

土石流の数値シミュレーションにおける物理量の空間平均化が解析精度に及ぼす影響

(国研)森林研究・整備機構森林総合研究所: ○鈴木 拓郎, 経隆 悠

1. 背景及び目的

土石流の数値シミュレーションは一般に浅水流方程式に基づいた方法が用いられている。一方、鈴木・堀田 (2015) は、粒子法 (MPS 法) に基づいた土石流の数値シミュレーション手法を構築し、土石流の侵食・堆積過程を従来の方法より高精度に再現可能であることを示している。これは、浅水流方程式において土石流の垂直方向の流速あるいは濃度分布が積分・平均化されているからであると考えられる。

このように物理量の空間平均化は数値シミュレーションの解析精度に影響を及ぼすと考えられるが、粒子法においても空間平均化に関わる部分が存在する。例えば、任意の粒子 (以降、着目粒子と呼ぶ) の各物理量は着目粒子の影響半径 r_e に存在する粒子 (以降、近傍粒子と呼ぶ) との相互作用から重みづけ関数を用いて算出される。この算出過程自体が一種の空間平均化であり、影響範囲の大きさや重みづけ関数の違いによってもその影響は異なる。そこで、本研究では粒子法における濃度解析過程に特に着目し、横断方向の拡がりを伴う扇状地への堆積過程を対象として、物理量の空間平均化が解析精度に及ぼす影響を検討した。

2. 検討内容

(1) 濃度変化解析における影響範囲

鈴木・堀田 (2015) による解析方法では、江頭ら (1997) の垂直濃度分布式を満たすように影響範囲内の粒子間で濃度を移動させる方法をとっている。これは、垂直方向 (Z 方向) の濃度分布のみを対象としている。しかし、粒子の影響範囲は他の物理量計算と同様に半径 r_e の球としていたため、垂直方向以外 (X, Y 方向) の方向にも濃度移動が発生してしまい、濃度の空間平均化が発生していることになる。そこで本研究では、できる限り X, Y 方向の移動が生じないように、濃度解析に関わる部分のみ粒子の影響範囲を Z 方向に長い長球とした場合とこれまでの同様に半径 r_e の球とした場合の解析精度の違いを検証する。 r_e は一般的によく用いられる $2.1d$ (d は粒子間の基本距離) とし、長球の場合は垂直方向 (Z 方向) のみ $2.1d$ とし、X, Y 方向は $0.6d$ ($= \frac{2}{7}r_e$) とした。

(2) 重みづけ関数

粒子間相互作用を算出する際の重みづけ関数 (カーネル関数) は様々なものが提案されているが、圧力項の解法とセットになっている場合が多い。基本的な粒子法 (Koshizuka et al., 1998) では次式のカーネル関数が用いられている。

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1, & r < r_e \\ 0, & r \geq r_e \end{cases} \quad (1)$$

影響範囲が球の場合、 r には着目粒子 i と近傍粒子 j の粒子

間距離を適用する。影響範囲が長球 (短半径 : 長半径 = 2 : 7) の場合、 r は次式から算出される。

$$r^2 = \frac{49}{4} \left[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right] + (z_i - z_j)^2 \quad (2)$$

ここで、 x, y, z は粒子の座標の X, Y, Z 成分であり、添え字 i, j は着目粒子、近傍粒子を示す。一方、鈴木ら (2016) は計算の高速化のために陽解法を導入しているが、軽微な圧縮性を許容する陽解法では計算の安定化のために下記のように式(1)よりも鈍ったカーネル関数が用いられることが多い。

$$w(r) = \begin{cases} \left(1 - \frac{r}{r_e}\right)^4 \left(1 + \frac{4r}{r_e}\right), & r < r_e \\ 0, & r \geq r_e \end{cases} \quad (3)$$

そこで、本研究ではカーネル関数の影響を比較するために、式(1)を用いる高精度粒子法の CMPS-HS 法 (Khayyer・後藤, 2008) と式(3)を用いる陽解法の比較検証を行った。また、カーネル関数のみの影響を比較するために、式(1)を用いた陽解法でも実施した (式(1)でも計算自体は可能なため)。

