

# 粒子法と格子法の結合モデルによる土石流の侵食・堆積過程のシミュレーション

DEBRIS FLOW SIMULATION FOCUSING ON ENTRAINMENT AND DEPOSITION  
PROCESS USING A PARTICLE-GRID COUPLING METHOD

鈴木 拓郎<sup>1</sup>

Takuro SUZUKI

<sup>1</sup> (国研) 森林研究・整備機構森林総合研究所 (〒305-8687 つくば市松の里1)

E-mail: takurosuzuki@ffpri.affrc.go.jp

**Key Words:** debris flow, particle-based model, grid-based model, coupling model, entrainment, deposition

## 1. はじめに

近年, MPS法<sup>1)</sup>やSPH法<sup>2)</sup>を代表とする粒子法による流れの解析手法の応用が土砂災害分野においても進んでいる<sup>3,4,5)</sup>。著者ら<sup>6)</sup>は土石流の構成則に基づいた土石流の粒子法モデルを開発し(以下, MPS-DF法と呼ぶ), 侵食・堆積過程に適用して検討したところ, 従来の格子法に基づいた手法よりも精度の良い再現結果が得られることを示している<sup>6,7,8)</sup>。粒子法は粒子による形状の直接的再現が可能のため, 堰堤の評価や流木・巨礫の挙動解析<sup>4,5)</sup>に有効である。

しかしながら, 粒子法は計算要素数が膨大となり計算負荷が非常に大きい。そのため, アルゴリズムの効率化や並列化による高速化が試みられており<sup>8)</sup>, 工夫次第で大幅な計算効率の向上が可能であるが, それでも実現象に適用するのは困難な場合も多い。

一方, 従来幅広く用いられてきた格子法は, 粒子法に比べて格段に計算負荷が小さく, 実際の土石流災害の検討も容易に可能である。人工構造物の直接的な再現が難しいという部分もあるが, 中谷ら<sup>9)</sup>のように工夫次第で家屋・道路等の影響も評価可能であり, 格子法によっても十分な精度が得られる場合も多い。また, 鈴木・堀田<sup>10)</sup>は勾配が急変するような極端に地形が変化する条件では粒子法と格子法には差異が生じやすいが, 緩やかな地形変化条件の場合には粒子法と格子法には大きな差異は生じないことを示している。すなわち, 全ての領域に粒子法を

適用する必要はないということである。

以上のように, 全ての領域に粒子法を適用する必要がないこと, 粒子法の計算負荷が大きいことを踏まえ, 鈴木・堀田<sup>10)</sup>は粒子法と格子法を結合した土石流のシミュレーション手法(以下, PBS-GBSと呼ぶ)を開発した。そして, 一定勾配条件および格子法から粒子法の接続地点において堰堤による堆積が遡上する条件にPBS-GBSを適用し, 粒子法区間の計算精度を保ったまま, 計算時間を減少させることが可能であることを示している。

本研究では, 鈴木・堀田<sup>10)</sup>で今後の課題として残されていた2つの条件について検証・改良を行う。まず, 格子法から粒子法の接続地点において侵食が生じる条件においてPBS-GBSの適用性を検証する。さらに, 粒子法から格子法の接続地点の堆積過程において, 壁粒子位置を調整することにより堆積遡上を評価する手法を構築・検証する。これらを通じてPBS-GBSの適用条件を拡張することを目的とする。

## 2. 方法

### (1) 結合手法の概要

本研究では鈴木・堀田<sup>10)</sup>と同様に, 格子法で計算を開始し, 粒子法区間を通過後は格子法に戻る計算モデルとした。概要図を図-1に示す。図中の $dx$ は格子法における格子間隔,  $h$ ,  $z$ は水深, 河床位を示しており添え字は格子番号である。格子法から粒子

