

雪崩による雪煙のビジュアルシミュレーション

菅野将太¹⁾ 菊池 司²⁾ (正会員)

1) 株式会社ジェットスタジオ 2) 東京工科大学

Visual Simulation of Spray of Snow Induced by Avalanche

Shouta SUGANO¹⁾ Tsukasa KIKUCHI²⁾(Member)

1) JET STUDIO Inc. 2) Tokyo University of Technology

1) suga424@gmail.com 2) kikuchitks@stf.teu.ac.jp

アブストラクト

本論文では、雪崩によって引き起こされる雪煙のビジュアルシミュレーション法を提案する。本論文で提案する手法は、山の斜面をポリゴンモデルで生成し、雪崩発生源から雪塊を表す雪パーティクルを落下させ、雪パーティクルと斜面ポリゴンとの衝突を検知し、衝突点からナビエ・ストークス方程式による雪煙拡散速度場を生成する。生成された速度場に沿って運動する雪煙の密度をボリュームフォトンマッピング法を介してアダプティブ・レイマーチング法によるボリュームレンダリングを行うことによって、雪崩による雪煙のビジュアルシミュレーションを行う。本手法により、山斜面の斜度の違いなどによって引き起こされる雪煙の違いも表現可能となった。

Keywords : ビジュアルシミュレーション, 雪煙, 雪崩, 流体現象

Abstract

This paper proposes a method for visually simulating snow spray caused by a snow avalanche. In this method, a polygon model is created of a mountain slope, then the snow particles that express snow clumps from the source of the avalanche are made to fall. The collision between the snow particles and the mountain slope is detected, then a velocity field of the expansion of snow spray is created based on a Navier-Stokes equation. The density of the snow spray that moves along this velocity field is subjected to volume rendering based on adaptive ray marching through the volume photon mapping method. This is used to visually simulate snow spray from a snow avalanche. This method can also express differences in snow spray resulting from differences in such things as the gradients of the mountain slope.

Keywords: Visual Simulation, Snow Spray, Snow Avalanche, Fluid Phenomenon



(a) (http://pds.exblog.jp/pds/1/201302/12/27/c0166427_1421167.jpg より)



(b)

図 1. 雪崩による雪煙の実写(a)と本論文による手法の成果画像例(b)

1. はじめに

本論文では、雪崩によって引き起こされる雪煙のビジュアルシミュレーション法を提案する (図 1)。

図 1(a) に示す雪煙を伴う雪崩は「泡雪崩 (ほうなだれ)」とも呼ばれ、多雪地で気温が低く、多量の降雪を伴う吹雪の時からその直後の積雪が安定しないときに発生しやすい。そのため、主に厳冬期の山間部で発生し、通常の雪崩のような雪塊の落下とは異なり雪崩を構成する雪煙が最大で時速 200 km 以上の速度で流下する。その衝撃力は数百 KPa (キロパスカル) に達し、大きな被害をもたらす。そのため、泡雪崩が発生すると、あまり雪が堆積しないにも関わらず、衝撃によって周囲のものがごとごとく破壊されているか吹き飛ばされているという状況が発生する [1]。

上記のように、雪煙を伴う泡雪崩は、実際の撮影には多大なる危険と困難を伴うため、CG によるビジュアルシミュレーションによって再現することが有益なのは言うまでもなく、エンターテインメント分野での利用のみならずハザードビジネスや災害対策にも有益であると考えられる。

本論文では、山の斜面をポリゴンモデルで生成し、雪崩発生源から雪塊を表す雪パーティクルを落下させる。そして、雪パーティクルと斜面ポリゴンとの衝突を検知し、衝突点からナビエ・ストークス方程式による雪煙の拡散速度場を生成する。生成された速度場に沿って運動する雪煙の密度をボリウムフォトンマッピング法を介してアダプティブ・レイマーチング法によるボリウムレンダリングを行うことによって、雪崩による雪煙のビジュアルシミュレーションを行う (図 1(b))。

