

2021年度共同利用研究報告書

2021年12月15日

所属・職名 愛媛大学大学院理工学研究科・准教授

松浦 一雄

		整理番号	20210015
1.研究計画題目	クラスタリング技術を用いた土砂災害シミュレーションの高度化		
2.新規・継続	新規		
3.種別	プロジェクト研究		
4.種目	短期共同研究		
5.研究代表者	氏名	松浦 一雄	
	所属 部局名	愛媛大学大学院理工学研究科	職名 准教授
6.研究実施期間	2021年08月30日(月曜日)～2021年08月31日(火曜日)		
7.キーワード	防災科学, 機械学習, 流体力学, 数値計算		
8.参加者人数	9人		

9.本研究で得られた成果の概要

日本は、約70%を山地や丘陵が占める一方で、国土面積が狭いため山の斜面は急峻で、崩れやすいという特徴がある。山の水源から流出する川の流れも急なため、川の氾濫も発生しやすい。また、気候変動に伴う豪雨が土砂災害の危険性を助長している。本研究では、土砂災害シミュレーションを実施し、土砂災害被害の抑制法について研究することが目的である。これまでも土砂災害のシミュレーションは行われてきたが、土砂災害で押し流される物体は球や円柱といった簡易形状と仮定するなど必ずしも現実に即した形状のものではなかった。そこで、現実に即した土壌構成、樹木分布や含水量を考慮した3次元山地モデルデータの構築およびそれを用いたシミュレーションにより土砂崩れの発生や下流への拡大条件について考える。特に、枝状構造を持つ樹木、根および石などの実環境構成要素を、解像し得る限り現実的な形状、質量および強度を持つ破断・分解可能な点群モデルとして統一的に考慮し、オイラー的、ラグランジュ的あるいは両者の立場による流動計算に組み入れ、two-way couplingによる流動と点群モデルとの連成流動シミュレーションの実現を目指す。このような計算を実現することにより、災害の発生条件やリスク（ハザードマップ情報）をより精緻化することが可能になると同時に、より個別の状況に即した災害予測が可能になると期待される。

本年度は、土砂災害シミュレーションの現状および、上述の実環境構成要素を「発展成長の結果であるクラスタ」として表すための成長モデルについて、特に根成長モデルに焦点を当てて文献調査した。また、この根システムのクラスタ群との相互作用を組み入れたSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法のプログラムを開発し、土壌の性質など様々な影響因子の取り込みに見通しを得た。

■ 本研究の目的と成果概要

日本は、約 70%を山地や丘陵が占める一方で、国土面積が狭いため山の斜面は急峻で、崩れやすいという特徴がある。山の水源から流出する川の流れも急なため、川の氾濫も発生しやすい。また、気候変動に伴う豪雨が土砂災害の危険性を助長している。本研究では、土砂災害シミュレーションを実施し、土砂災害被害の抑制法について研究することが目的である。これまでも土砂災害のシミュレーションは行われてきたが、土砂災害で押し流される物体は球や円柱といった簡易形状と仮定するなど必ずしも現実に即した形状のものではなかった。そこで、現実に即した土壌構成、樹木分布や含水量を考慮した 3次元山地モデルデータの構築およびそれを用いたシミュレーションにより土砂崩れの発生や下流への拡大条件について考える。特に、枝状構造を持つ樹木、根および石などの実環境構成要素を、解像し得る限り現実的な形状、質量および強度を持つ破断・分解可能な点群モデルとして統一的に考慮し、オイラー的、ラグランジュ的あるいは両者の立場による流動計算に組み入れ、two-way coupling による流動と点群モデルとの連成流動シミュレーションの実現を目指す。このような計算を実現することにより、災害の発生条件やリスク（ハザードマップ情報）をより精緻化することが可能になると同時に、より個別の状況に即した災害予測が可能になると期待される。

本年度は、土砂災害シミュレーションの現状および、上述の実環境構成要素を「発展成長の結果であるクラスタ」として表すための成長モデルについて、特に根成長モデルに焦点を当てて文献調査した。また、この根システムのクラスタ群との相互作用を組み入れた SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法のプログラムを開発し、土壌の性質など様々な影響因子の取り込みに見通しを得た。

