

富士山で発生するスラッシュ雪崩による 土砂流出の数値解析手法に関する研究

STUDY FOR NUMERICAL ANALYSIS OF DEBRIS FLOWS DUE TO SLASH AVALANCHE AT MT. FUJI

後藤 聡¹・北爪 貴史²・関 悠花里³

Satoshi GOTO, Takashi KITAZUME and Yukari SEKI

¹山梨大学大学院総合研究部工学域土木環境工学系 (〒400-8511 甲府市武田四丁目 3-11)

E-mail: goto@yamanashi.ac.jp

²東電設計株式会社 (〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12 KDX 豊洲グランスクエア 9F)

E-mail: dkita@tepsco.co.jp

³東電設計株式会社 (〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12 KDX 豊洲グランスクエア 9F)

E-mail: yukari-seki@tepsco.co.jp

Key Words: numerical simulation, slash avalanche, Mt. Fuji, cellular automaton, multi-agent

1. はじめに

富士山において発生する災害にスラッシュ雪崩(雪代(ゆきしろ))と呼ばれる土砂災害がある¹⁾。

富士山のスラッシュ雪崩という現象は、多量の岩塊や表土(富士山の場合は主にスコリア)、立木等を巻き込んで流下する水分が多い雪崩のことで、雪が溶けた後も土石流状態となる現象である。雪代(ゆきしろ)と称される場合もある。初冬から晩春において、主にスコリアの裸地で発生し、積雪と融雪、気温上昇と降雨などの気象条件や表層地盤の凍結・融解繰返しによる難透水層の出現などの条件が相互に関係する。流出する土砂量の大小は気象条件等により毎年異なるが、富士山にある道路や登山道、駐車場等で多くのスラッシュ雪崩被害が発生している。気候変動による気温の上昇等から、今後スラッシュ雪崩被害の発生頻度や規模の増加が十分に考えられ、道路だけではなく集落まで到達する可能性がある。

一方、スラッシュ雪崩の発生機構を考察するための現地観測データは乏しく、その発生条件を正確に示すことは現状では困難である。さらに、スコリア、雪、水、岩塊などの混合体がこれらの体積比率を変

化させ、周りの地盤や立木などを巻き込みながら斜面を流下する現象であり、その詳細なメカニズムは未だ解明されている状況にはない。しかし、スラッシュ雪崩が到達する範囲は混合体の中での水の比率や地形などが大きく関係すると考えられる。そこで、現象の全過程や全要因が解らないまでも、その現象の全体像が概ね再現可能で、かつ、モデルやパラメータの変更が容易なシミュレーション・ツール²⁾³⁾を用いて、これまでのスラッシュ雪崩発生地点と流下範囲等が判明している教師データに対する再現解析を実施する。土石流の流出範囲や到達距離などの定量化を試み、数値解析手法の適用性を検討する。

2. スラッシュ雪崩とは

(1) スラッシュ雪崩の定義と発生メカニズム

富士山で発生するスラッシュ雪崩について、「雪代」、「スラッシュ・フロー」、「スラッシュ・ラハール」などの言葉が用いられているが、文献¹⁾においてはこれらの言葉の相違を明確に定義している。文献¹⁾では、「雪代」という言葉は雪氷・土砂・水混合体の流動現象の発生から停止に至る全体を示し、「ス

「ラッシュ雪崩」は「雪代」の発生地点における初期段階を表すとしている。一方、本報告では流動現象の発生から停止に至るまでの全体の現象として、「スラッシュ雪崩」という言葉を用いることとした。

スラッシュ雪崩の最初の発生地点では、表層のスコリア地盤において凍結により雨水浸透能力が低下していることが重要である。

スラッシュ雪崩は発生する時期により、春型と初冬型があり、春型の模式図を図-1に示す。降雨と気温上昇が重なると、凍結したスコリア地盤と融解したスコリア地盤の境界をすべり面として、スラッシュ雪崩が発生する。一方、初冬型のスラッシュ雪崩では、積雪が少なく地盤凍結は進んでいるものの、春型と同様に気温上昇により凍結融解が起こり、凍結したスコリア地盤と融解したスコリア地盤の境界をすべり面として、スラッシュ雪崩が発生する。

