k-ε 乱流モデルを用いた粒子サーマルの数値解析手法の検討

長岡技術科学大学大学院　　学生会員　○衞藤俊彦
長岡技術科学大学環境・建設系　正会員　　福嶋祐介

1. はじめに

冬季山岳地帯などにおいて、空気の乱れによって巻き上げられた雪粒子は周囲の空気との密度差によって斜面方向に重力流を形成する。この現象は煙型雪崩と呼ばれる。煙型雪崩は、それを形成する雪粒子の底面への沈降・堆積と、底面からの雪粒子の巻き上げによって負の浮力が保存されない非保存性傾斜サーマルである。

図－1 は傾斜サーマルの模式図である。上流部より流入した流体が全体として非定常なフロント部を形成しながら流下する。このときフロント部では大規模な渦運動を伴うため、傾斜サーマルの解析には乱流構造を考慮したモデルを用いる必要がある。

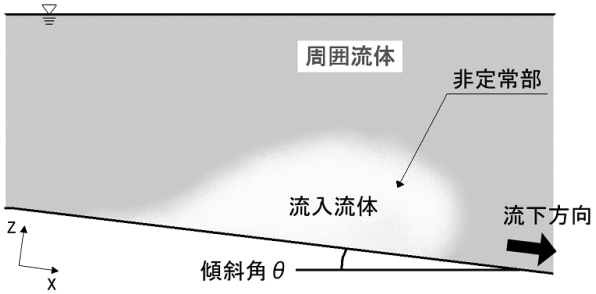
本研究では非保存性傾斜サーマルについて数値計算手法を提案し、実験結果と比較することによりその妥当性を検討する。計算モデルには乱流運動エネルギー k と分子粘性逸散率 ε を未知数とする k-ε 乱流モデルを用い、差分スキームには S.V.Patankar による SIMPLE 法を採用した。

数値解析による結果からサーマルの流下速度、最大厚さ、サーマル量を求め、福嶋らが行った [1] 硫酸バリウムを用いた傾斜サーマルの室内実験の結果と比較しその妥当性の検証を行った。ここでサーマル量とはサーマルに含まれる硫酸バリウム、または塩分の重量である。また内部機構の解明のためフロント部における流速ベクトル・濃度コンターを求めた。

2. 福嶋らの実験の概要

福嶋らの行った実験の概要を述べる。実験装置は幅 30cm、深さ 100cm、全長 200cm のアクリル製水槽に幅 15cm のアクリル板を傾斜角 30° に固定したものを用いた。水路上端部には引き上げゲート式のボックスが設置してある。水路内には真水が満たされており、上流部のボックスには硫酸バリウム混合水が 1 リットル入っている。ゲートを引き上げることによってサーマルを発生させ、流入するサーマルを画像解析を用いて流下速度、最大厚さを求めた。サーマル量は初期サーマル量から沈降した硫酸バリウム量を引いて求めた。

キーワード：粒子サーマル、k-ε 乱流モデル、煙型雪崩、SIMPLE 法、数値解析
連絡先：〒 940-2188 長岡市上富岡町 1603-1 長岡技術科学大学 Tel 0258-46-6000



図－1 傾斜サーマルの模式図

3. 解析モデル

数値解析に用いた基礎方程式は、連続式、x、z 方向のレイノルズ方程式、浮遊粒子の輸送方程式、乱流運動エネルギー k の方程式、分子粘性逸散率 ε の方程式である。これらの方程式は衞藤・福嶋 [2] の研究と同様のものを用いた。ここで浮遊粒子の沈降の影響を考慮するため、浮遊粒子の輸送方程式については以下のように変形される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (u + w_s sin\theta)\frac{\partial c}{\partial x} + (w - w_s cos\theta)\frac{\partial c}{\partial z} = D\left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_t}\frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_t}\frac{\partial c}{\partial z}\right) \tag{1}$$

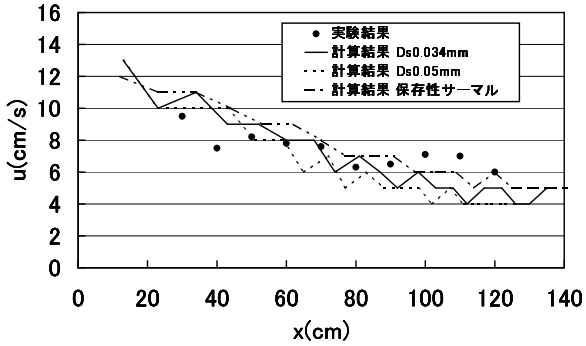
ν_t は渦動粘性係数であり、k と ε を用いて次のように表す。

$$\nu_t = c_\mu k^2/\varepsilon \tag{2}$$

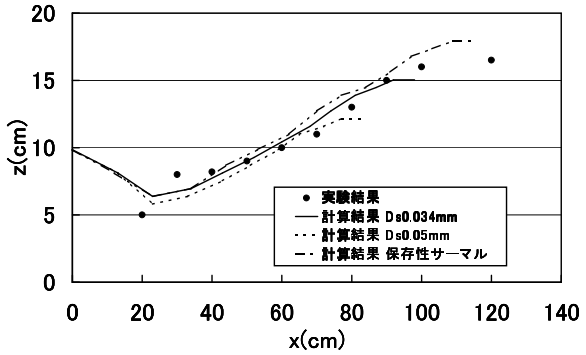
ここで w_s は鉛直方向の浮遊粒子の沈降速度、D は分子拡散係数、σ_t、c_μ は k-ε 乱流モデル定数である。