■ 土砂災害シミュレーション概観¹⁻³⁰⁾

土砂災害には斜面崩壊、地すべり、土石流、切土や盛土の崩壊、岩盤崩壊や落石などがあり、それぞれ形態やメカニズムが異なる。通常、土砂災害シミュレーションはこれらを斜面崩壊(斜面不安定性)および崩壊後の流動のように、土壌の移動変位のオーダーの違いから、両者を切り離して解析する。

特に、斜面安定解析では、分割法が広く用いられる。この方法では、すべり土塊を n 個のスライスに分割して、各スライスを剛体と仮定した上で、各スライスにおけるつり合い条件と破壊条件および静定化条件を用いて、安全率を評価する。分割法は、土塊の表面が直線でない斜面、複雑な地層構造をもつ斜面、内部摩擦角がゼロではない斜面にも適用できるため、最も多く利用されてきた [10]。

崩壊後の流動では、土砂流れの現象やレオロジー特性に加え、環境条件や運動の開始条件を考慮したモデリングを行う必要がある。特に土砂流れでは、ダイラタンシー、流動化、粒子分離、混合および土壌に含まれる水の飽和・不飽和が重要因子となる。レオロジー特性については、せん断応力の構成方程式に基づいて、ビンガム塑性流体、ダイラタントや擬塑性、レオペクシーやチキソトロピーの考慮がなされてきた。

数値シミュレーションでは、有限要素法(FEM, Finite Element Method), SPH, DEM(Discrete Element Method), ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian Method), FEMLIP(Finite Element Method with Lagrangian Integration), MPM(Material Point Method)などが用いられている。中でも特に、SPH 法は大変形を伴う固気液を統一的に扱える手法であり、土砂災害シミュレーションにも広く用いられている。例えば、Nonoyama らは、SPH 法を斜面安定性解析に適用した。まず、弾性および弾塑性材料の単純せん断試験を実施し、SPH 法の結果を理論解と比較し良好な結果を得た[27]。次に、SPH 法を斜面安定性解析に適用した。SPH 法の結果と Fellenius 法により得られる安全率を比較し、従来法と同様な傾向が得られると報告している。この研究では、Drucker-Prager モデル、オリジナルおよび修正 Cam-clay モデルなど計 3 種類の弾性・弾塑性の性質を有する地質材料や応力破壊条件などが考慮されている。

本研究では、植物が根を張ることによる土壌強化に注目し、根成長モデルを SPH 法と組み合わせる手法の開発を行った。

■ 成長モデル

実環境構成要素の多くは、自然現象の結果として形成されてきたものや人が基本的な部品を組み立てて作ったものである。一般的に、いずれも複雑な形状をしており、簡単な数式で表すことは困難である。そこで、土砂災害シミュレーションを行うにあたり、実環境構成要素を点群として（謂わばメソモデルとして）表すこととし、自然界の法則を模擬した成長モデルにより実環境構成要素を作る。

植物にとって根は、その植物全体の中で、土壌の中にある半分に相当する。しかしながら、根成長モデル（より広範には成長モデル）は樹木成長モデルとも共通する数理モデルであるので、植物全体の構造を再現する上で、統一的なモデルでもある。

