

論文

連続体モデル TITAN2D を用いた 雪崩の運動のシミュレーション I —室内実験との比較検討—

森 啓輔¹, 伊藤 陽一², 西村 浩一^{3*}, Abani Patra⁴

要 旨

雪崩を質点や剛体と仮定した運動モデルでは、雪崩の厚さや広がりが見えないなど防災上不備な点も多い。こうした背景のもと、土石流や地すべりなどの粒状体に加えて溶岩流の流動や堆積の再現にも実績がある連続体モデル TITAN2D を用いて雪崩の運動シミュレーションを試みた。本稿では、実際の雪崩への適用に先立ち、雪粒子を含む3種類の粒子を用いた室内実験を実施し、TITAN2D による計算結果との比較を通してモデルの性能評価を行った。TITAN2D が浅水流近似により導かれたモデルであること、さらには底面摩擦角の測定が困難さが起因して、流れの先端速度、最大高さ(厚さ)と広がりとの相違が見られた場合があるものの、全体的には TITAN2D は実験結果を再現しており、実際の雪崩現象への拡張も十分に可能と結論された。

キーワード：雪崩の運動, TITAN2D, 室内実験, 底面摩擦

Key words: Avalanche dynamics, Titan2D, Chute experiment, Basal friction

1. はじめに

雪崩は、家屋を含めた各種構造物の破壊、道路や鉄道への交通障害、さらには人命に関わるケースに至るまで、積雪寒冷地域に暮らす人々の生活に毎年多大な影響を与えている。このため、雪崩到達危険地域の正確な判定と各種の防護施設の効果的な設置は社会的にも重要な課題である。しかし、日本では、現在でも見通し角(高橋, 1960)を用いた経験則が用いられることが多い。その一方で、雪崩を質点や剛体と仮定した運動モデル

(Perla, 1980; Nohguchi, 1989; Nishimura and Maeno, 1989 ほか)も開発されてはきたが、防護施設の高さや空間的配置の決定に不可欠となる雪崩の厚さや広がりが見えないなど防災上不備な点も多い。こうした背景のもと、本研究では Savage and Hutter (1989) による粒状体の流れに関する連続体モデルをもとにニューヨーク州立大学バッファロー校で開発され、実際の地形上での土石流や地すべりなどの粒状体の流れのほか溶岩流の流動や堆積の再現にも実績がある TITAN2D (Pitman *et al.*, 2003; Sheridan *et al.*, 2005) を用いて雪崩の運動シミュレーションを試みた(森, 2014; 森ら, 2018)。雪崩の運動を記述するモデルとしては、Christen *et al.* (2010) により開発された RAMMS が空気の取り込みや湿雪などの効果も組み込んだ汎用性の高いモデルとして多方面で雪崩の解析に適用されている。しかし計算のプロセスが TITAN2D に比べやや煩雑であることに加え、近年 Issler *et al.* (2018) によってモデルに含まれる

1 伊藤忠テクノソリューションズ(株)

〒100-6080 東京都千代田区霞が関3-2-5

2 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

〒940-0821 新潟県長岡市栖吉町前山187-16

3 名古屋大学大学院環境学研究所

〒464-8601 愛知県名古屋市中千種区不老町

4 University at Buffalo, The State University of New York

605 Furnas Hall, Buffalo, NY 14260-4400

* 問合せ先: knishi@nagoya-u.jp

物理プロセスと数学的定式化について問題点が指摘されている。

本稿では、連続体モデル TITAN2D の実際の雪崩への適用に先立ち、異なる性質を持つ雪粒子を含む 3 種類の粒子を用いた室内実験を実施し、TITAN2D による 102 シミュレーションとの比較検討を行った結果を報告する。

2. 連続体モデル (TITAN2D)

本研究で使用した運動モデル TITAN2D は、非圧縮性のクーロン連続体の流れを記述するもので、流れの幅や長さに対して厚さが十分に小さいと仮定 (浅水流近似) することにより、3次元の流れを準 3次元な 2次元流れとして表現する (Patra *et al.*, 2005)。質量保存と運動量保存はそれぞれ以下の式 (1), (2) で与えられる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}_x}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}_x}{\partial t} + \frac{\partial (h\bar{v}_x^2 + 0.5k_{ap}g_z h^2)}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}_x\bar{v}_y}{\partial y} \\ = g_x h - \frac{\bar{v}_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \left[g_z h \left(1 + \frac{\bar{v}_x^2}{r_x g_z} \right) \right] \tan \mu_b \\ - \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y} \right) h k_{ap} \frac{\partial h g_z}{\partial y} \sin \mu_i \end{aligned} \quad (2)$$

式 (2) の右辺第 1 項は駆動力としての重力項、第 2 項は底面におけるクーロン摩擦抵抗、第 3 項は速度勾配に伴う内部摩擦を表す。なお、 \bar{v}_x, \bar{v}_y は x 方向 (流下方向) と y 方向 (横断方向) の速度 (厚さ方向の平均値)、 h は流れの厚さ、 t は時間、 g_z は重力加速度の z 成分、 r_x は底面の曲率半径をそれぞれ示し、 μ_i は粒子の内部摩擦角、 μ_b は粒子の底面摩擦角である。また k_{ap} は垂直応力と水平応力の比である土圧係数で、以下の式 (3)、式 (4) で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial y} > 0 \text{ のとき} \\ k_{ap} = \frac{2\{1 - \sqrt{1 - (1 + \tan^2 \mu_b) \cos^2 \mu_i}\}}{\cos^2 \mu_i} - 1 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial y} < 0 \text{ のとき}$$

$$k_{ap} = \frac{2\{1 + \sqrt{1 - (1 + \tan^2 \mu_b) \cos^2 \mu_i}\}}{\cos^2 \mu_i} - 1 \quad (4)$$