本手法により、山の斜面の斜度の違いなどによって引き起こされる雪煙の違いも表現可能となった。

2. 関連研究

流体の拡散現象を計算する手法に、非圧縮オイラー方程式を用いてナビエ・ストークス流体方程式を計算する Rasmussen らの手法 [2] がある。これは、グリッドベースの 3 次元非圧縮オイラー方程式に基づき流体の拡散現象をモデル化し、Kolmogorov noise を用いて 3 次元速度場に乱流成分を加えるという手法である。Rasmussen らの手法 [2] の高速化を目指した研究例としては、Lentine らの手法 [3] がある。Lentine ら [3] は、グリッドベースの流体計算手法において、グリッドの解像度を流体拡散の詳細度に応じて粗いものから高解像度のものへと制御する手法を提案した。本論文では、雪煙の拡散現象の速度場は Lentine らの手法 [3] を利用し、拡散詳細度によるグリッド解像度最適化を行いながら計算する。しかしながら、グリッドベースによるオイラー法 [2,3] では、本研究で表現対象としている流体の拡散現象が多地点から発生する雪崩による雪煙のようなシーンが生成可能であることは示されていないため、流体拡散速度場は雪パーティクルと山斜面ポリゴンとの衝突を検知した箇所それぞれ個別に発生させるものとし、その結果と

してシーン内に多数の速度場が個別に生成された集合体によって大規模な現象を再現するという手法を提案する。

上述のグリッドベースによるオイラー法によって流体拡散現象を再現する手法ではなく、パーティクルベースによるラグランジュ法を提案している研究例には、以下のようなものがある。Brochu [4] らは、煙のアニメーションにおいてラグランジュ渦層離散化モデルを開発し、空気と渦層との漸近極限で閉じられた三角形メッシュを生成して視覚的なディテールを表現する手法を提案した。同様にラグランジュ渦層離散化モデルを利用したものには、Pfaff らの手法 [5] がある。Pfaff ら [5] は、大規模なシーンでの煙アニメーションを生成している。しかしながら、ラグランジュ渦層離散化モデルによる手法 [4,5] では本論文で示す雪煙独特の質感が表現されていない。

地質力学の分野において、大規模な現象 (雪崩や地滑り) をシミュレーションするために、連続体にもとづいて流体をグリッドベースでシミュレーションする手法が提案されている [6-8]。しかしながら、これらは大規模流れ現象を物理的にシミュレーションするための手法であり、CG に用いるための計算手法ではなく、本論文で表現対象とする雪煙が舞い上がるような現象まではシミュレーションされていない。

雪のビジュアルシミュレーション法に関する研究例は古くから、リアルタイム・非リアルタイムを問わず数多くの手法が提案されているが、近年発表されたものとしては、Stomakhin らによる手法 [9] がある。Stomakhin らの手法 [9] では、従来手法では再現が困難とされてきた湿った雪、または高密度な雪を MPM (Material Point Method) を用いてシミュレーションを行った。MPM は Sulsky らによって提案された手法 [10] であり、陽解法の時刻歴計算を行う。雪塊はラグランジュ的に質量をもつ微小な要素に分けられ、これらの要素は質量をもつ粒子 (Material point) の集合により表される。雪塊の情報 (ラグランジュ変数) は個別の粒子により空間に固定された要素 (オイラー要素) 上を自由に移動する。粒子により運ばれたラグランジュ変数 (位置, 質量, 応力, ひずみ, 間隙水圧などの物質情報) は一定時間刻み毎に粒子がある要素に投影されさらに内挿関数を通して要素の節点に集約される。そして、この節点に対し運動方程式を解き次ステップの節点の速度増分を求める。この時点で、要素は粒子とともに変形し変数も更新される。変形した要素は次ステップに備え移動した粒子を残して再び元の位置に戻る。本手法により、雪の複雑な運動・状態変化が再現可能となった。本研究では、泡雪崩の雪煙を表現対象としており、雪崩発生から初期段階の山肌の雪が滑り流れる様子は再現しないため Stomakhin らの手法 [9] は用いないが、今後の表現対象拡大の可能性として利用価値が高い手法であると考えている。

このような中で、本論文では山の斜面をポリゴンモデルで生成し、雪崩発生源から雪塊を表す雪パーティクルを落下させ、雪パーティクルと斜面ポリゴンとの衝突点からナビエ・ストークス方程式による雪煙の拡散速度場を生成する。雪煙の拡散速度場は、雪パーティクルと山斜面ポリゴンとの衝突を検知した箇所それぞれ個別に発生させるものとし、その結果としてシ

ーン内に多数の速度場が個別に生成された集合体によって大規模な現象を再現するという手法を提案する。

3. 雪崩の発生メカニズム

本論文で表現対象としている泡雪崩は表層雪崩の一種で、大規模な煙型乾雪表層雪崩を指す。以下に雪崩の分類と発生メカニズムを記す。

発生形態に着目して雪崩を大別すると、表層雪崩、全層雪崩、氷雪崩の3つに分けることができる。このうち、表層雪崩は発生域の形状から面発生と点発生とに分けられる [1] (図 2, 図 3)。