(3) 計算条件の組み合わせ

粒子影響範囲の影響を比較するために、Case 1 : 陽解法 + 式(3) + 球, Case 2 : 陽解法 + 式(3) + 長球, Case 2 と合わせて重みづけ関数 (圧力解法含む) の影響を比較するために、Case 3 : 陽解法 + 式(1) + 長球, Case 4 : CMPS-HS 法 + 式(1) + 長球の 4 つの方法で計算を行った。

3. 検証対象

土石流の扇状地への氾濫堆積過程の実験結果 (Tsunetaka et al., 2022) を検証対象とした。直線水路に扇状地水路を連結させた水路を用いており、直線部の幅は 10cm, 長さは 6m, 勾配は 15° である。扇状地水路の縦断方向は 1m ごとに、 12° , 9° , 6° , 3° と勾配が変化する。横断方向は水平である。直線水路部分の下流側 5m 部分に深さ 20cm の土砂を堆積させた。土砂の平均粒径は 0.265cm で比重は 2.6 である。水路の上流端から $3,000\text{cm}^3/\text{s}$ の水を 60 秒間供給して土石流を発生させ、扇状地における堆積過程を計測した。

4. 結果

実験では、扇状地水路に流出した土石流は直線状の堆積形状で直線水路出口から約 3m 地点まで到達し、その後少しずつ流下方向を変化させながら横断方向に堆積幅が拡大していくような堆積過程となった (図-1)。

このような勾配変化点における堆積過程は従来の数値シミュレーションでは特に初期過程の直線性が再現できず、堆積形状が実際よりも横断方向に拡がり、勾配変化点で大きく堆積してしまうことが多い (Suzuki et al., 2019)。本研

究では特に初期過程の直線的な堆積形状の再現性に着目して検証するために、土石流が氾濫部に到達して 15 秒後の結果を比較した（図－2）。Case 1 の結果は実験結果に比べて土砂堆積が横断方向に大きく広がっている。横断方向への広がりには Case 2, 3, 4 の順に小さくなっていき、Case 4 は実験結果よりも少し広がり大きいものの概ね直線状の堆積形状を保っている。ただし、時間の経過とともに実験結果とのずれは少しずつ大きくなっていった。

5. 考察

Case 1 の横断方向への広がりが実験結果よりも大きくなったのは土砂濃度解析における空間平均化の影響だと考えられる。粒子法における濃度分布解析は本来垂直方向のみを対象としていて、それ以外への方向への移動は粒子の移動方向のみに支配されるべきであるが、濃度移動解析を行う粒子の影響範囲を球としているため、垂直方向以外の濃度移動が生じたからだと考えられる。そのため、垂直方向以外の影響を小さくするために粒子の影響範囲を長球とした Case 2 では横断方向への広がりが大きく改善された。ただし、陽解法でよく用いられる式(3)のカーネル関数は粒子間距離による重みづけの変化が小さい、鈍った関数であり、影響範囲を小さくしてしまったことで十分な土砂移動が起こらず侵食量が減少し、土砂の堆積量も小さくなっているように見える。そこで Case 3 は、鋭敏なカーネル関数である式(1)を用いたことで、粒子間距離の近い粒子同士の土砂移動量が大きくなり、侵食・堆積量を保ったまま横断方向への広がりには Case 1 よりも改善されている。Case 4 は Case 3 から圧力解法を CMPS-HS 法にしたもので、土砂堆積の結果はさらに改善された。CMPS-HS 法は圧力擾乱を抑えるために改良・開発された高精度陰解法であり、一方、陽解法は計算方法が簡易であるが圧力擾乱は非常に大きい。圧力擾乱は物理量の空間平均化とは関係ないと思われるため、CMPS-HS 法によって土砂堆積の結果が改善された理由は現時点で明確ではないが、陽解法の圧力擾乱による各物理