計算にあたっては、流れの発生位置と体積 (楕円柱と仮定)、さらに粒子と斜面の性質に応じた底面摩擦角 μ_b と内部摩擦角 μ_i を与える。

2次精度のゴドノフ法に基づく有限体積法を用いて上述の質量保存と運動量保存式の計算を行うことで、流れの厚さや速度の時空間分布が求められる。

3. 室内実験

3.1 室内実験の概要

室内実験は、2012年11月に著者らによって、国立研究開発法人防災科学技術研究所雪氷防災研究センターが所有する、金属製の実験斜面 (全長 5m, 横幅 1.6m, 高さ 1.7m, 最大傾斜 45°) を用いて行われた (森ら, 2013)。図 1 に模式図ほかを示す。この実験斜面は、傾斜角 45° の斜面と長さ 2m の平板を滑らかな曲面で繋ぎ合わせることで構成されており、斜面の上端より 1.4m から 2.4m の範囲で曲率を持つ。また、流れの先端の位置や広がり の把握に資する目的で、縦と横方向に 0.2m 間隔で黒線が引かれている。

斜面上部に設置した高さ 98mm, 直径 380mm, 体積約 6L のアクリル製のドーム (図 1) に粒子を満たし、ドームを一気に持ち上げることで生じる流れの様子を 3 台のレーザー距離計 (Z4M-W100, オムロン株式会社) とビデオカメラ (DCR-TRV900, SONY 株式会社) を用いて観測を行った。

本研究では、今回実施された 2 種類の粒子による測定結果に、2005 年に同じ実験斜面上で室温 -15°C の低温室において雪粒子 (ざらめ雪) を使用して行われた実験 (西村ら, 2007) を加えた、3 種の結果を用いて比較を行った。

3.2 実験粒子

実験に用いた粒子は、直径 4~8mm の球状の粒子 (粒子 A) と直径 2~2.5mm, 高さ 7~9mm の円柱状の粒子 (粒子 B)、そして直径 2mm 程度のざらめ雪 (雪粒子) である。粒子 A と B は市販

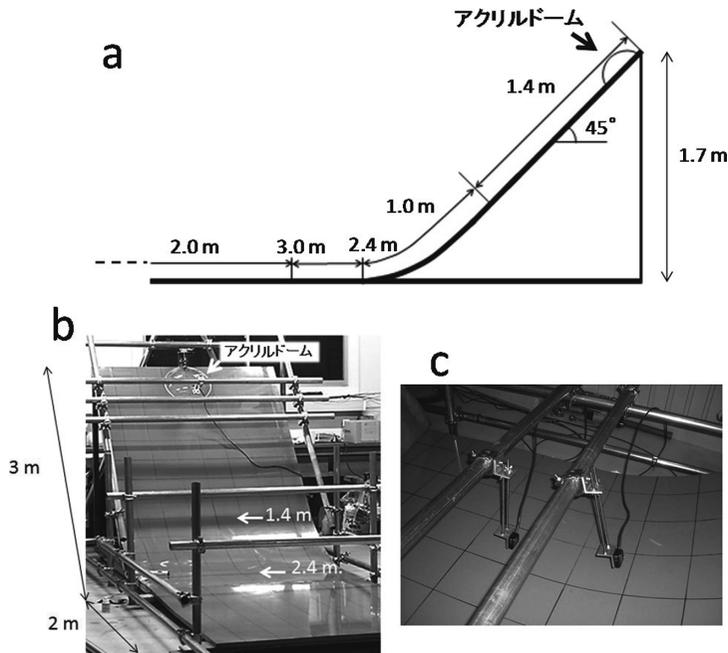
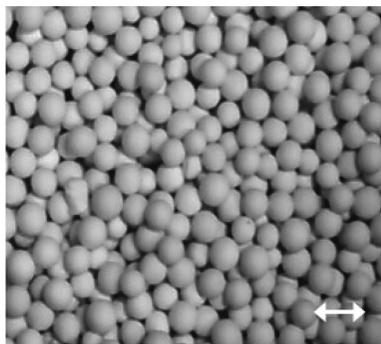


図 1 実験斜面.

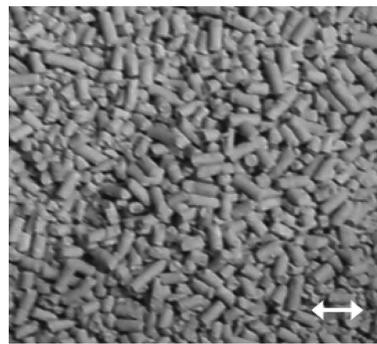
a: 斜面の模式図と b: 斜面の全景, 全長 5m, 横幅 1.6m, 高さ 1.7m, 最大傾斜 45° で, 斜面の上端より 1.4m から 2.4m の範囲で曲率を持つ. また, 流れの先端の位置や広がり の把握に資する目的で, 縦と横方向に 0.2m 間隔で黒い線が引かれている.

上部の亚克力製ドームは高さ 98mm, 直径 380mm, 体積約 6L で, この中に粒子を充填する.

c: 斜面上に設置されたレーザー距離計.



1 cm



1 cm

図 2 実験に用いた粒子.

左: 粒子 A (直径 4~8mm の球状の粒子),

右: 粒子 B (直径 2~2.5mm, 高さ 7~9mm の円柱状の粒子).