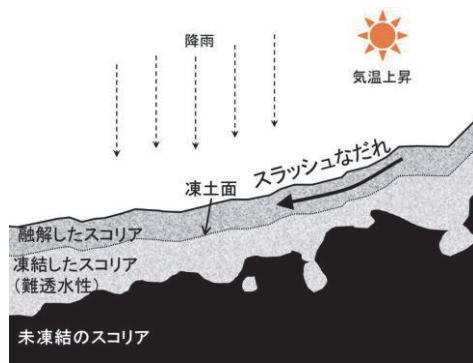


図-1 春型のスラッシュ雪崩 (模式図)



図-2 富士山スカイラインにおけるスラッシュ雪崩 (2007. 3. 29)

(国土交通省中部地方整備局富士砂防事務所 提供)



図-3 富士宮口新5合目でのスラッシュ雪崩 (著者撮影)

(2) 近年のスラッシュ雪崩災害

近年発生したスラッシュ雪崩災害の中では、初冬型として、平成16年(2004年)12月5日に主に富士山北斜面で発生した事例がある。春型として、平成19年(2007年)3月25日に主に富士山南斜面で発生し、富士山スカイラインに被害を与えた事例(図-2、図-3)と、2021年(令和3年)3月21日に発生し、富士山有料道路(富士スバルライン)に被害を与えた事例がある。

本報告では、2007年3月の事例を対象とした再現解析を試みる。

3. スラッシュ雪崩による土砂流出のシミュレーション

(1) シミュレーションのコンセプト

地震や流体による各種の応答解析には、物理現象を微分方程式で記述し、それらを離散化して構築した有限要素法や有限差分法などを用いることが多い。現象に関与する様々な素因それぞれの特性と、複数の素因の相互作用、さらには誘因が素因に及ぼす影響の定量化などが解明されない限り、現象を表現する厳密な微分方程式モデルの構築は困難であろう。このようなことから、様々な素因が関与し、誘因と素因との複雑な相互作用によって生じる土石流の再現や予測の困難さが窺い知れる。しかし、現象を構成する様々な素因の特定や分解、分析ができずとも、また、全ての相互作用が解明できなくとも、判明している上流側の一部の局所的な相互作用の積み重ねによって複雑な自然現象の再現を試みる方法も存在する⁴⁾。

富士山で発生するスラッシュ雪崩による土砂流出は広範囲かつ複数個所で発生し、広い範囲に流下している。広域で発生する土砂流出を数値シミュレーションによって表現するにあたり、計算資源の制約から、物質は高いところから低いところへ移動する、土砂は含水量によって流れ方が変化する、などの簡易なルールだけで現象の概要や傾向を把握することに重点をおきたい。

そこで、本シミュレーション・ツールには次の機能・特徴を与えた。土砂流出や流動を規定するルールを簡易化することで大規模な連立方程式を解く必要がなく高速演算を可能とすること、すなわち広域モデルを対象とできること、また、必要に応じたルールの変更を容易に行えるために地質や地形の専門家の知見・経験を導入し易くすること、土砂流動のルール記述に用いるパラメータの変動やばらつきを

考慮した検討を多ケース行えること、などである。土砂流動を規定するルールの簡易化による解析精度の低下を、上記の機能・特徴を持たせることで補完する。

シミュレーション手法として、セルラ・オートマトン (Cellular Automaton : CA) 法とマルチ・エージェント (Multi-Agent : MA) 法を用いる。以下、CA/MAシミュレーションと称す。本検討で用いた CA/MAシミュレーションは、環境や状態を「セル」内に表現し、土砂と水を「エージェント」としている。土砂エージェントと水エージェントの挙動やそれぞれのエージェントの隣接セルへの移動方法を本手法特有の「ローカル・ルール」で規定する。

a) セルラ・オートマトン法 (CA)

