

令和元年8月28日現在

機関番号：31103

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16377

研究課題名（和文）VMS法を用いた気液固連成による雪崩被害予測手法の開発

研究課題名（英文）Development of avalanche damage and forecasting method by gas-liquid-solid interaction analysis using VMS method

研究代表者

高瀬 慎介（Takase, Shinsuke）

八戸工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00748808

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：雪崩による風圧および衝撃荷重を考慮した構造物の損傷破壊被害予測システムを開発することを目的とし、空気と雪崩の相互作用を考慮するための3次元自由表面流れ解析手法の開発、および、構造物に作用する流体力による構造物の損傷破壊を考慮した相互連成解析手法の開発を開発した。これにより、完全な3次元条件で雪崩・空気・構造物が混在する場を精度よく雪崩現象を再現可能な手法を提案し、その有効性と従来手法に対する優位性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年多発している雪崩災害に対して、これまでの到達範囲を経験的手法による予測ではなく、数値解析を用いた本開発手法を用いることにより、雪崩の再現計算がより詳細に解析が可能となるため、雪崩の流下経路、到達範囲の予測、また、雪崩防護壁の設置効果などを定量的に評価が可能となる。そのため、雪崩被害を防ぐ設備の効果事前に知ることができるため、これからの雪崩災害に対する防災・減災のための有効なツールの1つとなりうる手法である。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this project is to develop a damage prediction system for structures considering wind pressure and impact load due to avalanche. We developed a three-dimensional free surface flow analysis method for considering the interaction between air and avalanche, and also developed a mutual analysis method considering damage and breakage of the structure due to fluid force acting on the structure. We proposed this method to analyze the avalanche, air, structure mixed phenomenon with high accuracy by three dimensional analysis. And, we showed the effectiveness of our method and the superiority to the conventional method.

研究分野：計算工学

キーワード：雪崩解析 ビンガムモデル 構造流体連成解析

## 1. 研究開始当初の背景

自然災害による被害が毎年のように数多く報告されている。地震や津波による被害、集中豪雨による内水氾濫や土砂災害、また、大雪による雪崩被害など多岐にわたる自然災害が発生している。これらの多くの自然災害に対して、減災・防災のため自然災害シミュレーションが行われており、ますます数値シミュレーションによる被害予測の役割は多くなってきている。その中でも研究者は場所柄雪崩災害に着目し、研究を行っている。国土の約半分が豪雪地帯として指定されている我が国では、毎年のように雪崩による被害が発生している。これらの雪崩災害の制御には、雪崩の流下経路、到達範囲の予測や雪崩防護壁の設置の効果などの定量的な評価が必要不可欠である。しかし、我が国の雪崩対策事業においては、雪崩の到達範囲を「見通し角法」という経験手法で予測することが主であり、詳細な地形情報を考慮した数値解析による予測技術は、実務レベルでは広く用いられていない。また、これまで提案されている数値解析手法においても、深さ方向に積分した支配方程式を用いた 2 次元近似による解析手法を用いていることが多く、これらの手法は、近似による制約から、3 次元的に変化にとんだ地形状況での適用や雪崩が防護壁などに衝突し乗り越えるような解析を行うことは難しい。また、2015 年に起こったネパール地震では、地震に起因する大規模雪崩が発生した。この雪崩では、雪崩による直接被害だけでなく、雪崩によって起こった竜巻なみの風速により家屋が被害を受けたと報告されている。そのため、流体力の影響による構造物の損傷破壊を評価するために、時間的に変化する構造物に対する外力を正確に考慮し、その外力による構造物の変化・破壊、および破壊した構造物の衝突に伴う 2 次破壊を含む多重物理現象を考慮した構造流体連成解析手法の構築が必要不可欠であると考えた。

## 2. 研究の目的

雪崩による風圧および衝撃荷重を考慮した構造物の損傷破壊被害予測システムを開発することを目的とする。これを達成するために、空気と雪崩の相互作用を考慮するための 3 次元自由表面流れ解析手法の開発、および、構造物に作用する流体力による構造物の損傷破壊を考慮した相互連成解析手法の開発を行う。これにより、完全な 3 次元条件で雪崩・空気・構造物が混在する場を精度よく再現する汎用性の高い解析手法を実現する。また、開発した手法を実際に発生した雪崩の再現解析に適用することにより、その有効性と従来手法に対する優位性を示すことまでを含めて本研究の目的とする。

