

# 非構造格子を用いた安定化有限要素法による雪崩の流動解析

○東北大学工学部建築・社会環境工学科 学生会員 山口 裕矢  
 東北大学災害科学国際研究所 正会員 森口 周二  
 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 寺田 賢二郎

## 1. はじめに

日本国内における雪崩予測手法は統計データに基づく「見通し角法」<sup>1)</sup>による危険度評価が主であり、地形情報がほぼ反映されない到達距離の予測のみで防災が行われてきた。いくつかの数値解析手法も提案されているが、多くは深さ方向に静水圧近似が用いられる2次元解析であり、3次元性に富んだ複雑な地形に適用することは難しい。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行った。

## 2. 数値解析手法

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<sup>2)</sup>によって行う。固定メッシュを用いて、界面関数の移流を保存形に修正されたAllen-Cahn方程式<sup>3)</sup>によって計算することで雪崩の自由表面を表現する。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 $\eta$ を与える。ビンガム流体はせん断応力 $\tau$ がせん断強度 $\tau_0$ を越えるまでは流動が起らず、 $\tau_0$ 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。 $\tau_0$ にモール・クーロンの破壊規準を採用することで、 $\eta$ は次式により表される。

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_0 + \frac{c + p \tan \phi}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

ここに、 $\eta_0$ は最小粘性係数、 $c$ は粘着力、 $p$ は液体の圧力、 $\phi$ は内部摩擦角である。有限要素方程式の導出はSUPG/PSPG法により、流速 $u$ 、圧力 $p$ にそれぞれ1次の四面体要素を適用する。

## 3. 室内実験の再現解析

既往の研究で実施された模型実験<sup>4)</sup>の再現解析を行い、雪崩の先端の到達距離および収束後の堆積状態について比較することでパラメータの影響を調査した。数値実験で使用するモデルは実験に使用した模型のハーフスケールモデル(図-1)を用い、境界条件として底面および模型の側面当たる面にはノンスリップ条件、実モデル中央断面に当たる面にはスリップ条件を与える。メッシュ分割は液相領域が

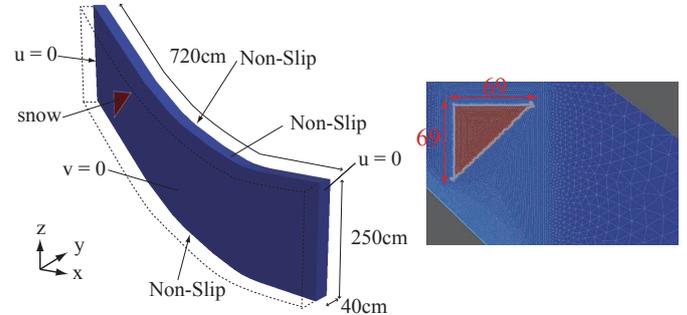


図-1 実験模型再現モデル

表-1 パラメータ設定

パラメータ	雪	空気
密度 $\rho$ ( $\text{kgm}^{-3}$ )	500	1.25
粘性係数 $\eta$ (Pas)	-	$1.81 \times 10^{-5}$
最大粘性係数 $\eta_{max}$ (Pas)	$1.0 \times 10^{10}$	-
最小粘性係数 $\eta_0$ (Pas)	$1.0 \times 10^{-2}$	-
粘着力 $\eta_0$ (N)	0.0	-
時間増分 $\Delta t$ (s)	$2.0 \times 10^{-4}$	

細かく、気相領域は粗いモデルとし、液相領域のメッシュサイズは1cm程度である。パラメータは実験データ等を参考に表-1のように定め、以下のテストケースでは内部摩擦角を変化させた影響について照査を行った。

### 3.1 内部摩擦角の影響

既往の研究を参考に $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ について数値実験を実施し、その影響を照査した。図-3より到達距離は $\phi$ 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。堆積形状としては、図-4より $30^\circ$ は実験値に非常に近く、 $20^\circ, 40^\circ$ は大きく異なると分かる。これより、雪崩全体の性質としては $30^\circ$ が適当であり、流速が遅くなるのは底面の境界条件の影響が強いと判断した。雪崩の形状は保持したまま滑る挙動の再現のために、底面摩擦の効果を考慮する必要がある。

### 3.2 低粘性相の導入

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。 $\phi$ の値を上部の液相1と底面側の液相2でそれぞれ $30^\circ, 10^\circ$ とした。結果は図-3、図-4より、流速は速くなったが流れが止まらず、壁に衝突しているため、単純にパラメータを小さくするの