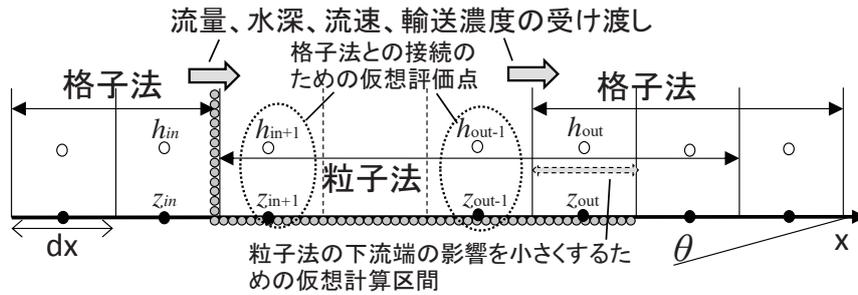


図-1 結合手法の概要<sup>10)</sup>

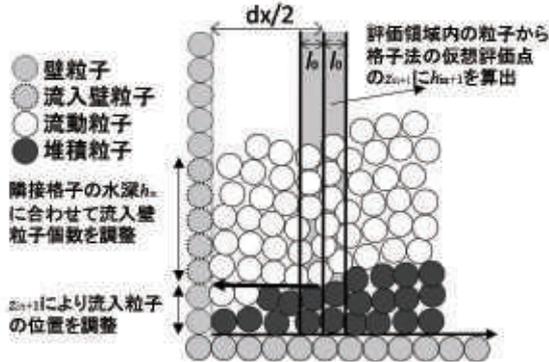


図-2 格子法と粒子法の接続部分<sup>10)</sup>

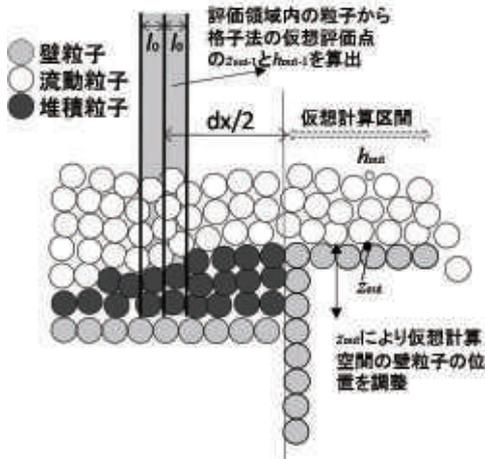


図-3 粒子法と格子法の接続部分

法への接続部分における格子法側の格子番号を in, 粒子法から格子法への接続部分における格子法側の格子番号を out とした。格子・粒子間では流量, 水深, 流速, 輸送濃度を変換して受け渡す。詳細は鈴木・堀田<sup>10)</sup>を参照されたい。本研究では, 格子法と粒子法を連結した手法 (PBS-GBS とする) と粒子法のみ (単に, PBS とする) の場合で計算を実施する。

格子法区間の計算は江頭ら<sup>11,12)</sup>の構成則に基づいた宮本・伊藤<sup>13)</sup>の抵抗則と鈴木ら<sup>14)</sup>の侵食速度式を用い, 計算安定性のため鈴木<sup>15)</sup>の侵食速度制御法における最小濃度法を適用した。粒子法区間は, MPS-DF 法<sup>6)</sup>に陽解法<sup>16)</sup>の適用および領域分割法<sup>8,17)</sup>などの計算アルゴリズムの効率化を行った鈴木ら<sup>8)</sup>の手

法を用いている。格子法, 粒子法区間はともに江頭ら<sup>16,17)</sup>の構成則に基づいた手法である。

### (2) 格子法から粒子法の接続部における侵食過程の評価方法

物理量の変換手法, 流入粒子の発生方法の詳細は鈴木・堀田<sup>10)</sup>を参照されたいが, 侵食過程を再現するために重要なのは流入位置の調整である。鈴木・堀田<sup>10)</sup>は, 接続部近傍で土砂堆積によって河床が上昇する場合に, 流入壁粒子の位置が一定であると, 堆積部分に流入粒子を発生させることになり不合理が生じるため, 流入壁粒子の位置の調整方法を提案した。図-2 のように先に算出した  $z_{in+1}$  の位置より上に流入壁粒子を設定する方法である。侵食過程にもこの方法をそのまま用いることができる。予め侵食可能な堆積粒子を粒子法領域に設定しておき,  $z_{in+1}$  の位置に応じて流入位置を設定すればよい。

### (3) 粒子法から格子法の接続部における堆積過程の評価方法

物理量の変換手法, 流入粒子の発生方法の詳細は鈴木・堀田<sup>10)</sup>を参照されたい。本研究では図-3 に示す方法により接続部における堆積遡上を再現することを試みる。この方法では, 粒子法から格子法の接続部における格子法領域の河床上昇 ( $z_{out}$  の変化) に応じて, 仮想計算区間の壁粒子の位置もそれに応じて上昇させる。壁粒子が上昇すれば, 上流側に堆積が生じて, それが遡上していくと考えられる。