解析領域を規則的に配置した空間格子「セル」に分割する。セルの1つがステップ s において任意の環境や状態を有している。隣接するセルの状態量との相互作用「ローカル・ルール」を考慮してステップ $s+1$ の状態量を順次求め、すべてのセルが同期して変化することにより、解析領域全体の環境や状態の変化を表現する。CA の特徴は簡単なセル間の局所的相互作用から解析領域全体における複雑な現象を再現できることにある。

b) マルチ・エージェント法 (MA)

エージェントと称される環境や状態を知覚して行動を起こし、また、環境や状態に影響を及ぼす要素を用いて、複数種類のエージェントを配置することでそれらが相互作用し、その総和として複雑な現象を表現する。本検討におけるシミュレーションでは土砂エージェントと水エージェントを設けている。

(2) シミュレーションの基本設定

本検討における「セル」、「エージェント」、「ローカル・ルール」の基本設定を示す。

- ① 解析領域は正方形格子 (セル) で構成する。例えば、 $10 \times 10, 5 \times 5, 2 \times 2$ (長さの単位) などのセルを X 及び Y 方向にそれぞれ x 個 $\times y$ 個配列する。
- ② 各セルは地表面 (Z 座標を持つ) を構成し、地表面は基盤標高 + 表層 (本検討では、土砂エージェントと水エージェントで表層を構成する) とする。
- ③ 注目セル (i,j) の状態変化は、当該セルとそれに接する隣接 8 セルとの関係から次ステップの状態を決定する (図-4)。
- ④ 注目セルに存在する土砂及び水エージェントの隣接セルへの配分量はそれぞれのセル間勾配の比によって決定する。セル間勾配は (基盤標高 + 土砂エージェント高さ) に対して算定している。

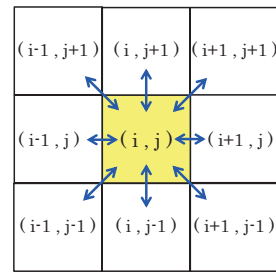


図-4 注目セル (i, j) と隣接する 8 個のセル

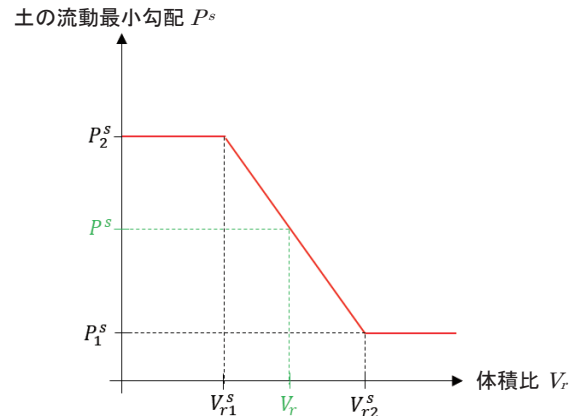


図-5 流動特性を規定するトリリニア関係 (上添え字の s は土砂エージェントを示す)

- ⑤ 各エージェントには流動し始める最小の勾配 (初期流動最小勾配 P_2^s, P_2^w) をパラメータとして与え、注目セルと隣接セルの間の勾配が流動最小勾配よりも大きい隣接セルにエージェントが移動する。
- ⑥ 各エージェントの流動最小勾配 (P^s, P^w) は当該セルに存在する水及び土砂エージェントの体積比 ($V_r = V^w / V^s$) によって変化し、 V_{r1} 及び V_{r2} の 2 点を設定したトリリニア関係とする (図-5)。
- ⑦ 土石流は流れの勢いで尾根を越えることもあり、その直進性 (慣性) を表現するために運動エネルギーに相当する量を、エージェント進行方向の上下流側のセルに対応する勾配を増減させることによって導入している³⁾。

(3) 検討対象とした現象と検討モデル

シミュレーションの検討対象としたのは、平成 19 年 (2007 年) 3 月 25 日に発生したスラッシュ雪崩による土砂流出現象である。図-6 に示すように、主に富士山頂の南西側において多数の流路をもつこれらの現象が観測された。

