

三次元地形を考慮した流れ型雪崩のモデル化と数値シミュレータの開発

水工学研究室 山田 邦博
指導教官 福島 祐介

1. はじめに

日本の国土の約70パーセントを山林が占めている。そのため集落や構造物が山岳地帯周辺に多数存在している。積雪地方の山岳地帯では冬から春先にかけて雪崩が発生し、遭難、家屋の倒壊等の被害が数多く報告されている。このような雪崩による被害を未然に防ぐためには、その流動機構を十分に把握することが重要である。雪崩の流動シミュレーションにより流動特性を知ることができれば、雪崩防災地域の策定を行うことが可能となる。

本研究では、3次元地形を入力データとしその挙動の解析が容易に行える流れ型雪崩の1次元・2次元数値解析シミュレータを開発する。解析結果を大澤(2003)によって行われた煙型雪崩の数値モデルや実現象と比較し流れ型雪崩の流動特性を知ることが研究目的とする。

2. 流れ型雪崩の数値解析手法

図1で示すように、流れ型雪崩の形状を横方向の広がりが一様である半楕円体と仮定し、また流下経路を入力データとして与えることによって、その速度や高さなどの特性を解析するシミュレーションモデルを本研究では1次元解析モデルと定義した。流動モデルの模式図を図3-1に示す。ここで、 U は流れ型雪崩の移動速度、 C は体積濃度、 h は高さ、 P_i は空気と境界面の長さ、 P_b は底面と境界部の長さ、 ρ_a および ρ はそれぞれ、雪崩内および空気の密度、 θ は斜面の傾斜角である。

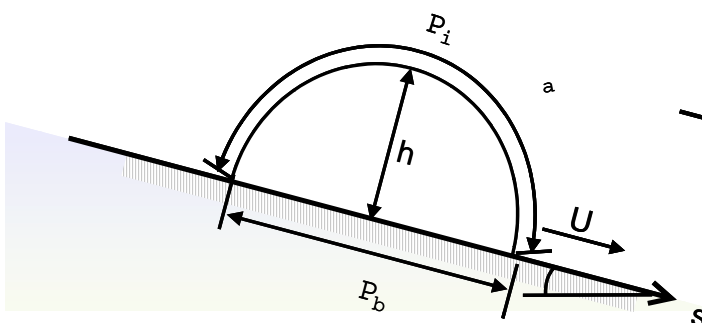


図 - 1 雪崩のモデル図

粒子の濃度が 1 に比べて十分に小さい場合、流れ型雪崩中の空気の質量保存式は図 - 2 のようになる。

ここで、 ρ_0, ρ_a はそれぞれ雪崩内の空気の平均密度、周囲空気の密度、 A は側方からみた雪崩の面積(単位幅あたりの体積)、 E_a は雪崩による周囲空気の連行係数であり、 U は雪崩の速度、 P_i は雪崩と空気との界面の潤辺長である。 $E_a U$ は連行速度である。

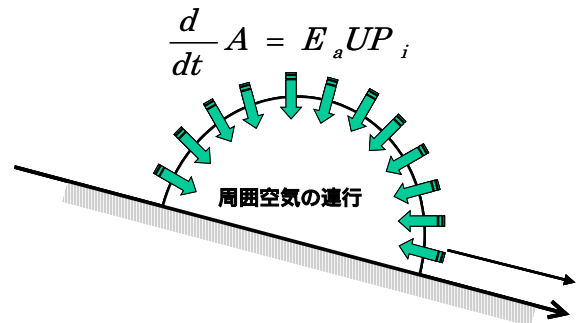


図 - 2 空気の質量保存式のモデル図

また雪崩の流下方向の運動量保存式は図 - 3 のようになる。ここで ρ は雪崩の中の平均密度、 ρ_a は周囲空気の密度、 k_v は付加質量係数、 g は重力加速度、 μ は斜面の摩擦係数、 θ は斜面の傾斜角、 τ_i, τ_b はそれぞれ上部境界面と下部境界面でのせん断応力を表す。

