

jh200015-NAH

## 大規模シミュレーションより構築した代理モデルによる 確率論的災害リスク評価

森口 周二 (東北大学)

本課題では、2016 年熊本地震で発生した阿蘇の斜面崩壊と 2017 年の那須町の雪崩を対象として、各災害における不確実性を考慮して複数ケースの大規模流動解析を実施し、その結果に基づいて代理モデルを構築した。また、得られた代理モデルを用いたモンテカルロシミュレーションを通じて 2 つの斜面災害の確率論的リスク評価の具体例を示した。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同研究を実施した拠点名

京都大学

#### (2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

#### (3) 参加研究者の役割分担

##### 全体統括・確率論的リスク評価グループ

・森口 周二 (東北大学)：研究代表者

研究全体の統括を担当した。また、数値解析結果から代理モデルを構築し、それを用いた確率論的リスク評価を担当した。

##### 高速化・安定化支援グループ

・牛島 省 (京都大学)：研究副代表者

・鳥生 大祐 (京都大学)

・西浦 泰介 (海洋研究開発機構)

非 Newton 流体モデルによる雪崩解析、および粒子法を用いた土砂流動解析の安定化や高速化を担当した。

##### 実災害再現グループ

・寺田 賢二郎 (東北大学)

・浅井 光輝 (九州大学)

・高瀬 慎介 (八戸工業大学)

・山口 裕矢 (東北大学)

本研究で対象とした実際の雪崩と土砂流動の再現解析を担当した。

### 2. 研究の目的と意義

現代の大規模数値解析は、自然災害の高精度なリスク評価やリアルタイム予測を実現し、人命を守るための重要なツールとして位置づけられる。一方で、近年では不確実性を考慮した確率論アプローチが多く分野で重視されており、特に防災・減災の分野では 2011 年の東日本大震災を経て、その流れは加速化している。数値解析と確率論リスク評価は今後の防災・減災を担う両輪として機能する必要があるが、その場合、数値解析は不確実性を考慮した十分な試行回数の下で現象を表現する必要があり、ときとしてその計算ケース数は数千・数万のレベルを要求される。計算の大規模化と可能な試行回数はトレードオフの関係にあるが、広域を対象とすることが多い災害シミュレーションにおいては、大規模情報基盤を利用したとしても、確率論的リスク評価に耐えうる試行回数を担保することが難しい場合が多い。このように、高いコストの数値解析は、十分な試行回数を要求する確率論的リスク評価の中では使用が難しい場面が多いが、今後の防災・減災対策事業を効率的に推進するためには、これらの技術の融合が重要なポイントとなる。この問題の解決策として、本研究では数値解析の代理モデルを用いた確率論的リスク評価手法の枠組みを採用する。ここで言う代理モデルとは、数値解析結果に基づいて入力と出力の関係を表現し

たものを意味し、極めて低い計算コストで数値解析と同等の解を出力することが可能な数学モデルである。この数値解析の代理モデルを用いた枠組みを、実際に発生した 2 つの斜面災害に適用する。具体的には、2016 年熊本地震で発生した阿蘇の斜面崩壊 (図-1) および 2017 年の那須の雪崩 (図-2) である。これらの 2 つの斜面災害について、不確実性を考慮して複数の解析ケースを実施する。また、それらの結果に基づいて、対象とするリスク指標に関する代理モデルを作成し、確率論的リスク評価を実施する。これにより、大規模計算とその代理モデルによる災害の確率論的リスク評価の具体例を示し、その有用性を確認することを目的とする。



図-1 2016 年熊本地震で発生した阿蘇の斜面崩壊



図-2 2017 年の那須の雪崩

(写真引用：防災科学技術研究所報告書より)

### 3. 当拠点公募型研究として実施した意義

先述のように、災害の確率論的リスク評価で求められるような計算ケース数に対する解を直接的

に大規模数値解析によって出力することは難しい。また、実務レベルで考えれば、必ずしも大規模数値解析を実行できる環境があるわけでもない。しかし、数値解析を事前に実施し、その結果をデータベースとして持つことで、代理モデルの構築が可能となり、低い計算コストで災害リスクの評価が可能となり、大規模数値解析の実務利用に対する可能性が広がる。本研究の試みは、防災・減災のための対策事業の両輪となるべき数値解析と確率論的リスク評価の効果的な融合を例示するものである。