検討モデル作成には国土地理院 10m メッシュ DEM データ (timePosition 2016-10-01) を使用し、モデル化範囲は図-7 に示す東西方向 (X) 14km、南北方向 (Y) 12km の範囲とした。セル 1 個の大きさは 20×20 m の正方形とし、モデル全域を合計 420,000 個の

セルで構成している。

図-8に検討モデルを示す。スラッシュ雪崩発生後のDEMデータを用いているため、現象発生前の詳細な地形は反映できていない。さらに、セルサイズを20mとしていることから、微細な地形については反映されていない。概略的な地形データとなるが、現象の概要や傾向を把握することが目的であることから、これを許容した。

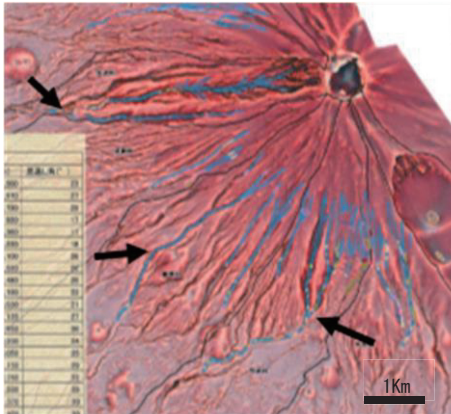


図-6 検討対象とした事象（中部地方整備局富士砂防事務所提供資料に加筆修正）
（— スラッシュ雪崩の範囲）

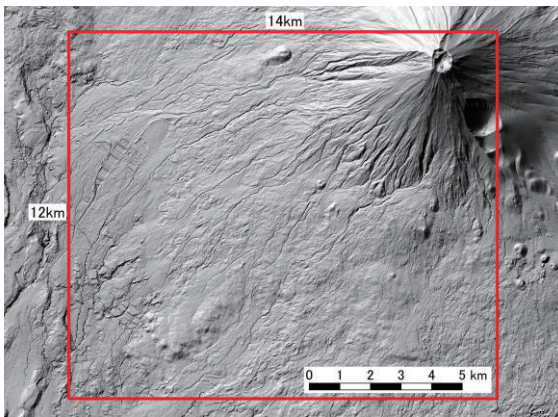


図-7 モデル化範囲（图中赤枠、基図：地理院陰影図）

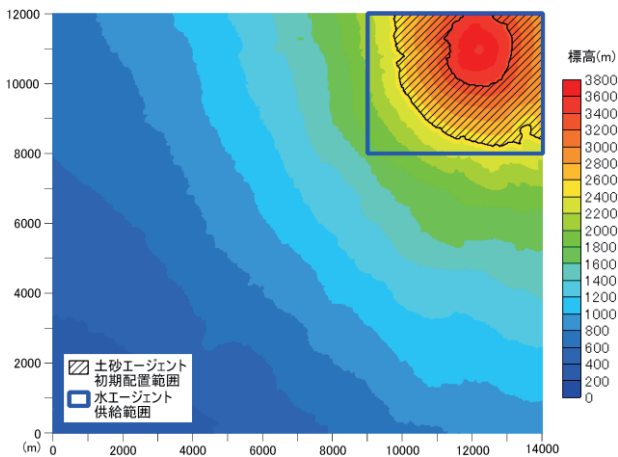


図-8 検討モデル（標高コンターとして表示）、
土砂・水エージェントの初期配置

(4) 検討ケースと検討条件

CA/MA シミュレーションにおける主な3つのパラメータの設定範囲を表-1に示す。3つのパラメータを組み合わせた合計12ケースのシミュレーションを実施した。

a) 土砂エージェントの初期配置と表層厚

流動する可能性のある表層（土砂エージェント）を図-8に示すように標高2450～3350m位置に一律1.0m厚で配置した。これは、概ね標高2500m以上が森林限界で裸地となっていること、また、上野⁵⁾によると、土砂流出を生じ得る表層厚（土検棒の貫入深度）は概ね1m程度であるとされていることによる。この土砂エージェントの初期配置条件はすべての検討ケースで共通とした。

