

粒子法と格子法を結合した土石流・流木シミュレーションの実地形への適用

(国研)森林研究・整備機構森林総合研究所：○鈴木 拓郎

1. 背景及び目的

流木災害の防止軽減を目的として効率的な施設対策を実施するためには、施設の計画地点に到達する流木量を正確に推定することが重要である。そこで、鈴木 (2022) は流木が土石流先端部に集積する流木輸送濃度式、鈴木ら (2025) は流木が底面摩擦によって停止する流木停止条件式を構築し、2次元数値シミュレーションモデルを開発した。このモデルでは、不透過堰堤の堆砂敷や溪流の拡幅部などで流体力が低下して流木が自然に停止する状態を考慮しているが、流木が絡まりログジャムを形成する過程や、透過型堰堤による直接的な物理捕捉過程は対象としていない。このようなプロセスを詳細に評価することが必要な場合は、粒子法等の3次元数値計算方法が有効である。しかし、3次元手法は計算負荷が大きいため、溪流全体を対象とすると、多大な計算リソースと時間が必要になる。そこで、溪流全体を2次元格子法で計算しつつ、必要な部分のみを3次元手法で計算する方法が有効である。ここで重要なのは2次元と3次元領域を連続的に接続することである。3次元手法には様々な手法があるが、例えば、土砂をDEMで扱う方法の場合、一般的に土砂濃度で土砂を表現する2次元領域の構成則とは基礎理論が一致せず、不連続性による問題が生じる可能性がある。一方、鈴木・堀田 (2018) は、1次元流れを対象として、鈴木・堀田 (2015) による土石流の構成則に基づいた粒子法と格子法の結合手法を提案している。この方法では、格子法、粒子法で同じEgashira et al.(1997)の構成則を用いているため、連続的に接続することが可能となっている。そこで本研究では、鈴木・堀田 (2018) の方法を3次元に適用したうえで、流木にも拡張して実地形に適用する。

2. 対象事例

平成30年7月豪雨、広島県東広島市八本松地区における不透過型堰堤の流木捕捉事例を対象とした。対象溪流では3カ所の斜面崩壊が発生して、流木が土石流とともに流下した。流木の一部は不透過型堰堤に堆積しつつ、下流のため池まで到達した。経隆ら (2019) は発生後の状況をドローンで調査し、不透過型堰堤の堆砂敷で捕捉された流木の総延長を656 mと推定した。本研究では、ドローン画像からSfMによってため池に堆積した流木の体積を推定した。間隙込みの体積を立体形状から推定したのち、一般的な間隙比0.7を考慮して、流木体積を40m³と推定した (図-1)。

まず、格子法によってこの状況を大まかに再現するための条件を調整した。3カ所の斜面崩壊の崩壊面積から、Tsunetaka et al.(2022)の式より崩壊土砂量を算出し、野々山ら (2020) の調査による近傍の林分の立木密度 (0.3 本/m²)、平均胸高直径 (16.7cm)、平均樹高 (11.2m) から流木体積を

算出した。地形データは1辺2.73mの正方形メッシュとした。3カ所の崩壊が土石流化したと仮定し、土砂濃度0.3で30秒間の矩形ハイドロを与え、土砂濃度と流木濃度は一定で供給したところ、堰堤とため池における流木堆積量の計算結果が調査結果と概ね一致した。そのため、この計算条件を用いて格子法と粒子法の結合を検討する。