斜面防災分野の数値解析では、計算コストの観点から準 3 次元解析 (深さ方向に静水圧近似) が主流となっている。しかし、現象は本来 3 次元条件であり、また、急峻な地形が多い日本においては、その深さ方向の仮定が破綻する場合も多々ある。数値解析技術と計算機能力が高度に発展した現代においては、より現実に近い 3 次元条件のモデル化が優先されるべきであり、その良例の積み重ねによって実務レベルでの信頼を獲得する必要がある。本研究で対象としている 2 つの斜面災害は、広範囲な流下経路をカバーしながら、流下過程では数十 cm の層厚になる流れを表現する必要がある。また、この計算規模の上に不確実性を考慮した複数ケースの計算が必要となるため、その大規模計算環境が提供される拠点公募型研究として実施する意義は非常に大きい。

### 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

前年度までに、対象とする 2 つの斜面災害の再現解析を実施しているため、得られた結果について概説する。

図-3 と図-4 は、MPM (Material Point Method) を用いて計算した阿蘇の斜面崩壊に関する結果である。図-4 は解析結果から得られた斜面下の阿蘇大橋に作用した力の時刻歴データを示している。約 1km<sup>2</sup>の領域を対象としており、計算格子 (バックグラウンドメッシュ) は 2.5m 間隔、粒子サイズは 62.5cm とし、全体で約 2400 万粒子を使用している。

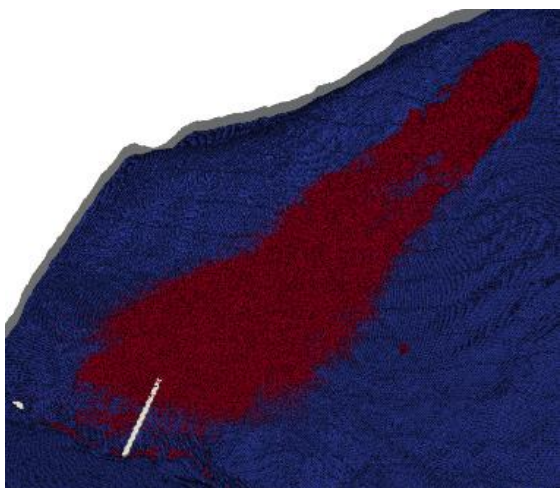


図-3 MPM による土砂流動解析結果

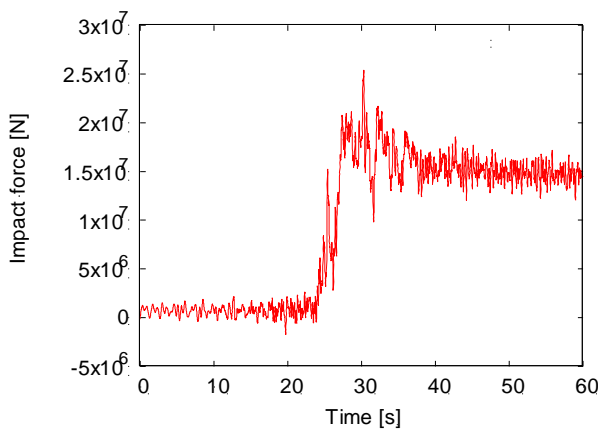


図-4 流動土砂の橋梁への作用力時刻歴

図-5 と図-6 は、那須の雪崩に関する結果である。これらの結果は安定化有限要素法 (Stabilized Finite Element Method) を用いて計算した結果である。斜面上の流下範囲に沿うように 10m の厚さでメッシュを発生させており、地表面付近のメッシュサイズは 50cm 程度で、全体の要素数は約 3200 万である。対象とした雪崩では、死傷者が発生しており、巻き込まれた地点が推定されているため、人体に作用する流体力の空間分布を出力した。なお、通常、人体に作用する流体力を流下範囲の任意の点で評価するためには、計算の中で全ての点で障害物を設けるなどして、それに作用する流体力をチェックする必要があるが、津波の流体力を評価する際などに用いられる簡易モデル（流速と層厚から流体力を評価するモデル）を応用することにより、1 回の計算結果から人体に作用する流体力の空間分布を求めている。図-6 は、