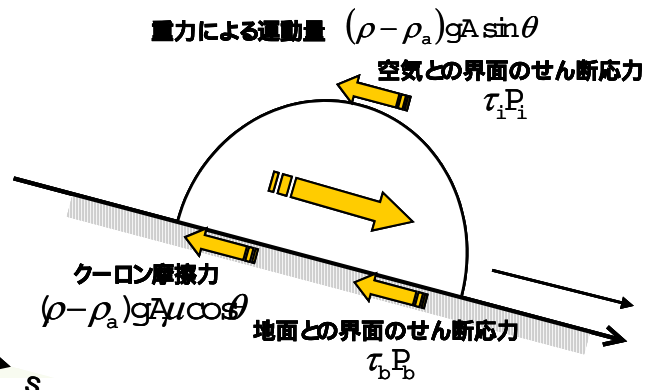


図 - 3 運動量保存式モデル図

次に、雪崩によって運ばれる雪粒子の質量保存式は図 - 4 のようになる。

ここで、 α_1 は積雪層の取り込み係数、 U_c は取り込み限界速度、 c_s は積雪層の濃度、 h_s は積雪層の深さである。

急斜面では式の U の増加に伴い、相対的に U_c が小さくなり、 $U > U_c$ となる。逆に緩斜面では U が小さくなるのに対して、相対的に U_c が大きくなり、 $U < U_c$ となる。さらに右辺第一項 ($\alpha_1 U c_s h_s$) は取り込まれる雪の量を表し、右辺第二項 ($\alpha_1 U_c c_s h_s$) は取り残される雪の量を表す。この式から言えることは、 $U > U_c$ である限り雪崩内部に雪粒子が堆積され、雪崩自体が大きくなるにつれて濃度も高くなる。 $U < U_c$ では雪崩内の雪粒子が外へと取り残され雪崩自体の大きさが小さくなるにつれて濃度も低くなる。

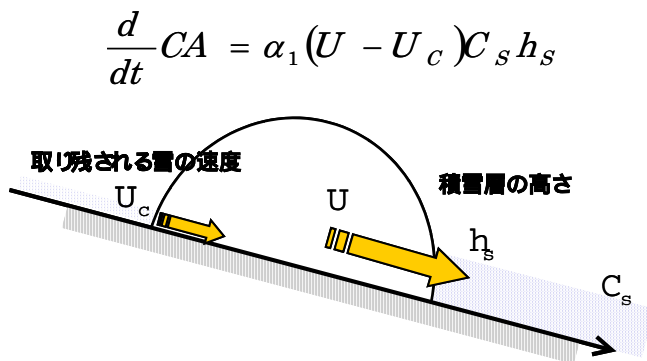


図 - 4 雪粒子の質量保存式モデル図

以上が流れ型雪崩の 1 次元解析モデルを構成する基礎方程式である。これに対し煙型雪崩の 1 次元モデルでは、空気の質量保存式、雪粒子の質量保存式、運動量保存式、雪崩の位置に関する式 + 乱れエネルギーの保存式で構成されている。また 2 次元モデルでは 1 次元に加え x , y 方向の運動量保存式、横方向の広がり幅 B_{max} に関する式について解析を行った。

3. 1 次元解析結果と考察

図 - 5 より両雪崩とも 2000m まで流下する間に高さは大きく上昇していが高さに大きな違いが見られる。理由としては第一に雪崩の初期高さが違う点が考えられる。ただこのケースでは初期高さの違いだけでは表現できないほどの違いが中盤にかけて見られる。そこで次に考えられる理由としては雪崩の高さに影響する式(3.10)の違いが考えられる。煙型雪崩のモデルでは、流下方向に対して爆発的に成長する雪崩の流動を表現するため粒子の巻き上げを考慮し、雪粒子の連衡係数を 0.1 にした。それに対し流れ型雪崩は煙型雪崩ほど雪崩の大きさが変化するものではないため今回の実験では 0.015 を用いた。その結果図 - 7 のような差に

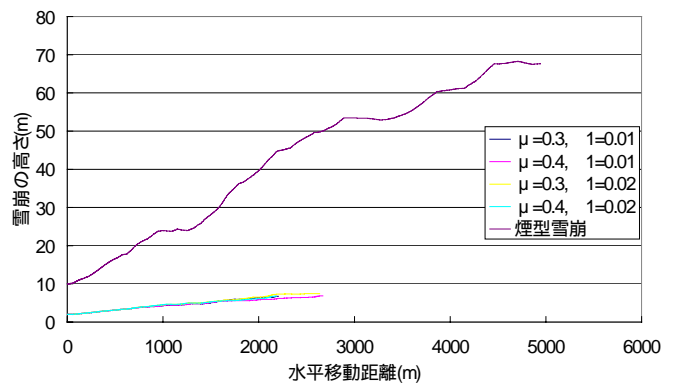


図 - 5 各流れ型雪崩と煙型雪崩の高さの比較

なったと思われる。

次に図 - 6 よりグラフのように摩擦係数が 0.3 ~ 0.4 の時に水平移動距離が約 2000m ~ 3400 m となり、さらに最高速度も 30m/s ~ 40m/s である。流れ型雪崩の一般的な速度である約 30m/s 時に、水平移動距離が統計モデルの経験則と同じ値をとる。さらに煙型雪崩は流れ型雪崩よりも速度が全体的に速く、更に流下距離も長いことからこの摩擦係数 0.3 ~ 0.4 の間が妥当であることがわかる。

