

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24651205

研究課題名(和文)汎用数値雪崩モデルの構築と雪崩減勢工設計手法の最適化

研究課題名(英文)Development of numerical avalanche model and its application for designing defense structures

研究代表者

木村 一郎(KIMURA, Ichiro)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60225026

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は雪崩のダイナミズムをシミュレートする「数値雪崩モデル」の構築を行うとともに、これを用いた雪崩減勢工の最適設計法を提案するものである。雪崩運動の物理的特徴は雪物性の不確定性に起因する運動形態の時空間的複雑性にある。このため煙型雪崩、流動型雪崩などの異なる運動形態が存在し、単一モデルによるアプローチは困難とされてきた。本研究は、これらの困難を粒子法的一种であるMPS法をベースに独自の工夫を施すことで克服し、雪崩運動を統一的に記述し定量的予測を可能とする汎用数値雪崩モデルを構築した。このモデルを、代表的な雪崩減勢工の基本形周辺の粒子流に適用し、実験結果等と比較することでその妥当性を示した。

研究成果の概要(英文)：The numerical snow avalanche model for simulating the dynamic behavior of avalanche was developed. The present model was applied to several kinds of benchmarks as well as real scale phenomena to validate the accuracy and efficiency. The numerical results showed that the present model can capture well the fundamental characteristics of slow avalanche phenomena, such as, forming shock waves, entrainment of bed snow, etc. It is also be pointed out that the present model has enough quantitative accuracy in order to consider effective protection methods. We also performed the field experiments to consider effective energy dissipater for protection from avalanches. Through the comparison between the present numerical and experimental results, we proposed effective design for avalanche protection facilities.

研究分野：水理学 数値流体力学

キーワード：雪崩 雪氷災害 数値解析

### 1. 研究開始当初の背景

雪崩は積雪地帯、特に山岳部に発生する代表的自然災害であり、我が国においても毎年雪崩により人命が奪われている。雪崩は莫大なエネルギー生成を伴う突発現象であるから、雪崩の発生そのものを抑止することは困難であり、現実的な雪崩対策として、①雪崩の発生を予測する技術、②雪崩エネルギーを局所的に減衰させる技術の2点に絞られる。残念ながらこれらの技術は現在のところその大部分を経験的方法に頼っている。この背景には、発生地域が積雪地帯の山岳部に限られること、突発的現象で観測が極めて困難であること、雪の物性変化を伴うため、特に実験における相似則の確立が困難であることなどが挙げられる。このため、信頼できる数値雪崩モデルの構築が急務となっている。

### 2. 研究の目的

#### (1) 概要

本研究は雪崩のダイナミズムをシミュレートする「数値雪崩モデル」の構築を行うとともに、これを用いた雪崩減勢工の最適設計法を提案するものである。雪崩運動の物理的特徴は雪物性の不確定性に起因する運動形態の時空間的複雑性にある。このため煙型雪崩、流動型雪崩などの異なる運動形態が存在し、単一モデルによるアプローチは困難とされてきた。本研究は、これらの困難を粒子法的一种である MPS 法をベースに独自の工夫を施すことで克服し、雪崩運動を統一的に記述し定量的予測を可能とする汎用数値雪崩モデルを構築する。さらに、現在経験的手法に頼っている雪崩減勢工の設計に本数値雪崩モデルを適用し、物理的根拠に基づく効果的かつ経済的な減勢工基本構造を提案し、そのスケールパラメータの具体的決定手順を示すことにより信頼性の高い簡便な設計手法を確立する。

#### 3. 研究の方法

本研究は数値雪崩モデルの開発（2年間）と雪崩減勢工最適設計方法構築（1年間）の二段階からなる。前者は MPS および SPH 法による粒子法モデルをベースに、木村・清水がこれまで蓄積してきたモデルのノウハウをベースに、研究協力者の大槻・斎藤・イセンコの協力の下で実施する検証実験との比較、連携研究者の平島による既往雪崩モデルとの比較や雪崩発生現象再現の試み、観測結果との比較などを通じて各パーツを詳細に同定し、高精度なモデルに組上げていく。続く雪崩減勢工の最適設計法の策定は、基本構造の同定、スケールパラメータの最適化の二段階からなる。この際にも検証実験を実施し、必要に応じてモデルの再チューニングを行う。なお、検証実験には既往の雪崩実験台用い、数値解析には既存の計算機を併用するため、大きな実験設備や基幹コンピュータの購入は不要であり、計測機器と補助的計算エンジン用 PC の購入によりこれらの計画を遂行できる。