## 3. 計算

### (1) 地形条件と計算領域

河床勾配が 18 度の一定勾配で斜距離 500cm の直線流路を設定した。上流端 (0cm 地点) から 250cm 地点までおよび 350cm 地点から下流端までの区間を格子法で計算し, 250cm 地点から 350cm 地点を粒子法で計算した (仮想計算区間<sup>10)</sup>は 355cm 地点まで)。

侵食過程（以下、侵食条件とする）は、上流端から300cm地点までの区間の河床を10cm低くした上で、150cm地点から300cm地点までの区間を10cmの堆積土砂で満たした。堆積土砂の上流端は傾斜をつけて河床に接続させた。粒子法と格子法の接続部は堆積土砂の下流端から50cm上流側となる。次に、堰堤による堆積過程（以下、鈴木・堀田<sup>10)</sup>の堰堤設置条件と区別するために、格子法堰堤条件とする）については、一定勾配の直線水路の365cm地点に高さ5cmの堰堤を設定した。PBS-GBSで計算する場合は格子法領域に堰堤が存在し、PBSの場合は堰堤付近の挙動は粒子法で計算する事になる。後述するように、堰堤は粒子法領域に設置するのが望ましいが、格子法から粒子法領域への堆積遡上の再現性を検証することを目的としているため、容易に堆積が生じるよう、このような設定とした。

## (2) 計算条件およびパラメータ

侵食条件は上流端から単位幅流量100cm<sup>2</sup>/sの水（土砂濃度=0.01）を供給し続けた。格子法堰堤条件は土砂濃度0.35の土石流を単位幅流量100cm<sup>2</sup>/sの条件で供給し続けた。計算パラメータを表-1に示す。供給条件以外は鈴木・堀田<sup>10)</sup>と同一の値である。

## 4. 結果

### (1) 侵食条件の結果と考察

図-7に侵食条件の結果を示す。PBSによる侵食過程の再現性は、鈴木ら<sup>6)</sup>によって確認されており、上流端から供給した水によって上流側から堆積土砂の侵食が進行している。PBS-GBSの結果もほぼ同様である。格子法と粒子法の接続部を見ると、時間の経過とともに、流入部付近の堆積土砂が侵食され、それに伴い壁粒子からの流入位置が下がっている。鈴木・堀田<sup>10)</sup>の方法が、侵食過程にも良好に適用可能であることがわかる。一方で、PBS-GBSの最後の図では、流入部付近で水粒子の乱れが発生している。これは、跳水が上流側に遡上する過程で生じたものである。格子法から粒子法区間への接続方向への流入のみ考慮しているため、逆方向のベクトル量の伝播は不可能であることに起因する。したがって、このような現象が生じない箇所に接続部を設定する必要がある。また、PBSでは跳水は生じていないことから、土砂濃度が小さい時の壁粒子の設定方法（流速分布の設定など）には、今後の検討が必要である。

図-8～図-10には下流端における流量、流砂量、体積濃度の時間変化を示している。流量は土砂の侵

食によって先頭部にピークが生じ、徐々に減少している。PBS-GBSとPBSの結果はよく一致しており、堆積土砂を徐々に侵食する過程では、格子法と粒子法の計算結果に大きな違いが生じないことがわかる。流砂量と体積土砂濃度に関しては、少し違いが生じているが、これは粒子法領域と格子法領域の輸送濃度の評価方法の違いのためであり<sup>10)</sup>、注意を要する。土石流の濃度分布は河床から表面に向かって小さくなる分布<sup>16,18)</sup>となり、粒子法領域では厳密に扱うが、格子法領域では、平均的に取り扱うからである。