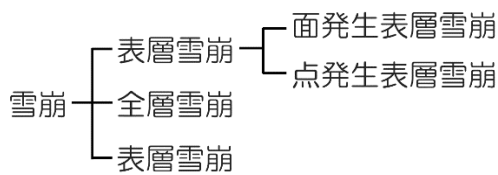


図2. 雪崩の分類

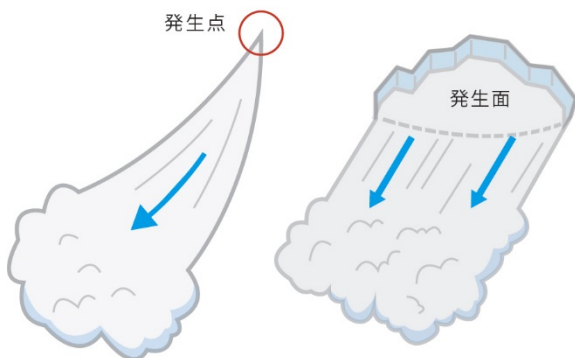


図3. 点発生雪崩（左）と面発生雪崩（右）

泡雪崩は、異常に発達した雪庇の傾斜に新雪が降った際に発生する場合が多いが、一般の雪崩のような雪塊の落下ではなく、雪崩れる際に新雪の雪粒と雪粒との間の空気を圧縮して落下する [11]。雪崩を構成する雪煙は、最大で時速 200 km 以上の速度で流下し、その衝撃力は数百 KPa (キロパスカル) に達するため大きな被害をもたらす。

上述から、泡雪崩は点発生・煙型乾雪表層雪崩であることがわかる。

4. 提案手法の概要

本論文で提案する泡雪崩による雪煙のビジュアルシミュレーション法は、以下のようになる。

まずはじめに、山の斜面をポリゴンで生成し、斜面上部から雪パーティクルを発生させ、斜面に沿って重力による落下運動を計算する (図 4(a))。次に、雪パーティクルが落下する際に斜面と衝突する地点を検出し、その地点での衝突力積を算出する

(図 4(b))。そして、算出された衝突力積を利用して衝突点からの雪煙の拡散速度場をグリッドベースによるオイラー法 [2,3] を用いて計算する (図 4(c))。最後に、このようにして生成された速度場に沿って運動する雪煙の密度を算出し、ボリウムフォトンマッピング法を介してアダプティブ・レイマーチング法によるボリウムレンダリングを行うことによって、雪崩による雪煙のビジュアルシミュレーションを行う。

次章以降において、提案手法の詳細を述べる。

5. 雪パーティクルと斜面との衝突

本論文で提案する手法の第 1 ステップとして、山の斜面をポリゴンで生成する。そして、斜面上部の雪崩発生源に見立てた箇所から雪パーティクルを、斜面に沿って重力により落下するように運動させる。その際の雪パーティクルの初速度水平方向の速度成分を V_{xz1} 、初速度鉛直方向の速度成分を V_{y1} 、回転速度を N_1 、斜面に対する入射角を θ_1 とする。また、斜面に衝突した後のそれらを V_{xz2} 、 V_{y2} 、 N_2 、 θ_2 とする。ここで、実際の雪塊は複雑な挙動をするものと考えられるが、計算を簡略化するため雪パーティクルは球形とし、斜面と衝突した後も球形を保ち、回転速度は落下方向と直交しているものとする (図 5)。また、雪パーティクル同士の衝突、および分裂は考慮しないものとする。

このように仮定すると、運動量の変化は働いた力積に等しくなるため、衝突の瞬間に雪パーティクルに働く垂直抗力、摩擦力の力積を \bar{R} 、 \bar{F} とすると、次の関係が得られる。

$$M \cdot (V_{xz2} - V_{xz1}) = -\bar{F} \quad (1)$$

$$M \cdot (V_{y2} - V_{y1}) = -\bar{R} \quad (2)$$

$$2\pi I \cdot (N_2 - N_1) = \bar{F} \cdot \frac{d}{2} \quad (3)$$

ここで、 M は雪パーティクルの質量、 I は雪パーティクルの重心を通る回転軸周りの慣性モーメント、および d は雪パーティクルの直径である。雪パーティクルの質量 M は、雪質の違い (新雪なのか、湿った雪なのか)などを考慮して初期値を任意に決めるものとし、シミュレーション時間に正比例するように増加するものとした。ただし、雪パーティクルの半径に関しては、本論文では雪パーティクル同士の衝突や分裂を考慮していないため、半径の増加は考慮しないものとした。