解析結果から得られた人体に作用する流体力の空間分布から、死傷する可能性がある領域と転倒する可能性がある領域を評価したものであり、実際の被害と整合することを確認している。

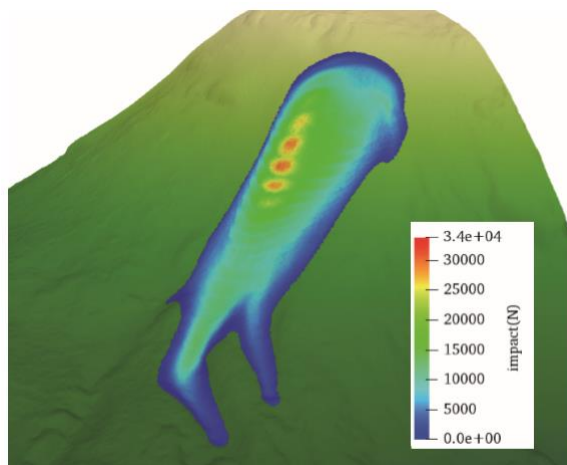


図-5 人体に対する衝撃力分布

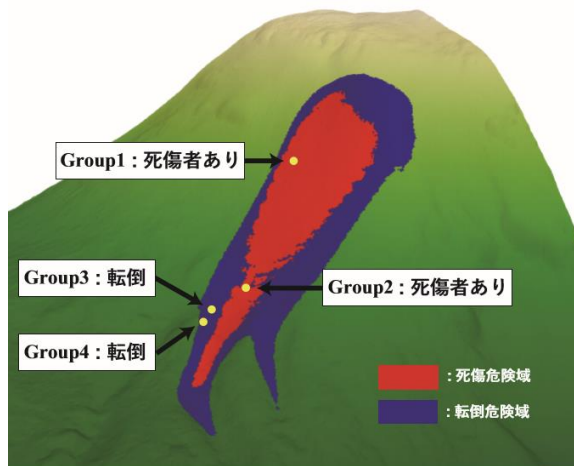


図-6 計算された衝撃力と実被害との比較

## 5. 今年度の研究成果の詳細

先述のように、昨年度の研究で、対象とする 2 つの斜面災害の再現解析を実施していた。その経験に基づいて、本年度の研究では各斜面災害における不確実性を考慮して複数の解析ケースを実施し、得られた結果から代理モデルを構築した。さらに、得られた代理モデルを用いてモンテカルロシミュレーションを実施し、その結果に基づいて確率論的リスク評価を行った。以下では、対象とした各斜面災害のシミュレーション、代理モデル、確率論的リスク評価の結果について説明する。

### 土砂流動のリスク評価

2016 年 4 月の熊本地震により阿蘇郡南阿蘇村

立野地区の国道 57 号線沿いで発生した大規模斜面崩壊による土砂流動を対象として、確率論的リスク評価を実施した。まず、昨年度と同様に、約  $1\text{km}^2$  の領域を対象として、MPM を用いたシミュレーションを実施した。国土地理院の数値標高モデルを用いて地形を粒子によって表現し、崩壊前と崩壊後の地形の差分の情報から崩壊部分の粒子を配置している。図-7 は、解析モデルのイメージである。なお、昨年度の計算の条件から計算解像度も向上させており、計算格子間隔を  $1\text{m}$ 、粒子数を 4 億 5 千万としている。

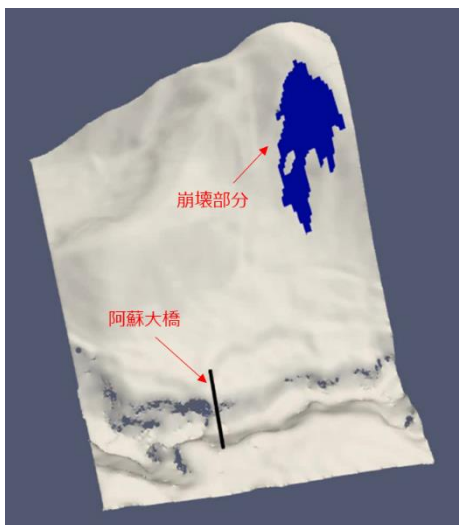


図-7 土砂流動解析モデルイメージ

昨年度と同様にシミュレーションによって斜面下の阿蘇大橋に作用した力を評価するものとして、流動させる土のパラメータ（粘着力と内部摩擦角）を変化させて合計で 24 ケースの解析を実施した。図-8～10 には、そのうちの 3 ケースの解析結果を示している。