されているいわゆる猫砂で, 具体名はそれぞれ粒子 A が「1 週間消臭・抗菌デオトイレ取り替え専用消臭サンド 4L, ユニ・チャーム」, 粒子 B は

「ニオイをとる砂 5L, LION」である (図 2). 実験を行う前に, それぞれの粒子の物性を把握するため, 粒子の底面摩擦角 (μ_b) と内部摩擦角 (μ_i)



図 3 粒子の底面摩擦角 μ_b の測定.

の測定を以下の方法で行った.

底面摩擦角 μ_b は, 箱型の厚紙の枠 (縦 70 mm, 横 195 mm, 高さ 50 mm) に, それぞれの粒子を詰め, その枠を実験斜面の平坦部でプッシュプルゲージ (MODEL-RX, アイコーエンジニアリング株式会社) にて約 30 cm の距離を 5 cm s^{-1} 程度の速度で押すまたは引く時の力 F の平均値を測定し, 粒子の全重量 (全体の質量 m と重力加速度 g の積 mg) との比 (F/mg) から $\mu_b = \tan^{-1}(F/mg)$ として算出した. 測定にあたっては, 枠を少し浮かせて底面には粒子のみが接するように留意し (図 3), それぞれの粒子について 10 回程度行って, その平均値を用いた.

粒子の内部摩擦角 μ_i は, 安息角測定器 (三輪式流動表面角測定器, 筒井理化学器械株式会社) を用いて計測される値を用いた. 両者は本来異なる物理量であるが, 実験に用いた粒子は直径が 2 mm 程度と大きく, また粒子間の粘着力が無視できることから, ほぼ同じ値を持つとみなすことができる. 図 4 に示すように, 円筒容器に試料を入れ, 一定の低い回転速度で回転させることで生じる試料と水平面との間の角度をそれぞれの粒子について 5 回程度測定し, その平均値を安息角つまり内部摩擦角 μ_i とする.

なお, 雪粒子に対する底面摩擦角および内部摩擦角の測定は, 上記と同様の方法で 2005 年に行われた. 各粒子に対する摩擦角の測定結果を表 1 に示す. 底面摩擦角 μ_b の大きさは粒子 B が最も大きく, 雪粒子, 粒子 A の順となった. 一方, 内

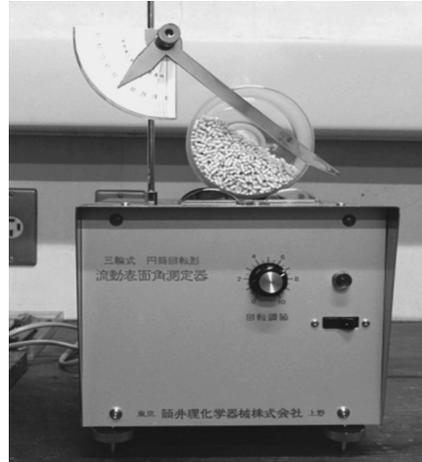


図 4 粒子の内部摩擦角 μ_i の測定.

表 1 実験に用いた粒子に対する内部摩擦角 μ_i と底面摩擦角 μ_b の測定結果.

	粒子 A	粒子 B	雪粒子
μ_i	40°	45°	39°
μ_b	16.7°	24.7°	18.7°

部摩擦角 μ_i は粒子 B が最も大きく, 粒子 A, 雪粒子の順となった.

3.3 実験方法

アクリルドームから放出された粒子の流れに対して, 3 台のレーザー距離計を用いて, 流れの先端の位置およびセンターラインに添った高さの変化の測定が行われた. レーザー距離計の 1 台はアクリルドームの中心から 0.2 m 下流の位置に斜面に対して垂直方向に設置した. 残りの 2 台は, まずそれぞれ 0.4 m と 0.6 m 下流の位置に設置して流下実験を 2 回行い, 次に下流側の距離計 2 台を 0.4 m 下流にずらし, 同じ条件のもとで再度実験を実施した. 以上のプロセスを下流にセンサーを移動しながら, 流れが停止する位置まで順次繰り返した. それぞれの粒子に対する実験の回数は, 粒子 A は 14 回, 粒子 B は 12 回, 雪粒子は 30 回である. 使用したレーザー距離計の測定範囲は光源から 60~140 mm の間で, 物体の通過に伴う電圧の変化は, 直接物体の高さへ変換することが可能である. 出力は A-D 変換器 (センサイインターフェイス PCD-320 A, 共和電業) を通して, サン

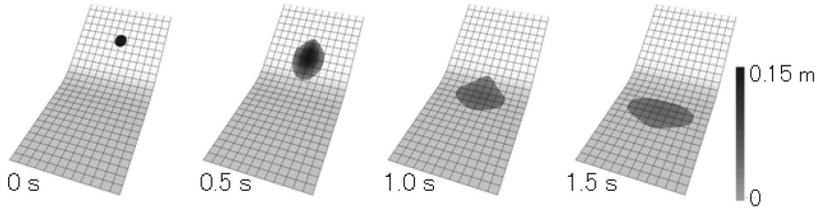


図 5 雪粒子を対象に行われた TITAN2D によるシミュレーション.
スタートから 0.5 秒ごとのスナップショットで色の濃淡は流れの高さを示す。

プリング周波数 500Hz でパーソナルコンピュータに記録された。なお、データの収録は、アクリルドームの中心から 0.2m 下流に固定したレーザー距離計の出力をトリガーとし、この地点を厚さ 4mm 以上の流れが通過した時に開始されるように設定した。物体（粒子の流れ）がレーザー距離計の位置を通過する際に記録される出力から流下に伴う流れの高さの変化が求められる。