また、雪パーティクルと斜面の鉛直方向の相対速度の比によって反発係数 e は次のように表される。

$$e = \frac{V_{y2}}{-V_{y1}} \quad (4)$$

さらに、垂直抗力の力積 \bar{R} と摩擦力の力積 \bar{F} には次の関係が成り立つ。

$$\bar{F} = \mu \bar{R} \quad (5)$$

ここで、 μ は摩擦係数である。

式 (4) から、衝突後の速度の鉛直成分は次のようになる。

$$V_{y2} = -eV_{y1} \quad (6)$$

式 (2), 式 (5), および式 (6) より、以下が求まる。

$$\bar{F} = -M\mu(e + 1)V_{y1} \quad (7)$$

式 (7) を式 (1), および式 (3) に代入すると、衝突後の速度の水平成分と回転速度が次のように得られる。

$$V_{xz2} = V_{xz1} + \mu(e + 1)V_{y1} \quad (8)$$

$$N_2 = N_1 - \frac{dM\mu}{4\pi l}(e + 1)V_{y1} \quad (9)$$

雪パーティクルの入射角 θ_1 と反射角 θ_2 は、次のように求まる。

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{-V_{y1}}{V_{xz1}}\right) \quad (10)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{V_{y2}}{V_{xz2}}\right) \quad (11)$$

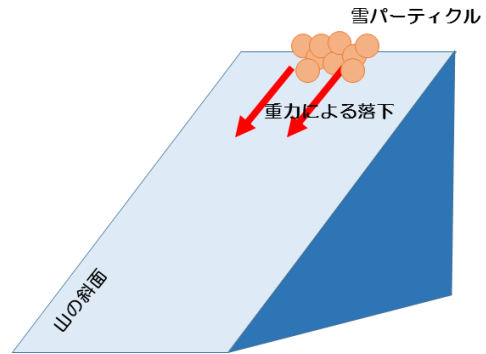
6. 雪煙の拡散速度場の算出

前述の雪パーティクルと山の斜面との衝突力積を利用して、衝突点からの雪煙の拡散速度場をグリッドベースによるオイラー法 [2,3] を用いて計算する (図 4(c))。この手法では、以下の非圧縮性ナビエ・ストークス流体方程式を用いる。

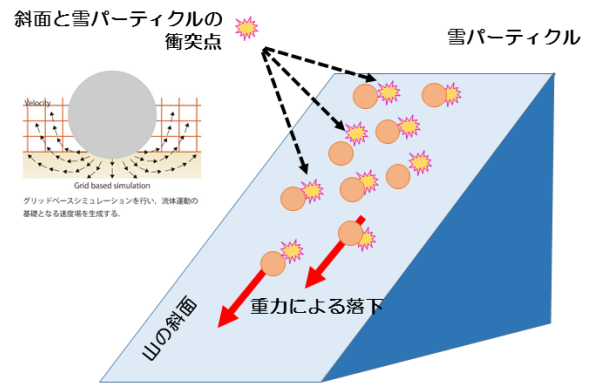
$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} - \frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (12)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (13)$$

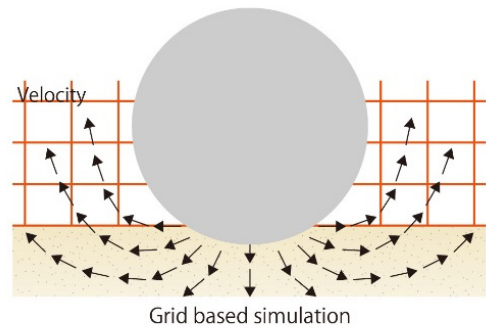
ここで、 \mathbf{u} は速度ベクトル、 t は時間、 ρ は流体の密度を表す定数、 p は圧力、 ν は動粘性係数、 \mathbf{f} は外力を表す。本手法では、 \mathbf{f} は式 (7) で与えられる雪パーティクルと山の斜面との衝突力積と重力を利用する。実際の雪崩現象を詳細にシミュレーションしようとした場合、雪面に接しながら表層 (または全層) を流れる雪を MPM 法などによって考慮する必要があると考えられるが、本論文では雪パーティクルの落下によって簡易的に雪煙のみをシミュレーションしている。そのため、外力 \mathbf{f} として雪パーティクルと山の斜面との衝突力積を考慮することによって瞬間的な撃力を積分して速度場に影響させ、斜面 (雪面) 付近の複雑な乱流成分、特に摩擦力によって雪面に吸い付きながら山の谷方向へ“走る”雪煙成分を再現することを目指した。