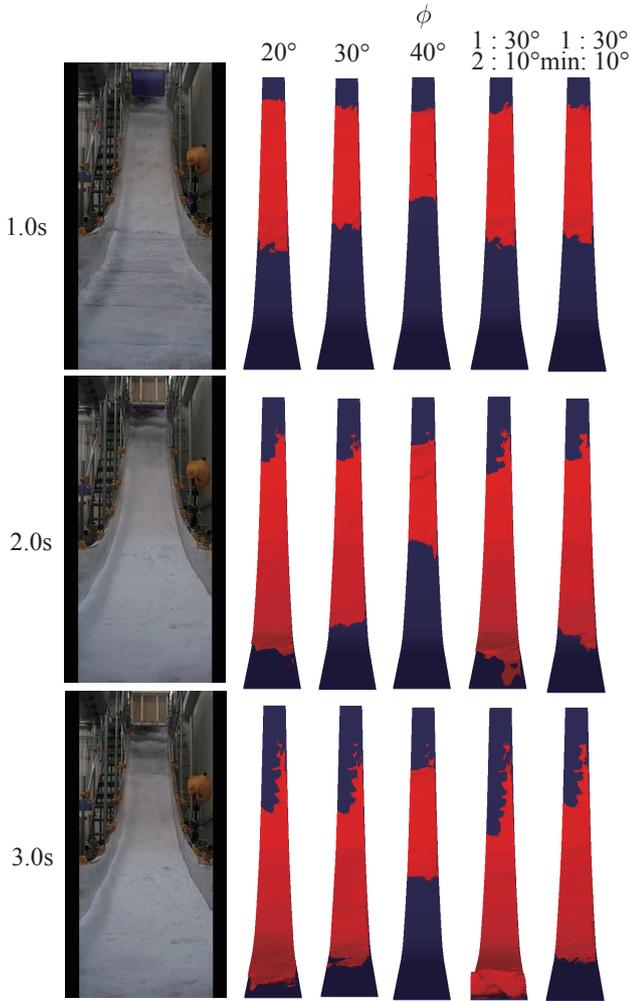


図-2 実験結果比較

みでは底面摩擦の挙動を再現するには不十分であると考えられる。実験値は勾配が小さくなると急激に流速が小さくなるため、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と分かった。

### 3.3 速度依存性パラメータの導入

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、液相を分割した底面側のパラメータについて、内部摩擦角を次の式によって  $\dot{\gamma}$  の関数として表した。

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

ここに、 $\dot{\gamma}_p$  はパラメータであり、 $\phi_2$  は  $\dot{\gamma}$  が  $\dot{\gamma}_p$  を下回ると  $\phi_1$  に漸近し、上回ると  $\phi_{min}$  に漸近する。 $\phi_1, \phi_{min}$  をそれぞれ  $30^\circ, 10^\circ$  とし、 $\dot{\gamma}_p$  は解析結果をもとに  $300s^{-1}$  とした。図-3、図-4 より、流れが止まらない挙動は改善され、堆積形状も大きく崩れない結果となり、雪崩全体の挙動として実験と近い傾向が再現できた。しかし、 $\dot{\gamma}_p$  の設定は数値実験的であり、傾向として近い結果が得られたものの根拠のある設定方法が必要である。

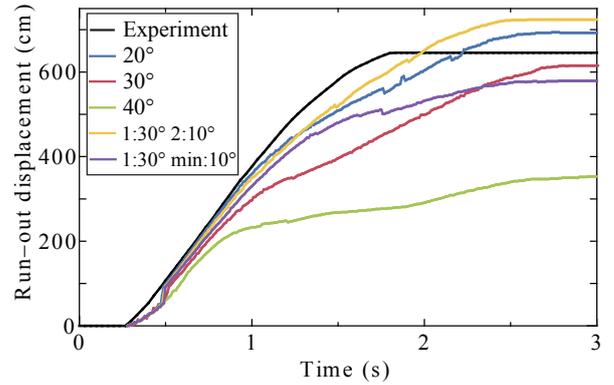


図-3 雪崩先端の到達距離の時刻暦応答

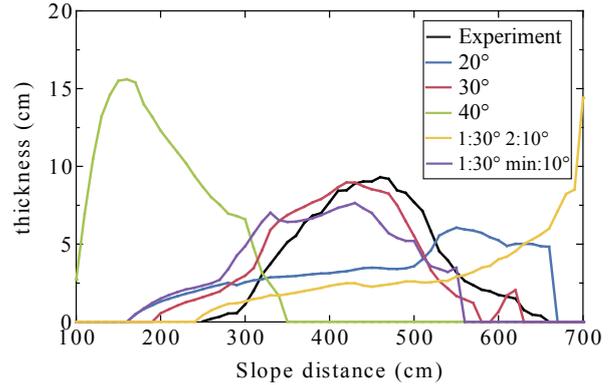


図-4 停止時の堆積状態

## 4. 結論

提案する手法では限られたパラメータ設定のみでも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、今回の数値実験により、実際の雪崩は流動が大きい場合は粒子としての特性が強く、粒子が転がるような状態であり、流動が小さい場合は連続体として滑るような挙動を示すと考察する。そのため、今回のテストケースでは速度依存のパラメータがその特性を最もよく表現できたと思われるが、現状ではパラメータ設定が数値実験的であるため、粒子としての解析結果を参考にするなどの方法で根拠のあるパラメータを与え、精度が改善されると考える。

### 参考文献

- 1) 外狩 麻子, 友利 方彦, 鈴木 博人: なだれ斜面管理手法に関する検討 (Special edition theme 「究極の安全」への挑戦: 災害に強い鉄道をめざして), *Technical review, JR East*, Vol.45, pp.35-40, 2013
- 2) Sun, Y., Beckermann, C.: Sharp interface tracking using the phase-field equation, *J. Comput. Phys.*, Vol.220.2, pp.626653, 2007
- 3) Chiu, P. H., Lin, Y. T.: A conservative phase field method for solving incompressible two-phase flows, *Journal of Computational Physics*, Vol.230.1, pp.185-204, 2011.
- 4) 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*, Vol52-58, 57-64, 2011