b) 水エージェントの初期供給条件

水エージェントの供給範囲を図-8に示す。スラッシュ雪崩による土砂流動の誘因となったと考えられる降雨と気温上昇に伴う融雪については、いずれも地盤内に浸透した水量が不明であることから変動パラメータとした。表-1に記した50, 100, 200mmが降雨と融雪によって地盤に浸透した水量を示す。解析初期の10ステップにおいて、1ステップあたり5, 10, 20mmずつの水エージェントを加えている。

c) 初期流動最小勾配

本検討で用いるCA/MAシミュレーション・ツールでは、土砂エージェントと水エージェントは図-5に示したトリリニア関係を独立に設定できる。しかし、今回の検討では両者のトリリニア関係を同一とした。トリリニア関係における縦軸との交点である初期流動最小勾配($P_2^s = P_2^w$)をパラメータとした。初期流動最小勾配は、32.5, 30.0, 27.5, 25.0°の4種類とした。なお、 P_2 以外のパラメータについては $P_1^s = 5.0^\circ$, $V_{r1} = 1.5$, $V_{r2} = 2.5$ で固定値としている。

4. 土砂流出シミュレーション結果

(1) 初期の水供給量50mmのケース

水エージェントの供給量50mmとした場合の土砂流動推定結果を図-9に示す。図より次のことが分かる。

表-1 パラメータの設定範囲

パラメータ	パラメータの値
a) 土砂エージェントの初期層厚	1.0 (m)
b) 水エージェントの供給量	50, 100, 200 (mm)
c) 初期流動最小勾配 (°)	32.5, 30.0, 27.5, 25.0

- ・初期配置された土砂エージェントは水エージェントの供給によって標高の低い箇所に移動（流動）する傾向が認められ、それらは土砂の浸食と堆積の様子を表している。
- ・相対的に標高の低い箇所（谷部）に土砂エージェントが堆積している様子が認められる。実際に観測された土砂の流動箇所（図-9(1)に示された水色部分）と同様の経路を示す谷筋が認められる。
- ・初期流動最小勾配を小さくするほど、初期配置された土砂エージェントは浸食され（濃青色部が減少する）、堆積する流路は標高の低い箇所にわずかではあるが伸びている。

(2) 初期の水供給量 100mm 及び 200mm のケース

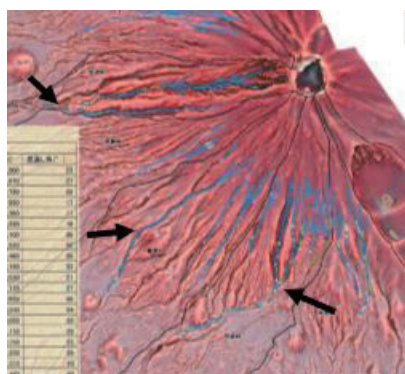
水エージェントの供給量を 100mm とした場合、200mm とした場合の土砂流動推定結果をそれぞれ図-10 及び図-11 に示す。水エージェントの供給量を増加させることによって土砂エージェントの流動距離が大きくなることを期待したが、その効果はわずかであった。

5. 考察と今後の課題

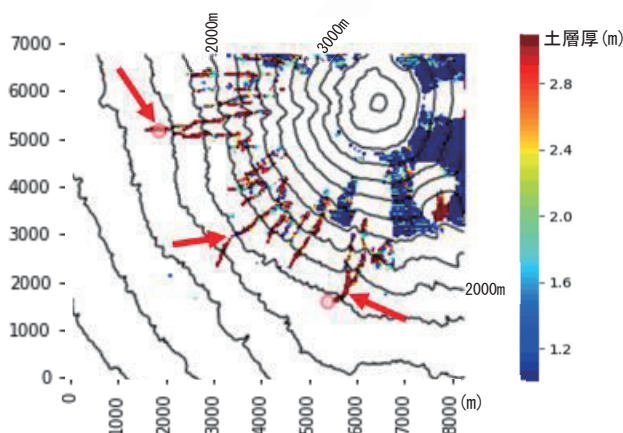
今回の検討では、表層（土砂エージェント）の初期配置と厚さ 1.0m を固定し、初期流動最小勾配、水エージェントの初期供給量の 2 項目に関するパラメトリックスタディを行った。結果として、水エージェント量 50, 100, 200mm の変動範囲において土砂流動距離が大きく異なることはなかった。流動距離の相違には初期流動最小勾配を変化させたことが寄与した（感度が大きかった）。水エージェントの供給量の変動が土砂エージェントの流動距離に相違をもたらさなかった原因として、初期配置した土砂エージェントの総量（表層厚 1.0m）が少なかった（相対的に水エージェント量が多かった）ことが考えられる。初期表層厚 1.0m の土砂の流出・流動範囲は、初期供給量 50mm 以下の水量でほぼ規定されたことによるものと考えられる。