(a) 雪パーティクルの落下



(b) 雪パーティクルと斜面との衝突点の算出



グリッドベースシミュレーションを行い、流体運動の基礎となる速度場を生成する。

(c) 衝突点 (上図(b)) の拡大図

図 4. 提案手法の概要図

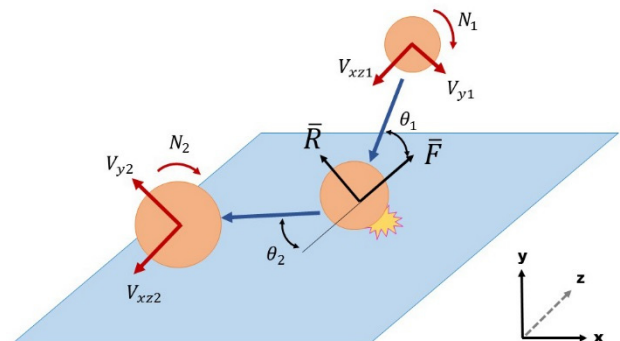


図 5. 雪パーティクルと斜面の衝突

また、雪煙のシミュレーションでは雪煙の密度 q の時間変化を表す次式を解く必要がある [12].

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla)q + \gamma \nabla^2 q + S \quad (14)$$

ここで、 γ は雪煙の拡散係数、 S は雪煙発生源の密度である。右辺第一項は、速度場の動きに伴って雪煙が移動することを表し、第二項は時間と共に雪煙が拡散する様子を表す。

上記の非圧縮性ナビエ・ストークス流体方程式と雪煙の密度 q をグリッドベースによるオイラー法 [2,3] を用いて計算し、アダプティブ・レイマーチング法によるボリュームレンダリングを行うことによって、雪煙が刻々と変化していく様子を映像化することが可能となる。

なお、グリッドベースによるオイラー法の詳細な計算手法に関しては文献 [2,3] に記述されているので、そちらを参照されたい。

7. レンダリング法

光の散乱、および透過効果は関与媒体 (Participating Media) のレンダリングにおいて本質的な問題であり、典型的な計算法はモンテカルロに基づく方法 [13-16] である。これらの手法では、自由行程サンプリングを行うための手法として、レイマーチング法を用いるのが一般的であり、本論文でもレイマーチング法によるボリュームレンダリングを採用した。

本論文で採用したボリュームレンダリング法は、モンテカルロ法によるフォントレーシングによってボリュームフォトンマップを作成し、アダプティブ・レイマーチング法によってカメラ方向への散乱光の放射輝度を計算する手法である (図 6)。

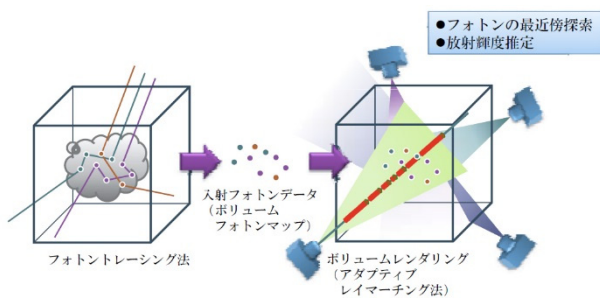


図 6. レンダリング法の概要図

なお、ボリュームフォトンマッピング法を介してアダプティブ・レイマーチング法によるボリュームレンダリングを行う手法の詳細は、文献 [2, 13-17] に記述されているので、そちらを参照されたい。

8. シミュレーション結果

本論文の提案手法によるシミュレーション結果を、図 7 と図 8 に示す。

図 7 (a) ~ (c) では、山の斜度の違いによるシミュレーション結果を検証したものである。

図 7 (a) は斜度 30 度、図 7 (b) は斜度 40 度、および図 7 (c) は斜度 50 度をそれぞれ想定している。雪パーティクルの落下速度の違いにより、雪煙の拡散の違いが観察できる。なお、これらの画像 (下記リンクで公開している映像) において、雪パーティクルは黄色い円で表しているが、シミュレーションステップが経過するほど半径を大きく描画している。これは、シミュレーション中の雪パーティクルの半径が実際に大きくなっていくわけではなく、雪パーティクルの質量 M の増加を表していることを断っておく。

図 8 には、本論文で提案した手法によって映像を生成した場合の成果画像を示す (映像は以下の URL にて公開している: <http://youtu.be/2GGzAtqJz8g>)。本論文では雪崩の発生段階のシミュレーションは行っていないため、第 3 章で述べた雪崩の分類において明確に「どれか」をシミュレーションしたわけではないが、雪パーティクルの発生源を点状に配置することも面状に配置することも可能である。

シミュレーションに使用した計算環境、計算時間、およびパラメータ群は、以下の通りである。

なお、本シミュレーション結果は NICOGRAPH 2014 において公開している [18].