4. 実験結果と数値解析結果の比較

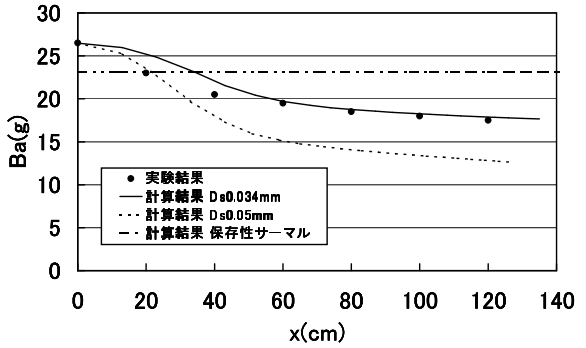
福嶋らの実験結果と比較するため、実験と同一の水理条件のもとで数値計算を行った。実験で用いた硫酸バリウム粒子は粒径分布を持ち、代表的な粒径が不明確であった。そのため粒径を変化させて数値計算を行い、サーマル量の実験結果と比較し、粒径を 0.034mm とすることで両者が一致することを確かめた。非保存性傾斜サーマルの特徴を調べるため、粒径 0.05mm の条件と保存性傾斜サーマルの条件についても数値計算を行った。**図－2** はサーマルの流下速度の流下方向変化のグラフである。実験結果と計算結果は比較的一致している。**図－3** はサーマルの最大厚さの流下方向変化のグラフである。実験結果と計算結果はよく一致し



図－ 2 サーマルの流下速度の流下距離に対する変化

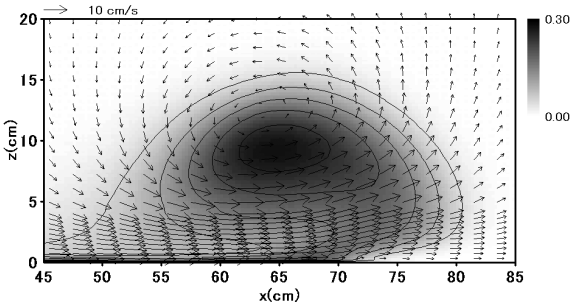


図－ 3 サーマルの最大厚さの流下距離に対する変化

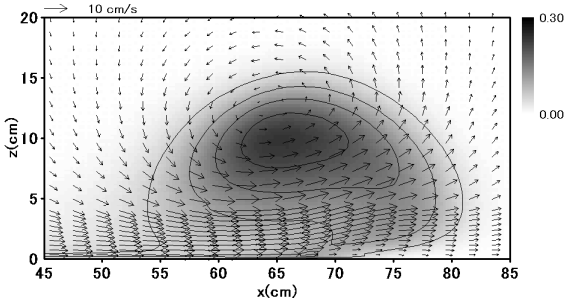


図－ 4 サーマル量の流下距離に対する変化

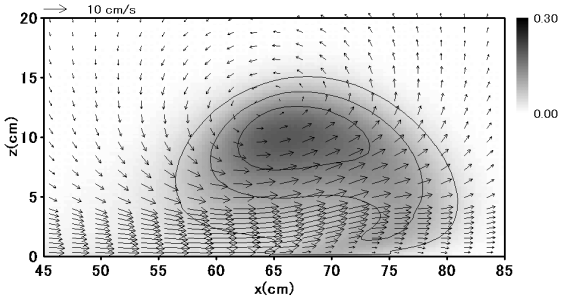
ている。厚さは粒径により若干の違いが見られるが、同様の線形的増加を示している。**図－ 4** はサーマル量の流下方向変化のグラフである。保存性サーマルではサーマル量は流下方向に対して一定である。粒径が 0.034mm と 0.05mm の場合では、粒径が大きいほど沈降速度が大きくなりサーマル量の減少の度合いが大きくなっている。**図－ 5**～**7** はそれぞれ流下距離 80cm における保存性サーマル、粒径 0.034mm、粒径 0.05mm の非保存性サーマルの数値計算結果での濃度コンター、流速ベクトル図である。サーマルの前部で巻き上げ、上部で後方へ、後部で巻き込みの流速ベクトルが発生しているのがわかる。粒径が大きくなるほど浮遊粒子の沈降量が大きいため濃度が小さくなっており、また流速ベクトルも全体的に小さくなっている。



図－ 5 濃度コンター、流速ベクトル図（保存性サーマル）



図－ 6 濃度コンター、流速ベクトル図（粒径 0.034mm）



図－ 7 濃度コンター、流速ベクトル図（粒径 0.05mm）

6. おわりに

非保存性傾斜サーマルについて、k-ε 乱流モデルを用いて SIMPLE 法による離散化を行い、数値解析を行った。数値解析は 2 種類の粒径と保存性サーマルの条件のもとで行った。得られたサーマルの流下速度、最大厚さ、サーマル量を福嶋らが行った実験結果と比較し、よく一致することを確かめた。また数値解析結果を濃度コンター、ベクトル図で表すことによって、非保存性傾斜サーマルの内部構造の解明を行うことができた。

参考文献

1) 福嶋祐介・今田昌運：粒径分布をもつ固体粒子浮遊による傾斜サーマルの解析法、水工学論文集、第 44 巻、pp.909～914、2000.

2) 衛藤俊彦・福嶋祐介：k-ε 乱流モデルによる保存性傾斜サーマルの数値解析、水工学論文集、第 46 巻、pp1043～1048、2002.