図-11には計算時間を示している。30秒経過時点での計算時間はPBSはPBS-GBSの約5.27倍であり、粒子法計算領域の比と概ね等しかった。

### (2) 格子法堰堤条件の結果と考察

図-12に格子法堰堤条件の結果を示す。PBSの場合は体積濃度と輸送濃度の違いにより先頭部に濃度の小さい領域が形成されるため<sup>6)</sup>、初期過程は湛水部に土石流が流入したような堆積過程<sup>19)</sup>となっている。PBS-GBSの結果は堰堤の直上流から堆積が開始している。後半部はほぼ同様の結果となっている。格子法と粒子法の接続部を見ると、堰堤上流側が堆積により河床が上昇し、それに伴い壁粒子の位置が上昇している。それにより、堆積が上流側に遡上している。なお、壁粒子の位置を変動させない場合は、粒子法区間では土石流がそのまま通過して堆積が生じず、格子法区間の堆積が粒子法領域には遡上しなかった。つまり、本研究の改良法により、粒子法と格子法の接続部における堆積過程が再現可能となった。図-13～図-15に下流端における流量、流砂量、体積濃度の時間変化を示す。PBS-GBSとPBSの結果は先頭部において大きく異なっており、PBS-GBSでは乱れが大きいことがわかる。PBS-GBSで先端に濃度の小さい領域が形成される影響もあるが、粒子法領域に堰堤を設置した場合<sup>10)</sup>はこのような違いは生じないため、堰堤の設置領域による違いが大きい。

表-1 計算パラメータ

	侵食条件	格子法堰堤条件
流入土石流流量 (cm <sup>2</sup> /s)	100	100
流入土石流濃度	0.01	0.35
水の比重 $\rho_w$	1.00	1.00
砂礫の比重 $\sigma$	2.64	2.64
摩擦角 $\varphi_s$ (°)	38.5	38.5
堆積層濃度 $c_*$	0.60	0.60
反発係数 $e$	0.775	0.775
粒径 $d$ (cm)	0.294	0.294
格子法		
格子間隔 $dx$ (cm)	5.0	5.0
格子法領域の緩和時間 $T$ (s)	0.1	0.1
粒子法		
粒子間距離 $l_0$ (cm)	0.25	0.25
クラン数 $C_u$	0.05	0.05
緩和時間の係数 $K_{co}$	5.0	5.0

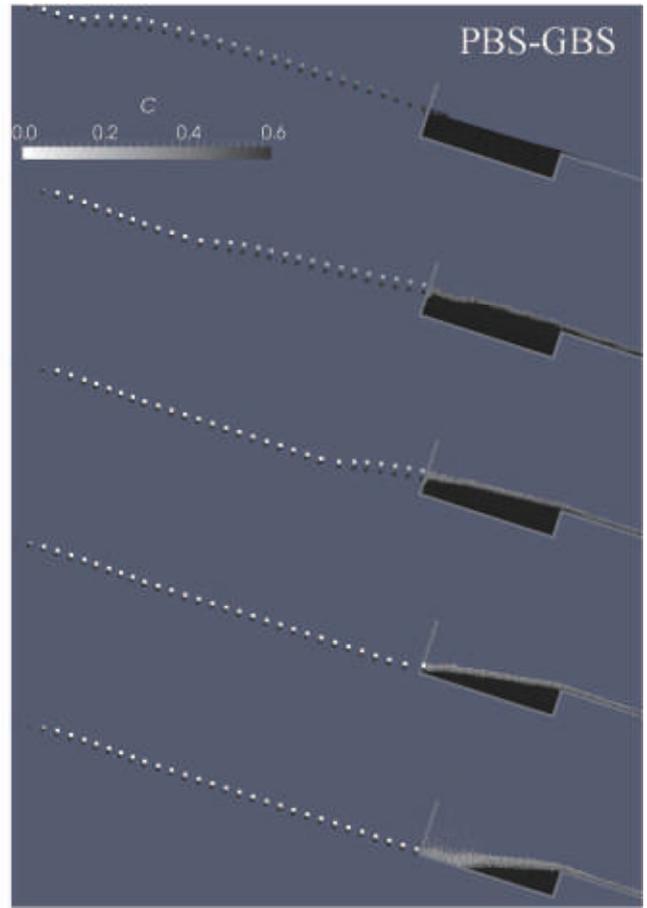
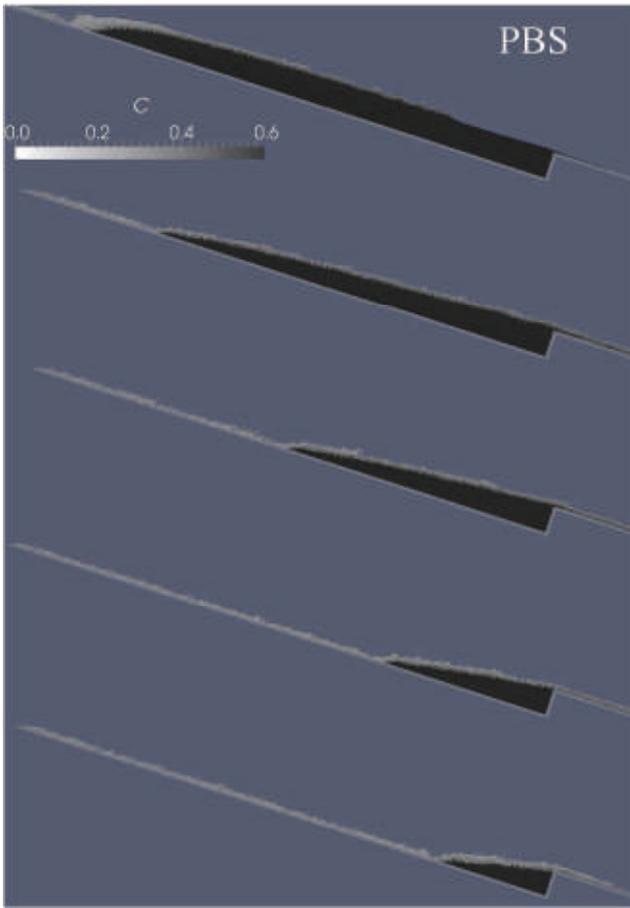