解析結果より得られる橋に作用する衝撃力の時刻歴データからその最大値を抽出し、これを代理モデルで評価するリスク指標とした。すなわち、粘着力と内部摩擦角を入力として、衝撃力を出力する代理モデルを構築した。ここでは、RBF 補間 (Radial Basis Function Interpolation) を用いており、その係数および正則化項の係数はクロスバリデーションを行うことで最適値を求めている。図-11 は得られた応答曲面（代理モデルのパラメータ空間における曲面）のイメージ図であり、図中の赤色

の点が大規模計算で実施した解析ケースを意味する。この代理モデルを用いて、試行回数 1 万回の条件でモンテカルロシミュレーションを実施して得られた衝撃力の発生確率分布を図-11 に示す。ここで、モンテカルロシミュレーションの入力条件としては、平均値は粘着力  $15\text{kPa}$ 、内部摩擦角  $20$  度として解析ケースで考慮したパラメータの範囲内で正規分布となるように仮定している。本研究では、材料パラメータのバラツキ特性に関する情報を得ることができなかったため、簡易的に数値解析で変化させた各パラメータの幅に対応する正規分布を考慮したが、材料特性のバラツキをより高精度に評価することができれば、実際の土砂流動によって発生した衝撃力を確率論に基づいて議論することが可能となると考えられる。

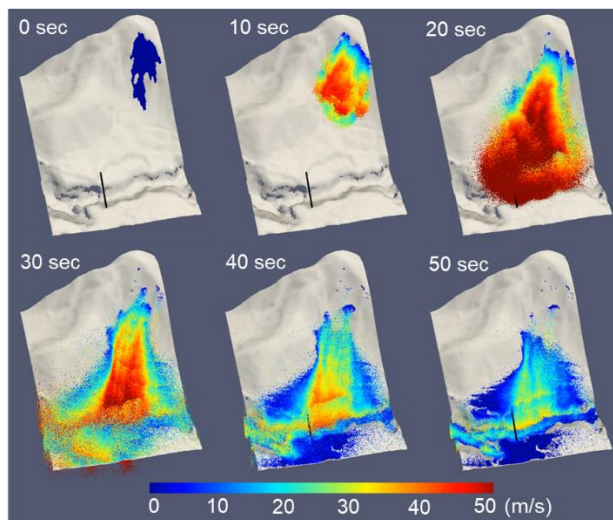


図-8 土砂流動解析結果 ( $c=0\text{kPa}$ ,  $\Phi=10$  度)

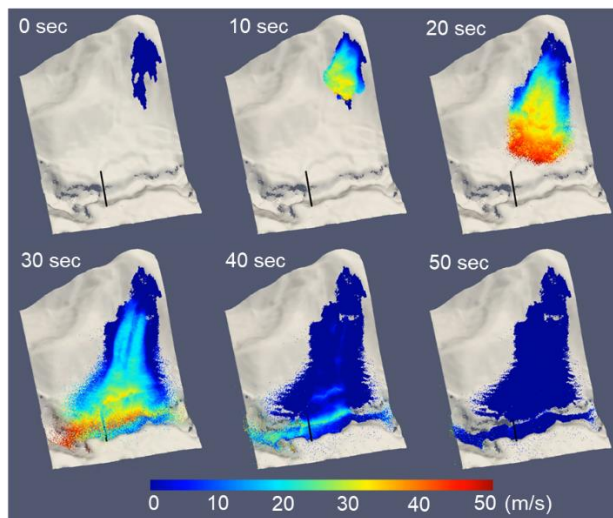


図-9 土砂流動解析結果 ( $c=10\text{kPa}$ ,  $\Phi=20$  度)