このほか、下流に斜面全体を俯瞰する形でビデオカメラを設置し、撮影された映像から粒子の放出から停止に至るまでの先端速度や横断方向の広がりを含む流れの挙動を求めた。

3.4 TITAN2D によるシミュレーション

実験と同じ条件のもとで TITAN2D を用いてシミュレーションを行い、各粒子流に対して最大高さ、横幅、先端速度と流下距離について室内実験と計算結果の比較を行った。計算にあたっては長さ 6.6m、幅 3.6m という大きめの領域を設定し、その中の実験斜面と同じ傾斜分布を持つ範囲を対象に、実験と同じ位置から同じ初期体積を設定して解析を行った。入力した底面摩擦角・内部摩擦角は表 2 のとおりである。ちなみに TITAN2D による計算の時間の増分は約 20ms であるが、計算結果は、0.5s 毎に出力されるよう設定した。また TITAN2D は粒子の流れを連続体と仮定して計算を行うため、流れの高さは無限に小さくなりうるが、本研究では各粒子の大きさを考慮して、それぞれ粒子 A は $4 \times 10^{-3}m$ 以上、粒子 B は $2 \times 10^{-3}m$ 以上、雪粒子は $1 \times 10^{-3}m$ 以上の高さとなる領域を対象として解析を行った。図 5 に雪粒子を対象に行った TITAN2D によるシミュレーションの 0.5 秒ごとのスナップショットを示す。

表 2 TITAN2D によるシミュレーションで用いた各粒子の内部摩擦角 μ_i と底面摩擦角 μ_b 。

	粒子 A	粒子 B	雪粒子
μ_i	40°	45°	39°
μ_b	17°	25°	19°

4. 結果

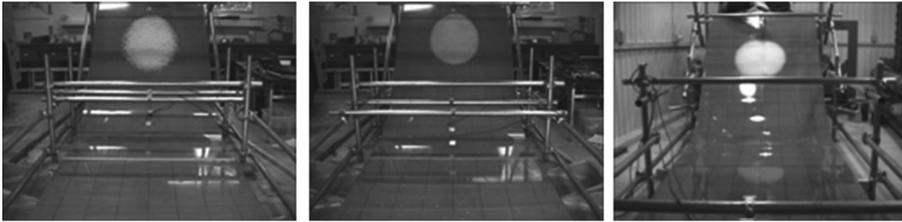
4.1 室内実験結果

全長 5m の実験斜面を用いて得られた結果について述べる。粒子 A はアクリルドームの中心から 4m 下流付近で、また粒子 B は 3m 付近で停止したのに対し、雪粒子は実験斜面を超えてさらに下流に流れ下る結果となった。粒子 A は粒子の跳躍が激しく、横断方向にも実験斜面から少しはみ出すほど大きく広がったが、粒子 B は変曲部から 0.4m 付近で急に減速し、停止した。それぞれの粒子が斜面を流下する様子を図 6 に示す。

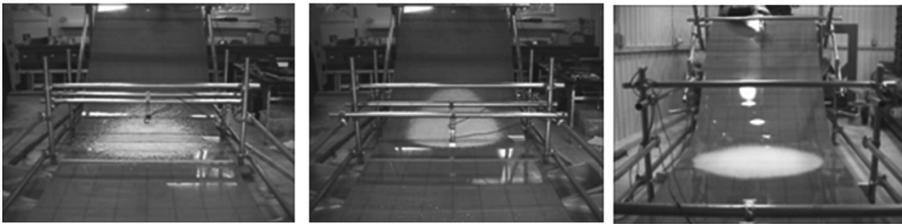
レーザー距離計による測定は、先に述べたように同じ位置で 2 回ずつ実施されたが、両者の差は高さに換算して数 mm 程度であった事から、解析にあたってはよりノイズの小さい結果を採用した。測定された流れの最大高さ（厚さ）とアクリルドーム中心からの距離の関係を図 7 に示す。距離 2.4m 付近までは粒子による違いはあまり顕著ではないが、その後は粒子 A が最も高く、続いて粒子 B、雪粒子の順になった。粒子 A に関しては、前述のように粒子の跳躍が顕著で、これがレーザー距離計に検出された結果と考えられる。

ビデオカメラで撮影した映像から求めたそれぞれの粒子流の横幅の変化を図 8 に示す。広がり最も大きいのは粒子 A で、距離 3.2m の位置では幅 1.5m、さらに停止位置では実験斜面の横幅 1.6

0.5s



1.0 s



粒子A

粒子B

雪粒子

図 6 3 種類の粒子が実験斜面を流下する様子。
上段は実験開始から 0.5 秒後、下段は 1.0 秒後の流れの様子を示す。

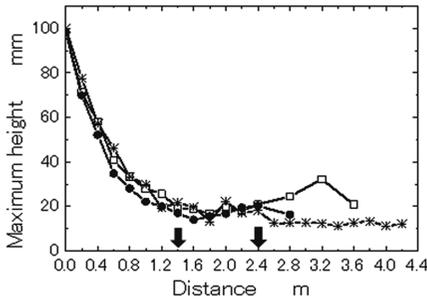


図 7 アクリルドーム中心からの距離と流れの最大高さの関係。
□：粒子 A, ●：粒子 B, *：雪粒子
図中の矢印は、斜面の傾斜が曲率を持つ範囲を示す (1.4m から 2.4m)。