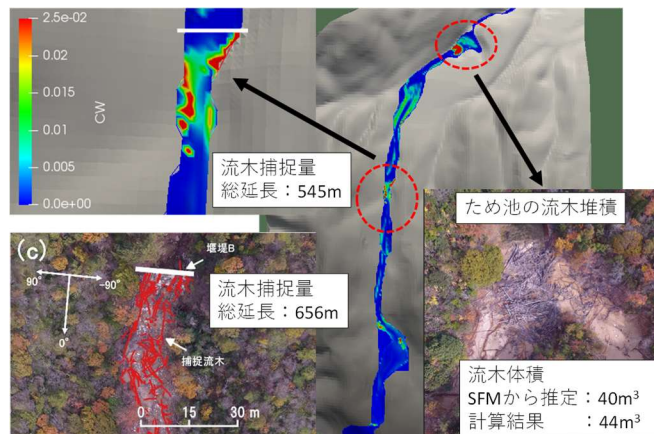


図-1 堰堤とため池における流木堆積量

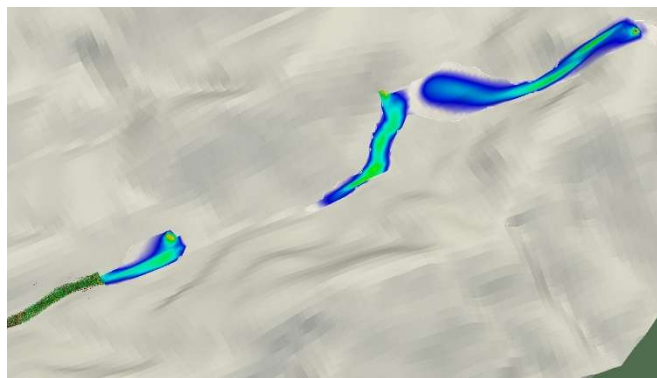


図-2 格子法と粒子法の接続外観図

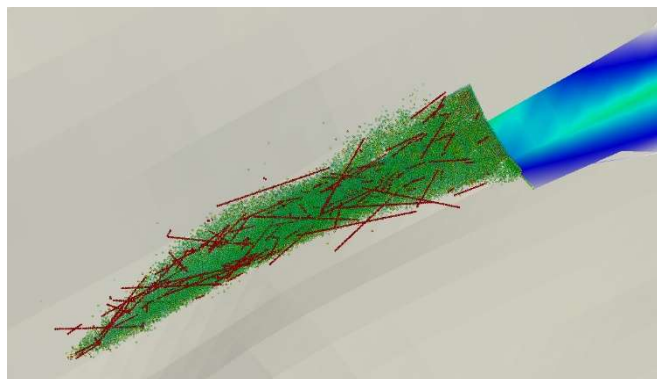


図-3 粒子法接続部における土石流と流木の投入方法

3. 格子法と粒子法の接続

鈴木・堀田 (2018) は、一次元流れにおいて、格子法と粒子法の接続点における土砂堆積に連動して壁粒子を移動さ

せていた。3次元地形では複雑な制御となるため、壁粒子は固定することとし、格子法において侵食も堆積も生じていない箇所を接続点とした。粒子法の粒子の大きさは、平均胸高直径と概ね一致するように、格子法メッシュの2.73mを16分割した大きさ($\approx 0.17\text{m}$)とした。格子法の各メッシュから接続する壁粒子に、流量、土砂濃度、流木濃度を受け渡した。流量と流木濃度によって流木体積を算出し、投入する流木体積を一致させるように投入した。流木粒子は、土石流粒子と投入点で接触しないように、少し上方から投入した。流木の長さは堰堤上の堆積流木の長さ分布(経隆ら, 2019)を適用し、投入順は乱数を用いてランダムとした。また、比較のため、流木が途中で折れなかったと仮定した場合(全て平均樹高11.2m)の計算も実施した。流木総体積が同じになるように本数を調整した。また、同じ計算条件で、不透過堰堤を透過型堰堤に置き換えた場合も計算した。

4. 結果

格子法と粒子法の接続部分において異常な土砂堆積などは生じることなく、連続的に接続されていた。格子法と粒子法で同じ基礎モデルを用いることが重要であるといえる。不透過型堰堤における流木の堆積状況について、調査結果と同様の流木長分布を与えた場合と一律11.2m量を与えた場合の結果をそれぞれ図-4, 5に示す。不透過型堰堤での捕捉流木体積はそれぞれ11.9, 23.0 m^3 であった。なお、格子法のみで計算した場合の捕捉流木体積は12.0 m^3 であった。格子法においては、流木の停止条件は流木の直径に依存するが、長さには依存しないため、流木長分布によらず同じ計算結果になる。透過型堰堤の結果は図-6, 7に示し、捕捉流木体積はそれぞれ31.7, 92.5 m^3 であった。

5. 考察

調査結果と同様の流木長分布を与えれば、格子法と粒子法は同等の結果が得られることが分かった。これは、格子法における停止条件式において、流木の停止角度を調査結果の平均角度35度を用いているからである。格子法で得られる結果は平均的な条件の結果となる。流木長が大きいと、両岸への引っ掛けりなどの停止条件式では考慮していない停止過程が多くなるため、堆積量が増加した。また、透過型堰堤による結果では、流木長の影響はより顕著に生じていた。不透過型堰堤に比べて流木捕捉量が大きくなるが、一律11.2mの場合はほぼ全ての流木を捕捉した。ただし、流木要素が大きいと透過型部分を閉塞できず、土砂が時間の経過とともに抜けてしまったことには課題が残る(巨礫を再現していないため)。以上より、流木長分布の変化を考慮した解析が必要な箇所では粒子法を用いることが有効である。

