

微地形情報を考慮した安定化有限要素法による雪崩解析

○東北大学大学院工学研究科 学生会員 山口 裕矢
 東北大学大学院工学研究科 正会員 高瀬 慎介
 東北大学災害科学国際研究所 正会員 森口 周二
 東北大学災害科学国際研究所 正会員 寺田 賢二郎

1. はじめに

国内における従来の雪崩予測手法は、経験則に基づく「見通し角法」や、深さ方向に静水圧近似を仮定する2次元解析が主であるが、これらは3次元性に富んだ複雑な地形には適用できないという問題がある。本研究では、非構造格子を用いた安定化有限要素法を用いることによって複雑な地形情報を取り入れ、3次元における雪崩の詳細な挙動を表現することを目的とする。本手法の検証のために、模型実験の再現解析を通してパラメータ調査を行った後に、実際に発生した雪崩の再現解析を実施し、解析手法の有効性を調べた。

2. 解析手法

空気と雪崩の二相流解析を界面捕捉法のひとつであるPhase-Field法によって行う。固定メッシュを用いて、界面関数 ϕ_P の移流を保存形に修正されたAllen-Cahn方程式によって計算することで雪崩の自由表面を表現する。

$$\frac{\partial \phi_P}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi_P = \frac{\epsilon}{\delta_P} \nabla \cdot (\delta_P (\nabla \phi_P) - F_a) \quad (1)$$

$$F_a = \phi_P (1 - \phi_P) \frac{\phi_P}{|\nabla \phi_P|} \quad (2)$$

ここに、 \mathbf{u} は流速、 ϵ は易動度、 δ_P は界面幅を表す。流体の基礎方程式はNavier-Stokes方程式および連続式を用い、雪の流動特性を表現するために雪をビンガム流体として仮定し、時間・空間的に変化する粘性係数 η を与える。ビンガム流体はせん断応力 τ がせん断強度 τ_0 を越えるまでは流動が起こらず、 τ_0 を越えると応力の超過分に比例するせん断速度 $\dot{\gamma}$ が生じる。 τ_0 にクーロンの破壊規準を採用することで、 η は次式により表される。

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_0 + \frac{c + p \tan \phi}{\dot{\gamma}} \quad (3)$$

ここに、 η_0 は最小粘性係数、 c は粘着力、 p は液体の圧力、 ϕ は内部摩擦角である。また、上式のせん断速度はテンソルの第二不変量を用いる。有限要素方程式の導出はSUPG/PSPG法により、流速 \mathbf{u} 、圧力 p にそれぞれ1次の四面体要素を適用する。

3. 模型実験の再現解析

既往の研究で実施された模型実験¹⁾の再現解析を行い、雪崩の先端の到達距離および停止後の堆積形状について比較することでパラメータの影響を検討した。数値計算で使用するモデルは図-1に示すように、実験に使用した模型の

