

OpenFOAM を用いた煙型雪崩の三次元流動解析

長岡工業高等専門学校 金子 優斗
長岡工業高等専門学校 正会員 衛藤 俊彦

1. はじめに

傾斜地に降り積もった雪は、重力により常に斜面下方に向かう力を受けている。この力が積雪・地面間の摩擦抵抗や積雪自身の破壊強度を超えると、積雪層は力学的に不安定となり雪崩が発生する。煙型雪崩は雪煙を発生しながら滑走する雪崩で、大規模な急斜面の粉雪の場合発生しやすい。また煙型雪崩は何らかの原因により巻き上がった雪粒子が、重力の作用で斜面方向に流下する現象であり、流動とともに斜面からの雪粒子の巻き上げや斜面への雪粒子の沈降、堆積を伴う。煙型雪崩の模式図¹⁾を図1に示す。雪崩は人間の生活および建造物や道路等に被害を与える危険があるため、適切な対策を講じる必要があり、そのためにも雪崩の流動性を明らかにしていくことが重要である。

そこで本研究では流動解析ツールである OpenFOAM を用いて雪崩の三次元流動解析を行い、煙型雪崩の流動特性を調べた。

2. 解析方法

解析には OpenFOAM の twoLiquidMixingFoam を基に、雪粒子の沈降速度 W_s の項を加えたものを用い、乱流モデルは LES モデルを採用した。底面境界においては雪粒子の巻き上げと沈降・堆積を考慮する必要がある。そのため巻き上げフラックスと沈降フラックス²⁾を加えた拡散方程式(1)を用いた。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(u-w_s)c}{\partial x_i} = D_m \frac{\partial^2 c}{\partial x_i^2} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_t}{S_c} \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) + 2W_s E_s - D \quad (1)$$

$$D = \alpha W_s C_b \quad (2)$$

E_s は雪の連行係数、 D は沈降粒子濃度フラックス、 $\alpha=2$ は底面への堆積率を規定するパラメータ、 C_b は底面近傍での粒子濃度である。雪の連行係数 E_s は次式(3)で示される³⁾。

$$E_s = AZ_u^5 / (1 + \frac{A}{0.3} Z_u^5) \quad (3)$$

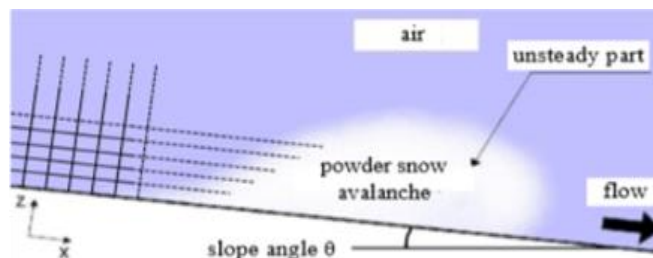


図1 煙型雪崩の模式図

表1 解析条件

| Case | 雪粒子密度 (kg/m ³) | 雪崩初期濃度 | 雪崩初期体積 (m ³) |
|------|----------------------------|--------|--------------------------|
| 1 | 100 | 0.1 | 576 |
| 2 | | 0.2 | |
| 3 | | 0.3 | |
| 4 | | 0.4 | |
| 5 | 200 | 0.1 | 576 |
| 6 | | 0.2 | |
| 7 | | 0.3 | |
| 8 | | 0.4 | |
| 9 | 300 | 0.1 | 576 |
| 10 | | 0.2 | |
| 11 | | 0.3 | |
| 12 | | 0.4 | |

ここで $Z_u = R_D^{0.6} \frac{u_*}{w_s}$, $R_D = \sqrt{gRD_s} \frac{D_s}{\nu}$, $A = 1.3 \cdot 10^{-7}$ は定数、 u_* は摩擦速度、 D_s は雪粒子の粒径、 ν は動粘性係数である。本研究では煙型雪崩の三次元的な流動特性について詳しく調べるために、横断方向を考慮した三次元解析を行った。

計算に使用する領域は傾斜角 30° とし流下方向の x 軸方向に 500 m、x 軸と垂直な方向の y 軸方向に 50 m、横断方向の z 軸方向に 500 m、格子の分割数は x 軸を 4 m、y 軸を 2 m、z 軸を 4 m メッシュとした。また初期の雪崩形状は幅 12 m、高さ 12 m、奥行 4 m とし、これが時間とともに流動する条件で、解析を行った。計算 Case としては雪崩の初期濃度を 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 にしたもの、密度を 100, 200, 300 kg/m³ としたもの計 12 パターン用意した。今回用意した

パラメータ等の解析条件を表 1 に示す。雪粒子の粒径は $D_s=0.2 \text{ mm}$ とした。

3. 計算結果

図 2~5 はそれぞれ case1~4 における雪崩の流下速度、最大厚さ、最大広がり幅、最大雪粒子濃度の流動距離変化のグラフであり、流下距離が 0 m から 500 m 地点での状況を示している。