量の解の乱れが結果的に土砂堆積にも影響を及ぼした可能性がある。

6. おわりに

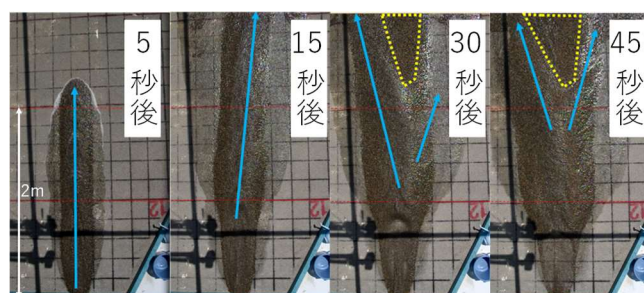
横断方向への広がりを伴う堆積過程に対しては、粒子法を単純に適用しても再現精度は高くなかったが、土砂濃度の空間平均化の影響が小さくなるように考慮することで再現精度は改善された。空間平均化や計算の安定化のための方法は再現精度とトレードオフとなる可能性があるため、適切な解法を選択することが重要である。

7. 謝辞

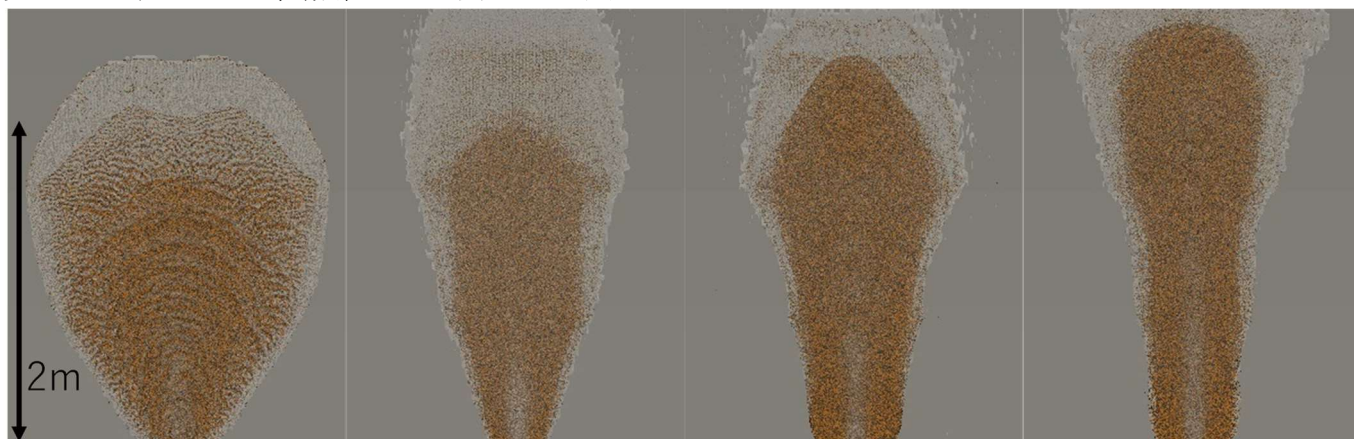
本研究は、農林水産省委託プロジェクト研究「流木災害防止・被害軽減技術の開発」JP19191196 の助成を受けたものである。ここに記して感謝申し上げます。

8. 参考文献

- 江頭ら (1997), 水工学論文集, Vol. 41, p. 789-794
 Khayyer・後藤 (2008): 海岸工学論文集, 55, p.16-20
 Koshizuka et. al. (1998): Int. J. Numer. Meth. Fluids, 26, p.751-769
 鈴木・堀田 (2015): 砂防学会誌, Vol.68, No.1, p.13-23
 鈴木ら (2016): 第 8 回土砂災害に関するシンポジウム論文集
 Suzuki et al. (2019): Seventh International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation - Proceedings 871-878
 Tsunetaka et al. (2022): Earth Surface Dynamics, 10:775-796



図－1 水路実験結果：扇状地水路における堆積過程。図中の矢印は主要な流速成分，点線内は不飽和領域を示す。



図－2 数値計算結果：各計算条件における 15 秒後の結果

（左から，Case 1：陽解法＋式(3)＋球，Case 2：陽解法＋式(3)＋長球，Case 3：陽解法＋式(1)＋長球，Case 4：CMPS-HS 法＋式(1)＋長球）