### 雪崩のリスク評価

2017年に栃木県那須郡那須町のスキー場付近の山岳地で発生した雪崩を対象として、確率的リスク評価を実施した。まず、昨年度と同様に、安定化有限要素法を用いて流動解析を実施した。材料モデルには Coulomb の破壊基準を導入した Bingham 流体モデルを採用した。ここでは、雪崩の発生区的位置を不確実性として考慮した。なお、発生位置が変化することで雪崩の流下範囲が広がる可能性があるため、昨年度よりも広い範囲をモデル化の対象とした。具体的には図-13 に示す約 100000m<sup>2</sup>の面積の領域に高さ方向 10 の範囲でメッシュを発生させており、地表付近の解像度は昨年度と同じ 50cm で、地表面から離れるにしたがって徐々に粗いメッシュサイズとなっている。

昨年度の研究によって 2017 年に発生した雪崩の発生区は概ね把握できているため、その発生区的位置を基準として、流下方向に対して垂直方向に両サイドに発生位置を変化させて 10 ケースの解析を実施した。発生区を変化させたイメージ図を図-14 に示す。図-15 には、10 ケースの解析結果から得られた人体に作用する最大衝撃力の分布図である。この最大衝撃力の分布図の評価については、昨年度の研究の中で提案した手法を用いており、解析結果として得られる斜面上の各点における流速と層厚の時刻歴データを用いて作成している。

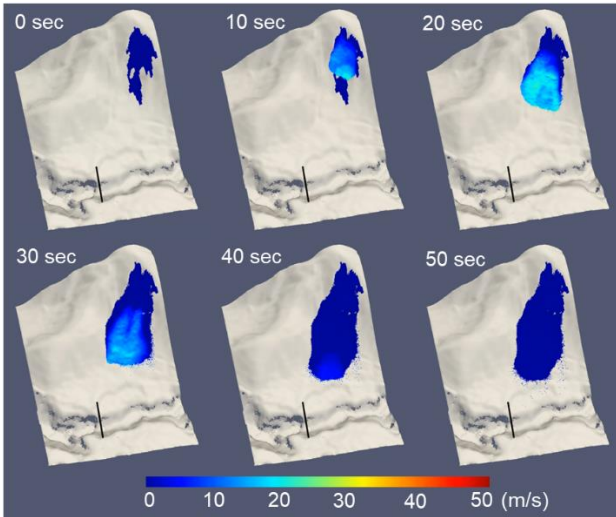


図-10 土砂流動解析結果 ( $c=30\text{kPa}$ ,  $\Phi=40$  度)