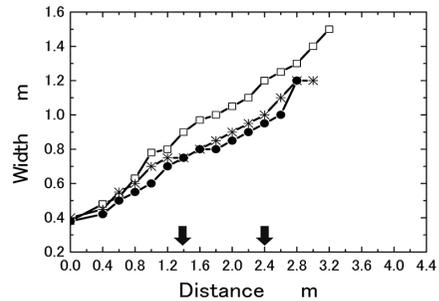


図 8 粒子流の横幅の変化。
□：粒子 A, ●：粒子 B, *：雪粒子
図中の矢印は、斜面の傾斜が曲率を持つ範囲を示す (1.4m から 2.4m)。

m を超える広がりが見られた。粒子 B と雪粒子との間には顕著な差はみられないが、後者の方がやや大きい結果となった。つまり、横断方向への広がりには粒子 A, 雪粒子, 粒子 B の順に大きくなった。一般に内部摩擦角が小さいほど広がりが大きくなることが予想されるが、表 1 の内部摩擦角の測定結果、つまり雪粒子, 粒子 A, 粒子 B の順とは異なる結果となった。

ビデオ映像から算出された先端速度と流下距離の関係を図 9 に示す。横軸の距離は、アクリルドームの先端部分の位置を 0m とし、値のエラーバーは、粒子 A : 14 回, 粒子 B : 12 回, 雪粒子 : 30 回それぞれ実施した実験結果の標準偏差を示す。最も速度が大きいのは雪粒子の流れで、最大 4.5ms^{-1} に達し、流れが実験斜面の水平部に達しても顕著な減速は見られなかった。一方、粒子 A の速度は最大約 4ms^{-1} 、粒子 B は約 3.5ms^{-1}

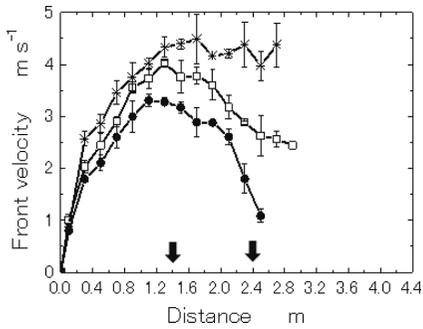


図 9 粒子流の先端速度と流下距離の関係.

□ : 粒子 A, ● : 粒子 B, * : 雪粒子
 図中の矢印は斜面の傾斜が曲率を持つ範囲 (1.4m から 2.4m) を, またエラーバーはそれぞれ粒子 A : 14 回, 粒子 B : 12 回, 雪粒子 : 30 回実施した実験結果の標準偏差を示す.

であった. つまり, 先端速度は大きい方から雪粒子, 粒子 A, 粒子 B という順序になった. 表 1 に示した底面摩擦角 (μ_b) の測定結果からは, 摩擦角が小さい粒子 A の先端速度が最も大きくなると予想されるが, 斜面を用いた実験では雪粒子の速度が粒子 A を上回る結果となった.

4.2 シミュレーション結果との比較

各粒子流の最大高さ (厚さ) を室内実験と比較した結果を図 10 に示す. 粒子 A に関しては, 斜面の曲率が変わる直前の距離 1.2m までは実験の高さが最大 10mm 程度シミュレーションの結果を上回るが, その後流下距離 2.4m の位置までは両者はほぼ一致した. 傾斜がほぼ平坦となる 2.4m 以降では実験値がシミュレーション結果を上回っているが, これは実験値には粒子の跳躍の影響が含まれていることが原因と推察される. 粒子 B と雪粒子については, どちらも距離 1.2m 付近までは実験の高さがシミュレーション結果を上回るが, 1.2m 以降は両者の違いはほとんどみられなかった.

流れの横幅の最大値の変化を比較した結果を図 11 に示す. 粒子 A は, 実験とシミュレーションの結果が非常に良く一致している. 一方, 粒子 B と雪粒子の流れでは, どちらもモデルの出力が実験結果を上回り広がりが大きくなった.

図 12 は実験とシミュレーションにより得られた先端速度を比較した結果である. 粒子 A は実

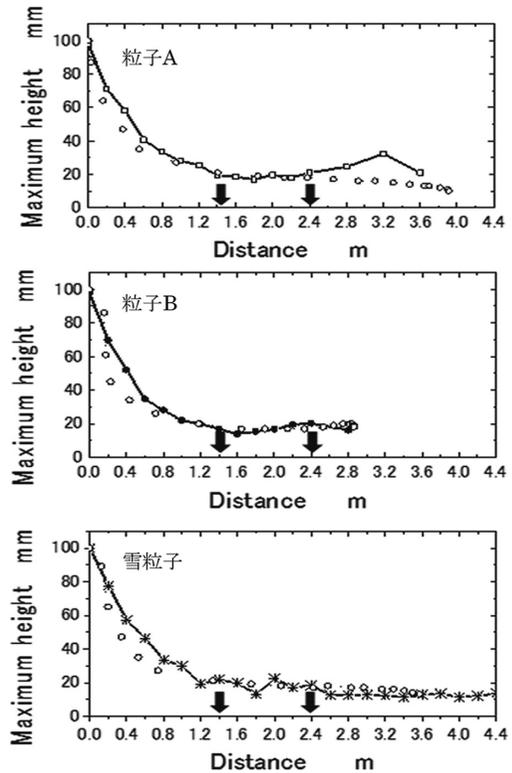


図 10 各粒子流の最大高さについて TITAN2D によるシミュレーション (点線) と室内実験 (実線) を比較した結果.