#### (2) 研究体制

本研究に従事する人員と、それぞれの主な役割分担を次に示す。

# 研究代表者：木村一郎（北海道大学大学院工学研究院）役割：数値シミュレーションモデルの構築と検証，雪崩模型実験，研究とりまとめ

# 研究分担者：清水康行（北海道大学大学院工学研究院）役割：数値シミュレーションモデルの検証，雪崩減勢工最適設計法の開発

# 連携研究者：平島寛行（独）防災科学技術研究所）雪崩発生現象再現の検討

# 研究協力者：大槻政哉，斎藤佳彦，エフゲニー・イセンコ（株）雪研スノーイーターズ）役割：屋外実験の実施，雪崩減勢工最適設計法の開発

### 4. 研究成果

#### (1) 数値雪崩ベースモデルの選択

数値雪崩ベースモデルとして、粒子法を選択したが、これは雪崩界面の大変形、特に減勢工に衝突したときの雪崩先端部の巻き上がり等の再現性を考慮してのことである。粒子法のうち、代表的なモデルは MPS 法と SPH 法である。これについては、いくつかのベンチマークテストにより、計算時間、精度、安定性の観点から精査したところ、SPH 型のモデルの方が総合的にみて雪崩の再現については良好な結果を与えることがわかった。ただし、SPH 型モデルでは、MPS 型モデルに比べてチューニングパラメータが多いため、これらを適切に同定することが重要となる点も指摘した。なお、この MPS 法と SPH 法の比較に関しては、冗長さを避けるためここでは省略し、文献（Journal of JSCE, 2014）に譲る。

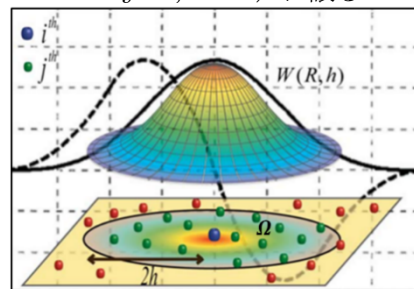


図1 SPH法によるカーネル関数の説明

#### (2) 数値雪崩モデルの基礎式

SPH 法の適用を想定した雪崩モデルの基礎式は、線形運動方程式および連続式であり、次のように記述される。

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\alpha} \quad (1)$$

ここに、 $\alpha, \beta$  はデカルト座標系を表し、 $x, y, z$  の値をとる。また、アインシュタイン総和則を適用する。また、 $\rho$  : 密度、 $v$  : 流速、 $\sigma^{\alpha\beta}$  : 応力テンソル、 $f^\alpha$  : 外力の加速度成分、 $D/Dt$  : 実質微分であり、次のように定義される。

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v^\alpha \frac{\partial}{\partial x^\alpha} \quad (3)$$

通常、応力テンソル  $\sigma^{\alpha\beta}$  は、2つの成分から構成される。すなわち、等方成分  $P$  と、非等方成分  $S$  であり、次のように表記される。

$$\sigma^{\alpha\beta} = -P\delta^{\alpha\beta} + S^{\alpha\beta} \quad (4)$$

### (3) 構成則

雪崩のモデルを構築するに先立ち、雪よりも取扱いの簡単な砂を用いて各種実験を実施した。そこで、ここでは、まず砂の粒子流を対象とした構成則を構築する。SPH法は、通常流体を対象とした計算手法といえる。これを砂の粒子流に適用するにあたり、応力-歪関係を砂粒子に適合するようにモデル化する必要がある。Bui, et al. (2007) に従って、ここでは砂粒子流を弾塑性体として扱う。