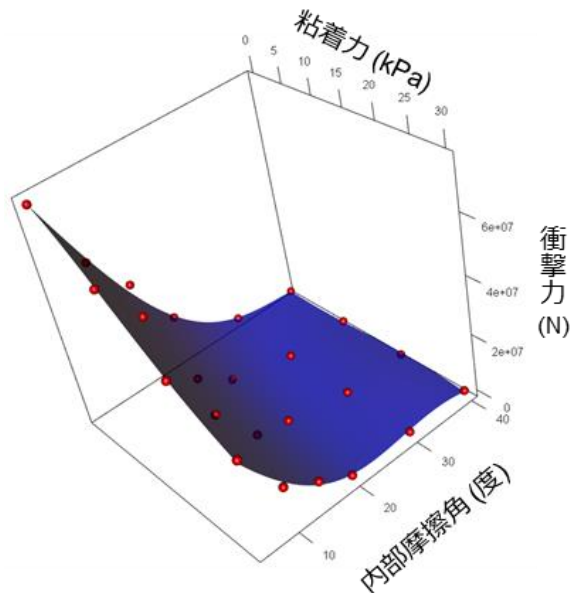


図-11 衝撃力の応答曲面

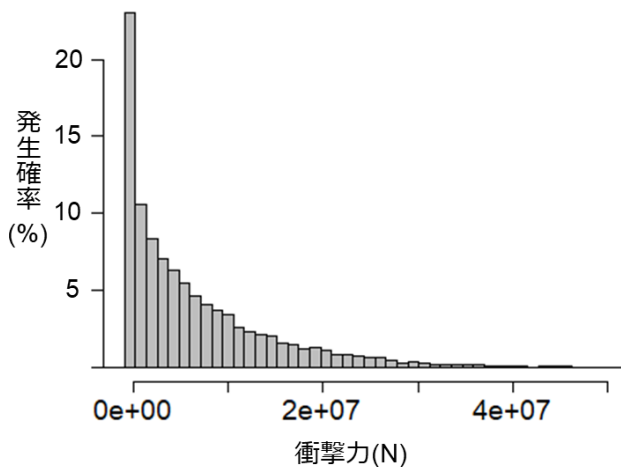


図-12 衝撃力の発生確率分布

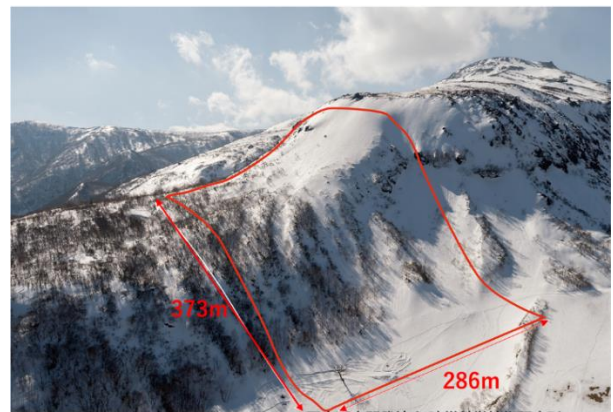


図-13 雪崩シミュレーションのモデル化領域

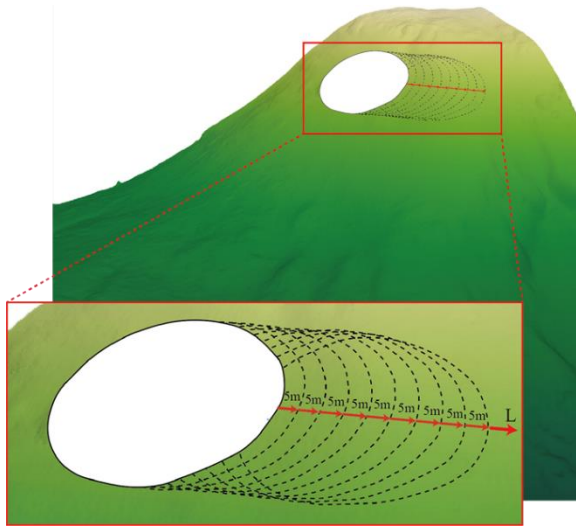


図-14 雪崩発生区の変化のイメージ

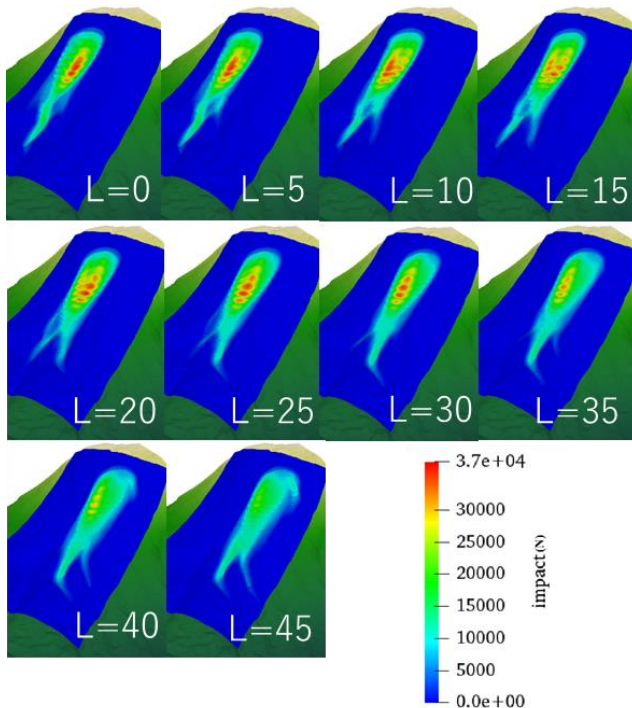


図-15 雪崩シミュレーションの結果

雪崩の流動解析に続いて、代理モデルを構築した。ここでのリスク指標は、図-15 に示した人体に対する衝撃力とした。先述の土砂流動のリスク評価の場合とは異なり、リスク指標が空間分布として表現されているため、固有直交分解 (POD: Proper Orthogonal Decomposition) を用いて空間モードを利用して代理モデルを構築した。POD を用いることで、解析結果である空間分布から主要な空間モードを抜き出すことが可能であり、各ケースの解析結果である空間分布は、空間モードの