上段 : 粒子 A, 中段 : 粒子 B, 下段 : 雪粒子
 図中の矢印は, 斜面の傾斜が曲率を持つ範囲を示す (1.4m から 2.4m).

験とシミュレーションは良く一致しているが, 粒子 B は, シミュレーション結果が約 0.5ms^{-1} , 実験を上回り, 流下距離も実験結果より 0.4m 程度伸びる結果となった. 逆に雪粒子に関しては, 実験の方がシミュレーション結果を距離 1.2m の位置で約 0.5ms^{-1} , その後もさらに増大して約 1.5ms^{-1} 上回る結果となった. 流下距離についても, 実験では雪粒子は斜面上では停止しなかったが, モデルでは 3.8m の位置で堆積している.

5. 考察

物性の異なる 3 種類の粒子 (粒子 A, 粒子 B, 雪粒子) を用いて, 全長 5m, 最大傾斜 45° の実験斜面を流下させる室内実験を実施した. 図 7 に示した流下距離に伴う最大高さ (流れの厚さ) は, 流

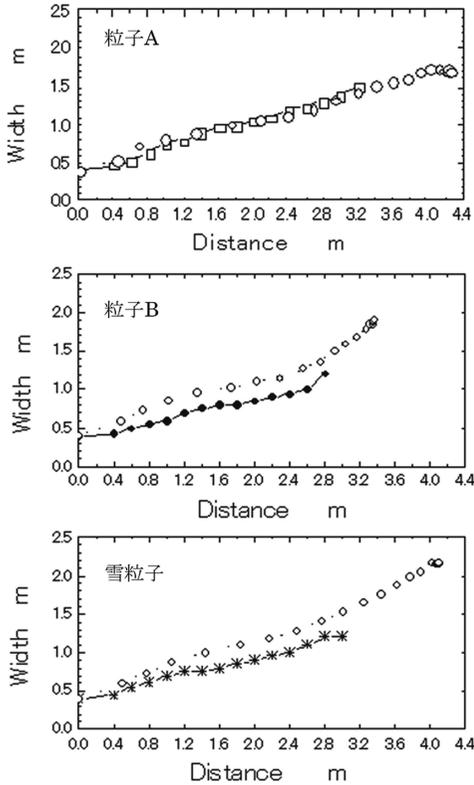


図 11 各粒子流の横幅の最大値の変化について TITAN 2D によるシミュレーション (点線) と室内実験 (実線) を比較した結果。

上段：粒子 A, 中段：粒子 B, 下段：雪粒子。

れが水平部に達するまでは粒子による相違はあまり顕著ではなかったが、斜面の水平部に至った以降は、粒子 A の流れが最も大きくなった。これは先に述べたように、底面を跳躍する粒子をセンサーが検知したためと考えられる。また、先端速度と流下距離の関係を示した図 9 によると、速度と流下距離が最も大きいのは雪粒子で、続いて粒子 A, 粒子 B という順になった。底面摩擦角は粒子 A が最も小さい (表 1) ことから、先端速度や流下距離も粒子 A が最も大きくなることが予想されたが、異なる結果となった。相違がもたらされた原因としては、厚紙の枠に粒子を充填してこれを移動させるのに要する力を求めるという極めて簡易な底面摩擦角の測定手法に原因があったと考えられる。特に 2005 年に -15°C という環境の下で実施された雪粒子の流下実験と底面摩擦角の

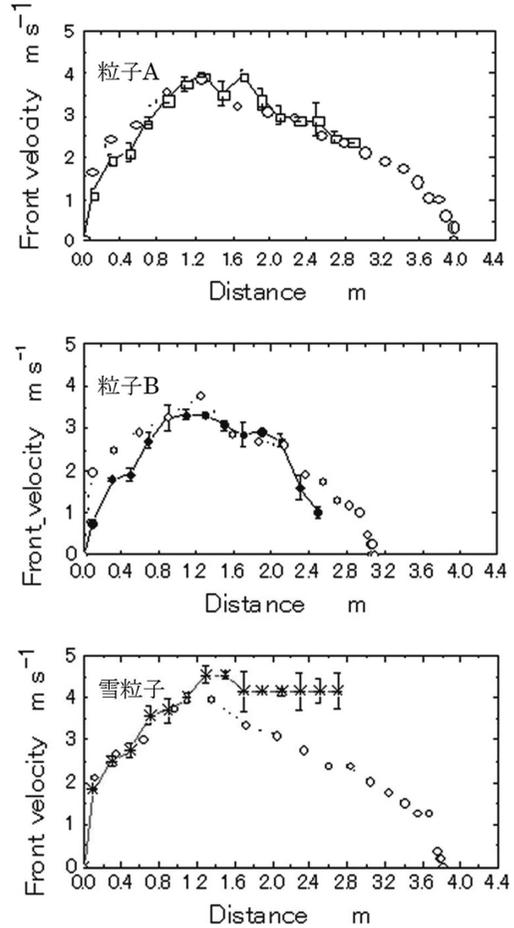


図 12 各粒子流の先端速度について TITAN2D によるシミュレーション (点線) と室内実験 (実線) を比較した結果。

上段：粒子 A, 中段：粒子 B, 下段：雪粒子
図中のエラーバーは、それぞれ粒子 A: 14 回, 粒子 B: 12 回, 雪粒子: 30 回実施した実験結果の標準偏差を示す。