全体的に結果を比較すると、初期濃度が大きい、つまり初期に流動する雪質量が大きい場合には、雪崩は流下方向に減衰しない結果となった。煙型雪崩がその流動を維持・発達するためには雪粒子の巻き上げが沈降・堆積を上回る必要があるが、初期質量が大きい Case ではこの条件を満たしたものと考えられる。また雪崩が加速・発達した Case では、全体的に雪崩の厚さと広がり幅が抑えられる傾向が示された。その一方で減速・衰退した Case では、雪崩の厚さと広がり幅は大きくなる傾向が示された。これらの傾向は case5~12 においても同様であった。

4. まとめ

煙型雪崩に対し、OpenFOAM を用いて三次元の流動解析を行った。その結果、初期濃度の違い、つまり初期に流動する雪質量の違いにより、雪崩の流動が大きく異なることが示された。

今後の展望としては、今回の研究では初期濃度と初期密度を変数とした解析だったため、雪粒子の粒径を変数とした解析も必要である。また、より長距離を流動する条件や、急勾配から緩勾配斜面に変化する領域での解析により雪崩の発達や停止に関わる流動を調べる必要がある。

参考文献：

- 1) 衛藤俊彦ら，「微細粒子の沈降・巻き上げを考慮した $k-\epsilon$ 乱流モデルによる煙型雪崩の数値解析」，土木学会論文集，A2(応用力学)，第 69 号，2013 年。
- 2) 衛藤ら，OpenFOAM による DynamicSGS モデルを用いた傾斜壁面粒子サーマルの数値解析，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vo173，No. 2，2017。
- 3) Garcia, M, Depositing and eroding sediment driven flows: turbidity currents, SAFL, University of Minnesota, Project Report, No.306, 1990.

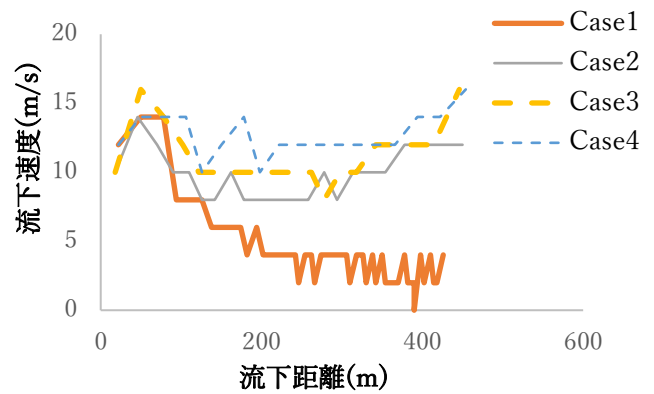


図 2 雪崩の流下速度の流動距離変化

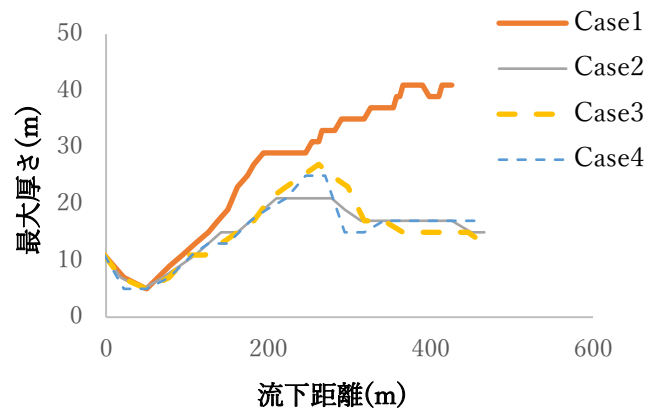


図 3 雪崩の最大厚さの流動距離変化

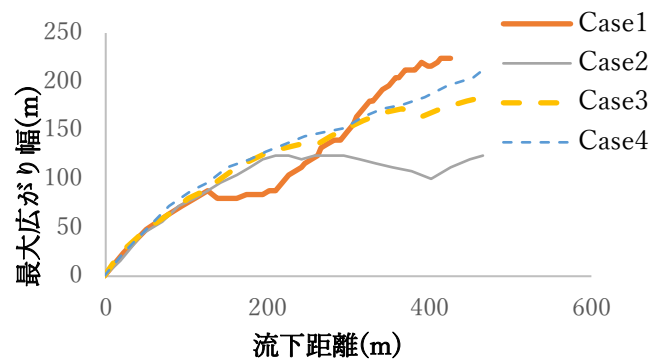


図 4 雪崩の最大広がり幅の流動距離変化

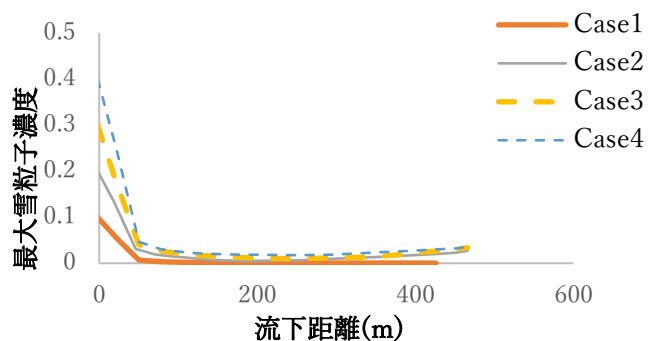


図 5 雪崩の最大雪粒子濃度の流動距離変化