

# 浅水系方程式に基づく雪崩シミュレーションモデルの作成

水工学研究室 田中 徹郎

指導教官 細山田 得三

## 1. はじめに

日本は本州日本海側を中心とした豪雪地帯において、その人口が全体の約2割を占めている。また、国土の約7割が山林であるため、豪雪地帯でも山間部に集落や建造物が点在している。このような地域では厳冬期から比較的温暖な春先にかけて家屋被害や道路閉鎖など様々な雪崩災害が懸念される。

雪崩被害を軽減するには運動モデルの構築が重要となる。数値解析により雪崩の運動を再現できれば、その解析結果を防御施設の設計や、ハザードマップ作成に反映させることが期待できる。しかし、福島・大澤らの従来のモデルには、多くの仮定条件が含まれ、精査の必要なものも多く、計算が複雑化している。そこで本研究では、最も簡単に流体の運動を記述した方程式系である浅水系方程式を用い、仮定条件を多く必要としない、雪崩シミュレーションモデルの作成を目的として行った。

## 2. 数値解析手法

### (1) 連続方程式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

$h$ : 雪崩高さ,  $M$ :  $x$  方向の速度成分,  $N$ :  $y$  方向の速度成分,  $t$ : 時間座標,  $x, y$ : 水平座標

### (2) 運動量方程式

$x$  方向の運動量方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{h} \right) = -g\rho h \frac{\partial(\eta+h)}{\partial x} + A_h \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) - \frac{gn^2}{h^3} M \sqrt{M^2 + N^2}$$

$y$  方向の運動量方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{M^2}{h} \right) = -g\rho h \frac{\partial(\eta+h)}{\partial y} + A_h \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) - \frac{gn^2}{h^3} M \sqrt{M^2 + N^2}$$

$g$ : 重力加速度,  $\rho$ : 雪崩の密度,  $A_h$ : 拡散係数,  $n$ : マニングの粗度係数,  $\eta$ : 基準水平面から地面までの高さ

### (3) 雪粒子移流拡散方程式

$$h \left( \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} \right) = h \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_{sx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_{sy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) \right] + w_0 E_s - c a_s w_0$$

$c$ : 雪崩高さ平均濃度,  $u$ :  $x$  方向の速度,  $v$ :  $y$  方向の速度,  $\varepsilon_{sx}, \varepsilon_{sy}$ :  $x, y$  方向の渦動粘性係数,  $w_0$ : 沈降速度,  $E_s$ : 無次元巻上げ速度,  $a_s$ : 積雪深と平均濃度と底面での雪粒子濃度を関係付ける係数

### (4) 雪の取り込みに関する方程式

雪崩の質量は、滑走中一定ではなく、雪の取り込みと堆積のために、時々刻々変動している。一般的には、初期の加速域では増え、減速域では変わらないか減ると考えられる。ここでは、滑走距離及び速度に比例して増加すると仮定し雪崩の質量変化率  $k$  に次のような速度依存性を加え、以下のように仮定した。

$$k = \frac{dm}{dr} = \frac{1}{V} \frac{dm}{dt} = \alpha_b \rho_b h_b W$$

$r$ : 滑走距離,  $m$ : 質量,  $\rho_b h_b W$  ( $\rho_b$ : 進行方向積雪密度,  $h_b$ : 進行方向積雪深,  $W$ : 雪崩幅),  $\alpha_b$ : 雪の取り込み率 ( $0 < \alpha_b < 1$ ),  $V$ : 流下速度  
雪の取り込み率  $\alpha_b$  は、取り込みによる増加と堆積による減少との差し引きであるから、メカニズムは極めて複雑であるが、次のような関数で書き表

されると仮定した。

$$\alpha_b = \alpha_\infty (1 - e^{-V/V_m})$$

$\alpha_\infty$  : 高速時の取り込み率,  $V_m$  : 速度の次元を持つ定数

### 3. 結果

#### (1) 仮想地形モデルを対象とした解析

単純なハーフパイプ状の仮想地形モデルを対象とした解析では、雪崩が流動幅を広げつつ、斜面を流下する一連の運動挙動を数値解析によって表現可能である事が確認できた。また、雪崩先端部の雪崩高さが高くなっているのに対して、後方は低くなっている。これより、流下方向の雪の取り込み及び後方への離脱表現が可能である事が確認できる。