式(4)の圧力項については、密度変化を関数とする状態方程式から計算される。砂粒は弾性的な挙動をするとみなされるので(Bui and others, 2007; Yaidel and others 2012), 砂粒子流の圧力方程式はフックの法則に従うとし、次のように与える。

$$P = -K \frac{\Delta V}{V} = K \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) \quad (5)$$

ここに、 $K$ : 体積弾性率、 $\Delta V/V$ : 体積ひずみ、 $\rho_0$ : 初期密度である。せん断応力の時間変化  $dS/dt$  については、剛性率  $\mu$  を用いる Jaumann (ヤウマン) の応力速度を導入し、次のように関係づけられる。

$$\frac{dS^{\alpha\beta}}{dt} = 2\mu \left( \varepsilon^{\alpha\beta} - \frac{1}{3} \varepsilon^{\gamma\gamma} \right) + S^{\alpha\gamma} \omega^{\beta\gamma} + \omega^{\gamma\beta} S^{\alpha\gamma} \quad (6)$$

ここに、 $\varepsilon^{\gamma\gamma} = \varepsilon^{xx} + \varepsilon^{yy} + \varepsilon^{zz}$ ,  $\varepsilon$  はひずみ速度テンソル、 $\omega$  は回転速度テンソルをそれぞれ表す。ひずみ速度テンソル、回転速度テンソルについては、次のように定義される。

$$\varepsilon^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\beta} + \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\alpha} \right) \quad (7)$$

$$\omega^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\beta} - \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\alpha} \right) \quad (8)$$

### (4) SPH法のコンセプトと基礎式

SPH法は、連続体に関する数値解析法の一つである。シミュレーション空間上の任意の点  $x$  における部室特性  $f(x)$  は、図1のように影響円  $\Omega$  内の近傍計算粒子の影響を内挿理論により、次のように計算される (Hanifa and others, 2013)。

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x') W(x-x', h) dx' \quad (9)$$

ここに、 $h$ : カーネルの影響領域から定義される平滑化長さ、 $W(x-x', h)$ : 平滑化関数であり、

次の3つの条件を満たす必要がある。すなわち、規格化条件を満たすこと、デルタ関数特性を有すること、そして、コンパクトであることの3つである(Liu and Liu, 2003)。

従来から前述の条件を満たす平滑化関数については多数提案されてきた。そのうちの最も良く知られているものの一つは、Monaghan and Lattanzio (1985)によって提案された三次スプライン内挿関数であり、次のように表される。

$$W(R, h) = \alpha_d \times \begin{cases} 1.5 - R^2 + 0.5R^3 & 0 \leq R < 1 \\ (2-R)^3/6 & 1 \leq R < 2 \\ 0 & R \geq 2 \end{cases} \quad (10)$$

ここに、三次元空間の場合は  $\alpha_d = \frac{3}{2\pi h^3}$  であり、

$$R = \frac{|x-x'|}{h} \text{ となる。}$$

このような方法を前述の砂粒子運動の支配偏微分方程式に適用することを考える(Liu & Liu 2003, 2010)。これにより、式(1)、(2)は、次のように変形される。

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j (v_i^\alpha - v_j^\alpha) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\alpha} \quad (11)$$

$$\frac{Dv_i^\alpha}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + f^\alpha \quad (12)$$

同様に、粒子  $i$  に対する SPH法による歪テンソルと回転テンソルの表現は、次の通りである。

$$\varepsilon_i^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \left( \frac{m_j}{\rho_j} (v_i^\alpha - v_j^\alpha) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{m_j}{\rho_j} (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\alpha} \right) \quad (13)$$

$$\omega_i^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \left( \frac{m_j}{\rho_j} (v_i^\alpha - v_j^\alpha) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} - \frac{m_j}{\rho_j} (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\alpha} \right) \quad (14)$$

式(6)、(13)、(14)を組み合わせることで、せん断応力の偏差成分が計算できる。そして、これは、塑性体のモールクーロンの破壊基準による最大応力 ( $S_f = c + P \tan\phi$ ) 比較される。ここに、 $c$ : 粘着力、 $\phi$ : 内部摩擦角である。

