

煙型雪崩の流動に対する雪の連行係数の効果

長岡工業高等専門学校

正会員 ○衛藤俊彦

福島工業高等専門学校

正会員 菊地卓郎

株式会社 東京建設コンサルタント

正会員 大澤範一

1. はじめに

煙型雪崩は、何らかの原因によって地面から巻き上げられた雪粒子が重力によって斜面方向に流下する現象である。流下に伴い地面からの雪粒子の巻き上げや、地面への沈降・堆積を伴うため、煙型雪崩の負の浮力の総量は増減し、流下方向に加速または減速する。そのためこの雪粒子の巻き上げの評価が、煙型雪崩の解析を行う上で非常に重要である。

本研究では煙型雪崩における雪粒子の巻き上げについて、雪の連行係数の概念を導入し $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いて数値計算を行った。雪の連行係数を変化させて計算を行い、数値計算結果から得られた雪崩の流下速度、層厚などの流下特性を求める。その結果を比較することにより連行係数が煙型雪崩の流動に及ぼす影響を調べた。

2. 計算モデル

数値計算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、雪粒子濃度の輸送方程式、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。これらの方程式は衛藤・福島¹⁾の研究と同様のものを用いた。

3. 数値計算条件

図 - 1 に煙型雪崩の模式図を示す。計算の座標軸は斜面方向を x 軸、それと鉛直方向を z 軸とした。一定の傾斜角 $\theta=30^\circ$ をもつ二次元の斜面上には雪粒子が堆積しているとし、上流端においては初期高さ 35m、斜面方向長さ 9 m の領域に、初期雪粒子濃度 $c_0=0.01$ を与え、これが計算開始とともに斜面方向に流下する条件で計算を行った。雪粒子の密度は $\rho_s=161.4\text{kg/m}^3$ 、粒径は $D_s=0.1\text{mm}$ とした。また雪の連行係数 E_s は次式を用いて表した。

$$E_s = AZ_u^5 / \left(1 + \frac{A}{B} Z_u^5 \right) \quad (1)$$

ここで、 $A = 1.3 \times 10^{-7}$ 、 B は連行係数の上限を定める定数、 $Z_u = R_p^{0.6} u_* / w_s$ 、 R_p は雪粒子のレイノルズ

キーワード：煙型雪崩、雪の連行係数、 $k-\varepsilon$ 乱流モデル、SIMPLE 法、数値計算

連絡先：〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888 番地
長岡工業高等専門学校 Tel 0258-32-6435

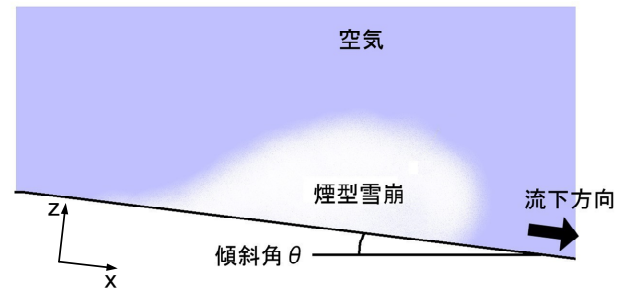


図 - 1 煙型雪崩の模式図

表 - 1 計算条件

Case No.	連行係数の定数 B
1	0.03
2	0.02
3	0.01
4	0.008
5	0.005
6	0.003

数、 u_* は底面での摩擦速度、 w_s は雪粒子の沈降速度である。上式は Garcia²⁾ による開水路浮遊砂流の実験において得られた提案式であり、このときの定数は $B=0.3$ である。菊地・福島³⁾による地吹雪の実験においては連行係数は 1 桁以上小さいとの知見が得られており、これを参考に本研究では $B=0.03 \sim 0.003$ の範囲で計算を行った。計算条件を表 - 1 に示す。

4. 数値計算結果

計算領域は x 軸方向 2002m、 z 軸方向 150m とし、格子間隔は $\Delta x = 7\text{m}$ 、 $\Delta z = 3\text{m}$ とした。時間刻みは $\Delta t = 1.0\text{s}$ とし 100s まで行った。また計算領域は煙型雪崩の流下とともに、その位置を x 方向に移動させながら計算を行った。

図 - 2 は煙型雪崩の流下速度の流動距離変化のグラフである。連行係数が大きいものほど、流下速度が大きい結果となった。また連行係数が大きい場合、雪崩は流動開始直後に急激に速度が増加しているのがわかる。特に $B=0.02, 0.03$ での速度の増加が顕著である。また流動距離が 1500m 以降では速度の増加があまり見られない。これは底面からの雪粒子の巻き上げと底面への沈降・堆積がほぼ釣り合った状態になったためと考えられる。

図 - 3 は煙型雪崩の層厚の流動距離変化のグラフである．いずれの条件でも層厚は流動距離に対し線型的な増加を見せている．また連行係数が大きいほど増加割合が小さく，層厚が小さくなっている．また $B=0.02$ ， 0.03 の条件における結果には顕著な差が見られない．