✓ 根成長モデル³¹⁻³⁹⁾

根の成長に関する数値シミュレーションは、作物栽培学において、根が栄養や水を吸い上げる機構の研究や根システム構造の定量的な 3 次元動的モデルとして発展してきた。

Pages および Kervella は、根システムの形成を考慮したシミュレーションを提案した[31]。茎に接続する根の枝は階層 1、これに接続する枝は階層 2 とする根の階層性を導入し、根システムの成長や発達を議論した。シュートから発生する新たな根軸、既存の根軸の成長および分岐を導入した。Jones et al. は根の成長に影響を及ぼす、土壌の性質や作物の特色を考慮する計算モデルを提案した[32]。Clausnitzer および Hopmans は、根成長および土壌水流れに関する過渡挙動の 3 次元数値モデルを提案した[33]。本モデルは、土壌水流れについては、FEM により 3 次元の土壌水ヘッドに対する Richards 方程式を解き、根成長については根先端が時々刻々と成長する発展方程式を解いている。このモデルでは、蒸散や根による水吸上げの考慮の有無に関して、3 段階のモデル階層に分けて構築した。Chikushi および Hirota は、根による水吸い上げを評価する上で重要な根分布、2 次元ポテンシャル場における根成長を、放電と根成長との類似性に基づいてシミュレーションできる、誘電破壊モデル(Dielectric Breakdown Model)モデルを発表した[34]。Wilderotter は、単一の根の局所的な影響を再現しつつも根全体の水吸い上げの計算を行える、根成長を伴ったリチャード方程式に対するアダプティブ有限要素法を提案している[35]。Leitner らは、L-System に基づく動的な根成長モデルを提案し、ポット試験におけるトウモロコシによるリン酸塩摂取についてシミュレーションを行い、重力屈性や化学的指向性の影響を示した[36]。不飽和土壌の水流をモデル化するために一般的に使用される Richards 方程式は、非線形性が強いいため、実問題で意味のある状況を解析的に解くことは非常に困難である。この方程式に現実的な形の根の水分摂取率を含めると、正確な解を導き出す際に複雑さが増す。Broadbridge らは、土壌水分量に非線形に依存する吸い込み項を持つ Richards の解析解を初めて示した。彼らはこれらの解を、デカルト座標を使用して灌漑溝に適用し、円筒座標で円盤からの灌漑に適用した[37]。Katuri らは、運動論的な根成長モデルに基づく非線形 1 階常微分方程式を構築した[38]。Ciszak らは、トウモロコシの根成長を対象として、ある根が近くの根と影響を及ぼし合うことで生じる群行動を調べた[39]。この中で、ランダム成長モデルおよび近くの根との相互作用を考慮する非ランダムモデルを構築した。

✓ 根による土壌強化⁴⁰⁻⁵⁰⁾

土の破壊基準(Mohr-Coulomb の破壊基準)に対する根の影響や斜面崩壊に対して報告がなされている。例えば、文献[48]では、根補強(Root Reinforcement)による斜面安定性に関して、標準的な陰的有限要素法および個別要素法を行い、三次元直接的せん断試験に関する数値シミュレーションを行った。低凝集度の均質土壌、36本の直線的、非分岐で細い根モデルを3つの平行線状に植え込んだ。

■ 根成長モデル-SPH 法ハイブリッド手法の開発

これまでの文献調査の結果、根成長モデル(複雑な根ネットワーク形成)と SPH 法の連成については研究報告がなされていないようである。この根システムのクラスタ群との相互作用を組み入れた SPH 法のプログラムを開発し、土壌の性質など様々な影響因子の取り込みに見通しを得た。