### (5) 人工粘性

非合理的な応力の振動を抑制、非合理的な衝撃波の抑制、さらに粒子が境界を突き抜けるのを防ぐため、運動方程式に人工的な粘性項 ( $\pi_{ij}$ ) を導入する。この人工粘性について、最も良くもちられるモデルは Monaghan and Lattanzio (1985)の提案によるものであり、次のように記述される。

$$\pi_{ij} = \begin{cases} \frac{-\alpha_1 \bar{c}_{ij} \phi_{ij} + \beta_1 \phi_{ij}^2}{\bar{\rho}_{ij}} & v_{ij} \cdot x_{ij} < 0 \\ 0 & v_{ij} \cdot x_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

ここに、

$$\phi_{ij} = \frac{\bar{h}_{ij} v_{ij} \cdot x_{ij}}{|x_{ij}|^2 + \epsilon \bar{h}_{ij}^2}, \bar{c}_{ij} = \frac{1}{2} (c_i + c_j) \quad (16)$$

$$\bar{h}_{ij} = \frac{1}{2} (h_i + h_j), \bar{\rho}_{ij} = \frac{1}{2} (\rho_i + \rho_j) \quad (17)$$

$$v_{ij} = v_i - v_j, x_{ij} = x_i - x_j \quad (18)$$

ここに、 $\alpha_1$  と  $\beta_1$  はモデル定数であり、いずれも 1.0 の値をとる。また、 $\epsilon$  は通常 0.01 とされる。 $c$  と  $v$  は、それぞれ音速と粒子流速のベクトルを表す。

人工粘性項を導入した運動方程式を示す。

$$\frac{Dv_i^\alpha}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} + \pi_{ij} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + f^\alpha \quad (19)$$

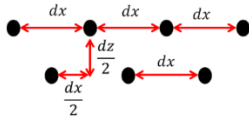


図2 壁面粒子のスタガード配置の説明

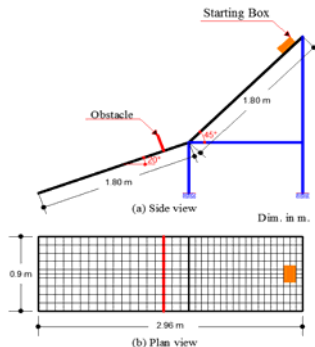


図3 楕円形雪崩減勢工に関する実験の概要

#### (6) 境界条件

本研究では壁面の境界条件に、動的境界条件を用いる。動的境界条件では、壁面境界粒子に運動方程式および連続式を満たすような力学的特性を課すが、それらは固定されているとする。運動中の粒子が壁面に近づくと、連続式により壁面付近の粒子密度が上昇し、状態方程式により圧力が上昇する。続いて運動方程式により接近粒子に対して壁面に対する反発方向の力が增加する。壁面粒子は運動粒子の突き抜けを防ぐため図2示すようにスタガード形状に配置する。

#### (7) 雪崩減勢工に対するモデルの適用と考察

##### a) 概要

本研究で開発した SPH 法ベースの数値雪崩モデルを雪崩減勢工の設計に適用するため、3つの異なる現象を取り上げモデルの適用を実施する。

#### b) 楕円形減勢工に対するモデルの適用

##### ・計算条件

イエリンら(2013)によって北海道大学において実施された雪崩模擬実験の結果を検証データとする。図3は実験の概要を示す。

実験は、次の3つの条件について行う。

Case1: 1cm square columns with 1 cm spacing.

Case2: 2cm square columns with 2 cm spacing.

Case3: 1cm square columns in a staggered shape.

これらの配置を図4に示す。

##### ・計算方法

粒子数は 12054 個に設定し、初期粒子間距離は 0.005m とした。粒子の密度は、 $\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$ 、ヤング率は  $E = 150 \text{ Mpa}$ 、内部摩擦角は  $\phi = 32^\circ$ 、ポアソン率は  $\nu = 0.3$  とした。