測定では、枠そのものの大きさや、粒子層の厚さ (上載加重) も含めた枠内への粒子の充填状況が今回の底面摩擦角の測定と異なっていたことも一因と推測される。底面摩擦を測定した枠内の粒子の充填構造は、粒子層の厚さ (上載加重) にも起因して相違があることは容易に想像されるが、実際、2005 年の実験でも枠内に入れる粒子の重量を 384 g から 69 g まで変化させることで、底面摩擦角が 23 度から 16 度まで減少している。さらに Nishimura *et al.* (1993) が低温室内で直径 3 mm の

氷球を長さ 5.4m の樋上を流下させた実験では、その反発係数の大きい物理特性を反映して、速度勾配の大きい底面近傍の粒子の空間密度(充填率)は流れの中心部の 50% まで低下することが報告されている。実際に粒子が流下する状況を反映した底面摩擦角の正確な測定には、同軸の円筒容器内に粒子を充填し、法線応力を調整することで回転時の空隙率が調整可能なシアーセル (Casassa *et al.*, 1991) の使用等も含め、さらなる工夫と検討が必要である。

次に、実験的に求めた底面摩擦角・内部摩擦角の値を用いて TITAN2D によるシミュレーションを行い、斜面を用いた粒子の流下実験結果との比較を行った。

流下距離に伴う最大高さ(厚さ)の変化(図 10)は、斜面上 1.2m の位置までは、実験値がシミュレーションを上回る結果となったが、斜面に曲率があらわれる距離 1.4m 以降では、粒子 A の跳躍による影響を除けば、各粒子とも実験とモデルによる計算結果は良く一致した。距離 1.4m 以前の初期の違いは、全ての粒子に対して確認されたが、これは、TITAN2D では流れを浅水流(流れの長さのスケールに対して高さのスケールが十分に小さい流れ)と仮定しているのに対し、アクリルドームに充填された状態から短時間後の流れはまだ厚く、浅水流近似が十分成立していないためと考えられる。横方向の広がりと比較した結果(図 11)では、粒子 A については実験とシミュレーションの間に差はほとんどみられなかったものの、粒子 B と雪粒子では計算結果が実験結果を最大で約 0.2m 上回った。ちなみに、実験結果を連続体を仮定したシミュレーション結果と比較・検討するにあたっては、粒子それぞれの大きさを考慮して、計算結果のうち流れの厚さが粒子 A は 4×10^{-3} m 以上、粒子 B は 2×10^{-3} m 以上、雪粒子は 1×10^{-3} m 以上となる領域に限定した。この設定の妥当性についても今後検討の余地があると考えられる。先端速度と流下距離の関係は、粒子 A については実験結果とモデルによる計算結果が良く一致した(図 12)。これに対し、粒子 B はシミュレーションから得られた出力が実験で得られた先端速度を約 0.5 ms^{-1} 上回り、流下距離も約 0.4m 大きくなった。雪粒子の場合は、先端速度は実験

が、距離 1.2m の位置ではシミュレーションを約 0.5 ms^{-1} 上回り、下流ではその差はさらに増大した。実際、実験では流れは実験斜面上で停止せずに通過したのに対し、計算では距離 3.8m で停止した。こうした相違の原因としては、上述した底面摩擦角の測定手法の相違、さらには手法そのものが必ずしも実際に粒子が流下する状況を反映していない点を挙げることができる。また、粒子 A と B の場合は、流下直後(0.4m 程度の位置)で、シミュレーションによる速度が実験結果を約 0.5 ms^{-1} 上回っているが、これは最大高さの議論でも述べたように、アクリルドームから放出された短時間後は流れの厚さが大きく、浅水流近似がまだ十分成立していないことに起因すると考えられる。

6. 結論

異なる物性を持つ 3 種類の粒子(粒子 A, 粒子 B, 雪粒子)を用いて、長さ 5m の斜面を流下させる室内実験を行い、TITAN2D による計算結果との比較を通してモデルの性能評価を行った。前章では主として、実験と計算結果の相違点に着目してそれがもたらされた原因についての考察を行った。しかし、全体的には TITAN2D は実験結果を再現しているということが出来よう。特に粒子 A に関しては、図 10 から図 12 に示されるように、流れの最大高さ(厚さ)、横断方向への広がり、先端の流下速度とも両者が非常に高い精度で一致している。雪粒子を用いた測定結果と計算結果の間には相違が見られたものの、これは前述のように主として底面摩擦係数の測定精度に起因すると考えられる。 -15°C の低温室において粒径の大きいざらめ雪を使用して行われた実験であり、流下中の粒子間の付着力の効果は無視できることから、その物理的特性は他の 2 種類の粒子に比べて特段の相違は無いと考えられる。このため、モデルに入力する摩擦係数の測定精度、またモデルの浅水流近似の限界や連続体モデルと粒子流を比較する際の対象範囲の設定などの点を考慮すれば、モデルは雪を含めた広範な粒子流の挙動を表現するのに十分な能力を備えていると結論できよう。

近年は、非ニュートン流体の Navier Stokes 方程式を用いた 3 次元解析も Oda *et al.* (2011) や森

口ら (2012) によって実施され, 室内での模型実験や実際の雪崩との比較検討も行われているが, 計算負荷が大きく結果の導出には長時間を要する. 一方, TITAN2D は浅水流近似に基づくモデルであるため適用範囲にはおのずと限界はあるが, 1 回の計算に要する時間は通常数分程度である. このため, 例えばモデルに入力するパラメータの不確定性を考慮した確率論に基づく雪崩ハザードマップの作成 (森ら, 2018) など, 多数回の計算を要する場合等には非常に有効なツールとなると期待される.