土砂エージェントの初期配置範囲や表層厚を大きくすることによって、土砂エージェントの総量を変化させるケースも考えられ、そうした場合、水エージェント供給量の変動に対する土砂流動距離に感度が生じる可能性もある。

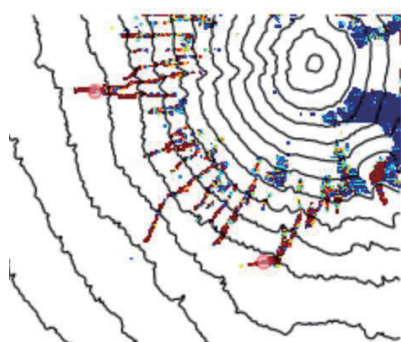
しかし、現地において土砂流動が生じ得る表層の



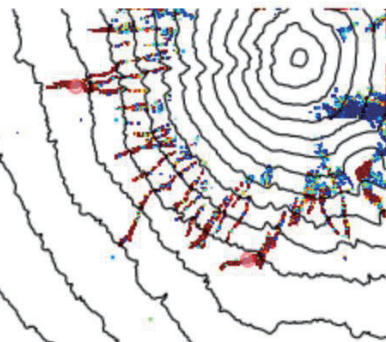
(1) スラッシュ雪崩による土砂流動範囲（水色）



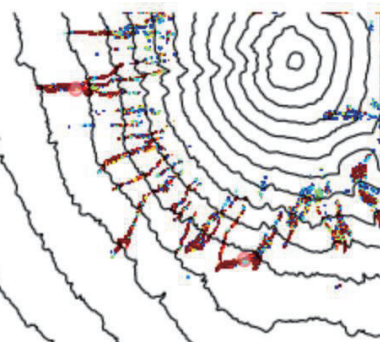
(2) 初期流動最小勾配 32.5° のケース



(3) 初期流動最小勾配 30.0°

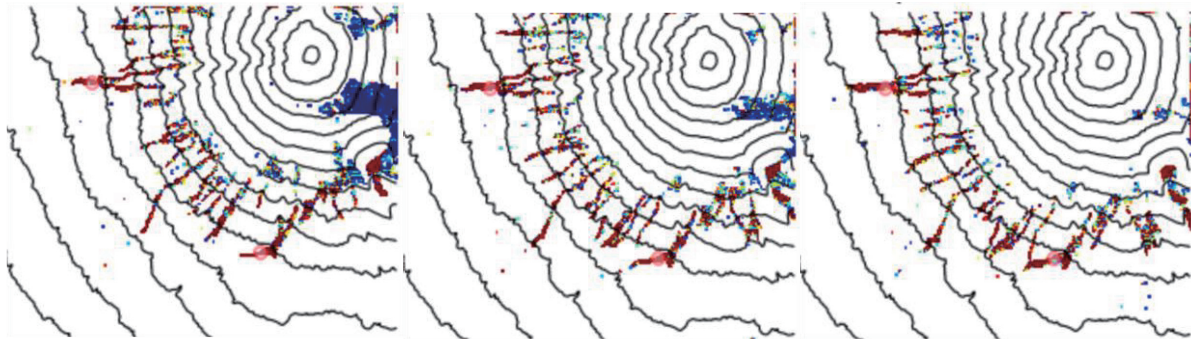


(4) 初期流動最小勾配 27.5°



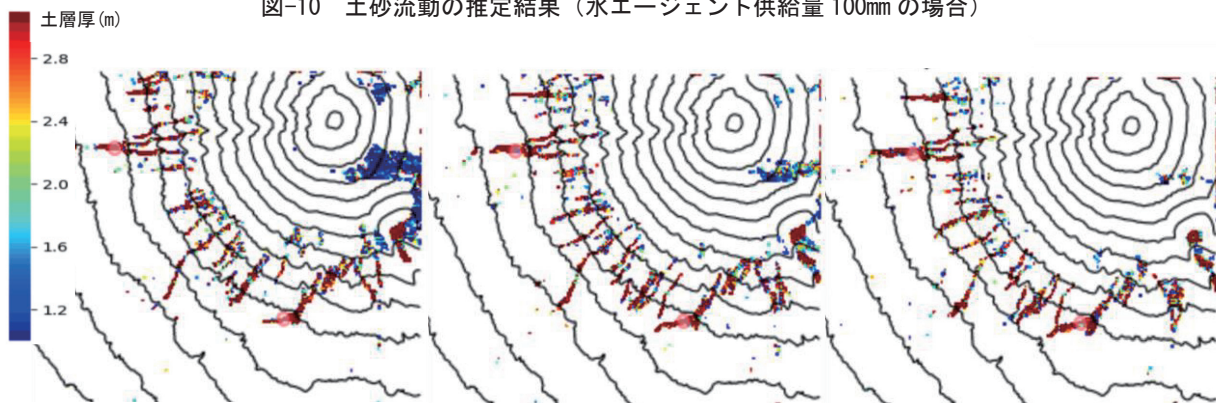
(5) 初期流動最小勾配 25.0°

図-9 土砂流動の推定結果（水エージェント供給量 50mm の場合）



(1) 初期流動最小勾配 30.0° (2) 初期流動最小勾配 27.5° (3) 初期流動最小勾配 25.0°

図-10 土砂流動の推定結果（水エージェント供給量 100mm の場合）



(1) 初期流動最小勾配 30.0° (2) 初期流動最小勾配 27.5° (3) 初期流動最小勾配 25.0°

図-11 土砂流動の推定結果（水エージェント供給量 200mm の場合）

位置や層厚を広範囲にわたって調査・把握することは現状困難であると考えられることから、予測解析を実施する際には、このような初期条件の設定に少なからぬ仮定を設けざるを得ない。

今後は、水エージェント供給量に応じて、土砂エージェントの配置や総量を変化させた感度解析をはじめとし、トリリニア関係の設定も含めた初期条件に関する多変数、多変量のパラメトリックスタディを行い、確率・統計的な評価の実施を考えることとしたい。