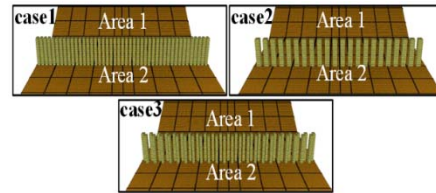


図4 杭型雪崩減勢工配置の詳細

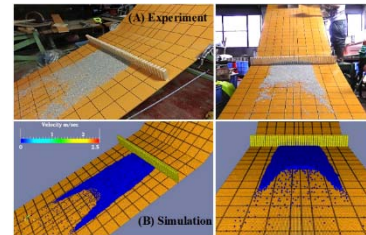


図5 Case1 の計算結果と実験結果の比較

##### ・結果と考察

図5は、Case1の実験結果と計算結果を比較したものである。いずれのケースでも良好な一致を示している。

#### c) 円柱型減勢工要素への適用

##### ・対象とする流れ場

減勢工の構成要素として、最も一般的な円柱周辺の粒子流挙動に対して、本研究で提案する SPH 数値雪崩モデルを適用する。検証実験としては、Cui et al. (2013) による小規模実験の結果を採用する。実験装置は亚克力製であり、幅 300mm、長さ 600mm である。また、傾斜角度は  $\zeta = 36^\circ$  であり装置の概要を図6に示す。粒子には砂を用い、これは上流ホッパーから供給する。実験の様子はビデオカメラとスチルカメラ (シャッター速度 1/20[sec]) で記録する。1秒間に 25 コマのが撮影され衝撃波や粒子空洞部が記録される。

##### ・結果とその考察

図7に粒子流が円柱に衝突する様子の連続スナップショットを示す。これらのスナップショットより、粒子の位置や自由表面の位置、時間ごとの流速分布などが理解できる。粒子がホッパーから解放されると、粒子は乱れながら下流に進む。初期には流動速度は比較的

大きく、流動深は比較的小さい。粒子が円柱に衝突し始めると、円柱に衝突する粒子以外は流下を続けるが、衝突した粒子は大きく影響を受ける様子が示されている。

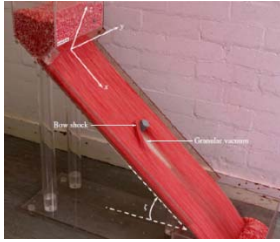


図6 円柱回りの粒子流に関する実験装置  
表2 円柱に関するケースのパラメータ

Parameter	Value
Density (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho = 1500$
Young's modulus (MPa)	$E = 150$
Friction angle	$\phi = 26^\circ$
Passion ratio	$\nu = 0.3$

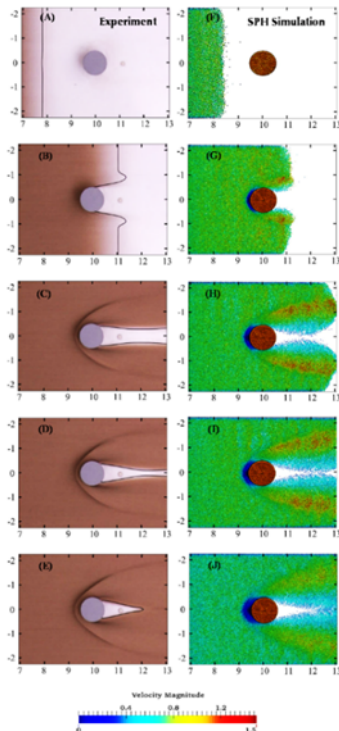


図7 円柱に関するケースの実験（左）、数値解析（右）、Cuiらの水理学的雪崩モデルの境界形状（左図の実線）の比較

#### d) 三角錐型（ピラミッド型）減勢工

##### ・対象とする現象の概要

三角錐型の雪崩減勢工はドイツ Zugspitze にある, Schneefernerhaus という施設を 100 年周期規模の大規模雪崩から守るために提案されたものである。100 年規模の雪崩では、雪の厚みは 8m にも及ぶとされる。Schneefernerhaus の様子を図 8(a)に示す。Yih-Chin T. (2000)は、このような模型実験を実施しこのような現象の検討を実施した。スケール 1:100 と 1:300 の 2 通りのモデルを用いて実験は行われた。平均粒径 0.8mm のセモリナ小麦粉末と、プラスチックビーズが乾燥した雪のモデルとして使用された。これらの粒子群の内部摩擦角は