図-7 侵食条件の結果。左側はPBS，右側はPBS-GBSの結果で，6.67秒毎の結果を示している。四角プロットは格子法の結果，丸プロットは粒子法の結果を示し，色の濃淡は土砂濃度を表している。

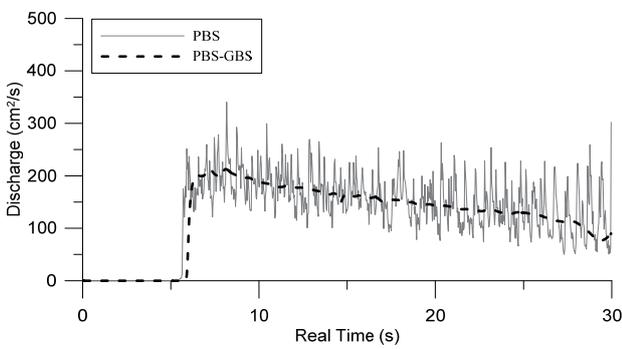


図-8 侵食条件の下流端における流量

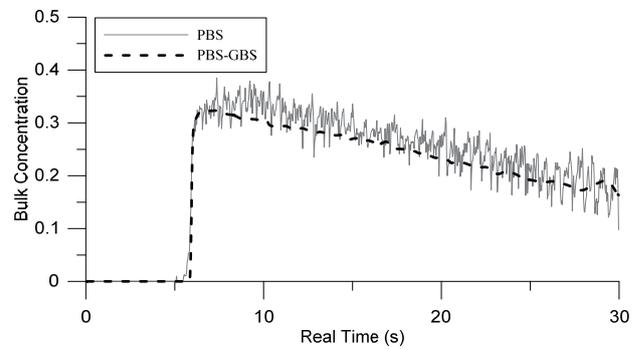


図-9 侵食条件の下流端における体積濃度

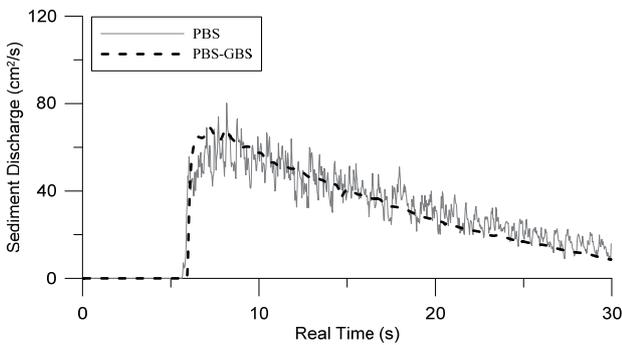