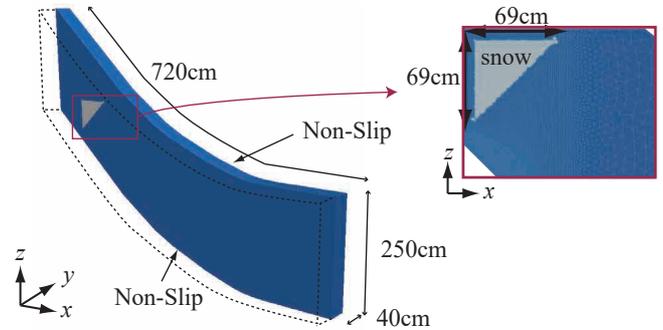


図-1 実験模型再現モデル

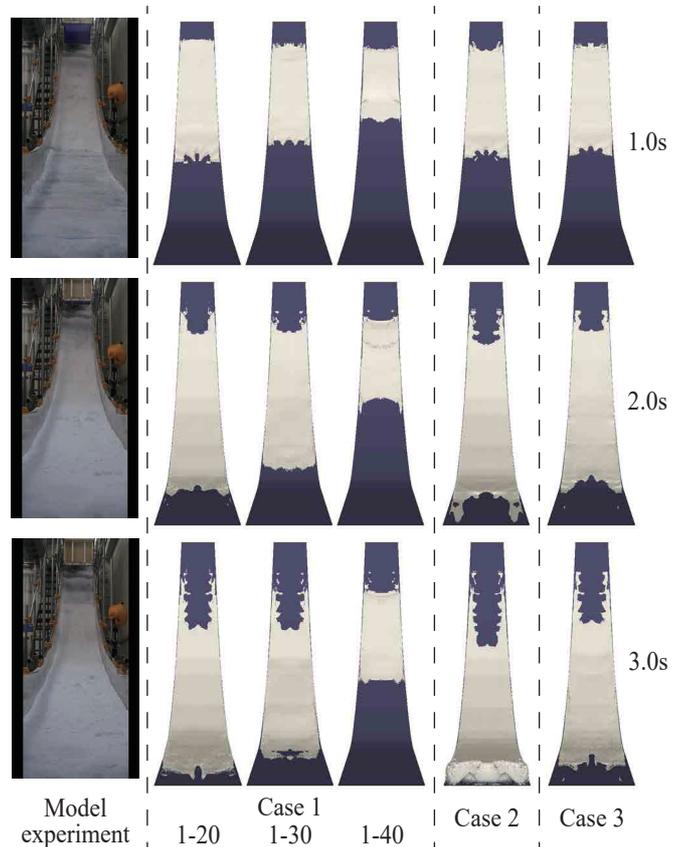


図-2 実験結果比較

ハーフスケールモデルを用いる。境界条件には底面及び側面にノンスリップ、その他の面にはスリップ条件を与える。以下のCase1~3では内部摩擦角 ϕ を変化させた影響について調査した。

キーワード：雪崩 ビンガム流体 安定化有限要素法

〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1, TEL 022-752-2132, FAX 022-752-2133

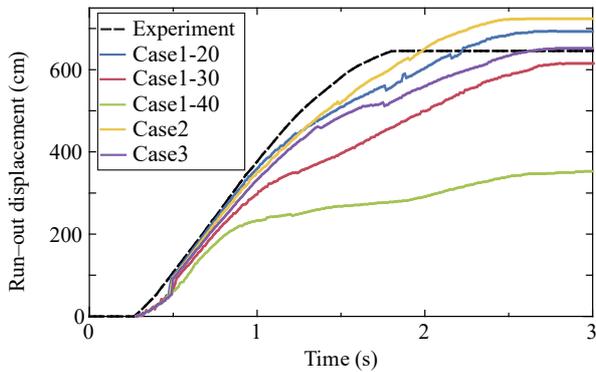


図-3 雪崩先端の到達距離の時刻歴応答

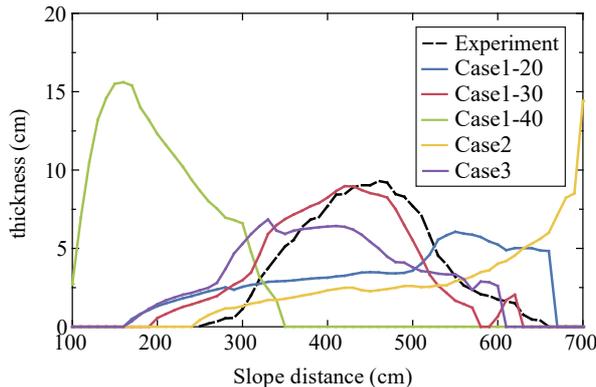


図-4 停止時の堆積形状

3.1 Case1: 内部摩擦角の影響

既往の研究を参考に ϕ を 20° , 30° , 40° に設定したCase1-20~40の結果を図-2に示す。図-3より到達距離は ϕ が小さいほど実験値に近づくが、全テストケースで実験値よりも小さい傾向にある。図-4に示す堆積形状は 30° が実験値に非常に近いことが分かる。これより、雪崩全体の性質としては 30° が妥当であり、移動速度が遅くなるのは底面境界の nonslip 条件の影響が過剰なためであると判断した。雪崩の形状は保持したまま移動速度を改善するためには、底面摩擦の効果を考慮する必要があると考えられる。