## 3. 研究の方法

- (1) 雪崩と空気の気液二相流の計算を行うため、雪崩の流動特性の表現のため、時間・空間的に粘性が変化するビンガム流体モデルを考慮可能な界面捕捉法の 1 つである VOF 法を開発する。流体解析の安定化手法として Variational MultiScale model を適用し、また、実地形への適用を行うため、領域分割に基づく並列計算手法の導入し、高速化を行う。
- (2) 構造物の破壊損傷解析を行うため、有限被覆法を用いた FEM - DEM カップリング手法を開発し、構造物の損傷破壊および破壊後の挙動も解析可能な手法の開発を行う。

## 4. 研究成果

### (1) ビンガム流体モデルを用いた VOF 法による雪崩解析

ここでは、本研究で用いたビンガム流体を用いた VOF 法による雪崩解析結果について示す。基礎方程式である Navier-Stokes 方程式の粘性係数を時間・空間的に変化するビンガム流体モデルを用いてモデル化し、雪崩の流動特性を評価するため、内部摩擦角、粘着力、降伏後の粘性係数が主な粘性パラメータになるように設定した。粘性モデルのテスト解析として、図-1 に示す摩擦性材料を仮定した粘着力はゼロ、内部摩擦角を 30 度、45 度を与えたケースと図-2 に粘着性材料を仮定した内部摩擦角はゼロ、粘着力を 300Pa と 600Pa を与えたケースを示す。これらの図より、粘性係数に与えたパラメータが精度よく解析が行えていることがわかる。

次に本手法の大規模かつ複雑な実地形への適用例として、2011 年に山形県月山沢の国道 112 号沿いで発生した雪崩の解析を行った。本解析手法は、四面体要素を用いたメッシュ分割を用いているため、地形・防護壁や植生も表現が可能である。月山での雪崩解析では、防護壁と植生を考慮し解析を行った。図-3 に防護壁のみの解析モデル、図-4 に植生も考慮した解析モデルを示す。

解析結果として、図-5 に各時刻における雪崩状況を示す。図には、流動速度の速い 10、20 秒後および概ね流動が停止した 80 秒後の結果を示している。図-5(上)は、防護壁によって雪崩が堰き止められた後に越流するという 3 次元挙動が見られ、実際の被災状況とも一致した結果となっているが、実際の被災状況よりも防護壁が無い部分からの流出が多くなっている。図-5(下)の植生を考慮した解析では、植生を表現したメッシュによって図の斜面右側への雪崩流出量が減り、防護壁の越流量が増える結果となっており、実際の被災状況とも整合性が高くなっている。以上のことより、微地形情報を正確に再現したメッシュを用いることで雪崩挙動のより詳細な再現が可能であることが例証されたと考えられる。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