- Computer used: HP WORKSTATION Z820,
- CPU: Xeon E5504@2.00 GHz (4 core)
- Memory: 32 GB
- Operating system: Windows 7 (64bit)
- Graphics card: NVIDIA Quadro FX 1800
- シミュレーションに使用した雪パーティクルの個数: 約 3000 個 (乱数によるランダム性を持たせている)
- 計算グリッドの解像度 500×500×500
- 雪パーティクルの質量 $M=0.01$
- 直径 $d=1.0$
- 慣性モーメント $I = 3.14 \times 10^{-4}$
- 摩擦係数 $\mu = 0.06$
- 流体密度 $p=1000$
- 動粘性係数 $\nu=0.5$
- 反発係数 $e=0.05 \sim 0.2$
- シミュレーションに費やした時間: 約 3 時間 (総 300 フレーム)
- レンダリング時間: 約 2 時間

9. まとめと今後の課題

本論文では、雪パーティクルと山の斜面との衝突点からナビエ・ストークス方程式による雪煙拡散速度場を生成し、速度場に沿って運動する雪煙をボリュームフォトンマッピング法を介してアダプティブ・レイマーチング法によるボリュームレンダリングを行うことによって、雪崩による雪煙のビジュアルシミュレーションを行う手法を提案した。本手法により、山の斜面の斜度の違いなどによって引き起こされる雪煙の違いも表現可能となった。

今後の課題としては、雪崩の初期段階や雪崩過程に MPM を応用した手法を開発すること、雪崩している雪面の大変形問題を数値解析しながら雪煙への干渉をシミュレーションすること、および雪煙と他の物体との相互干渉を考慮することなどが挙げられる。

参考文献

- [1] 北海道雪崩事故防止研究会編, “最新雪崩学入門－雪山最大の危険から身を守るために－”, 株式会社山と溪谷社, 1998.
- [2] RASMUSSEN, N., NGUYEN, D. Q., GEIGER, W., AND FEDKIW, R. “Smoke simulation for large-scale phenomena.” Proc. of SIGGRAPH 2003, pp. 703-707. 2003.
- [3] LENTINE, M., ZHENG, W., AND FEDKIW, R. “A Novel Algorithm for Incompressible Flow Using Only a Coarse Grid Projection.” ACM Transactions on Graphics (TOG) – Proceedings of ACM SIGGRAPH 2010, Volume 29 Issue 4, Article No. 114. 2010.
- [4] BROCHU, T., KEELER, T., AND BRIDSON, R. “Linear-Time Smoke Animation with Vortex Sheet Meshes.” Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pp.87-95. 2012.
- [5] PFAFF, T., THUREY, N., AND GROSS, M. “Lagrangian Vortex Sheets for Animating Fluids.” ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of SIGGRAPH 2012, Volume 31 Issue 4, Article No. 112. 2012.
- [6] ARANSON, I. S., TSMIRING, L. S., “Continuum description of avalanches in granular media.” Phys. Rev. E 64, 2 (Jul), 020301. 2001.
- [7] QUECEDO, M., PASTOR, M., HERREROS, M. I., AND MERODO, J. A. F. “Numerical modelling of the propagation of fast landslides using the finite element method.” International Journal for Numerical Methods in Engineering 59, 6, 755–794. 2004.
- [8] JOSSEAND, C., LAGREE, P. Y., AND LHUILLIER, D. “Stationary shear flows of dense granular materials: a tentative continuum modelling.” The European Physical Journal E: Soft Matter and Biological Physics 14 (06), 127–135. 2004.
- [9] STOMAKHIN, A., SCHROEDER, C., CHAI, L., TERAN, J., AND SELLE, A. “A Material Point Method for Snow Simulation.” ACM SIGGRAPH 2013, 32(4), pp. 102:1-102:10. 2013.
- [10] SULSKY, D., ZHOU, S. J., AND Schreyer, H. L. “Application of a

particle-in-cell method to solid mechanics.” Computer Physics Communications, 87, 236-252.1995.