図-10 侵食条件の下流端における流砂量

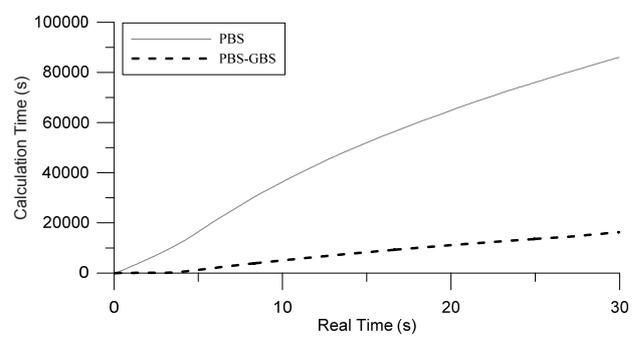


図-11 侵食条件の計算時間

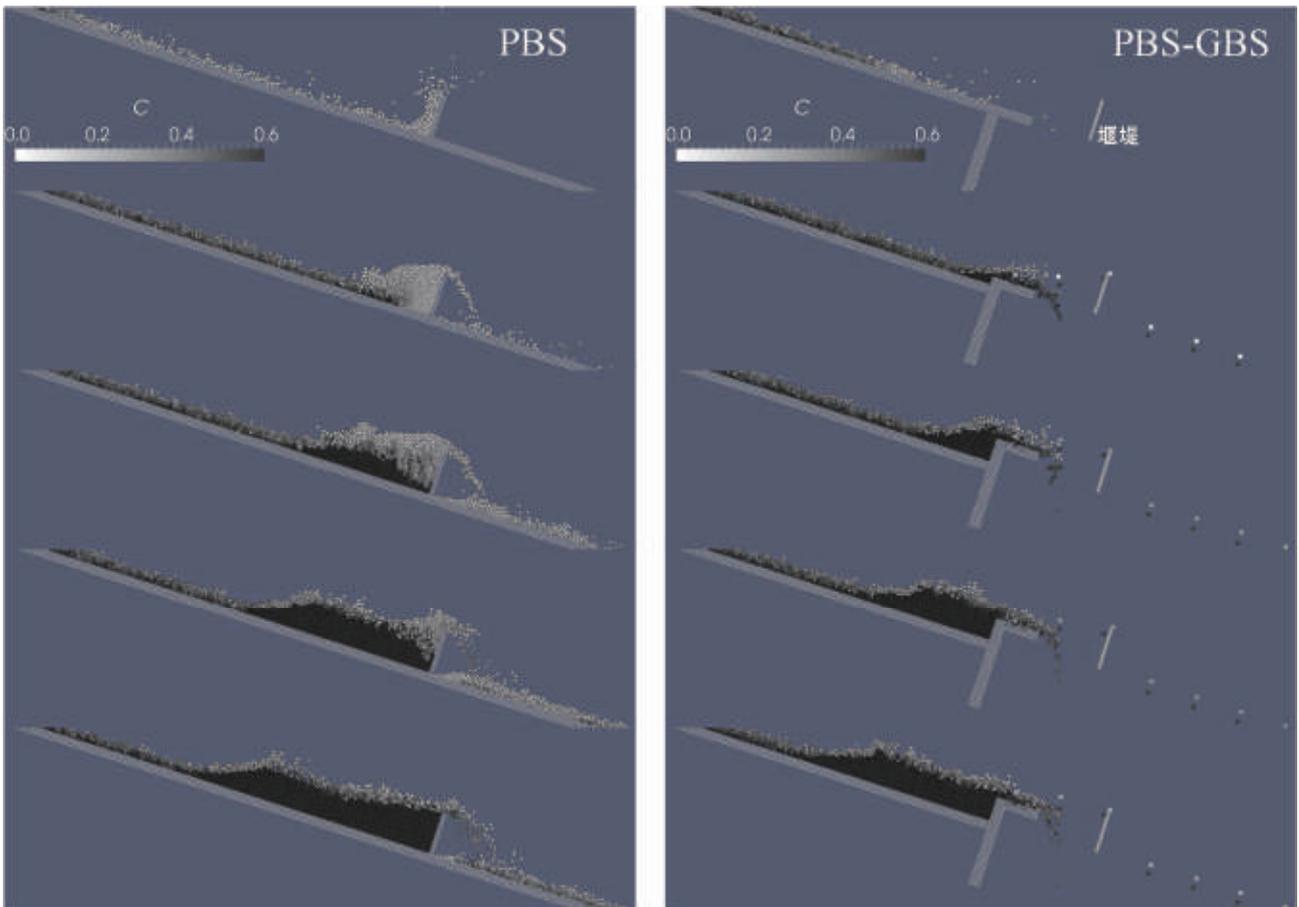


図-12 格子法堰堤条件の結果。左側はPBS, 右側はPBS-GBSの結果で, 0.67秒毎の結果を示している。四角プロットは格子法の結果, 丸プロットは粒子法の結果を示し, 色の濃淡は土砂濃度を表している。