雪の内部角とほぼ等価である。図 8 右図はスケール 1:300 の場合の実験装置を示す。

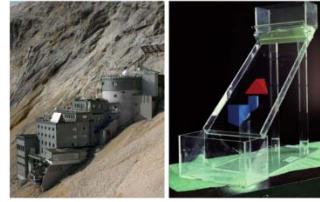


図8 Schneefernerhaus の模型と実験装置  
表3 三角錐型減勢工のケースの計算条件

Parameter	Value	
	Semolina	Plastic beads
Density (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho = 600$	$\rho = 890$
Young's modulus (MPa)	$E = 5000$	$E = 900$
Friction angle	$\phi = 35^\circ$	$\phi = 38^\circ$
Passion ratio	$\nu = 0.49$	$\nu = 0.42$

##### ・数値解析条件

粒子数は 165000 個とし、初期の粒子間距離は 0.002m とした。2つの条件における数値解析パラメータを表3に示した。

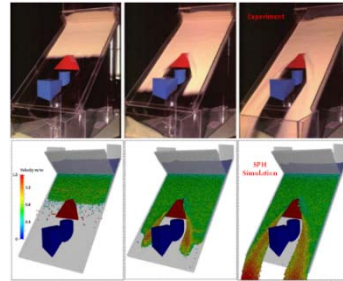


図9 三角錐型減勢工の計算と計算結果

##### ・結果とその考察

図9は、セモリナ粒子の挙動を3つの異なる時間のスナップショットで示したものである。これらより、雪崩がどのようにして建物から逸らされていくかが理解できる。法線方向の衝撃波がピラミッド頂点に形成され、これは両サイドに伸び、ピラミッドの裾野付近で斜め衝撃波を形成する。これらの過程は実験と数値解析で良好に一致している。

#### (8) 結論

本研究では、SPH型粒子法をベースに、構成則に弾塑性挙動を反映させるなどの工夫を施すことにより、新たな数値雪崩モデルを構築した。この数値雪崩モデルの雪崩減勢工設計に対する適用性を検証するため3つの異なる流れ場に適用し、既往の実験結果等と比較することにより検討を実施した。これより、本研究で開発した数値雪崩モデルは雪崩の挙動、減勢工周辺の粒子挙動を適切に再現できることが確認され各種雪崩減勢工設計において強力なツールとなり得ることが示された。

##### <引用文献>

Abdelrazek A M, Kimura I and Shimizu Y (2014) Comparison between SPH and MPS Methods for

Numerical Simulations of Free Surface Flow Problems. *J.JSCE.*, Ser.B1, 70 (4), I\_67-I\_72.  
 Abdelrazek A M, Kimura I and Shimizu Y (2014) Numerical Simulation of Snow Avalanches as a Bingham Fluid Flow Using SPH method. *River Flow 2014*, 65-71.  
 Armstrong BR, Williams K and Armstrong RL (1992) The avalanche book. *Fulcrum Publishing*.  
 Chen W and Qiu T (2012) Numerical Simulations for Large Deformation of Granular Materials Using Smoothed Particle Hydrodynamics Method. *Int. J. Geomech.*,12(2), 127-135.  
 Cui X and Gray J M N T (2013). Gravity-driven granular free-surface flow around a circular cylinder. *J. Fluid Mech.* 720, 314-337.  
 Liu GR, Liu M. B (2003) Smoothed particle hydrodynamics: a mesh-free particle method. *World Scientific*.  
 Monaghan JJ, Lattanzio JC (1985) A refined particle method for astrophysical problems. *Astron Astrophys.* 149-135.  
 Yellin K, Saito Y, Kimura I, Otsuki M and Shimizu Y (2013) Refinement of Simulation Model for Practical Design of Energy Dissipater for Snow Avalanche. *JSSI & JSSE Joint Conference on Snow and Ice Research*.  
 Yih-Chin T, Wang Y, Gray J, and Kolumban H (1999) Methods of similitude in granular avalanche flows. *Advances in Cold-Region Thermal Engineering and Sciences-Lecture Notes in Physics*, 533, 415-428.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ① S. Patsinghasanee, I. Kimura and Y. Shimizu: Experimental and numerical study on overhanging failure of riverbanks, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. B1, Vol. 71, 2015 (査読有) .
- ② Ahmed M. ABDELRAZEK, Ichiro KIMURA and Yasuyuki SHIMIZU: Numerical Simulation of Granular Flow Past Simple Obstacles using the SPH method, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. B1 (Hydraulic Eng.), Vol.71, 2015(査読有).
- ③ A. Abdelraze, I. Kimura & Y. Shimizu: Application of non-Newtonian SPH model to simulate small-scale snow avalanche laboratory tests, *J. of JSCE*, Ser.A2, 2015(査読有).
- ④ A. Abdelrazek, I. Kimura and Y. Shimizu: Comparison between SPH and MPS Methods for Numerical Simulations of Free Surface Flow Problems, *J. of JSCE*, Ser.B1, 70, I\_67-I\_72, 2014(査読有).
- ⑤ K. Yellin, Y. Sato, T. Takagi, I. Kimura, M. Otsuki, E. Isenko and Y. Shimizu: Refinement of MPS Method, or Simulating Avalanches, *J. JSCE*, 70, I\_433-I\_438, 2014(査読有).
- ⑥ イエリン賢太郎, 齋藤佳彦, 木村一郎, 大槻政哉, イセンコエフゲニ, 清水康行: 雪

