流下速度、最大厚さ及びサーマル内外部の流速ベクトルの測定を行った。なお、流速ベクトルは流体画像解析ソフトを用いた。

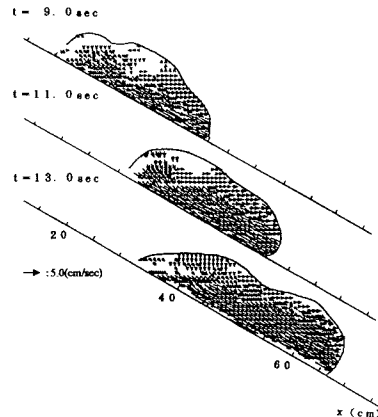
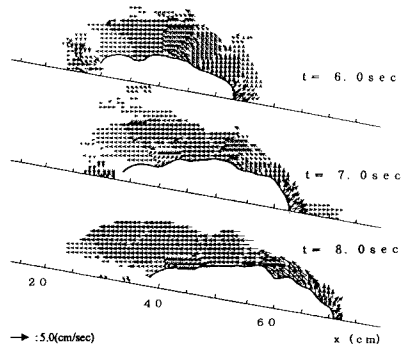
2.3 実験結果

画像処理により求めたサーマル内外部の瞬間流速

保存性傾斜サーマル、非保存性傾斜サーマル、数値計算

〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1 TEL 0258-46-6000 FAX 0258-47-9600

ベクトルの経時変化を図 2.1、図 2.2 に示す。図 2.1 より、サーマル内部の流速ベクトルは、底面の流下方向のベクトル、フロント部の巻き上がりのベクトル、後部の巻き込みのベクトルが確認された。図 2.2 より、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同方向のベクトル、上部での流下方向と逆向きのベクトル、後部での流下方向へ巻き込むベクトルが確認された。このように、サーマルは周囲水を連行しながら発達していくことがわかった。流下速度、最大厚さの実験結果は、後節で説明する数値シミュレーションの結果と比較して論議を行う。

図 2.1 サーマル内部の流速ベクトル($\theta=30^\circ$, $C=1\%$)図 2.2 サーマル周囲の流速ベクトル($\theta=10^\circ$, $C=5\%$)

3. 理論的検討

数値解析にあたって、本実験結果を用いた保存性傾斜サーマルの数値解析と福岡¹⁾の実測データを用いた非保存性傾斜サーマル(硫酸バリウム混合水を用いた)の数値解析を行い、理論値と実験値との比較・検討を行った。

3.1 基礎方程式

保存性、非保存性の傾斜サーマルのモデルは福岡²⁾によって提案されている。このモデルは乱れエネルギーの式を省略した三式モデルであり、次に示す連続式、濃度の保存式、運動量保存式よりなる。

○連続式

$$\frac{d}{dt} \rho A = \rho_a E_w U_f P_i \quad E_w = \alpha \frac{\theta}{90^\circ}$$

○濃度の保存式

$$\text{保存性: } \frac{d}{dt} CA = 0$$

$$\text{非保存性: } \frac{d}{dt} CA = V_s (E_s - C_b \cos \theta) P_b$$

○運動量保存式

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (\rho + k_v \rho_a) U_f A = & \rho_a R g \sin \theta CA - \frac{1}{2} \rho_a c_D U_f^2 h \\ & - \frac{1}{2} f_i \rho_a U_f^2 P_i - \frac{1}{2} f_b \rho_b U_f^2 P_b \end{aligned}$$

ここで、 ρ はサーマルの平均密度、 ρ_a は周囲流体の密度、 A は横から見たサーマルの面積、 C 、 c_b はそれぞれサーマルの平均体積濃度と底面付近の濃度、 k_v は仮想質量係数、 g は重力加速度、 c_D はサーマルの抵抗係数、 f_i 、 f_b はそれぞれ界面と底面の摩擦係数、 E_w は水の連行係数、 E_s はバリウム粒子の連行係数、 V_s はバリウム粒子の沈降速度である。この計算において、保存性・非保存性の傾斜サーマルでは連行係数 E_w の式中の係数 α と抗力係数 c_D をパラメータとし、非保存性の傾斜サーマルでは硫酸バリウム粒子の沈降速度 V_s もパラメータとし、これらのパラメータを適当に変化させ流下速度・最大厚さの流下方向変化を求め、実験値との比較を、また、非保存性の傾斜サーマルに関してはサーマル内の粒子量の実験値と計算値との比較も行った。サーマルの粒子量とは、初期バリウム重量からサーマルが流下した後に底面に沈降したバリウム量を20cm間隔で差し引いていった量である。すなわちサーマルとして流下したバリウムの重量のこ

とである。

3.2 計算結果

図3.1に保存性の結果を、図3.2に非保存性の結果を示す。これらの図から $\alpha=0.5$ 、 $c_D=0.0 \sim 0.5$ と設定することで計算値が実験値を良好に再現すると考えられる。 V_s については $0.025 \sim 0.125(\text{cm/s})$ の範囲内に設定することで計算値と実験値が一致した。

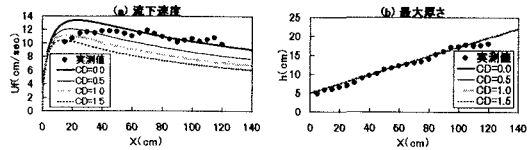


図3.1 保存性の計算結果と実験値との比較

($\theta=30^\circ$, $C=5\%$, $\alpha=0.5$)

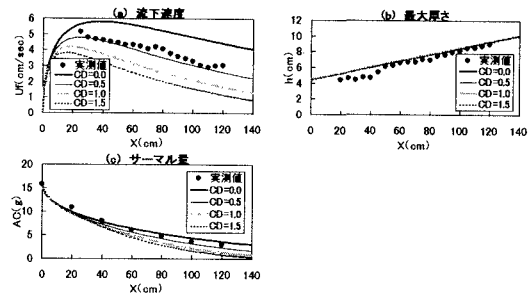


図3.2 非保存性の計算結果と実験値との比較

($\theta=10^\circ$, $C=3\%$, $\alpha=0.5$, $V_s=0.075$)

4. 結論

本研究で得られた結果は以下の通りである。

- (1) サーマル内部の流速ベクトルは、流下方向・巻き上がり・巻き込みの3つに分類できた。
- (2) サーマル周囲の流速ベクトルは、流下方向・逆向き・巻き込みの3つに分類できた。
- (3) 保存性・非保存性共に連行係数の無次元量 $\alpha=0.5$ 、抗力係数 $C_D=0.0 \sim 0.5$ の範囲内に設定することでほぼ統一的に実験値を説明できた。
- (4) 硫酸バリウム粒子の沈降速度 $V_s=0.025 \sim 0.125(\text{cm/sec})$ の範囲内に設定することで実験値と計算値が一致することがわかった。

参考文献

- (1) 福岡祐介、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、42、pp.517-522、1998。
- (2) 福岡祐介：固体粒子浮遊による2次元下層密度流先端部の解析、土木学会論文集、No.461/11-22、pp.21-30、1993.2