図 - 4 は煙型雪崩の雪粒子最大濃度の流動距離変化のグラフである．連行係数が大きいものほど最大濃度が大きく，いずれの条件においても流動直後に急激に濃度が変化し，それぞれ一定濃度に落ち着く結果となっている．またそれぞれの条件での最大濃度は， B の値の $1.5 \sim 2$ 倍ほどの値で一定となった．

図 - 5 は $B=0.03$ の条件における 50s 後の雪粒子濃度コンター，流速ベクトル図である．煙型雪崩の形状は斜面方向に大きく広がっている．底面付近において非常に高濃度となっており，その部分において大きい流速ベクトルが確認できる．また全体として流速ベクトルによる循環流はわずかにしか確認できず，流下方向のみに強い流速ベクトルが発生している．これより先端部で巻き上げられた雪粒子が後方に取り残されるようにサーマル形状が形成されていると考えられる．

5. 結論

煙型雪崩について， $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いて数値計算を行った．離散化手法に陰解法，圧力方程式の解法に SIMPLE 法を採用した．雪粒子の巻き上げについて，雪の連行係数の概念を導入した．この連行係数を変化させた条件で数値計算を行った．得られた雪崩の流下速度，層厚の流動距離変化をグラフで表し，雪の連行係数が煙型雪崩の流下特性に大きく影響を与えることが示された．

参考文献

- 1) 衛藤俊彦・福嶋祐介：加速を伴う泥水サーマルの流動解析，水工学論文集，第 47 巻，pp.1171～1176，2003.
- 2) Garcia, M.: Depositing and eroding sediment driven flows:turbidity currents, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, University of Minnesota, Project Report No. 306, 179 p, 1990
- 3) 菊地卓郎・福嶋祐介：乱流拡散方程式を用いた固体粒子浮遊流の底面条件に関する検討，混相流，21 巻 2 号，pp.177～184，2007．

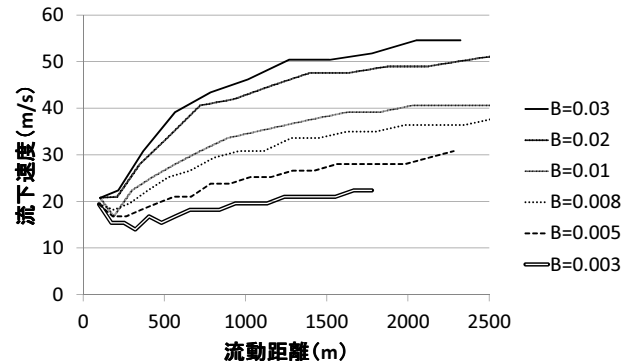


図 - 2 煙型雪崩の流下速度の流動距離変化

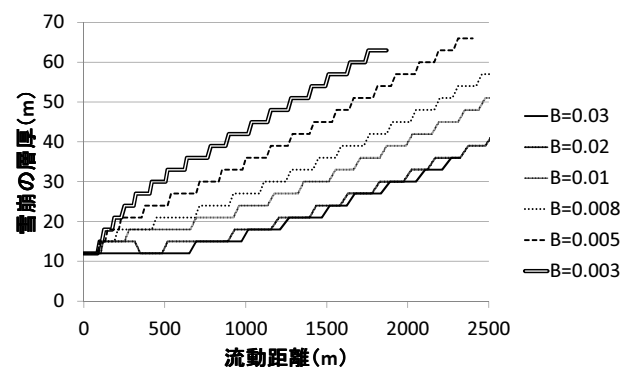


図 - 3 煙型雪崩の層厚の流動距離変化

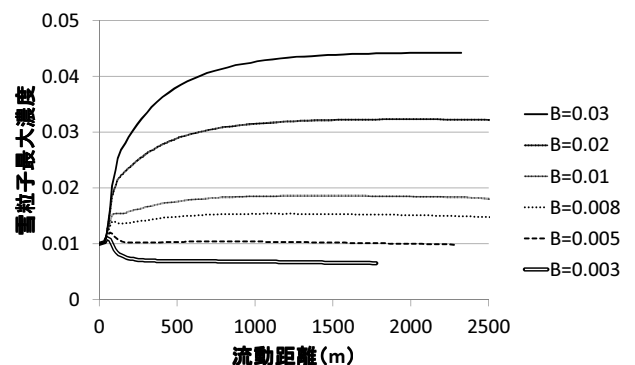


図 - 4 煙型雪崩の雪粒子最大濃度の流動距離変化

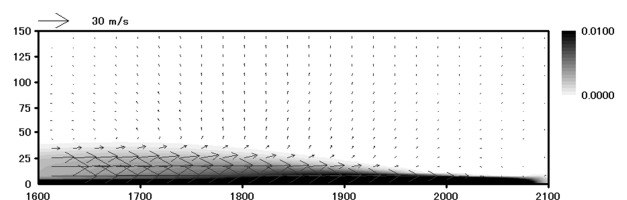


図 - 5 Case1 の雪粒子濃度コンターと流速ベクトル図