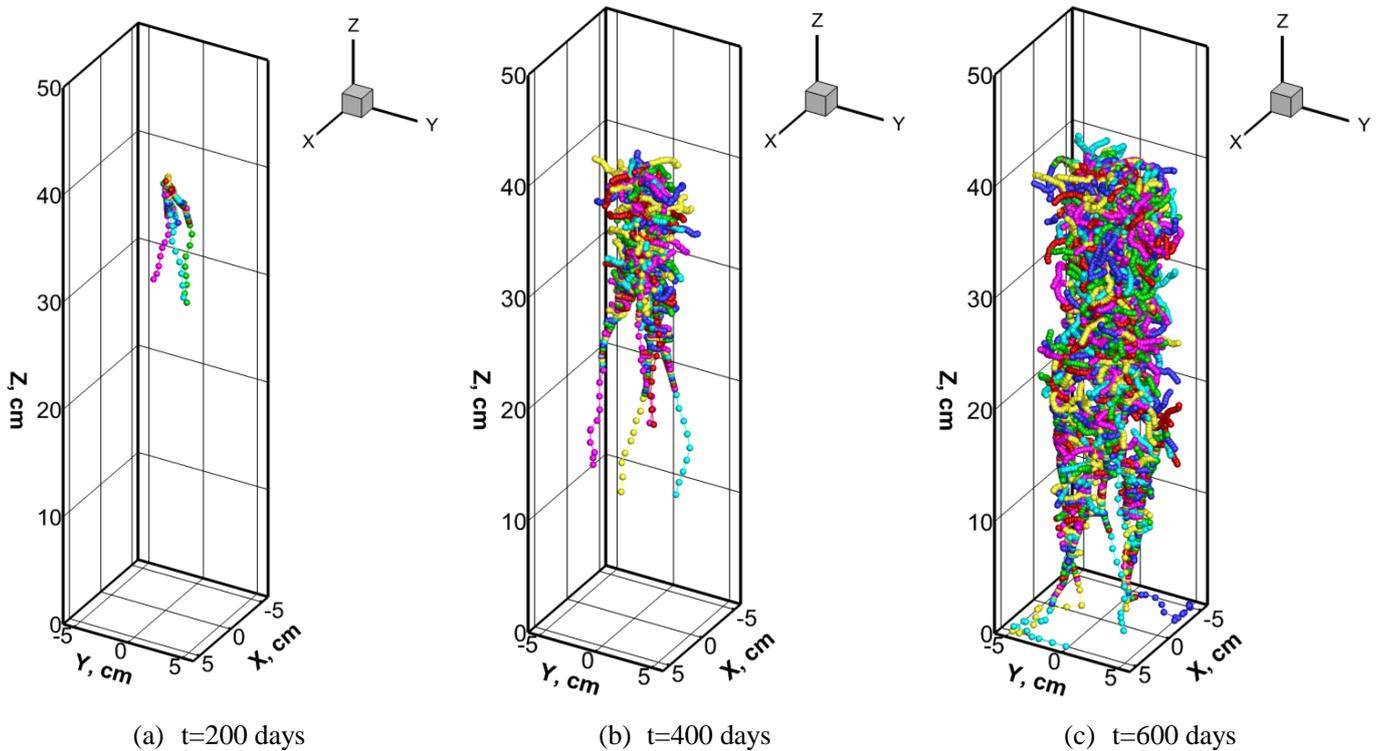


Fig. 1 Root growth (from $z=40$ mm to $z=0$ mm) for $t=200$, 400 and 600 days. Different color shows different connected paths, i.e., cluster elements, in the root system. Some different paths are shown in a same color due to the limitation of the colors.

図 1 に、文献[33]の手法によって得られた根成長および、その結果のクラスタリング (2020 年度の IMI 短期共同研究で開発された乱流渦クラスタリング技術⁵¹⁾) を行い分岐無しの連結経路を別々の色で表示した結果を示す。各連結経路が個別のクラスタ要素として扱えるようになったことで、今後、根の分離・破断やそれら破片(新たに生成されたクラスタ)が斜面安定性および崩壊後流動に影響を評価することが可能になると期待される。

■ 参考文献

✓ 土砂災害シミュレーション

[書籍]

1. W. F. Chen, E. Mizuno, "Nonlinear Analysis in Soil Mechanics—Theory and Implementation," *Developments in Geotechnical Engineering*, 53, Elsevier (1990).
2. G. Lorenzini, N. Mazza, "Debris Flow, Phenomenology and Rheological Modelling," WIT Press (2004).
3. G. R. Liu, M. B. Liu, "Smoothed Particle Hydrodynamics – a meshfree particle methods," World Scientific (2009).
4. T. Zhao, "Coupled DEM-CFD Analyses of Landslide-Induced Debris Flows," Springer (2017).
5. T. Takahashi, "Debris Flow, Mechanics, Prediction and Countermeasures, 2nd ed.," CRC Press (2019).
6. 社団法人地盤工学会, 「斜面の安定・変形解析入門」(2006).
7. 社団法人日本地すべり学会編, 「対策工の合理的な設計に向けて 有限要素法による地すべり解析」(2006).
8. 小松利光監修, 山本晃一編集, 財団法人河川環境管理財団企画, 「流木と災害」(2009).
9. 酒井幹夫編著, 「粉体の数値シミュレーション」, 丸善出版(2012).
10. 石原研而, 「土質力学, 第3版」, 丸善(2018).

[論文]