- [11] 雨野 義広, 川村 國夫, “6.10 苛酷を極めた高熱ずい道”, 地盤工学会誌「土と基礎」, 39(3), pp.136-141, 1991.
- [12] 土橋宜典, “流体力学に基づく自然現象のシミュレーション”, 画像電子学会誌, Vol.39, No.2, pp.215-219, 2010.
- [13] JENSEN, H.W. AND CHRISTENSEN, P.H. “Efficient simulation of light transport in scenes with participating media using photon maps.” Proc. SIGGRAPH 98, ACM, pp.311-320. 1998.
- [14] LAFORTUNE, E.P. AND WILLEMS, Y.D. “Rendering participating media with bidirectional path tracing.” Proc. EGWR 96, pp.91-100. 1996.
- [15] PAULY, M., KOLLIG, T. AND KELLER, A. “Metropolis Light Transport for Participating Media.” Proc. EGWR 2000, pp.11-22. 2000.
- [16] RAAB, M., SEIBERT, D. AND KELLER, A. “Unbiased global illumination with participating media.” Proc. Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Method 2006, pp.591-605. 2006.
- [17] TOSHIYA, H., SHINJI, O., AND HENRIK, W. J. “Progressive Photon Mapping.” ACM Transactions on Graphics (TOG) – Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2008, Volume 27 Issue 5, December 2008, Article No. 130. 2008.
- [18] 菅野将太, 伊藤弘樹, 菊池 司, “雪崩による雪煙のビジュアルシミュレーション”, Proceedings of NICOGRAPH 2014, pp.44-50, 2014



菅野将太

2014年拓殖大学工学部デザイン学科卒業。現在、映像制作プロダクションに在籍し、主にエフェクト周りの業務に従事。



菊池 司

1999年岩手大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。2000年拓殖大学工学部工業デザイン学科(現デザイン学科)助手。2004年同大学専任講師(現助教)。2007年から2008年まで韓国・高麗大学客員教授。2009年拓殖大学工学部工業デザイン学科(現デザイン学科)准教授, 2014年東京工科大学メディア学部准教授, 現在に至る。ACM, 芸術科学会, 情報処理学会, 画像電子学会, 他会員。