線形結合として表現可能である。さらに、その線形結合の係数 (POD 係数) と数値解析で変化させた入力パラメータ (ここでは発生区的位置座標) を関連付けることで、代理モデルが構築される。図-16 は、数値解析の結果と代理モデルの結果の比較を示したものであり、定性的には代理モデルは数値解析とほぼ遜色のない精度で衝撃力分布図を出力できていることが理解できる。また、定量的に数値解析と代理モデルの結果の比較を行ったところ、大きくても 1 割程度の差であることを確認している。

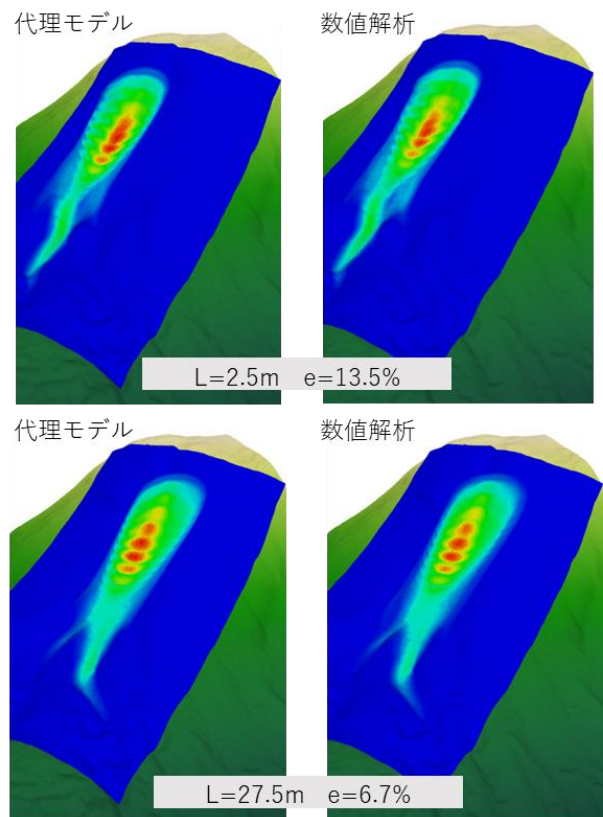


図-16 数値解析と代理モデルの結果の比較

先述のように、代理モデルは非常に低い計算コストで結果の出力が可能であり、この雪崩に関する代理モデルも計算時間をほとんど必要としない。そのため、土砂流動の場合と同じく、モンテカルロシミュレーションが可能となる。ここでは、雪崩の発生区を変化させたモンテカルロシミュレーションを実施した。なお、数値解析では 10 種類の発生区的位置のみについて結果が得られているが、代理モデルでは当然ながら変化させた範囲の中で

任意に位置を設定して解を出力することができる。雪崩の発生区の位置については、その予測が非常に難しいことを考慮して、その位置に対して均一な発生確率を仮定した。この条件で、試行回数 10000 回のモンテカルロシミュレーションを実施し、斜面上の各点における衝撃力の確率密度関数を出力した。また、その結果に基づいて、死傷する可能性がある衝撃力に対して各点でその確率を計算することができる。図-16 は、出力結果の例であり、20%以上の確率で死傷する可能性がある範囲を色付けしている。ここで示した結果は、数値解析で変化させた条件の範囲内で雪崩が発生した場合に、死傷する可能性がある範囲を示したものであるため、条件付確率であり、その確率自体は物理的な意味をそれほど強くはもたないが、斜面上で相対的に危険と判断される領域を相対的に評価できる。そのため、このようなアプローチで、より多くの不確実性を考慮することで、雪崩の防災対策などに貢献できるものと考えられる。