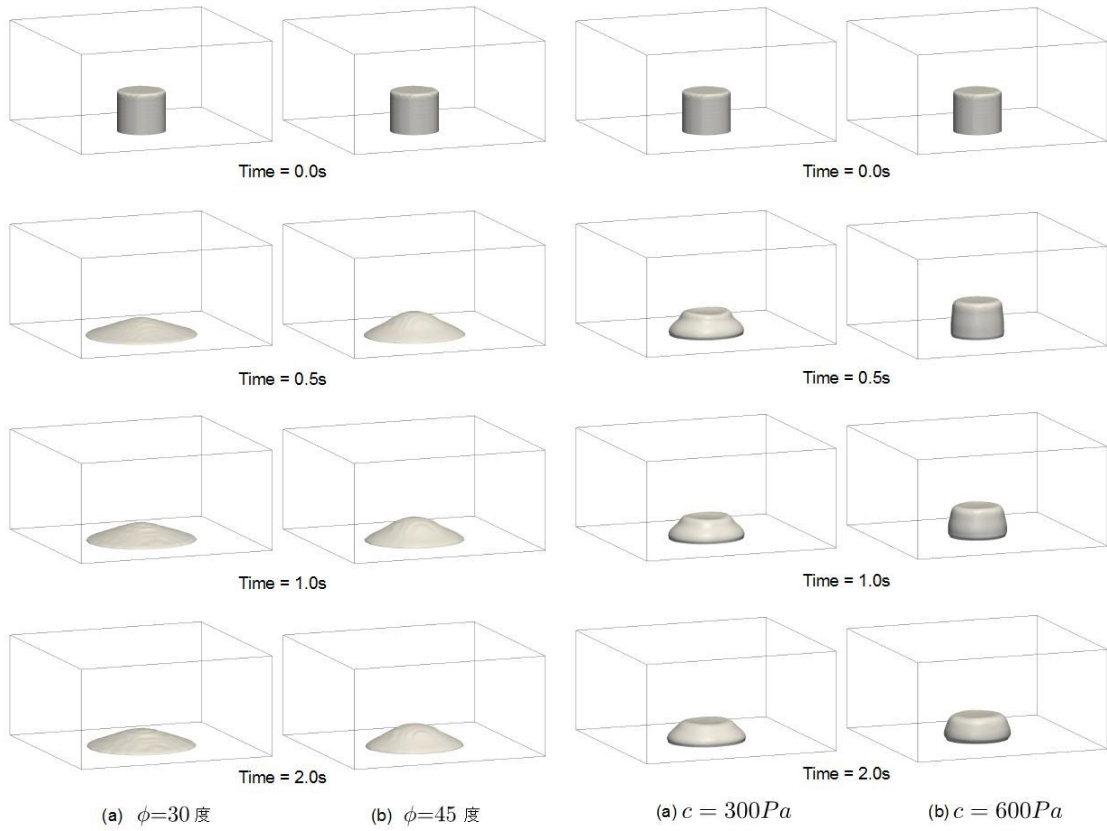


図-1: 摩擦性材料を仮定した解析結果

図-2: 粘着性材料を仮定した解析結果

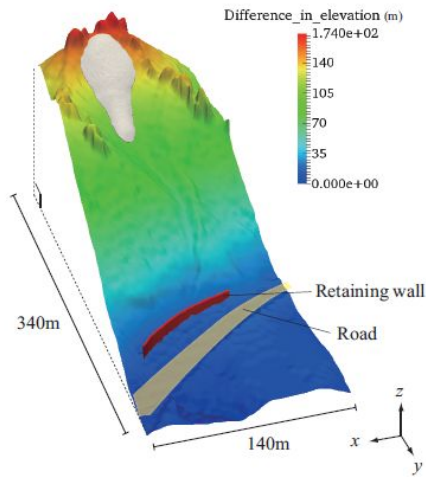


図-3: 防護壁のみの解析モデル

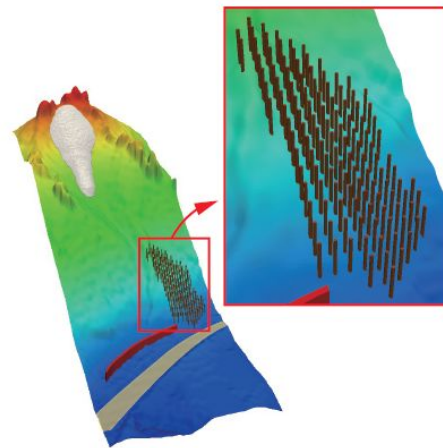


図-4: 植生も考慮した解析モデル

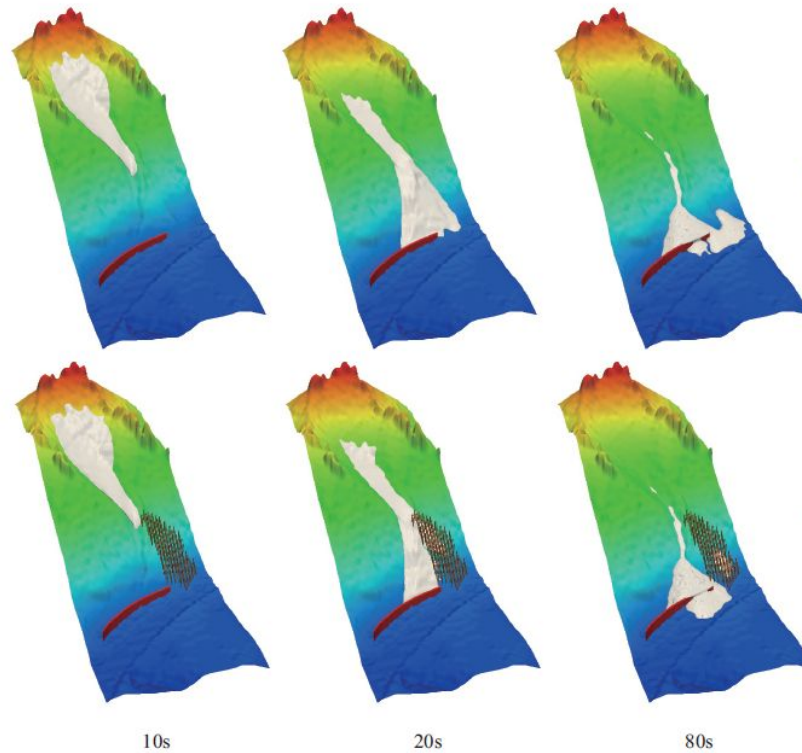


図-5：解析結果（上）防護壁のみ考慮した解析結果，（下）植生も考慮した解析結果  
 (2) 構造物の破壊損傷を考慮した雪崩の構造流体連成解析

有限被覆法に基づく構造物の破壊損傷を考慮した雪崩の構造流体連成解析結果について示す。本解析では、雪崩の挙動は、(1)で示した、ピンガム流体モデルを用いたVOF法に基づき解析を行う。構造物の破壊挙動の解析には、個別要素法(DEM)を用いた解析手法を用いている。具体的には、構造物を複数のブロックに分割し、そのブロックは、球要素を結合した剛体要素モデルを作成する。剛体要素モデルの表面を潜在的な不連続面としてこの面を Cohesive model を用いて連結することで破壊挙動を表現している。また、この解析では、DEMを用いていることで、比較的容易に、破壊後の剛体要素モデルの移動および接触の解析が可能である。雪崩の挙動は Euler 法により表現しており、構造の挙動は、Lagrange 法により表現しているため、両者の物理位置および物理量の連成を行うため、有限被覆法を適用することにより、流れ場に構造物の境界位置を正確に考慮した解析が可能となっている。

数値解析例として、仮想斜面における防護壁との連成結果を示す。図-6に示すような30度の斜面に雪塊を設定し、斜面端部より1mの位置に高さ2.5m、奥行5m、幅0.5mの防護壁を設置する。防護壁は32個の剛体要素モデルでモデル化している。球要素の半径は0.1mとしている。図-7に各時刻における解析結果を示す。この図より、雪崩が防護壁にあたり、破壊される様子が安定に解析が行われていることがわかる。このことより、本手法の適用性