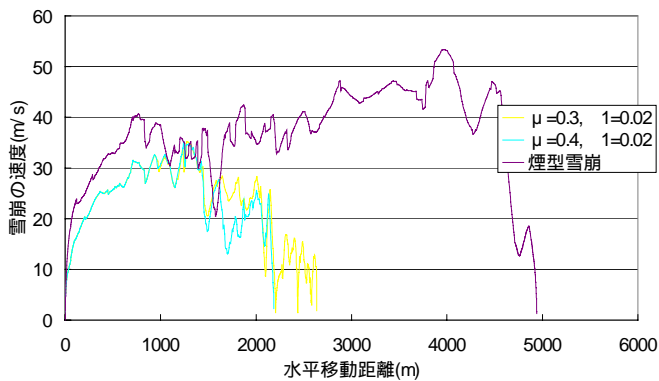


図 - 6 各流れ型雪崩と煙型雪崩の速度の比較

次に一般的に流れ型雪崩は春先に多く発生する。そのため取り込む雪の濃度は煙型雪崩に比べ大きい。そのため流れ型雪崩自体の濃度も煙型に比べ大きくなることから図 - 7の結果は妥当であると思われる。

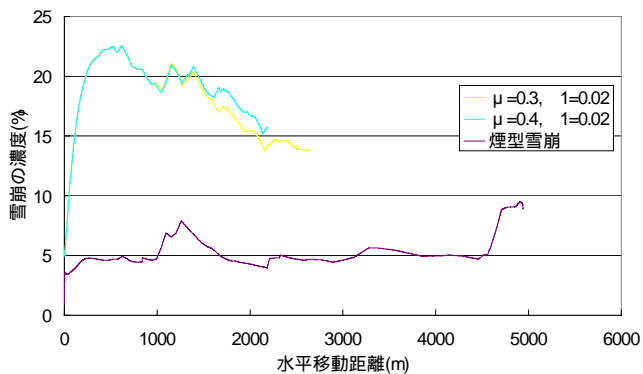


図-7 各流れ型雪崩と煙型雪崩の濃度の比較

4. 2次元解析結果と考察

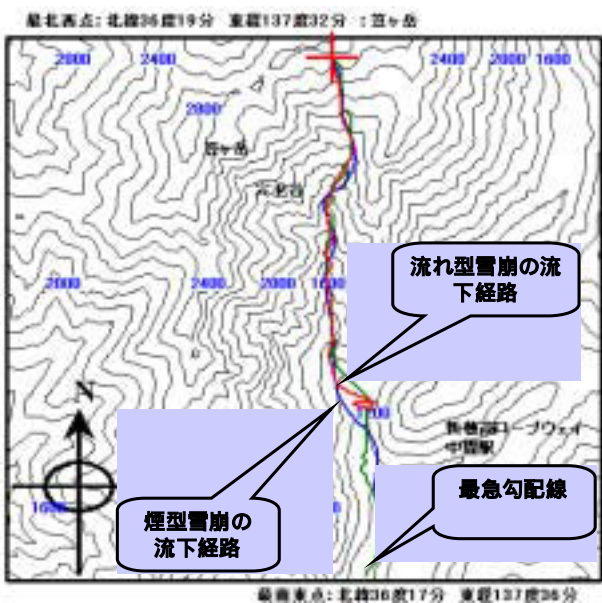


図 - 8 流れ型雪崩の流下経路 (摩擦係数 $\mu=0.2$)



図 - 9 流れ型雪崩の形状変化 (摩擦係数 $\mu=0.2$)

図 - 8, 9より、流れ型雪崩、煙型雪崩共に最急勾配線に沿うように流下している。煙型雪崩は実際の現象と同じように新穂高ロープウェイ中間駅付近で静止に至っているのに対して、流れ型雪崩は穴毛谷付近で静止に至っている。この流下距離の差は摩擦係数 μ が大きくなるにつれて運動量保存式の右辺第 2 項が大きくなり速度が減少すると同時に、流下したことで地面や空気との界面が大きくなり運動量保存式の右辺第 3 項における界面に働く摩擦が大きくなったことから速度が減少したためであると考えられる。

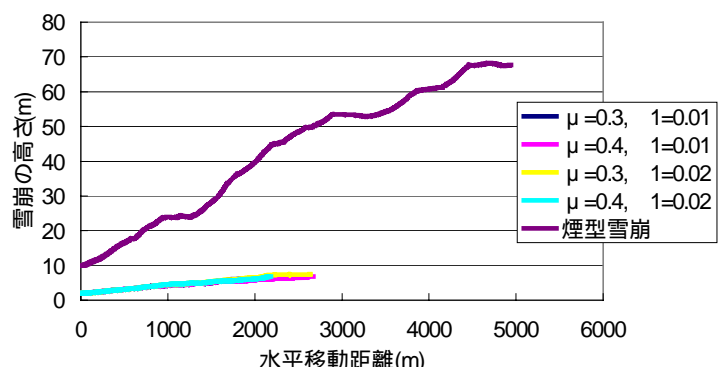


図 - 10 各流れ型雪崩と煙型雪崩の高さの比較

図 - 9, 10より流れ型雪崩の形状は煙型雪崩ほど顕著に変化しない。流れ型雪崩の高さは煙型雪崩ほど爆発的に大きくなるものではないことがグラフにも良く表れている。これにより雪