崩減勢工の合理的設計に向けたMPS数値雪崩モデル改良, 第29回寒地技術論報告集, 29, pp. 4-9, 2014(査読有).

- ⑦ A. Abdelrazek, I. Kimura & Y. Shimizu: Numerical simulation of snow avalanches as a Bingham fluid flow using SPH method, *RiverFlow2014*, 1581-1587, 2014(査読有).

[学会発表] (計7件)

- ① S. Patsinghasanee, I. Kimura and Y. Shimizu: An analytical approach to calculate the coupling fluvial erosion and overhanging failure of cohesive riverbanks, 第18回応用力学シンポジウム講演概要集, 91-92, 2015.5.18, 金沢大, 金沢.
- ② A. Abdelrazek, I. Kimura and Y. Shimizu: Numerical Investigation of the Propagation of Shock Waves and Dead Zones in Rapid Flows of Granular Materials using SPH Method, 第18回応用力学シンポジウム講演概要集, pp.163-164, 2015.5.18, 金沢大, 金沢.
- ③ S. Patsinghasanee, I. Kimura, Y. Shimizu & K. Hasegawa: Computational modeling of bank erosion by a 2-D depth averaged model under homogeneous and heterogeneous Conditions, 第17回応用力学シンポジウム講演概要, 327-328, 2014.5.11, 琉球大, 沖縄.
- ④ A. Abdelrazek, I. Kimura & Y. Shimizu: Application of SPH method for simulation snow avalanche model test, 第17回応用力学シンポジウム講演概要, 177-178, 2014.5.11, 琉球大, 沖縄.
- ⑤ E. Kakegawa, Y. Shimizu, I. Kimura, Y. Saito and E. Isenko : The effect of particle size on the accuracy of PMS in simulation of avalanche, *International Snow Science Workshop 2014*, 2014.9.30, Banff, Canada.
- ⑥ 木村一郎, S. Patsinghasanee, 清水康行: 河岸のオーバーハングと間欠的崩落を考慮した河岸浸食モデル, 土木学会H26年度第69回年次学術講演会, 2014.9.12, 大阪大, 大阪
- ⑦ イエリン賢太郎, 齋藤佳彦, 木村一郎, 大槻政哉, 清水康行: 雪崩減勢工の合理的設計に向けた数値解析モデルの改良, C2-1, 雪氷研究大会, 2013.9.18, 北見工大, 北海道.

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
 木村 一郎 (KIMURA, Ichiro)  
 北海道大学・大学院工学研究院・准教授  
 研究者番号: 60225026
- (2) 研究分担者  
 清水 康行 (SHIMIZU, Yasuyuki)  
 北海道大学・大学院工学研究院・教授  
 研究者番号: 20261331
- (3) 連携研究者  
 平島 寛行 (HIRASHIMA, Hiroyuki)  
 独立行政法人防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・主任研究員  
 研究者番号: 00425513