6. 謝辞

本研究は、本研究はJSPS科研費JP23K03511の助成を受けたものです。ここに記して感謝申し上げます。

7. 引用文献

Egashira et al.(1997), Proc. 1st International Conference on Debris-Flow

Hazards Mitigation, ASCE, pp. 340-349

野々山ら(2020): 水利科学, 64(2): 21-42

鈴木(2022): 関東森林研究第73巻, p109-112

鈴木・堀田(2015): 砂防学会誌, 68(1): 13-24

鈴木・堀田(2018): 砂防学会誌, 71(2): 13-21,

鈴木ら(2025): 関東森林研究第76巻, (印刷中)

経隆ら(2019): 砂防学会研究発表会概要集

Tsunetaka et al. (2022): ESPL, 47(4): 3332-3347

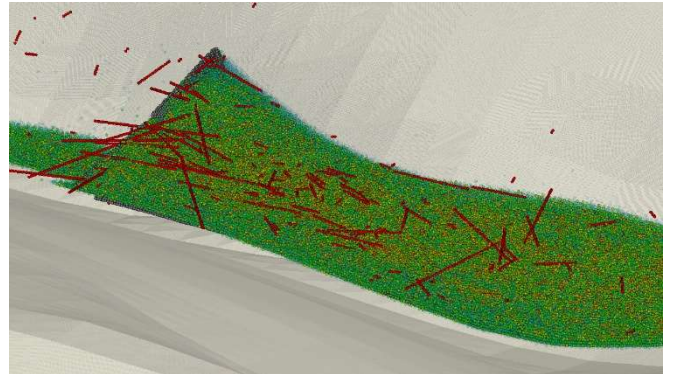


図-4 調査結果と同様の流木長分布(不透過型)

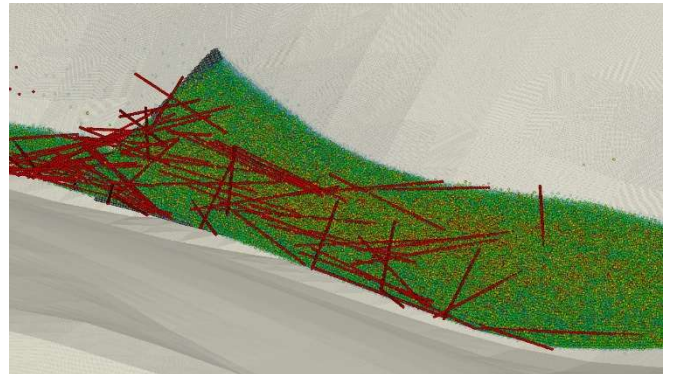


図-5 一律11.2mの流木長(不透過型堰堤)

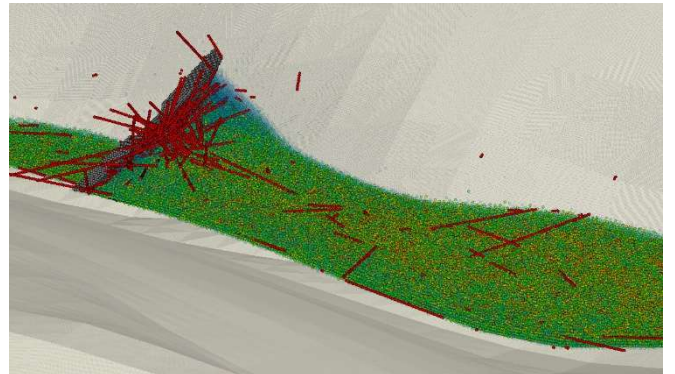


図-6 調査結果と同様の流木長分布(透過型)

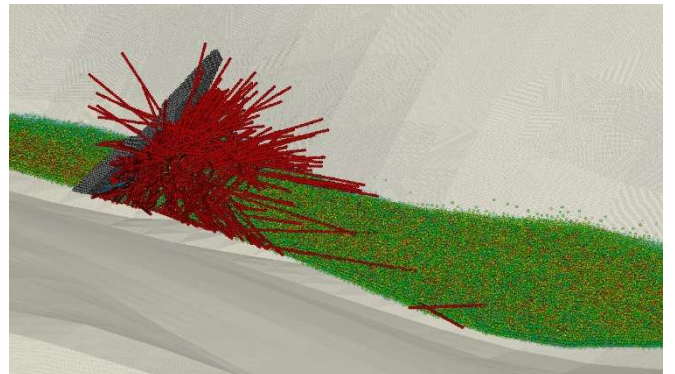


図-7 一律11.2mの流木長(透過型)