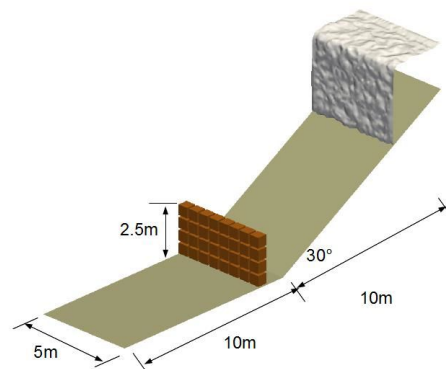


図-6：解析モデル

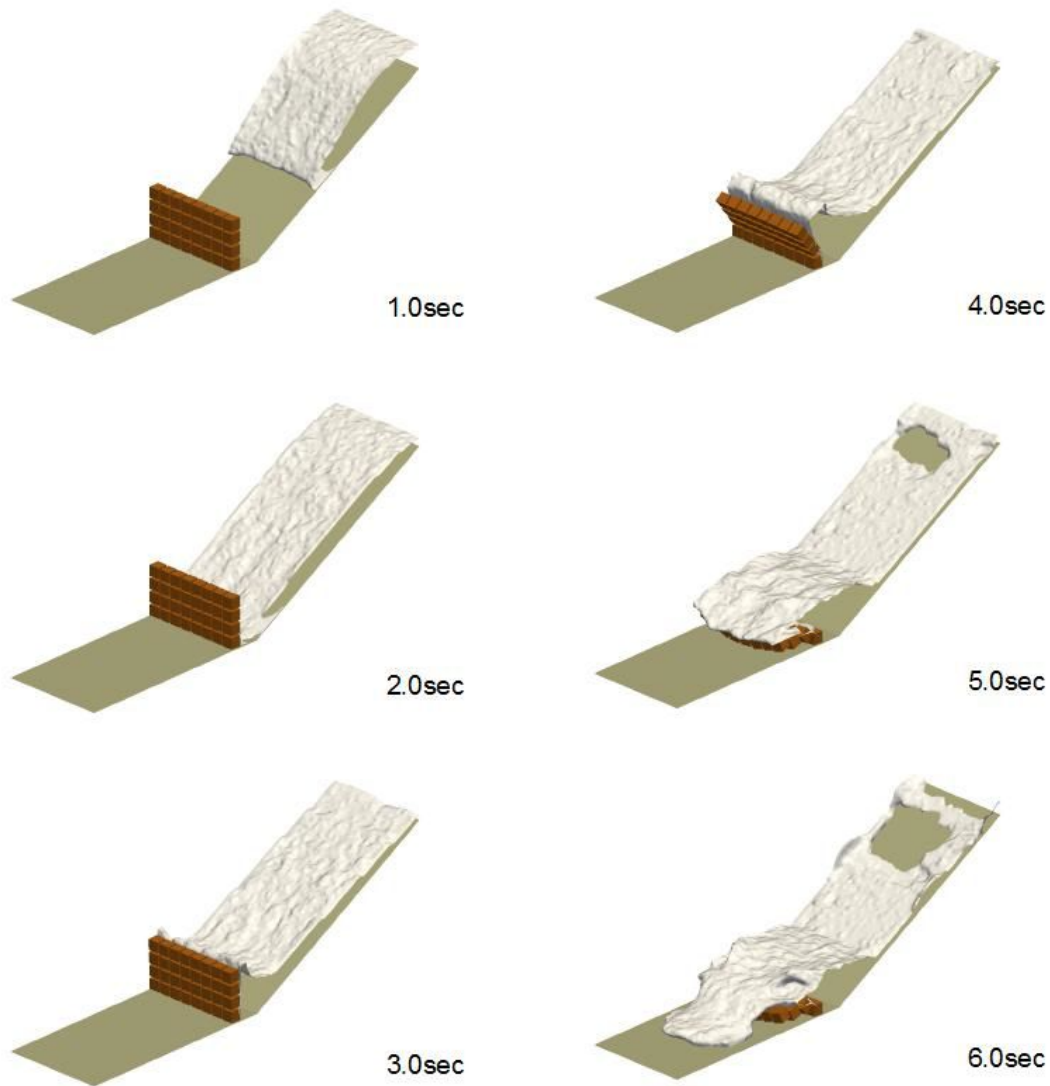


図-7：各時刻における解析結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- (1)山口裕矢, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 小田憲一, 上石勲, 非ニュートン流体モデルを用いた雪崩の3次元非構造有限要素解析, 日本計算工学会論文集, 2017年.(査読有)
- (2)鬼頭昂平, 小谷拓磨, 山口裕矢, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 3次元解析に基づく雪崩の危険度マップ, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 74, I\_203~I\_211, 2018年.(査読有)

〔学会発表〕(計6件)

- (1)山口裕矢, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, ピンガムモデルを用いた安定化有限要素法による雪崩解析, 応用力学シンポジウム, 2016年5月21日~5月22日, 北海道大学工学部, 北海道.
- (2)山口裕矢, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 安定化有限要素法による雪崩の流動解析, 第21回計算工学講演会, 2016年5月31日~6月2日, 新潟コンベンションセンター, 新潟.
- (3)Yuya Yamaguchi, Shinsuke Takase, Shuji Moriguchi, Kenjiro Terada, Simulations of Snow Avalanches Using 3-D Stabilized Finite Element Method, WCCM XII & APCOM VI, 2016年7月24日~7月29日, 韓国, ソウル.
- (4)山口裕矢, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 微地形を考慮した安定化有限要素法による雪崩解析, 土木学会全国大会, 2016年9月7日~9月9日, 東北大学, 宮城.
- (5)山口裕矢, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 上石勲, 非構造格子を用いた実地形を考慮した雪崩の流動解析, 第22回計算工学講演会, 2017年5月31日~6月2日, ソニックシティ, 埼玉.
- (6)高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 非ニュートン流体モデルを用いた雪崩の構造流体連成解析, 第23回計算工学講演会, 2018年6月6日~6月8日, ウィンクあいち, 愛知.

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年:

国内外の別:

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号(8桁):

(2) 研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。