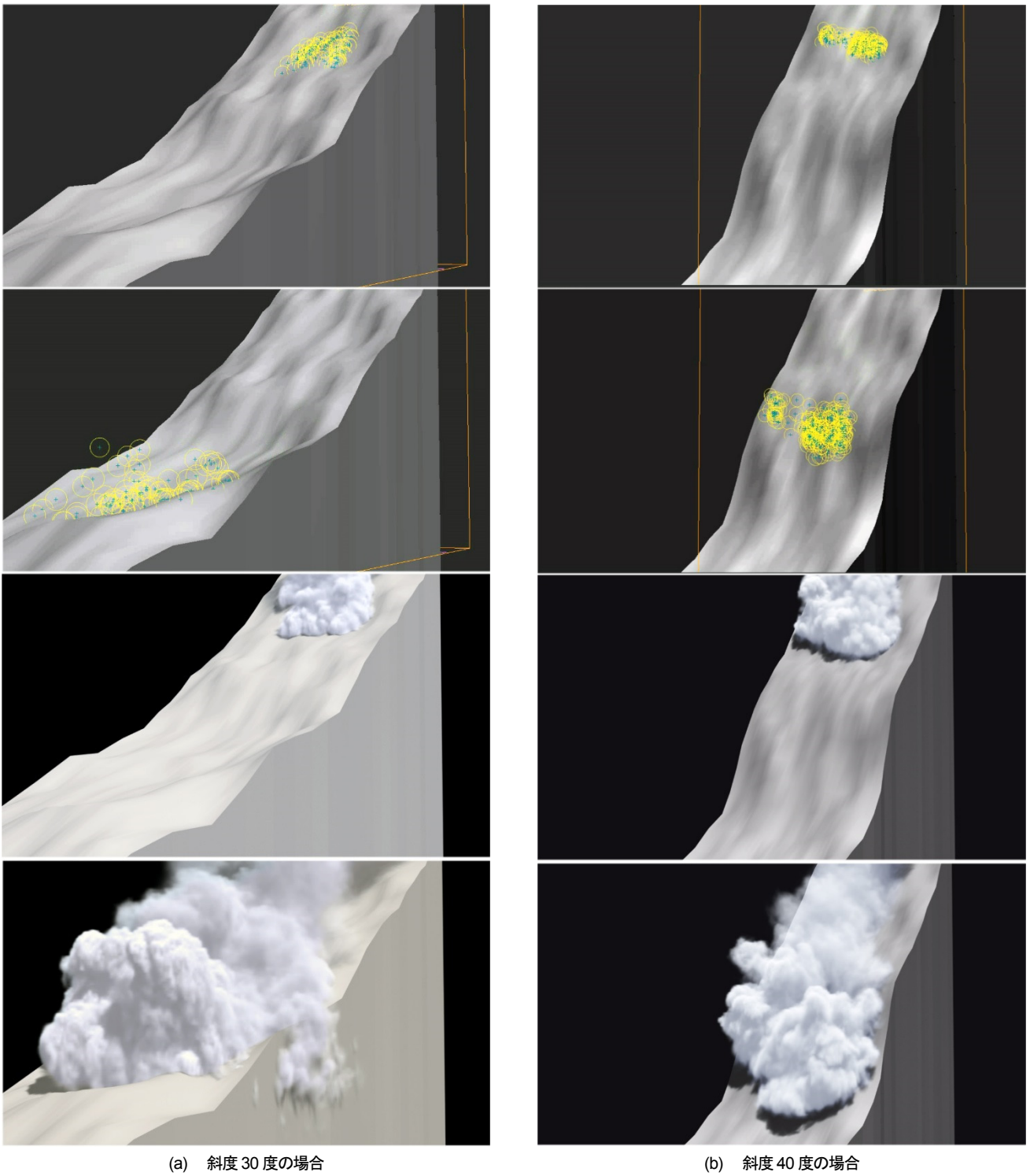
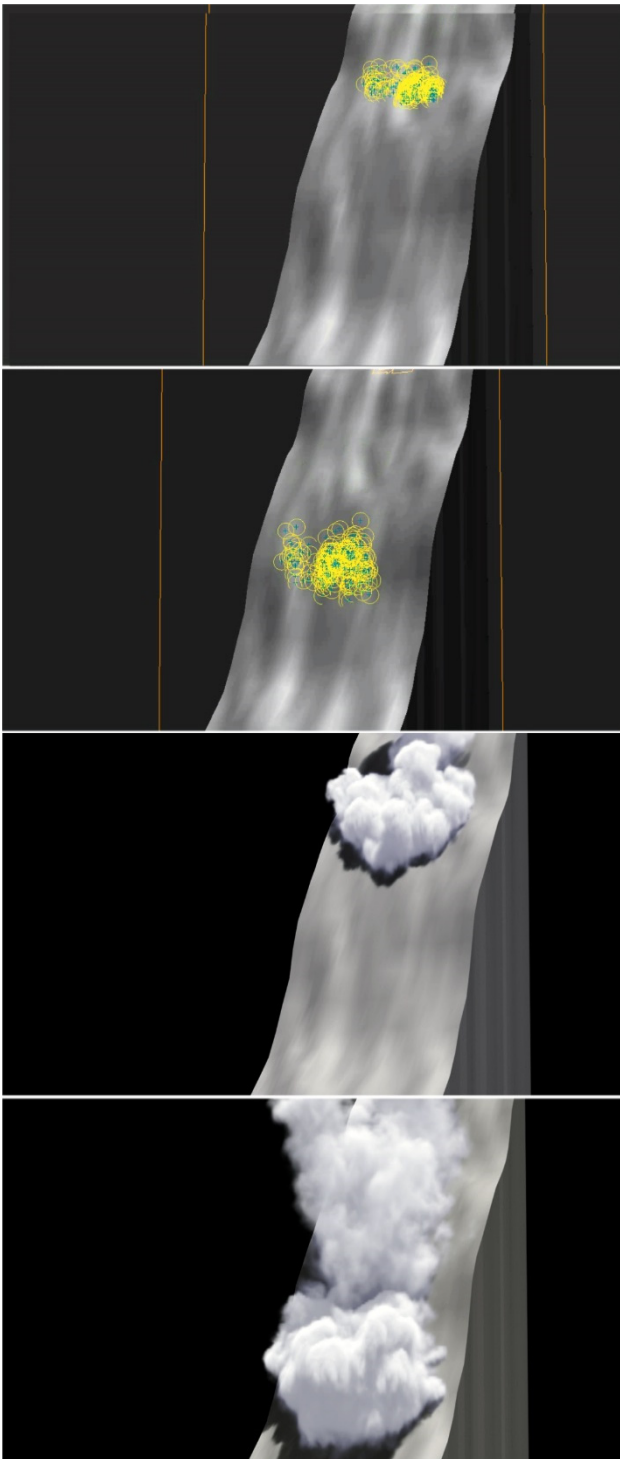


図 7. 斜度の違いによる検証 (次ページ左段に続く)



(c) 斜度 50 度の場合
図 7. 斜度の違いによる検証



図 8. 最終成果画像例