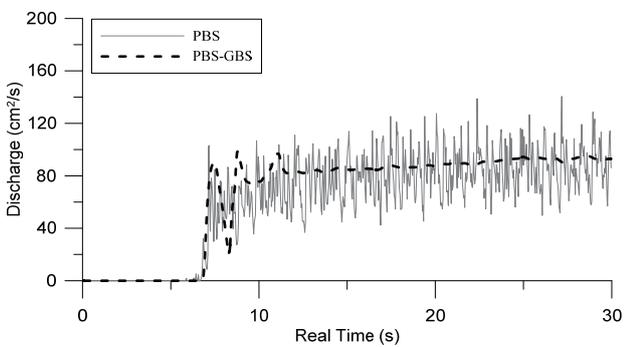


図-13 格子法堰堤条件の下流端における流量

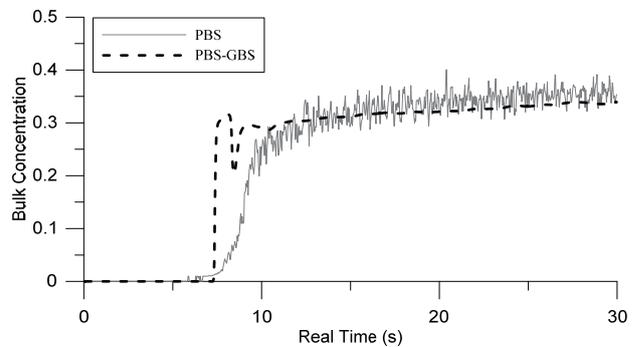


図-14 格子法堰堤条件の下流端における体積濃度

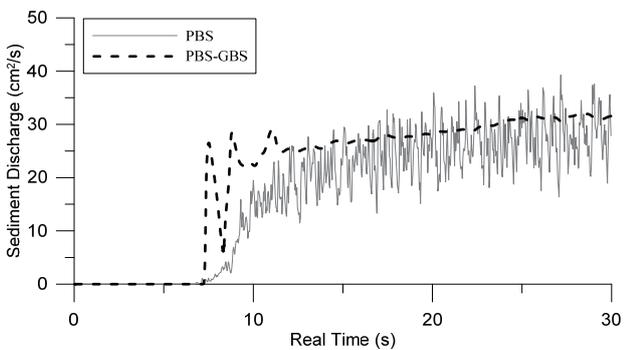


図-15 格子法堰堤条件の下流端における流砂量

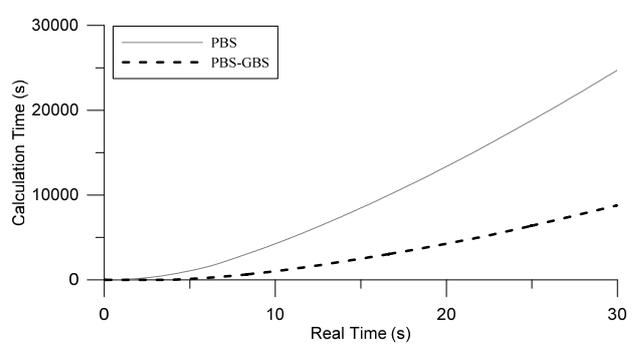


図-16 格子法堰堤条件の下流端における計算時間

図-16には計算時間を示している。30秒経過時点での計算時間はPBSはPBS-GBSの約2.81倍であり、計算時間は短縮している。粒子法計算領域の比と比較して小さいが、これは粒子法領域で堆積が生じるため、計算粒子数が多くなるからである。

## 5. 結論

本研究では、鈴木・堀田<sup>10)</sup>による粒子法と格子法を結合したシミュレーション手法について、格子法と粒子法の接続部における侵食過程に対する適用性を検証するとともに、粒子法と格子法の接続部における堆積過程の再現のための改良法を考案して検証した。前者については、既存の方法により侵食過程も再現可能であった。ただし、跳水に伴う水粒子の乱れについては今後の課題である。後者についても、改良法によって堆積過程を連続的に再現可能であることが示された。しかし、堰堤のような人工構造物を格子法領域に設定すると、粒子法の計算結果とは大きな違いが生じ、計算が不安定になる可能性がある。そのため、徐々に堆積が生じるような箇所には本手法を適用することに問題はないが、堰堤のような人工構造物は粒子法領域に設定する必要がある。