謝 辞

本稿は, 著者の一人である森啓輔の修士論文 (森, 2014) の一部をまとめた結果である. 斜面を用いた粒子の流下実験にあたっては, 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター所有の実験斜面および敷地を使用させていただいた. 上石勲センター長を含め, 関係諸氏に心より謝意を表します. また本稿の校閲にあたっては, 2 名の査読者と編集担当委員から有益かつ丁寧なコメントと助言をいただいた. この場をお借りして深くお礼申し上げます.

文 献

- Casassa, G., Narita, H. and Maeno, N. (1991): Shear cell experiments of snow and ice friction. *J. Apply. Phys.*, **69**, 3745-3756.
- Christen, M., Kowalski, J. and Bartelt, P. (2010): RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **63** (1-2), 1-14, doi: 10.1016/j.coldregions.2010.04.005.
- Issler, D., Jenkins, J.T. and McElwaine, J.N. (2018): Comments on avalanche flow models based on the concept of random kinetic energy. *J. Glaciology*, **64** (243), 148-164.
- 森 啓輔, 西村浩一, 伊藤陽一, 阿部 修 (2013): 連続体モデル Titan2D を用いた雪崩の運動のシミュレーション. 雪氷研究大会 (2013・北見) 講演要旨集, 55.
- 森 啓輔 (2014): 雪崩運動のシミュレーションとハザードマップの作成. 名古屋大学大学院環境学研究所修士論文, 97 pp.
- 森 啓輔, 西村浩一, 常松佳恵, 阿部 修, Abani Patra (2018): 連続体モデル TITAN2D を用いた雪崩の運動のシミュレーション II—雪崩への適用と多項式カオス求積法を用いたハザードマップの作成—. *雪氷*, **80**, 289-296.
- 森口周二, 沢田和秀, 上石 勲, 小田憲一 (2012): 非ニュートン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, 2015-25, 24-26.
- Nishimura, K. and Maeno, N. (1989): Contribution of viscous forces to avalanche dynamics. *Ann. of Glaciology*, **13**, 202-205.
- Nishimura, K., Kosugi, K. and Nakagawa, M. (1993): Experiments on ice-sphere flows along an inclined chute. *Mechanics of materials*, **16**, 205-209.
- 西村浩一, Keith Dien, Abani Patra (2007): 雪崩の連続体モデルの開発 II—Titan2D の適用—. 2007 年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 27.
- Nohguchi, Y. (1989): Three-dimensional equations for mass centre motion of an avalanche of arbitrary configuration. *Ann. of Glaciology*, **13**, 215-217.
- Oda, K., Moriguchi, S., Kamiishi, I., Yashima, A., Sawada, K. and Sato, A. (2011): Simulation of a snow avalanche model test using computational fluid dynamics. *Ann. of Glaciology*, **52** (58), 57-64.
- Patra, A.K., Bauer, A.C., Nichita, C.C., Pitman, E.B., Sheridan, M.F., Bursik, M., Rupp, B., Webber, A., Stinton, A.J., Namikawa, L.M. and Renschler, C.S. (2005): Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **139**, 1-21.
- Perla, R.I. (1980): Avalanche release, motion, and impact. Dynamics of snow and ice masses (ed. by S.C. Colbeck), Academic Press, 397-462.
- Pitman, E.B., Nichita, C.C., Patra, A.K., Bauer, A.C., Sheridan, M.F. and Bursik, M. (2003): Computing granular avalanches and landslides. *Physics of Fluids*, **15** (12), 503-514.
- Savage, S.B. and Hutter, K. (1989): The motion of a finite mass of granular materials down a rough incline. *J. Fluid Mech.*, **199**, 177-215.
- Sheridan, M.F., Stinton, A.J., Patra, A., Pitman, E.B., Bauer, A. and Nichita, C.C. (2005): Evaluating TITAN 2D mass-flow model using the 1963 Little Tahoma Peak avalanches, Mount Rainier, Washington. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **139**, 89-102.
- 高橋喜平 (1960): 雪崩の被害 (雪崩に関するシンポジウム講演と討論 [2]). *雪氷*, **22**, 7-9.

Snow avalanche simulation with TITAN2D. Part I: comparison with chute experiment results

Keisuke MORI¹, Yoichi ITO², Kouichi NISHIMURA^{3*} and Abani PATRA⁴

¹ *ITOCHU Techno-Solutions Corporation, 3-2-5, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-6080*

² *Snow and Ice Research Center, NIED, 187-16, Maeyama, Suyoshi-cho, Nagaoka, Niigata 940-0821*

³ *Graduate School of Environmental Science, Nagoya University,*

Furo-cho, Chkusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8601

⁴ *University at Buffalo, The State University of New York, 605 Furnas Hall, Buffalo, NY 14260-4400*

** Corresponding author: knishi@nagoya-u.jp*

Abstract: Despite the development of various models simulating the dynamics of snow avalanches, including the mass-point and rigid-body models, existing products are unable to express the change of flow height and spread over the complicated topography. To address these shortcomings, we incorporated the mass flow model TITAN2D, which was originally developed to describe lava flow and landslide dynamics, to simulate snow avalanches. First, we conducted chute flow experiments using three types of granules, including granular snow. Outputs from these experiments include front velocity, maximum height, flow width, and flow distance data, which we then compared with numerical outputs. Although certain differences are inevitable due to the model's assumption of shallow water and difficulties in measuring the bed friction angle accurately, our simulated data exhibit general agreement with the experimental data, indicating that TITAN2D is an effective tool for describing the motion of snow avalanches.

(2017年8月17日受付, 2018年3月31日改稿受付, 2018年5月26日最終改稿受付,
2018年5月28日受理, 討論期限2019年1月15日)