11. J. J. Mojon, "Groundwater Seepage Vectors and the Potential for Hillslope Failure and Debris Flow Mobilization," *Water Resources Research*, 22(11), pp. 1543-1548 (1986).
12. K. Hutter, B. Svendsen, D. Rickenmann, "Debris Flow Modeling: A Review," *Continuum Mech. Thermodyn.* 8, pp. 1-35 (1996).
13. C. D. Jan, H.W. Shen, "Review Dynamic Modeling of Debris Flows." In: Armanini A., Michiue M. (eds) *Recent Developments on Debris Flows. Lecture Notes in Earth Sciences*, 64. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/BFb0117764> (1997).
14. R. P. Denlinger, R. M. Iverson, "Flow of Variably Fluidized Granular Masses across Three-dimensional Terrain 2. Numerical Predictions and Experimental Tests," *J. GeoPhys. Res.*, 106(B1), pp. 553-566 (2001).
15. F. Laouafa, F. Darve, "Modelling of Slope Failure by a Material Instability Mechanism," *Computers and Geotechnics*, 29, pp. 301-325 (2002).
16. H. Chen, G. B. Crosta, C. F. Lee, "Erosional Effects on Runout of Fast Landslides, Debris Flows and Avalanches: a Numerical Investigation," *Géotechnique*, 56(5), pp. 305-322 (2006).
17. M. Christen, J. Kowalski, P. Bartelt, "RAMMS: Numerical Simulation of Dense Snow Avalanches in Three-dimensional Terrain," *Cold Regions Science and Technology*, 63, pp. 1-14 (2010).
18. B. Turnbull, E. T. Bowman, J. N. McElwaine, "Debris flows: Experiments and Modelling," *C. R. Physique* 16, pp. 86-96 (2015).
19. I. Karantgis, P. Broadbridge, V. Lemiale, "Sloping Saturated-Unsaturated Flow with Outflow at Seepage Face," *Transp. Porous Med.*, 116, pp. 777-796 (2017).
20. Y. He, *et al.*, "On the Computational Precision of Finite Element Algorithms in Slope Stability Problems," *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 9391657, pp. 1-15 (2019).
21. R. Yuan, *et al.*, "Application of a Non-Coaxial Soil Model with an Anisotropic Yield Criterion in Tunnelling," *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 2859390, pp. 1-8 (2019).
22. S. Cuomo, "Modelling of Flowslides and Debris Avalanches in Natural and Engineered Slopes: a Review," *Geoenvironmental Disasters*, 7(1), pp. 1-25 (2020).
23. 若井明彦, 吉松弘行, 「地すべりを再現するための数値解析手法の現状」, *Landslides, Journal of the Japan Landslide Society*, 50(1), pp. 7-17 (2013).
24. 森口周二, 「土砂災害シミュレーションの現状と課題」, 19(1), pp. 1-4 (2014).

✓ SPH 法

25. V. L. Lemiale, L. Karantgis, P. Broadbridge, "Smoothed Particle Hydrodynamics Applied to the Modelling of Landslides," *Applied Mechanics and Materials* 553, pp. 1-6 (2013).
26. G. G. Pereira, P. W. Cleary, V. Lemiale, "Application of the SPH Method to Compression of Solid Materials," *Proc. of the Eleventh Int. Conf. on CFD in the Mine. and Proc. Ind.*, CSIRO, Melbourne, Australia, 7-9 Dec., pp. 1-5 (2015).
27. H. Nonoyama, *et al.*, "Slope Stability Analysis Using Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Method," *Soils and Foundations*, 55(2), pp. 458-470 (2015).
28. C. Wang, *et al.*, "Smoothed Particle Hydrodynamics Simulation of Water-Soil Mixture Flows," *J. Hydraul. Eng.*, 142(10): 04016032 (2016).
29. MA. W. Khairi, MR Rozainy, J. Ikhsan, "Smoothed Particle Hydrodynamics Simulation for Debris Flow: A Review," *Proceedings of Advanced Material, AIP Conf. Proc.* 2291, 020093-1-020093-9. K. (2020).
30. S. A. M. T. Tayebi, S. M. Tayyebi, M. Pastor, "Depth-Integrated Two-Phase Modeling of Two Real Cases: A Comparison between r.avaflow and GeoFlow-SPH Codes," *Appl. Sci.*, 11, 5751, pp. 1-19 (2021).