以上、輸送濃度と体積濃度の違いには注意が必要だが、PBS-GBSによって一定の精度を保ちつつ、計算時間が短縮可能である。堰堤における堆積過程の再現性自体については今後、実験的な検証を行いたい。また、粒子毎に土砂濃度と同様に含水比のパラメータを付与して計算すれば、地震時に発生するような不飽和の崩壊土砂の流動・堆積過程を再現できる可能性もあり、今後検討を進めたい。

謝辞：本研究は科研費（16K16375）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。

### 参考文献

- 1) Koshizuka, S. and Oka, Y.: Moving Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid, Nuclear Science and Engineering, Vol.123, pp.421-434, 1996.
- 2) Monaghan J. J.: An introduction to SPH, Computer Physics Communications, Volume 48, Issue 1, pp. 89-96, 1988.
- 3) 阿部孝章, 里深好文, 水山高久: 高濃度石礫流れの粒子間応力を考慮した粒子法の開発, 砂防学会誌, Vol. 63, No. 6, pp. 23-31, 2011.
- 4) 別府万寿博, 井上隆太, 石川信隆, 長谷川裕治, 水山高久: 修正 MPS 法による土石流段波モデルのシミュレーション解析, 砂防学会誌, Vol. 63, No. 6, pp. 32-42, 2011.

- 5) 大野亮一: 粒子法を使った三次元流木シミュレータ, 砂防学会誌, Vol. 69, No. 4, pp. 16-20, 2016.
- 6) 鈴木拓郎, 堀田紀文: 土石流の構成則に基づいた粒子法モデルの構築と堆積過程への適用, 砂防学会誌, Vol. 68, No. 1, pp. 13-23, 2015.
- 7) Suzuki, T. and Hotta N.: Development of Modified Particles Method for Simulation of Debris Flow Using Constitutive Equations, International Journal of Erosion Control Engineering, Vol.9 No.4, pp.165-173, 2016.
- 8) 鈴木拓郎, 堀田紀文, 岩田知之: 土石流の粒子法モデルの改良による高速化と侵食過程への適用, 第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp. 193-198, 2016.
- 9) 中谷加奈, 小杉恵, 里深好文, 水山高久: 家屋や道路が土石流の氾濫・堆積に及ぼす影響—2014年8月に発生した広島土砂災害を対象として—, 砂防学会誌, Vol. 69, No. 5, pp. 3-10, 2017.
- 10) 鈴木拓郎, 堀田紀文: 粒子法と格子法を結合した土石流シミュレーション, 砂防学会誌, Vol. 71, No. 2, pp. 13-21, 2018.
- 11) 宮本邦明, 伊藤隆郭: 支配方程式に侵食速度式を導入した場合の土石流の数値シミュレーション手法, 砂防学会誌, Vol. 55, No. 2, pp. 24-35, 2002.
- 12) 鈴木拓郎, 堀田紀文, 宮本邦明: 非連行型侵食速度式を用いた勾配・流路幅の変化点や砂防ダムにおける土石流の数値シミュレーション, 砂防学会誌, Vol. 62, No. 3, pp. 14-22, 2009.
- 13) 鈴木拓郎: 土石流の数値シミュレーションにおける侵食速度式の制御法, 砂防学会誌, Vol. 65, No. 5, pp. 21-28, 2013.
- 14) 大地雅俊, 越塚誠一, 酒井幹夫: 自由表面流れ解析のためのMPS陽的アルゴリズムの開発, 計算工学講演会論文集, 15(2), pp. 589-590, 2010.
- 15) 後藤仁志, 五十里洋行, 酒井哲郎, 奥田一弘: 粒子法とBoussinesqモデルのハイブリッド化に関する基礎的研究, 水工学論文集, Vol. 50, pp. 1453-1458, 2006.
- 16) 江頭進治, 芦田和男, 矢島啓, 高濱淳一郎: 土石流の構成則に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第32号B-2, pp. 487-501, 1989.
- 17) 江頭進治, 宮本邦明, 伊藤隆郭: 掃流砂量に関する力学的解釈, 水工学論文集, Vol. 41, pp. 784-794, 1997.
- 18) 椿東一郎, 橋本晴行, 末次忠司: 土石流における粒子間応力と流動特性, 土木学会論文報告集, 第317号, pp. 79-91, 1982.
- 19) 椿東一郎, 橋本晴行, 藤田和夫: 清水域に流入する土石流の堆積過程, 九州大学工学集報, Vol. 57, No. 2, p. 87-93, 1984.

(2018. 5. 18 受付)