

# 高濃度石礫流れ解析に適用可能な粒子法の開発

寒地土木研究所 阿部孝章

立命館大学理工学部 里深好文

京都大学大学院農学研究科 水山高久

## 1. 緒言

日本は地すべり・崩壊・土石流等の土砂災害危険箇所を多数抱えている。ほぼ毎年のように尊い人命が土砂災害によって失われており、土砂災害の防止は防災・砂防の非常に重要な課題の一つとなっている。特に土石流は、一度発生するとその流動形態を変化させながら大きなエネルギーを持って長い距離を流下するため、大きな災害に結びつきやすい。そのため土石流の数値予測に関する研究はこれまで数多く行われてきた。一般に土石流は山地部の不規則な河床形状・急勾配条件下において激しい自由表面変形や河床変動を伴っている。従来手法である格子法ではこうした境界条件の複雑な変化への対応が非常に困難であり、これまで十分な計算精度が得られていなかった。

そこで本研究では、そのような特異な境界条件下においても安定した流体解析が可能な粒子法の利点に着目し、粒子法の一つである MPS 法<sup>1)</sup>をベースに高濃度石礫流れが解析可能な粒子法（以下、構成則型粒子法）を開発し、計算結果と既往の石礫流れに関する理論解析・水路実験との比較を行い、その適用性の検討を行った。

## 2. 数値解析モデルの概要

標準型の MPS 法（以下、標準型粒子法）は連続式と運動方程式である Navier-Stokes 方程式を連立させて解き、粒子挙動を連続体挙動として時間発展的に追跡を行うが、提案手法では既往の土石流研究で提案された各種の土石流・粒子流に対する構成則を考慮するため、Cauchy の運動方程式を基点として離散化を行った。非圧縮性の条件を連続式及び粒子数密度一定の条件から導くのは標準型粒子法と共通である。

椿ら<sup>2)</sup>は移動床上の土石流実験によって得られた知見を元に、粒子間衝突応力と粒子間接触応力を統合したテンソル型の土石流に対する構成則を構築しており、提案手法である構成則型粒子法の枠組みにおいて、椿らの構成則の離散化を行った。すなわち、連続式は、

$$\frac{D\rho_{\text{mix}}}{Dt} = 0$$

運動方程式は、

$$\frac{D\mathbf{u}_{\text{mix}}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_{\text{mix}}}\nabla P + \frac{1}{\rho_{\text{mix}}}\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_c + \mathbf{g} + \mathbf{F}_{bf}$$

である。但し、添え字の”mix”は本モデルが混合体モデルであることを表しており、 $P$ は混合体内部の垂直応力、 $\boldsymbol{\tau}_c$ は椿らが提案した粒子間衝突応力、 $\mathbf{F}_{bf}$ は後藤ら<sup>3)</sup>による河床面粗度項である。この項は周囲平均流速の二乗に比例する抵抗力を表し抗力係数  $C_D$  を中に入れているが、本研究では河床面条件を考慮しつつ、試行錯誤的に決定することとした。また、椿らによる構成則は石礫粒子の濃度  $C$  を含んでいるが、本研究では椿らが示したように、土石流が等流状態となった場合の濃度分布を予め算定しておき、流動深  $h$  に対する河床からの粒子高さ  $y$  に応じて濃度を与える方法をとった。

## 3. 数値実験水路及び検証解析

開発した数値実験水路の概要は次のようである。水路長は 3.6m、初期水深は 2.5cm、初期粒子配置間隔は 0.25cm であり、上流端に流入境界、下流端に流出境界、そして 3.0m 地点に検査断面を設置した。水路の概念図を図 1 に示す。この数値実験水路を用い、表 1 のような 3 ケースで椿らによって行われた土石流水路実験の数値シミュレーションを行った。同時に、動粘性係数  $\nu$  を調整<sup>4)</sup>した標準型粒子法を水路に適用し、構成則型粒子法と速度分布特性の比

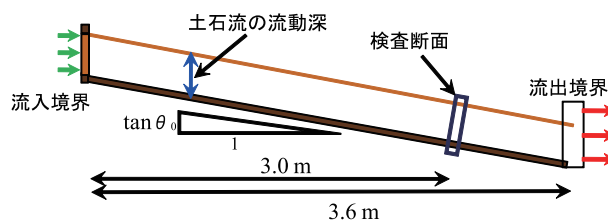


図 1: 数値実験水路の概念図

表 1: 椿らによる実験条件

	勾配	底質材料
case A	7°	メサライト
case B	11°	メサライト
case C	16°	砂

較を行った。また、粒子法シミュレーションにおける流速分布の計測は次のように行った。まず、計算領域内の流動層全体にわたって勾配  $\theta_0$  に傾けた正方格子を生成する。正方格子の格子間隔は、構成則型粒子法については  $d_0$ 、標準型粒子法については  $d_0/2$  を採用した。但し  $d_0$  は初期の粒子配置間隔である。異なる格子間隔を用いたのは、構成則型粒子法に比較して標準型粒子法は河床面抵抗や剪断抵抗の効果が小さく、流動深が小さくなったためである。またシミュレーション時間は、流入開始から一定の時間が経過し、流路の 2.5 m 以降においてほぼ等流状態が発生したとみなし得る 3.0 秒まで行い、流速分布の計測は  $t = 3.0$  sec において行った。