✓ 根成長モデル

31. L. Pagès and J. Kervella, "Growth and Development of Root Systems: Geometrical and Structural Aspects," *Acta Biotheoretica* 38, pp. 289-302 (1990).
32. C. A. Jones, *et al.*, "Simulation of Root Growth." *Modeling plant and soil systems – Agronomy Monograph*, No. 31, pp. 91-123. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin (1991).
33. V. Clausnitzer, J. W. Hopmans, "Simultaneous Modeling of Transient Three-Dimensional Root Growth and Soil Water Flow," *Plant and Soil*, 164, pp. 299-314 (1994).
34. J. Chikushi, O. Hirota, "Simulation of Root Development Based on the Dielectric Breakdown Model," *Hydrological Sciences Journal*, 43(4), pp. 549-560 (1998).
35. O. Wilderrotter, "An Adaptive Numerical Method for the Richards Equation with Root Growth," *Plant and Soil*, 251, pp. 255-267 (2003).
36. D. Leitner, *et al.*, "A Dynamic Root System Growth Model Based on L-systems, Tropisms and Coupling to Nutrient Uptake from Soil," *Plant Soil*, 332, pp. 177-192 (2010).
37. P. Broadbridge, E. Daly, J. Goard, "Exact Solutions of the Richards Equation with Nonlinear Plant-Root Extraction," *Water Resources Research*, 53, pp. 9679-9691, <https://doi.org/10.1002/2017WR021097> (2017).
38. S. R. Katuri, R. Khanna, "Kinetic Growth Model for Hairy Root Cultures," *Mathematical Biosciences and Engineering*, 16(2), pp. 553-571 (2019).
39. M. Ciszak, *et al.*, "Swarming Behavior in Plant Roots," *PLoS ONE*, 7(1), e29759, pp. 1-7 (2021).

✓ 土壌強化

40. T. Endo, "Effect of Tree Roots upon the Shear Strength of Soil," *JARQ*, 14(2), pp. 112-115 (1980).
41. C. O'Loughlin, R. R. Ziemer, "The Importance of Root Strength and Deterioration Rates upon Edaphic Stability in Steepland Forests," *Proceedings of I.U.F.R.O. Workshop P.1.07-00 Ecology of Subalpine Ecosystems as a Key to Management*. 2-3 August 1982, Corvallis, Oregon. Oregon State University, Corvallis, Oregon. p. 70-78.
42. K. Abe, R. Ziemer, "Effect of Tree Roots on a Shear Zone: Modeling Reinforced Shear Stress," *Canadian Journal of Forest Research*, 21, pp. 1012-1019 (1991).
43. J. C. Ekanayake, *et al.*, "Tree Roots and Slope Stability: A Comparison between PINUS RADIATA and KĀNUKA," *New Zealand Journal of Forestry Science*, 27(2), pp. 216-233 (1997).
44. Z. A. Li, X. Cai, "Effects and Mechanisms of Plant Roots on Slope Reinforcement and Soil Erosion Resistance: A Research Review," *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18(4), 895-904 (2007)
45. A. M. Ireson, A. P. Butler, "Modelling Plant Root System Development in Response to Soil Water Status: A Review," *Imperial/NRP_017*, pp. 1-26 (2009).
46. D. Kim, *et al.*, "Estimating Soil Reinforcement by Tree Roots using the Perpendicular Root Reinforcement Model," *Int. J. Eros. Contrl. Eng.*, 3(1), pp. 80-84 (2010).
47. F. Bourrier, *et al.*, "Discrete Modeling of Granular Soils Reinforcement by Plant Roots," *Ecological Engineering*, 61P, pp. 646-657 (2013).
48. Z. Mao, *et al.*, "Evaluation of Root Reinforcement Models using Numerical Modelling Approaches," *Plant Soil*, 381, pp.249-270 (2014).
49. H. Wang, *et al.*, "Model Test of the Reinforcement of Surface Soil by Plant Roots under the Influence of Precipitation," *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 3625053, pp. 1-12 (2018).
50. E. B. Masi, *et al.*, "Root Reinforcement in Slope Stability Models: A Review," *Geosciences*, 11, 212, pp. 1-24, <https://doi.org/10.3390/geosciences11050212> (2021).
51. 松浦一雄, 2020年度MI研究所共同研究成果報告.pdf

■ 成果発表

52. 松浦一雄, 「クラスタリング技術を用いた土砂災害シミュレーションの高度化」, IMI 共同利用・短期共同研究(プロジェクト研究) 公開講演会, 2021年8月30日

九州大学 IMI 共同利用・短期共同研究 公開講演会

クラスタリング技術を用いた土砂災害シミュレーションの高度化

Advances in Sediment Disaster Simulations using Clustering Techniques

日時： 2021年8月30日（水）13：00 ～ 14：00

場所： Zoomミーティングによるオンライン開催



13：00-13：05

開会の辞

福本 康秀（九州大学・教授）

13：05-14：00

講演者： 松浦 一雄（愛媛大学・准教授）

講演タイトル：土砂災害シミュレーションの現状および土砂モデリングに対するクラスタリング技術の応用

※研究実施期間：2021年8月30日～31日

8月31日は非公開