#### (2) 感度分析

仮定条件 および $V_m$ の仮定値を変更することにより、主要条件に及ぼす影響を精査した。においては、値の増加に伴い主要条件全てに共通して、増加する傾向が確認できた。また、雪崩高さへ強い影響を及ぼしていることも合わせて確認できる。次に $V_m$ については、値の減少に伴って、主要条件の増加傾向が確認できた。

上記の結果を比較した際、雪の取り込みについては、 $V_m$ に対しての方がより大きな影響を及ぼす事が確認できた。

粒径を変化させた場合、共通して粒径の増加に伴い減少傾向が確認できた。また、雪粒子濃度に対して強い影響を及ぼすことがわかった。

#### (3) 実地検証

実地検証として、2000年3月27日午前11時50分頃、岐阜県吉城郡上宝村神通川水系蒲田川支流左俣谷穴毛谷の上流で発生した大規模雪崩を対象とした。

図1に、解析結果によって得られた、雪崩の流下経路を示す。図1より、雪崩が実現象とほぼ同様の流下経路を辿っている事が確認できる。また、流動幅においても、実現象とほぼ一致している。しかし、モデルでは停止することなく南下しつづける結果となった。

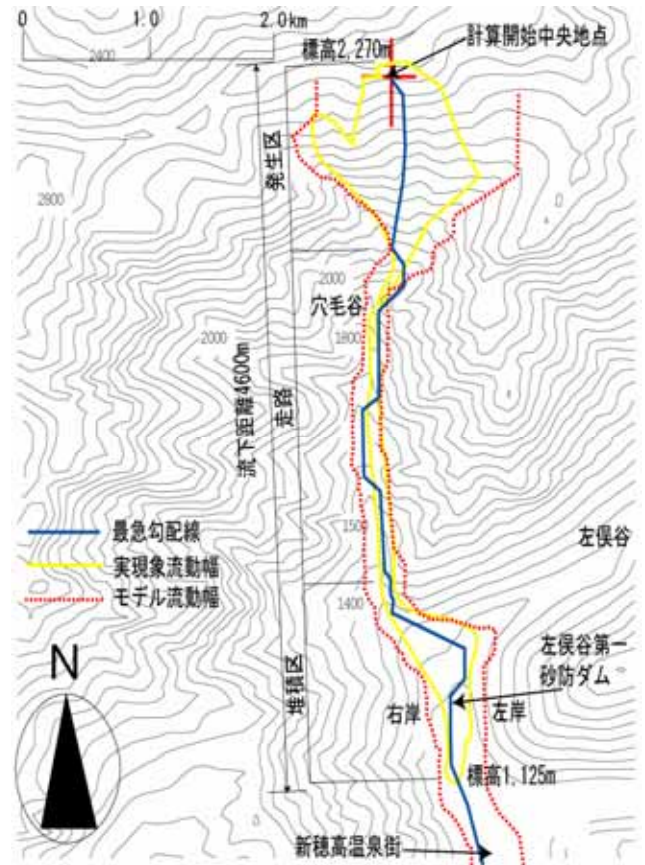


図1 雪崩の流下経路

### 4. まとめ

- 1) 本解析モデルは雪崩が雪を取り込み加速しながら、斜面を流下し、緩勾配斜面へ流入すると、減速するといった流下挙動を数値解析によって表現可能である。
- 2) 本解析モデルは雪崩本体の雪の取り込みや離脱、雪粒子濃度の増減による、雪崩総量の増減や本体の状態変化、それに伴う運動エネルギーへの影響を評価することが可能である。
- 3) 本解析モデルは、浅水系方程式をもとに作成することにより、仮定条件を多く必要とせず、計算の簡略化を計ることが出来た。
- 4) 全領域で同時に解析が可能となり、雪塊同士の相互影響が表現可能である。