図 2 は case B 及び C において表面流速  $u_s$  で規格化した流速分布の粒子法によるシミュレーション結果、樫らの理論から導出された計算曲線、そして実験値との比較である。標準型粒子法は流動層上層ではほぼ一定値になり、栓流状の流速分布を呈した。一方、河床面抵抗及び土石流内部の石礫粒子間応力構造を考慮した構成則型粒子法は、樫らの理論曲線と同様ほぼ中央部に変曲点を持つ速度分布形を再現できており、また実験値との適合も良好であると言える。本稿では紙面の制約上掲載していないが、case A においても流速分布において水路実験との良好な対応が確認された。

#### 4. 結言

粒子法の一つである MPS 法に基づき、非 Newton 流動に対する構成則を考慮可能な構成則型粒子法を開発した。そして典型的な 3 種類の勾配条件下において土石流の数値流動実験を行い、樫らの土石流水路実験で計測された流速分布と数値シミュレーション結果の比較を行った。その結果、標準型粒子法で粘性値  $\nu$  を変更しただけでは再現できなかった高濃度石礫流の特異な流速分布を再現することが可能となった。今後の課題であるが、現在のモデルでは濃度分布を予備計算によって与えており、石礫濃度の基礎方程式を粒子場において離散化するなど継続的なモデル開発が必要である。さらに、流動機構モデルや濃度場を反映させて、粒子法における土石流河床変動モデルの構築も進めていく予定である。

#### 参考文献

1) Koshizuka, S. and Oka, Y., Moving-Particle Semi-implicit Method for fragmentation of incompressible fluid, Nuclear Science Engineering, **123**, 421-434 (1996).

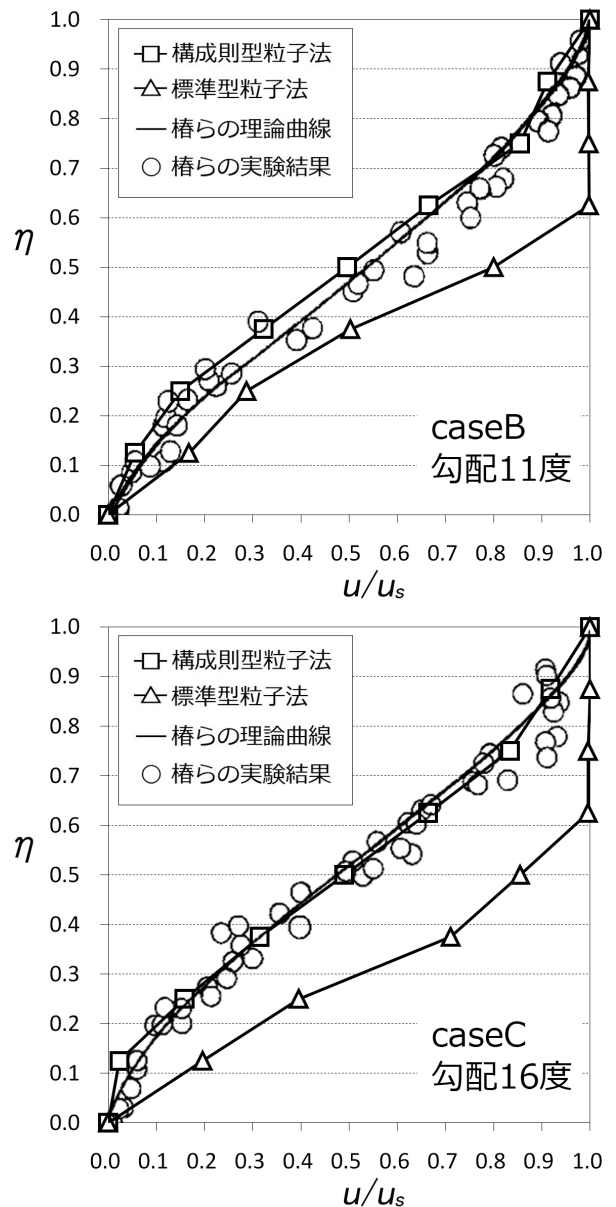


図 2: case B, C の速度分布  $u/u_s$  と  $\eta = y/h$  との関係

2) 樫東一郎, 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, **317**, 79-91 (1982).

3) 後藤仁志, 五十里洋行, 谷岡弘邦, 山本和久, 粒子法による河岸堤防裏法侵食の数値シミュレーション, 水工学論文集, **52**, pp.979-984 (2008).

4) 別府万寿博, 石川信隆, 園田佳臣, 長谷川祐治, 水山高久, 個別要素法・粒子法による土石流モデルのシミュレーション解析, 砂防学会研究発表会概要集, 38-39 (2008).