3.2 Case2: 低粘性層を導入した数値計算

有限要素法による流体解析では、底面境界処理には nonslip 条件を用いることが一般的であり、有限要素方程式に境界処理を直接組み込む手法も存在するが、計算方法が複雑になる。そこで、本研究では液相を底面からの距離関数を用いて二相に分割し、パラメータを変化させることによって、底面付近の粘性を小さくし、底面摩擦の挙動を再現することを試みた。 ϕ の値を上部の液相1と底面側の液相2でそれぞれ 30° , 10° としたCase2の解析結果を図-2に示す。図-3, 図-4より、移動速度は速くなったが、勾配が小さくとも流れが止まらず、壁に衝突しており、不適切な結果となっている。実験値は勾配が小さくなると急激に移動速度が小さくなるため、速度に対して敏感な粘性パラメータを与える必要があることが分かる。

3.3 Case3: 速度依存性パラメータを導入した数値計算

速度によって急激に粘性が変化する挙動を再現することを目的とし、Case2における液相2の内部摩擦角 ϕ_2 を次

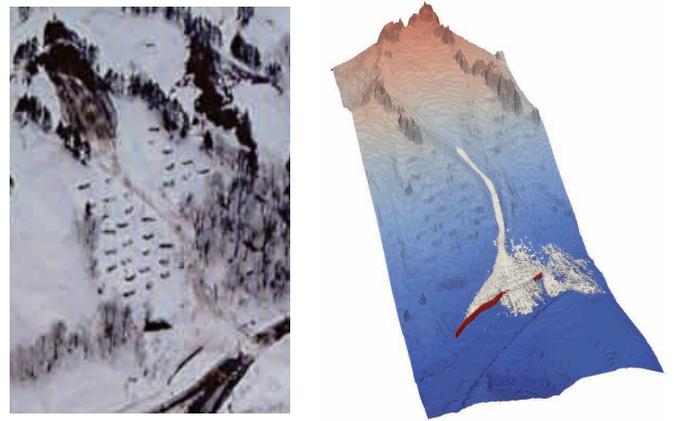


図-5 実際の雪崩の状況(左)と再現解析結果(右)

式より $\dot{\gamma}$ の関数として表した。

$$\phi_2 = \frac{\phi_1 - \phi_{\min}}{\pi} \arctan(-\dot{\gamma} + \dot{\gamma}_p) + \frac{1}{2}(\phi_1 + \phi_{\min}) \quad (4)$$

ここに、 $\dot{\gamma}_p$ はパラメータであり、 ϕ_2 は $\dot{\gamma}$ が $\dot{\gamma}_p$ を下回ると ϕ_1 に漸近し、上回ると ϕ_{\min} に漸近する。 ϕ_1 , ϕ_{\min} をそれぞれ 30° , 10° とし、 $\dot{\gamma}_p$ は解析結果をもと 250s^{-1} としたCase3を用いる。図-3, 図-4より、堆積形状は大きく崩れず、流れが止まらない挙動が改善されていることが分かる。よって、全テストケースの中で、雪崩全体の挙動としては最も実験と近い傾向が得られたと考えられる。

4. 実例の再現解析

模型実験の結果および既往の数値解析²⁾を参考に、実際の雪崩の再現解析を行った。まず防護壁を設置しない状態において、模型実験の解析と同様にして低粘性層、速度依存パラメータを用いて計算を行った結果、模型実験のそれと同様の傾向が確認された。次に、防護壁を設置した条件の数値計算を行い、雪崩発生時の再現度を検証した。図-5に示す実際の状況と解析結果の比較より、雪崩が防護壁を乗り越えて道路全幅に渡って堆積しており、実際の状況と近い結果が得られたことから、実地形情報を用いた解析においても、雪崩の挙動として妥当な再現結果を得られることが確認された。

5. おわりに

提案する手法では限られたパラメータ設定によりある程度の精度を持った結果が得られることが確認できた。また、実際の雪崩は流動状態によって底面摩擦の影響が変化すると考えられ、今回のテストケースでは速度依存性パラメータを用いたケースによってその特性が表現された。しかし、現状ではパラメータ $\dot{\gamma}_p$ の設定が恣意的であるため、実現象により決定したパラメータを与えることで、精度が改善されるものとする。

参考文献

- 1) Oda, K., Moriguchi, S., Kamiishi, I., Yashima, A., Sawada, K., Sato, A.: Simulation of a snow avalanche model test using computational fluid dynamics, *Annals of Glaciology*, Vol.52-58, pp.57-64, 2011.
- 2) 森口周二, 沢田和秀, 上石勲, 小田憲一: 非 Newton 流体モデルによる雪崩シミュレーション, 計算力学講演会講演論文集, Vol.2015.25, pp.24-26, 2012.