図-16 雪崩の確率論的リスク評価の出力例

最後に、計算資源の利用率について説明する。利用している計算機は京都大学・学術情報メディアセンターの Cray XC40 (Camphor2: Xeon Phi KNL 68cores/node) であり、通年利用可能な計算資源 (250,560 ノード時間) の利用率は 74.28%, 集中利用 (128 ノード x 3 週間) の利用率は 99.86%であった。

## 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

土砂流動と雪崩の2つの実災害を対象として、不確実性を考慮した複数ケースの大規模数値解析を実施するとともに、その結果に基づいて代理モデルを構築し、さらにその代理モデルを用いた確率論的リスク評価の具体例を示した。今後の防災事業の中では、数値解析の役割が増々重要なものとなると予想される中で、工学的に重要な情報が蓄積されるとともに、計算コストの高い数値解析の代理モデルの活用によって確率論的リスク評価を現実的に実施できる可能性を示すことができた。ただし、本研究で考慮した不確実性は現象に含まれるすべてのものを対象としたものではなく、考慮できている範囲は限定的である。大規模数値解析に基づく災害のリスク評価をより効果的なものとするためには、各災害に含まれる不確実性の影響をより効果的に反映する手法や考え方の議論が必要である。

## 7. 研究業績一覧

### (1) 学術論文 (査読あり)

- 永野浩大, 鳥生大祐, 牛島省, 吸水性粒子の間隙における自由液面流れの数値解析手法, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 76 巻 2 号, pp. I\_109-I\_117, 2020.
- 九鬼愛夢, 鳥生大祐, 牛島省, 有限体積法による高粘性ニュートン流体の容器充填の数値計算, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 76 巻 2 号, pp. I\_131-I\_141, 2020.
- 藤井孟大, 浅井光輝, 井元佑介, '物理速度と輸送速度を区別した選択型デュアル流速 ISPH 法を用いた混相流解析', 土木学会論文集 A2 (76-2), pp. I\_247 - I\_257, 2020
- D.S. Morikawa, H. Senadheera, M. Asai, 'Explicit Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics in a multi-GPU environment for large scale simulations', Computational Particle Mechanics, 2020  
<https://doi.org/10.1007/s40571-020-00347-0>

- L. Yi, M. Asai, B. Chandra, M. Isshiki, 'Energy-tracking impulse method for particle-discretized rigid-body simulations with frictional contact', Journal of Computational Particle Mechanics (8), pp. 237 - 258, 2021
- Mitsuteru Asai, Yi Li, Bodhinanda Chandra, Shinsuke Takase, 'Fluid-rigid body interaction simulations and validations using a coupled stabilized ISPH-DEM incorporated with the energy tracking impulse method for multiple body contacts', Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, Vol.377, 113681, 2021

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)  
なし

(3) 国際会議発表 (査読なし)

- J. Ohno, D. Toriu, S. Ushijima, Computations of two phase flows consisting of Newtonian and Bingham fluids between multiple static solid objects, The 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE2020), December, 2020.
- Daniel S. Morikawa, Mitsuteru Asai, Non-Newtonian fluid simulation using a particle method for landslide simulations, 14th WCCM, January, 2021.

(4) 国内会議発表 (査読なし)

- 大野絢平, 鳥生大祐, 牛島省, 多数の静止固体間を流れるニュートンおよびビンガム流体から構成される 2 流体の数値計算, 第 23 回土木学会応用力学シンポジウム, 2020 年 5 月, オンライン開催.
- 山口裕矢, 飛弾野壮真, 高瀬慎介, 森口周二, 金子賢治, 寺田賢二郎, 固液混合 MPM を用いた地盤構造物のマルチステ

ージ浸透破壊解析, 第 23 回土木学会応用力学シンポジウム, 2020 年 5 月, オンライン開催.

- 飛弾野壮真, 山口裕矢, 高瀬慎介, 森口周二, 金子賢治, 寺田賢二郎, 固液混合 MPM による地盤の浸透破壊解析, 第 74 回土木学会全国大会, 2020 年 9 月, オンライン開催.
- 藤井孟大, 浅井光輝, 井元佑介, '物理速度と輸送速度を区別した選択型デュアル流速 ISPH 法を用いた混相流解析', 第 23 回応用力学シンポジウム, 2020 年 5 月

(5) 公開したライブラリなど

なし

(6) その他(特許, プレスリリース, 著書等)

なし