謝辞：本研究の一部は、(一財)砂防・地すべり技術センター 令和2年度研究開発助成により実施した。山梨県及び中部地方整備局富士砂防事務所から情報をいただいた。関係各位に感謝いたします。

参考文献

1) 安間荘：富士山で発生するラハールとスラッシュ・ラ

ハール、富士火山(2007)、山梨県環境科学研究所, pp.285-301, 2007.

2) Takashi KITAZUME, Takahiro ABE and Satoshi GOTO: Numerical simulation of debris flows after ash fall at Mt. Fuji, © Springer Nature Switzerland AG 2021, B. Tiwari et al. (eds.), *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk*, ICL Contribution to Landslide Disaster Risk Reduction, https://doi.org/10.1007/978-3-030-60706-7_27, pp.281-292, 2021.

3) 阿部峻大, 西村聡, 北爪貴史, 佐藤恭兵, 遠藤秀祐, 後藤聡：MA/CA 法による土石流シミュレーション・ツールの拡張(その1), 土木学会第74回年次学術講演会概要集, III-470, 2019.

4) 加藤恭義, 光成友孝, 築山洋：セルオートマトン法—複雑系の自己組織化と超並列処理—, 森北出版, 1998.

5) 上野将司：表層崩壊の危険度評価, 第59回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.90-91, 2020.

(2022. 5. 30 受付)