崩の流下方向に対する P_b があまり変化しないため流れ型雪崩の形状変化が煙型ほど顕著でなくなる。

5. 結論

摩擦係数 μ を変化させることにより、 μ が雪崩の速度に大きな影響を及ぼしていることがわかった。時には煙型雪崩より速度が遅いにもかかわらず流下距離は煙型雪崩と同等に達するケースもあった。また摩擦係数 μ が関係する式は運動方程式でもあるので速度に直結することも分かった。これにより速度の大きさによって雪崩が斜面特性より受ける影響の大きさが変化するため、流下経路にも違いが生じた。

また今回の解析において流れ型雪崩の高さは煙型雪崩ほど爆発的に大きくなるものではないことを考慮し各パラメータを決定した。そのため流れ型雪崩の高さはあまり変化しない。雪崩の形状を現す式 P_i , P_b 等が h の変化に依存するものであるため煙型雪崩に比べ流れ型雪崩の雪崩の形状はあまり変化しなかった。

参考文献

福嶋祐介,2000: 煙型雪崩の流動機構とその解析, 煙型表層雪崩の発生機構と流動機構の解明, pp.3-12.

西村浩一・納口恭明, 1998:流れ型雪崩の数値モデル, 気象研究ノート, pp. 73-82

浅野正彦,2002: 煙型雪崩の流動シミュレーション手法の検討, 長岡技術科学大学修士論文

大澤範一,2003: 三次元地形を考慮した火砕流及び煙型雪崩のモデル化と数値シミュレータの開発, 長岡技術科学大学修士論文

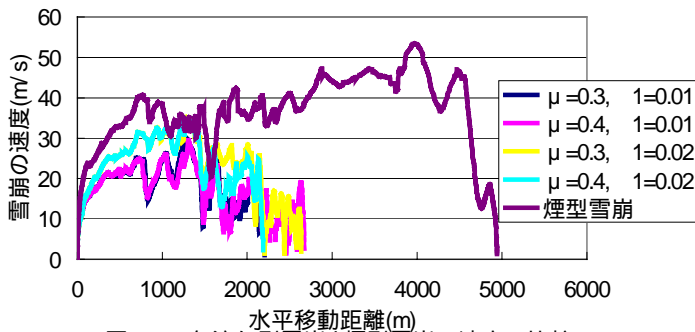


図 - 11 各流れ型雪崩と煙型雪崩の速度の比較

図 - 11 より、雪崩の速度は斜面勾配によって流れ型雪崩, 煙型雪崩共に増減を繰り返していることが分かる。しかし全体的に煙型雪崩の方が早くなっている。流れ型雪崩は経験則より、水平移動距離が約 2000m ~ 3400m が妥当であり、この値を取る摩擦係数は 0.3 ~ 0.4 であった。また流れ型雪崩の一般的な速度は約 30m/s であり、煙型雪崩の一般的な速度は約 60 ~ 80m/s なのでこのグラフは両者の特徴を良く表している。流れ型雪崩の一般的な速度である約 30m/s 時に、水平移動距離が統計モデルの経験則と同じ値をとることからもこの摩擦係数 0.3 ~ 0.4 の間が妥当であるため、今回得られた結果は順当であったと思う。

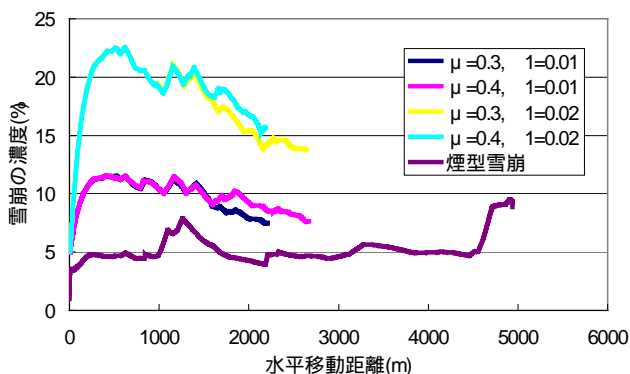


図 - 12 各流れ型雪崩と煙型雪崩の濃度の比較

一般的に流れ型雪崩は春先に多く発生する。そのため取り込む雪の濃度は煙型雪崩に比べ大きい。そのため流れ型雪崩自体の濃度も煙型に比べ大きくなることが図 - 12 のグラフにも良く表れている。